



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

Αποτίμηση και προτάσεις ενίσχυσης σε κτίριο στην Αλκαίου & Κρατερού του Δήμου Ζωγράφου



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Θ. Πετρόπουλος
Επιβλέπων: Εμμανουήλ Βουγιούκας

Αθήνα, Μάρτιος 2020

Πίνακας περιεχομένων

1.1	Εισαγωγή.....	8
1.2	Γενικά	8
1.3	Αντικείμενο της εργασίας.....	8
2	Θεμελιώδεις έννοιες αντισεισμικού σχεδιασμού.....	9
2.1	Εισαγωγή.....	9
2.2	Πλαστιμότητα.....	10
2.3	Πλαστικές αρθρώσεις.....	11
2.4	Στάθμες επιτελεστικότητας.....	13
2.5	Καμπύλη ικανότητας (capacity curve).....	13
2.6	Καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου.....	14
2.7	Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής.....	19
2.8	Έλεγχος στοχευόμενης ικανότητας.....	20
2.9	Διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την ανελαστική στατική ανάλυση (pushover).....	21
2.9.1	Βασικές παραδοχές της μεθόδου:.....	21
2.9.2	Προϋποθέσεις εφαρμογής.....	22
2.9.3	Προσομοίωση και ανάλυση.....	22
2.9.4	Καθορισμός κόμβου ελέγχου.....	22
2.9.5	Κατανομή σεισμικών φορτίων.....	22
2.9.6	Εξιδανικευμένη καμπύλη αντίστασης.....	23
3	Περιγραφή και προσομοίωση κτιρίου.....	24
3.1	Εισαγωγή.....	24
3.2	Μορφολογία φέροντος οργανισμού.....	24
3.3	Προσομοίωση φορέα.....	25
3.3.1	Γενικά.....	25
3.3.2	Υλικά.....	26
3.3.3	Ορισμός φερόντων στοιχείων.....	28
3.3.4	Καθορισμός φορτίων κτιρίου.....	35
3.3.5	Προσομοίωση πλαστικών αρθρώσεων.....	39
3.3.6	Ταλαντευόμενη Μάζα.....	41
	Αποτίμηση συμπεριφοράς κατασκευής μέσω στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover).....	42
4	Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς.....	42
4.1	Ιδιομορφική ανάλυση.....	42
4.2	Εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων.....	42
4.3	Καθορισμός παραμέτρων στατικής ανελαστικής ανάλυσης.....	43
4.4	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης.....	44
4.4.1	Κατά X.....	44
4.4.2	Κατά Y.....	48
4.5	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης με συνεκτίμηση της τοιχοποιίας.....	52
4.5.1	Κατά X.....	52
4.5.2	Κατά Y.....	53
5	Προτάσεις επέμβασης στην κατασκευή.....	54
5.1	Γενικά.....	54
5.1.1	Επεμβάσεις:.....	54
5.1.2	Ενισχύσεις.....	54
5.1.3	Ψαθυρή συμπεριφορά υποστυλωμάτων.....	54
5.2	Αποτίμηση συμπεριφοράς μετά την ενίσχυση.....	55
5.2.1	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	56
5.2.2	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά X.....	56
6	Ενίσχυση του Φορέα.....	65
7	Συμπεράσματα.....	2
8	Βιβλιογραφία.....	4

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1. Σχήμα 1.1 Εξωτερική άποψη του υφιστάμενου κτιρίου.....	9
2. Σχήμα 2.1: Ανακυκλιζόμενη φόρτιση για α) πλαστικό μέλος και β) μη-πλαστικό μέλος.....	10
3. Σχήμα 2.2: διάταξη συνδετήρων α) με τις ισχύουσες διατάξεις β) όπως γινόταν παλιότερα	10
4. Σχήμα 2.3 Πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων.....	11
5. Σχήμα 2.4 Πλαστικές αρθρώσεις και διαγράμματα ροπών	11
6. Σχήμα 2.5 Καμπύλη έντασης-παραμόρφωσης	12
7. Σχήμα 2.6 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής.....	13
8. Σχήμα 2.7 Ορισμός γωνίας στροφής χορδής, θ	14
9. Σχήμα 2.8 Καμπύλες F- δ δομικών α) καμπτική συμπεριφορά, β) διατμητική συμπεριφορά.....	14
10. Σχήμα 2.9 Ιδεατή καμπύλη F- δ δομικών στοιχείων.....	15
11. Σχήμα 2.10 α) Μεταβολή της αντοχής σε τέμνουσα, V_R , με τη γωνία στροφής χορδής, θ , β) Μετατροπή του διαγράμματος σε διάγραμμα ροπής-στροφής χορδής, M_R - θ . ..	17
12. Σχήμα 2.11 Αστοχία μόνο σε κάμψη	17
13. Σχήμα 2.12 Αστοχία σε διάτμηση πριν την διαρροή σε κάμψη	18
14. Σχήμα 2.13 Αστοχία σε διάτμηση μετά τη διαρροή σε κάμψη, αλλά πριν την αστοχία σε κάμψη	18
15. Σχήμα 2.14 Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας.....	19
16. Σχήμα 2.15 Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος	20
17. Σχήμα 2.16 Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας	20
18. Σχήμα 2.17 Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	23
19. Σχήμα 3.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση φορέα	24
20. Σχήμα 3.2 Κάτοψη τυπικού ορόφου.....	25
21. Σχήμα 3.3 Ορισμός σκυροδέματος	26
22. Σχήμα 3.4 Ορισμός χάλυβα οπλισμών.....	27
23. Σχήμα 3.5 Ορισμός διαστάσεων διατομής.....	28
24. Σχήμα 3.6 Ορισμός οπλισμών μέλους	29
25. Σχήμα 3.7 Ορισμός δυσκαμψίας τοιχείων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	30
26. Σχήμα 3.8 Προσομοίωση τοιχείου με τη μέθοδο wall fiber hinge.....	30
27. Σχήμα 3.9 Καμπύλη ικανότητας τοιχείου.....	31
28. Σχήμα 3.10 Συμπεριφορά ίνας σκυροδέματος στην εφελκυστική ζώνη.....	32
29. Σχήμα 3.11 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ρηγματομένου σκυροδέματος.....	32
30. Σχήμα 3.12 Καμπύλη ικανότητας τοιχείου μη-λαμβάνοντας υπόψη την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος	34
31. Σχήμα 3.13 & 3.14 Ορισμός διαφραγμάτων	34
32. Σχήμα 3.15 Ορισμός πακτώσεων στις στηρίξεις.....	35
33. Σχήμα 3.16 Ορισμός φορτίων στις πλάκες.....	36
34. Σχήμα 3.17 Εισαγωγή παραμέτρων φάσματος.....	37
35. Σχήμα 3.18 Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού.....	37
36. Σχήμα 3.19 Καθορισμός οριζόντιας φόρτισης για την ανάλυση.....	38
37. Σχήμα 3.20 Ταλαντευόμενη μάζα κτιρίου κατά την διάρκεια του σεισμού.....	38
38. Σχήμα 3.21 Ορισμός πλαστικής άρθρωσης δοκού.....	40
39. Σχήμα 4.1 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $X+0,3Y$	44

40. Σχήμα 4.2 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $X-0,3Y$	45
41. Σχήμα 4.3 Σύγκριση απόκρισης φορέα και διγραμμικοποίηση $-X+0,3Y$	45
42. Σχήμα 4.4 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $-X-0,3Y$	46
43. Σχήμα 4.5 Καμπύλες ADRS φορέα κατά $X + 0,3Y$	46
44. Σχήμα 4.6 Απόκριση φορέα.....	47
45. Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ροπής – στροφής υποστυλώματος C59.....	47
46. Σχήμα 4.8 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $+Y+0,3X$	48
47. Σχήμα 4.9 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $+Y-0,3X$	48
48. Σχήμα 4.10 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $-Y-0,3X$	49
49. Σχήμα 4.11 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $-Y+0,3X$	49
50. Σχήμα 4.12 Καμπύλες ADRS φορέα κατά $+Y+0,3X$	50
51. Σχήμα 4.13 Απόκριση φορέα.....	51
52. Σχήμα 4.14 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία $+X+0,3Y$	52
53. Σχήμα 4.15 Απόκρισης φορέα με τοιχοποιία $Y+0,3X$	53
54. Σχήμα 5.1 Επεμβάσεις στο φορέα με δημιουργία τοιχίου.....	55
55. Σχήμα 5.2 Ενισχυμένος φορέας $X+0,3Y$	57
56. Σχήμα 5.3 Ενισχυμένος φορέας $X-0,3Y$	57
57. Σχήμα 5.4 Ενισχυμένος φορέας $-X+0,3Y$	58
58. Σχήμα 5.5 Ενισχυμένος φορέας $-X-0,3Y$	58
59. Σχήμα 5.6 Ενισχυμένος φορέας $Y+0,3X$	59
60. Σχήμα 5.7 Ενισχυμένος φορέας $Y-0,3X$	60
61. Σχήμα 5.8 Ενισχυμένος φορέας $-Y-0,3X$	60
62. Σχήμα 5.9 Ενισχυμένος φορέας $-Y+0,3X$	61
63. Σχήμα 5.10 ADRS ενισχυμένου φορέα $X+0,3Y$	61
64. Σχήμα 5.11 Απόκριση ενισχυμένου φορέα $X+0,3Y$	62
65. Σχήμα 5.12 ADRS ενισχυμένου φορέα $Y+0,3X$	63
66. Σχήμα 5.13 Απόκριση ενισχυμένου φορέα $Y+0,3X$	64

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. Πίνακας 4.1 Ποσοστά ενεργοποιούμενης μάζας ιδιομορφών.....	42
2. Πίνακας 4.2 Συνδυασμοί φορτίσεων για ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων.....	43
3. Πίνακας 5.1 Ποσοστά ενεργοποιούμενης μάζας ιδιομορφών ενισχυμένου φορέα...56	56



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αποτίμηση και προτάσεις ενίσχυσης σε κτίριο στην Αλκαίου & Κρατερού του
Δήμου Ζωγράφου**

Πετρόπουλος Θ. Χ. (Επιβλέπων: Βουγιούκας Ε.)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Βουγιούκα Ε. για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς επίσης και για την καθοριστική συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ τον Αντιδήμαρχο Τεχνικών Έργων του Δήμου Ζωγράφου κ. Δήμα Δ. που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα υφιστάμενο κτίριο παρέχοντας μου όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και διευκρινήσεις.

Τον κ. Ζαβιτσάνο Α. για τις συμβουλές του και τον χρόνο του σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου.

Τον κ. Παπαδόπουλο Χ. για την βοήθεια σε θέματα χρήσης του λογισμικού και στην εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμπαράσταση και την κατανόηση που έδειξαν όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Στην παρόν διπλωματική εργασία εξετάστηκε υπάρχων κατασκευή με την αποτίμηση της συμπεριφοράς της έναντι σεισμού , μελετημένης το 1987 στην περιοχή της Ζωγράφου. Για τη σεισμική αποτίμηση χρησιμοποιήθηκαν κατά βάση οι διατάξεις του Ελληνικού Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ. ΕΠΕ).

Στη συνέχεια, και αφού διαπιστώθηκε η ανεπάρκεια της κατασκευής, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς προτείνεται ενίσχυσή της και αποτιμάται η συμπεριφορά της ενισχυμένης κατασκευής.

Συγκεκριμένα, η κατασκευή προσομοιώνεται στο λογισμικό ETABS v17.0.1 και εκτιμάται η φέρουσα ικανότητά του φορέα, με συνεκτίμηση της συνεισφοράς της τοιχοποιίας και μη, με χρήση της μεθόδου στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover). Μετέπειτα, ενισχύεται και εκπονεείται μια ακόμη ανάλυση pushover στον ενισχυμένο φορέα για να γίνει έλεγχος επάρκειας .

Εν κατά κλείδι , παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται και παρατηρούνται από τη δημιουργία του μοντέλου, την αποτίμηση και την ενίσχυσή του καθώς και το μελλοντικό πεδίο εργασιών και μελέτης που χρειάζεται προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία σεισμικής αποτίμησης.

Abstract

This diploma thesis deals with the evaluation of the seismic behavior of an existing building, constructed during 1987, in Zografou area. For the seismic assessment there were used the regulations of the Greek Code of Retrofitting. Following that, and due to the inadequacy of the construction according to the existing regulations, a retrofitting method is proposed on the reinforced construction and the behavior of it, is evaluated again.

Specifically, the construction is simulated using the software ETABS v17.0.1, while the carrying capacity of the building is taken into consideration, or not, an analysis is being held on, using the method of static inelastic analysis (pushover). Afterwards, the building is retrofitted and is subjected to another pushover analysis to check on its adequacy.

Summing up, the fitted conclusions are represented, after the creation of the model, evaluation of its capacity and retrofitting it along with the future scope of work and studies that needs to be done, to complete the process of seismic evaluation.

1.1 Εισαγωγή

1.2 Γενικά

Το αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού εξελίσσεται συνεχώς ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες της κοινωνίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό του δομικού πλούτου της Ελλάδας, αλλά και του πλανήτη είναι κατασκευασμένο με προγενέστερους κανονισμούς οι οποίοι υστερούν έναντι των ισχυόντων. Η αποκατάσταση ενός τόσο μεγάλου αριθμού κτιρίων, έτσι ώστε να συμμορφωθούν στα σημερινά δεδομένα, δεν είναι εφικτή από οικονομικής άποψης. Γεννήθηκε, λοιπόν, η ανάγκη αποτίμησης της συμπεριφοράς αυτών των κτιρίων έναντι σεισμικών δράσεων έτσι ώστε να έχουμε μια εικόνα για τη διάσταση του προβλήματος και να βρεθεί μια οικονομικά εφικτή λύση. Για την ικανοποίηση της ανάγκης αυτής αναπτύχθηκε, μεταξύ άλλων, η μέθοδος pushover, την οποία θα εφαρμόσουμε για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

1.3 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με την μέθοδο της στατικής ανελαστικής ανάλυσης, καθώς επίσης και η πρόταση ενισχύσεων του κτιρίου σε περίπτωση που αυτό κριθεί ανεπαρκές. Ο έλεγχος και η πρόταση ενίσχυσης θα γίνει σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό επεμβάσεων (KAN.ΕΠΕ.) και θα εφαρμοστεί μια νέα μέθοδος προσομοίωσης των στοιχείων δυσκαμψίας.

Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια περιγραφή του αντικείμενου της εργασίας και τον κανονισμό στα πλαίσια του οποίου έγινε η προσομοίωση και η ανάλυση της υπό μελέτη κατασκευής.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες του αντισεισμικού σχεδιασμού των κτιρίων, στην θεωρία της στατικής ανελαστικής ανάλυσης και στις διατάξεις που έχει ο ελληνικός κανονισμός (KAN.ΕΠΕ.) για την εφαρμογή της.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το προσομοίωμα του κτιρίου και ο τρόπος με τον οποίο αυτό ορίζεται στο περιβάλλον του λογισμικού. Καθορίζονται τα υλικά, οι ιδιότητες των διατομών, οι κατακόρυφες και οριζόντιες φορτίσεις. Γίνετε επίσης προσομοίωση των στοιχείων δυσκαμψίας με τη μέθοδο wall fiber hinge.

Στο κεφάλαιο 4 ορίζονται οι παράμετροι της στατικής ανελαστικής ανάλυσης και εξετάζονται τα αποτελέσματα της για την συμπεριφορά του κτιρίου στο σεισμό σχεδιασμού. Γίνεται επίσης η 1^η ενίσχυση του φορέα.

Στο κεφάλαιο 5 επαναλαμβάνονται όσα έγιναν στο κεφάλαιο 4 για τον ενισχυμένο πλέον φορέα. Εξετάζουμε εκ νέου τη συμπεριφορά του κτιρίου και συνεχίζουμε τη διαδικασία μέχρις ότου η κατασκευή φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο. Πραγματοποιούνται κάποιοι επιπλέον έλεγχοι στα στοιχεία δυσκαμψίας.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης σχετικά με την αντιμετώπιση-προσέγγιση του θέματος και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς του κτιρίου.



Σχήμα 1.1 Εξωτερική άποψη του υφιστάμενου κτιρίου

2 Θεμελιώδεις έννοιες αντισεισμικού σχεδιασμού

2.1 Εισαγωγή

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών (στάθμη επιτελεστικότητας) ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο σεισμικής ικανότητας. Εξετάζεται, δηλαδή, η πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών, σε αντίθεση με την κλασική μεθοδολογία όπου εξετάζεται η συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι να αρχίσουν οι ζημιές (ελαστική απόκριση) και δεν ασχολείται με το τι συμβαίνει μετά.

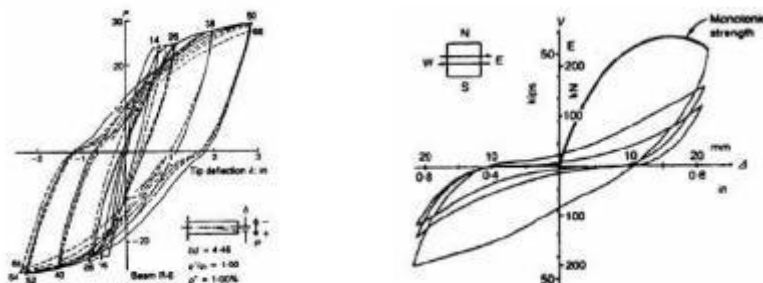
Η μεθοδολογία των σταθμών επιτελεστικότητας εφαρμόζεται κυρίως για τον έλεγχο και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών και αποτελεί τον βασικό κορμό των κανονισμών επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ., EC8-3). Σε νέες κατασκευές, η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί για τον έλεγχο μιας ήδη διαστασιολογημένης κατασκευής.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και μετά την ελαστική περιοχή, από την εμφάνιση των πρώτων ζημιών έως και την οιονεί κατάρρευση.

2.2 Πλαστιμότητα

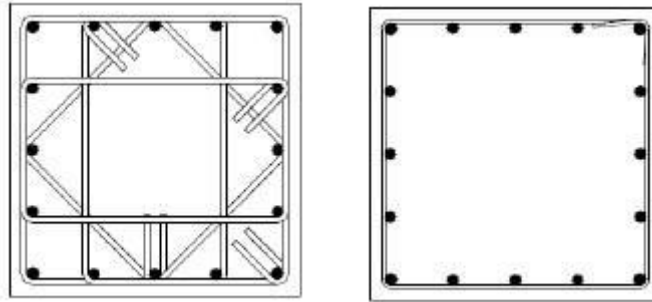
Ο όρος πλαστιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα μια κατασκευής, μέλους η υλικού να υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις, χωρίς απώλεια ή μείωση της φέρουσας ικανότητας αυτού. Υλικά με μικρή πλαστιμότητα χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά(π.χ. άοπλο σκυρόδεμα), ενώ υλικά με μεγάλη πλαστιμότητα ως όλκιμα(π.χ. χάλυβας). Η πλαστιμότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για τις αντισεισμικές κατασκευές, καθώς καθορίζει αν μια κατασκευή καταρρεύσει ή όχι στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού. Αυτό οφείλεται στο ότι οι περισσότεροι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους κανονισμούς προϋποθέτουν ότι ένα μέρος της σεισμικής ενέργειας θα καταναλωθεί στην κατασκευή σαν έργο πλαστικών παραμορφώσεων.

Η πλαστιμότητα μιας πραγματικής κατασκευής είναι δύσκολο να υπολογισθεί ή ακόμα και να εκτιμηθεί με κάποιο τρόπο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν καθιερωμένες μέθοδοι ή κανονισμοί στους οποίους υπεισέρχεται άμεσα σαν φυσικό μέγεθος. Σε επίπεδο κατασκευής η πλαστιμότητα εξασφαλίζεται μέσω της πλαστικής συμπεριφοράς των μελών τα οποία συνθέτουν την κατασκευή. Ένα μέλος λέμε ότι έχει πλαστική συμπεριφορά, όταν, για μεν μονότονη φόρτιση παρατηρείται αύξηση των παραμορφώσεων χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής του μέλους, για δε ανακυκλιζόμενη φόρτιση οι βρόγχοι υστέρησης δύναμης-παραμόρφωσης είναι περίπου σταθεροί σε πλάτος και σε μέγιστη δύναμη για σταθερό εύρος των κύκλων παραμόρφωσης. Αντίθετα, όταν ένα μέλος δεν έχει πλαστική συμπεριφορά, μετά από δύο ή τρεις κύκλους φόρτισης-επαναφόρτισης παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Ανακυκλιζόμενη φόρτιση για α) πλαστικό μέλος και β) μη-πλαστικό μέλος

Πρακτικά, η πλαστική συμπεριφορά ενός μέλους εξασφαλίζεται μέσω της αύξησης της πλαστιμότητας των τμημάτων που συνθέτουν την διατομή του. Συγκεκριμένα του σκυροδέματος εξασφαλίζεται, πλέον, μέσω κατάλληλων οπλισμών (συνδετήρων)(Σχήμα 2.2) στις κρίσιμες περιοχές των μελών (περίσφιξη), οι οποίοι δίνουν ικανότητα πλαστικής στροφής στα άκρα των μελών.

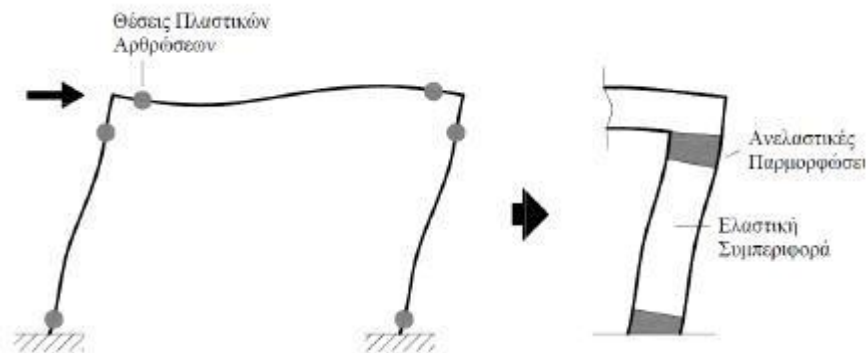


Σχήμα 2.2: διάταξη συνδετήρων α) με τις ισχύουσες διατάξεις β) όπως γινόταν παλιότερα

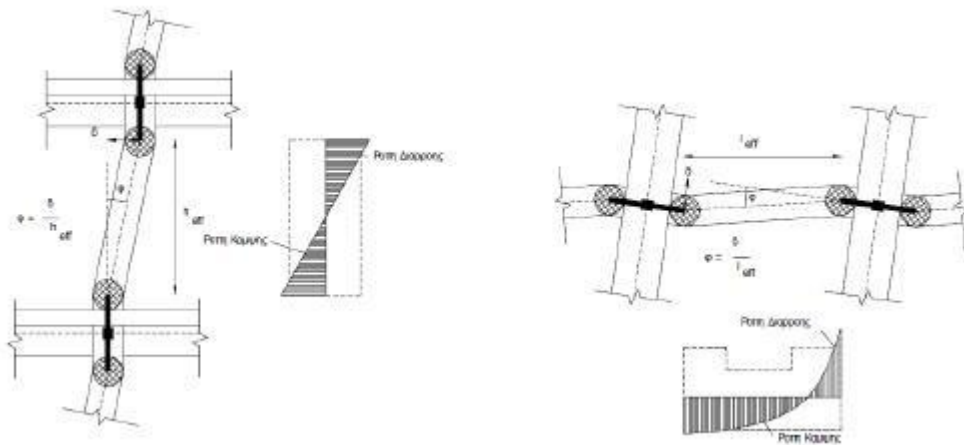
2.3 Πλαστικές αρθρώσεις

Η συμπεριφορά μιας κατασκευής που αποκρίνεται ελαστικά σε μια δράση περιγράφεται από την ελαστική θεωρία. Ωστόσο οι κατασκευές σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφερθούν πλαστικά για σεισμικές φορτίσεις. Επομένως, προϋπόθεση του σχεδιασμού είναι η ανάπτυξη σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων στα μέλη, οι οποίες συμβάλουν στην κατανάλωση της ενέργειας που εισάγεται στον φορέα μέσω του σεισμού. Πρέπει, να λαμβάνεται υπ' όψιν η δυνατότητα του κτιρίου να καταναλώνει ενέργεια μέσω αυτού του μηχανισμού, έτσι ώστε να προκύψουν ακριβή συμπεράσματα για την φέρουσα ικανότητα του. Οι ελαστικές μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς q . Αντίθετα, κατά την εφαρμογή ανελαστικών αναλύσεων απαιτείται η άμεση προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σε όλο το φάσμα της απόκρισης τους.

Κατά την επιβολή μιας αυξανόμενης έντασης σε μια κατασκευή, τα μέλη της σταδιακά διαρρέουν και αναπτύσσουν ανελαστικές παραμορφώσεις. Οι θέσεις αυτές εντοπίζονται στα άκρα των δοκών και στην κορυφή και βάση των υποστυλωμάτων. (Σχήμα 2.3)



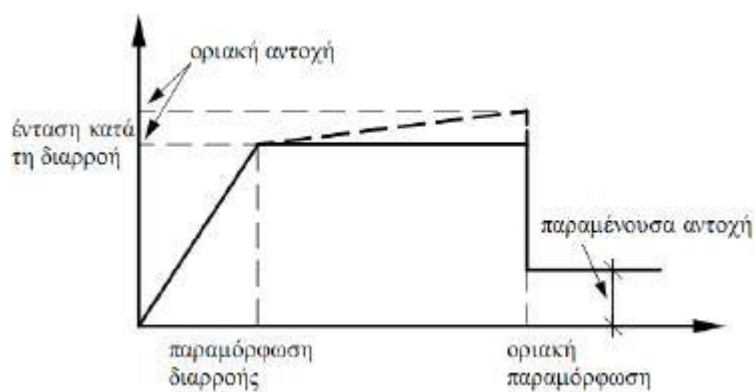
Σχήμα 2.3 Πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων



Σχήμα 2.4 Πλαστικές αρθρώσεις και διαγράμματα ροπών

Τα παραπάνω αποτυπώνονται και στο σχεδιασμό νέων κατασκευών με την ύπαρξη κρίσιμων περιοχών σε δοκούς και υποστυλώματα ώστε να αντιμετωπιστούν οι αντίστοιχα αυξημένες απαιτήσεις παραμόρφωσης σε περίπτωση σεισμικής έντασης. Κατά συνέπεια, τα μέλη μιας κατασκευής αναμένεται να αναπτύξουν ανελαστικές παραμορφώσεις σε περιοχές πεπερασμένου μήκους οι οποίες αναφέρονται με τον όρο πλαστικές αρθρώσεις.

Γνωρίζοντας λοιπόν ότι οι πλαστικές αρθρώσεις εκτείνονται σε πεπερασμένο μήκος του δομικού στοιχείου, απαιτείται ο εντοπισμός αυτών των περιοχών στο προσομοίωμα και η περιγραφή της συμπεριφοράς τους. Η προσομοίωση τους γίνεται με χρήση στροφικών ελατηρίων και οι ιδιότητες τους καθορίζονται από διαγράμματα έντασης παραμόρφωσης. Η μορφή του διαγράμματος είναι τέτοια ώστε να προσεγγίζει την περιβάλλουσα των βρόγχων υστέρησης. Τελικώς, υιοθετείται ένα διγραμμικό διάγραμμα με έναν απολύτως ελαστικό κλάδο μέχρι την διαρροή και πέρα από αυτή συνεχίζει οριζόντιος πλαστικός κλάδος μέχρι την αστοχία. (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5 Καμπύλη έντασης-παραμόρφωσης

2.4 Στάθμες επιτελεστικότητας

Όλοι οι κανονισμοί ορίζουν με μικροδιαφορές τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για τον φέροντα οργανισμό και τα μη-φέροντα στοιχεία, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών:

- Άμεση χρήση (immediate occupancy)

Το επίπεδο βλαβών είναι τέτοιο ώστε να μην διακόπτεται καμία λειτουργία μετά ή και κατά την διάρκεια του σεισμού. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτρέπονται μόνο μερικές τριχοειδής ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα οι οποίες δεν επηρεάζουν την κατασκευή να φέρει τα κατακόρυφα φορτία. Επίσης, ο κίνδυνος τραυματισμού ατόμων από τις βλάβες είναι αμελητέος.

- Προστασία ζωής (life safety)

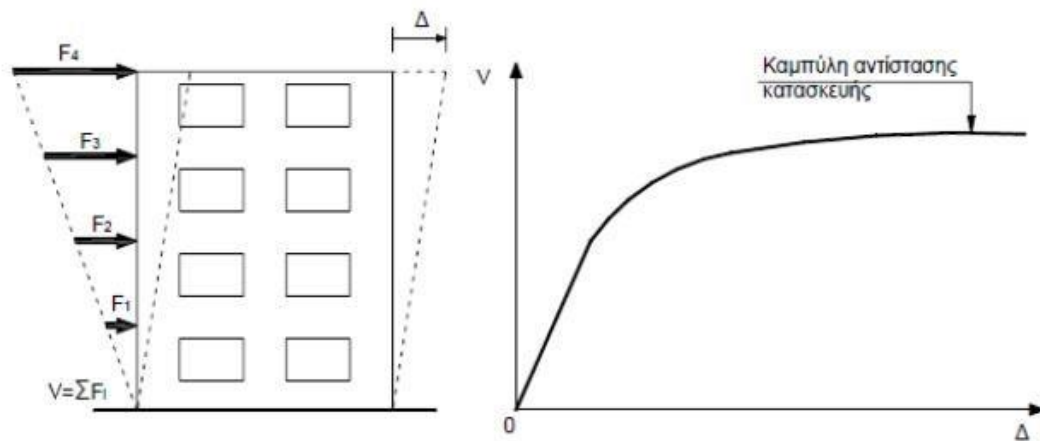
Αναμένεται να εμφανιστούν βλάβες, οι οποίες είναι επισκευάσιμες και δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ή σοβαρό τραυματισμό ατόμων. Για την επανάχρηση της κατασκευής απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.

- Οιονεί κατάρρευση (structural stability)

Αναμένεται να εμφανιστούν εκτεταμένες, μη επισκευάσιμες ως επί το πλείστον, βλάβες. Ο φέρον οργανισμός έχει ακόμα την ικανότητα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά η οριζόντια δυσκαμψία του έχει μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να τίθεται θέμα κατάρρευσης σε ενδεχόμενο μετασεισμό. Ο κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού ατόμων είναι μεγάλος, κυρίως λόγω πτώσης στοιχείων. Για την επανάχρηση της κατασκευής απαιτούνται εκτεταμένες διορθώσεις, ενώ είναι πιθανό να μην είναι τεχνικά ή οικονομικά δυνατή η επισκευή της.

2.5 Καμπύλη ικανότητας (capacity curve)

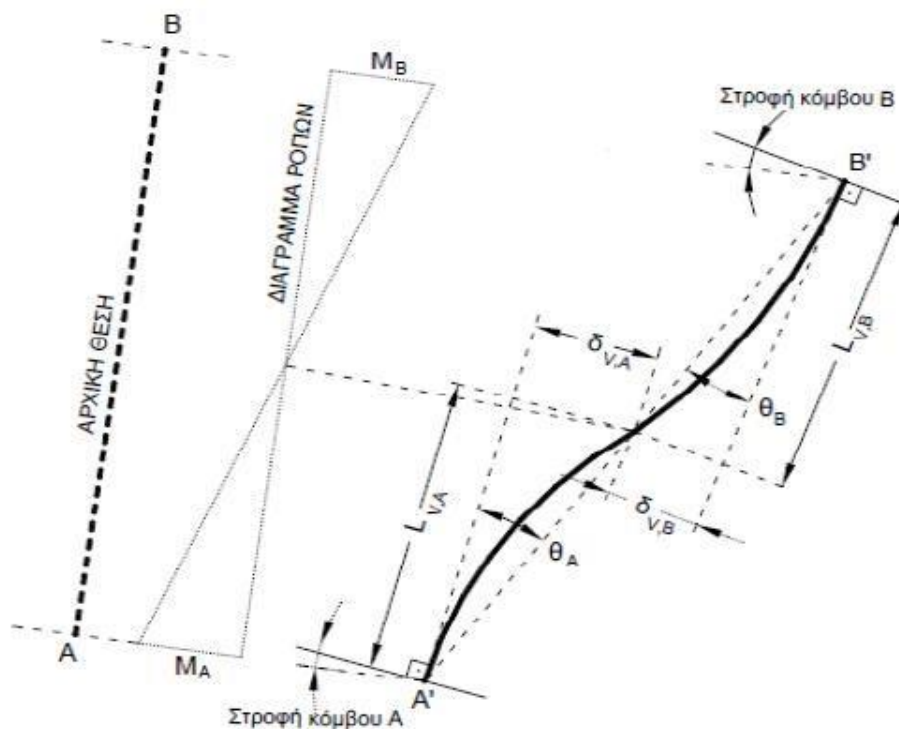
Ο καθορισμός των διάφορων σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται πάνω στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής ή οποία εκφράζει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και μετατόπισης της κορυφής. Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου, με δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους (Σχήμα 2.6). Ως κατανομή των φορτίων καθ' ύψος της κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τριγωνική, η πρώτη ιδιομορφή ή ακόμα και συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνονται πολλές στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογισμό της μετακίνησης στην κορυφή σε κάθε βήμα, λαμβάνοντας υπόψη την μειωμένη δυσκαμψία των μελών που έχουν διαρρεύσει.



Σχήμα 2.6 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής

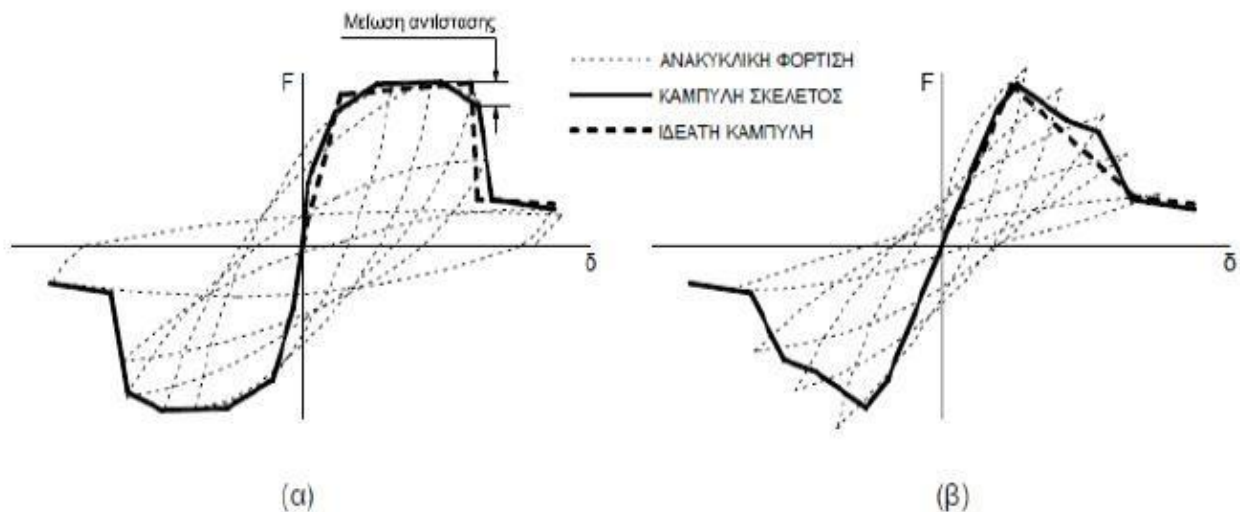
2.6 Καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου

Το πρώτο βήμα για να μορφώσουμε την καμπύλη ικανότητας της κατασκευής μας είναι ο καθορισμός των νόμων που διέπουν την ανελαστική συμπεριφορά των μελών αυτής, οι οποίοι περιγράφονται μέσω διαγραμμάτων F-δ (ένταση- μετακίνηση). Σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα συγκεκριμένα επιλέγουμε ως ένταση τη ροπή κάμψης M και ως μετακίνηση την στροφής χορδής $\theta = \delta_v/L_v$, όπου $L_v = M/V$. (Σχήμα 2.7)



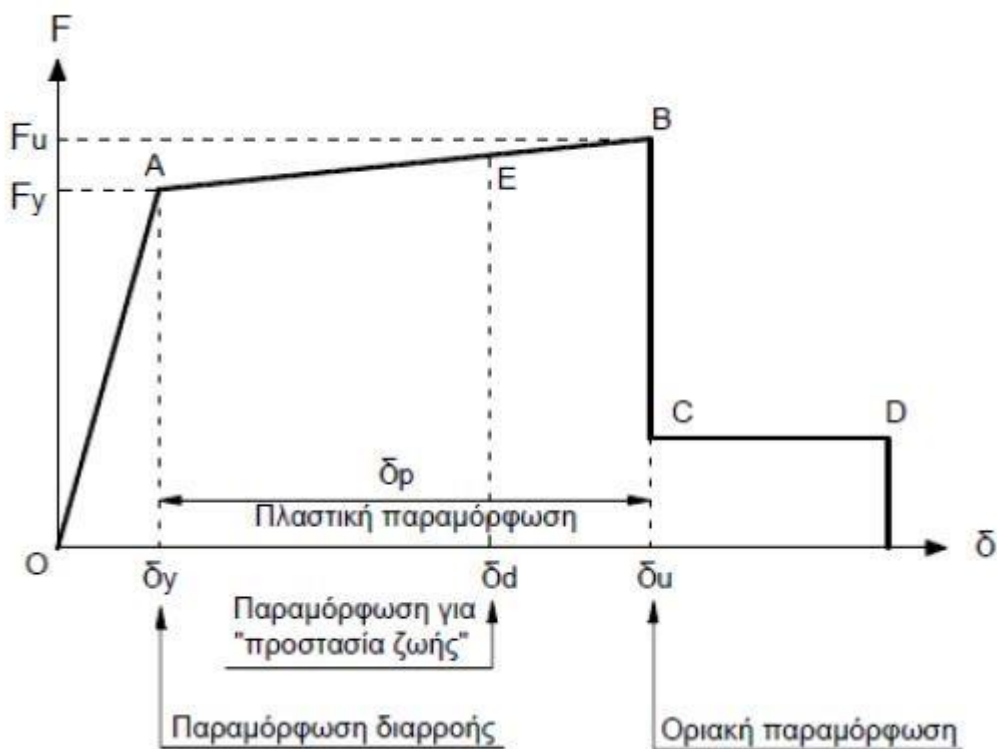
Σχήμα 2.7 Ορισμός γωνίας στροφής χορδής, θ .

Η κατασκευή των διαγραμμάτων έχει ιδεατή μορφή, η οποία βασίζεται στην καμπύλησκελετό της συμπεριφοράς σε ανακυκλική φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8



Σχήμα 2.8 Καμπύλες F - δ δομικών α) καμπτική συμπεριφορά, β) διατμητική συμπεριφορά

Η γενική μορφή των διαγραμμάτων F - δ λαμβάνεται συνήθως όπως στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Ιδεατή καμπύλη F - δ δομικών στοιχείων

➤ **Τμήμα OA:**

Αντιπροσωπεύει την ελαστική συμπεριφορά μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής. Η κλίση της ευθείας ορίζει την τέμνουσα δυσκαμψία που λαμβάνεται στην ελαστική ανάλυση. Εάν η παραμόρφωση δίνεται σε όρους στροφής χορδής η τιμή της θ_y πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την καμπυλότητα διαρροής $1/r$ αλλά και τη συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων και τις πιθανές ολίσθησης οπλισμού στις αγκυρώσεις.

➤ **Τμήμα AB:**

Αντιπροσωπεύει τη μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου μέχρι τη θεωρητική αστοχία (σημείο B). Το σημείο B καθορίζεται από την οριακή παραμόρφωση για την οποία έχει συμβεί ουσιαστική μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίων. Συνήθως, το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της αντοχής κατά 20% σε σύγκριση με την μέγιστη τιμή της.

Πολλές φορές η κλίση του κλάδου AB λαμβάνεται οριζόντια. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση διαρροής F_y μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας.

Η παραμόρφωση δ_u ορίζει την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία, δηλαδή: $\delta_p = \delta_u - \delta_y$.

➤ **Τμήμα CD:**

Αντιπροσωπεύει την απομένουσα ικανότητα του στοιχείου. Συνήθως, μετά την παραμόρφωση αστοχίας, δ_u , η ικανότητα ενός μέλους να παραλάβει φορτία μειώνεται σημαντικά αλλά δεν μηδενίζεται και έτσι το στοιχείο μπορεί να εξακολουθήσει να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία έως και το σημείο D, όπου το στοιχείο δεν είναι σε θέση πλέον να φέρει κατακόρυφα φορτία.

Η τιμή της απομένουσας είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Συνήθως λαμβάνεται ίση με το 20% της οριακής αντοχής.

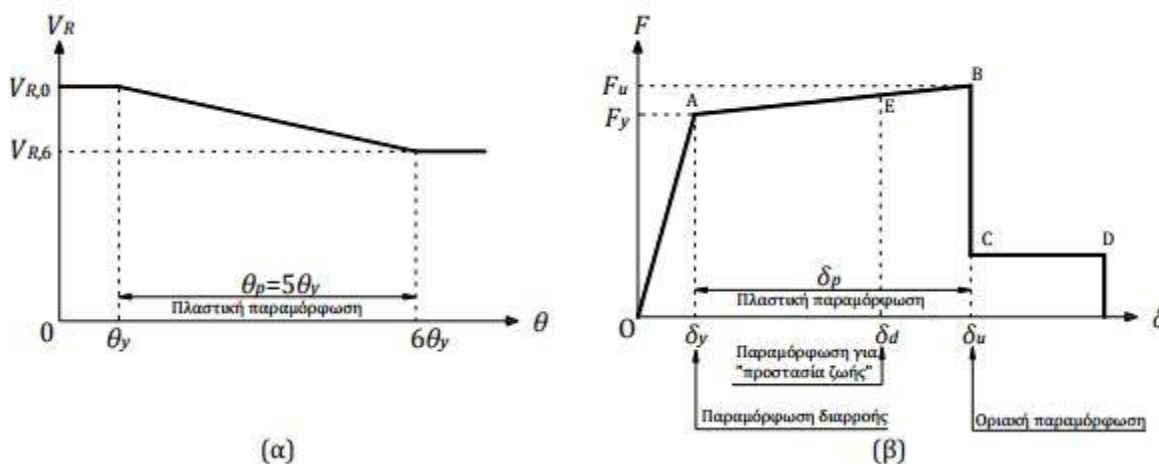
➤ **Στάθμες επιτελεστικότητας E:**

Στην καμπύλη F-δ του δομικού στοιχείου ορίζονται οι στάθμες οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τις αντίστοιχες παραμορφώσεις, δ_d . Στο Σχήμα 2.9 το σημείο E αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας προστασία ζωής. Ο ορισμός των σημείων επιτελεστικότητας, E, δίνεται στους διάφορους κανονισμούς ανάλογα με το είδος του στοιχείου (υποστύλωμα, δοκός, κτλ.), τον τρόπο αστοχίας (πλάστιμος ή ψαθυρός) και την κατηγοριοποίηση του στοιχείου σε πρωτεύων ή δευτερεύων.

Πλάστιμα και ψαθυρά στοιχεία

Σε περιπτώσεις πλαστικών στοιχείων (όταν η καμπτική αστοχία προηγείται της διατμητικής) κρίσιμες είναι οι παραμορφώσεις, γι' αυτό ο ορισμός των σταθμών επιτελεσματικότητας γίνεται σε όρους παραμορφώσεων. Αντίθετα, σε περιπτώσεις ψαθυρών στοιχείων ο ορισμός τους γίνεται σε όρους δυνάμεων.

Για τον καθορισμό του τελικού διαγράμματος $F-\delta$, πρέπει να ελεγχθεί ποια μορφή αστοχίας εμφανίζεται πρώτα, καμπτική ή διατμητική. Στην περίπτωση που η διατμητική αστοχία εμφανίζεται πρώτα πρέπει να τροποποιηθεί το διάγραμμα $F-\delta$ του μέλους που αντιστοιχεί στην κάμψη. Μορφώνουμε το διάγραμμα $V_R-\theta$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10 με αρχική αντοχή σε τέμνουσα $V_{R,0}$, η οποία μειώνεται μετά τη διαρροή της διατομής σε κάμψη ανάλογα με την πλαστιμότητα των στροφών μ_θ . Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. θεωρεί ότι η μείωση αυτή ισχύει για γωνίες στροφής έως και $6\theta_y$. Για μεγαλύτερες στροφές θεωρούμε ότι η αντοχή σε τέμνουσα παραμένει σταθερή με τιμή $V_{R,6}$.

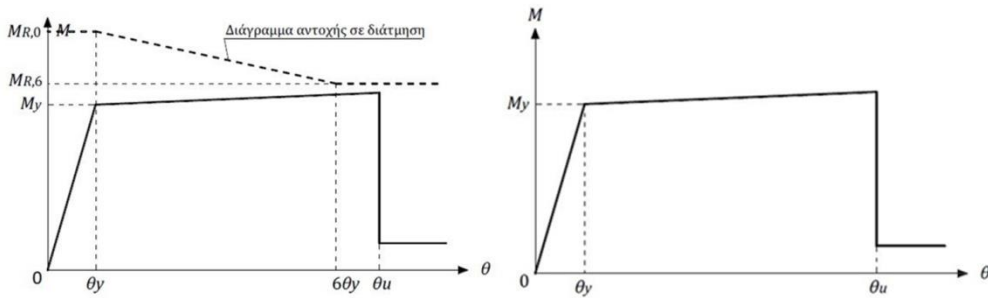


Σχήμα 2.10 α) Μεταβολή της αντοχής σε τέμνουσα, V_R , με τη γωνία στροφής χορδής, θ , β) Μετατροπή του διαγράμματος σε διάγραμμα ροπής-στροφής χορδής, $M_R-\theta$.

Για τον καθορισμό του τελικού διαγράμματος $M-\theta$ του στοιχείου μετατρέπουμε το $V_R-\theta$ του σχήματος σε διάγραμμα $M_R-\theta$, όπου M_R είναι η ροπή στη διατομή που αντιστοιχεί στη V_R ($M_R = V_R \cdot L_V$). Έπειτα τοποθετούμε το διάγραμμα $M_R-\theta$ πάνω στο $M-\theta$ της κάμψης.

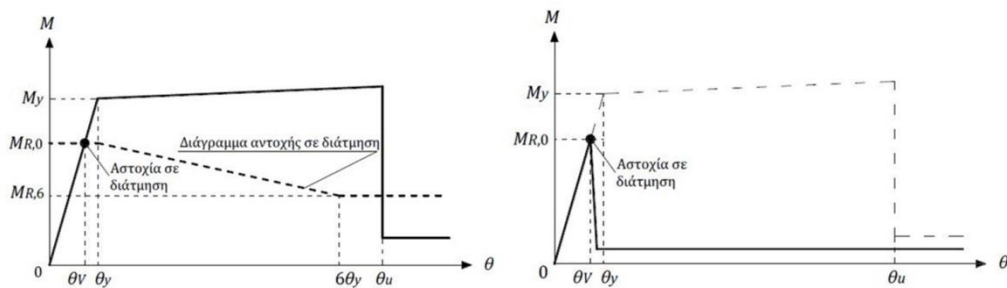
Υπάρχουν τρεις πιθανές περιπτώσεις:

- i. Το διάγραμμα της αστοχίας σε διάτμηση βρίσκεται εξ ολοκλήρου πάνω από αυτό της αστοχίας σε κάμψη Σχήμα 2.11. Σε αυτή την περίπτωση η αστοχία είναι καμπτική και η συμπεριφορά του μέλους περιγράφεται πλήρως από το διάγραμμα $M-\theta$ της κάμψης.



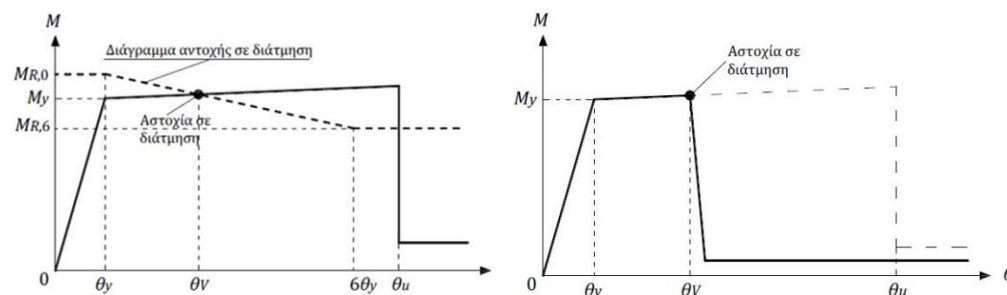
Σχήμα 2.11 Αστοχία μόνο σε κάμψη

- ii. Συμβαίνει αστοχία σε διάτμηση πριν την διαρροή σε κάμψη. Στην περίπτωση αυτή η διατομή αστοχεί σε διάτμηση (ψαθυρή αστοχία) για γωνία στροφής $\theta = \theta_v$. Πέραν της θ_v η αντοχή της διατομής μειώνεται δραματικά (πρακτικά μηδενίζεται).



Σχήμα 2.12 Αστοχία σε διάτμηση πριν την διαρροή σε κάμψη

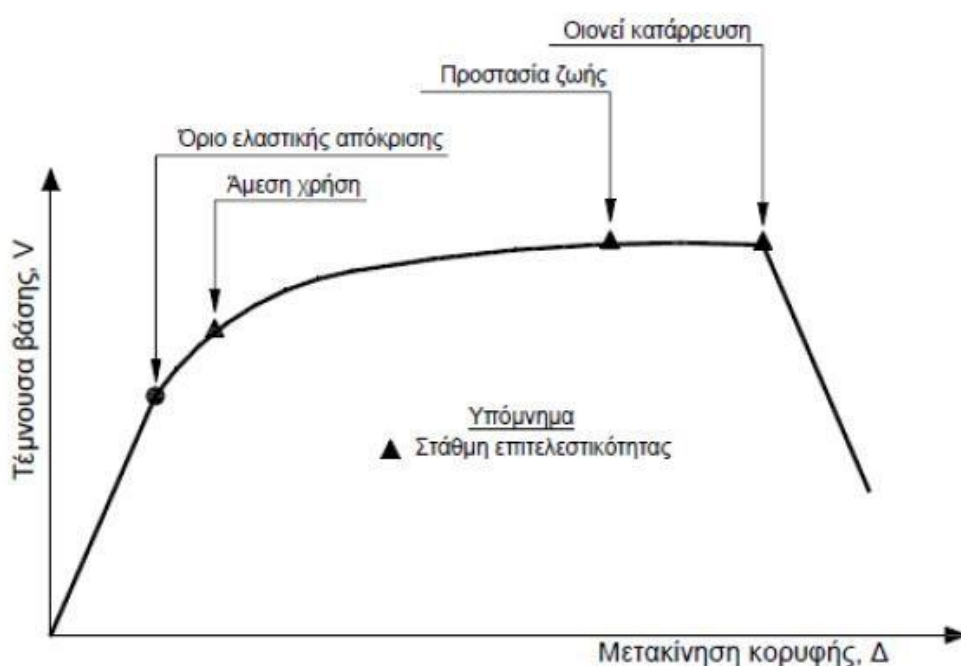
- iii. Αστοχία σε διάτμηση μετά την διαρροή της διατομής σε κάμψη αλλά πριν την αστοχία της. Η διατομή αστοχεί για γωνία στροφής $\theta = \theta_v$ ($\theta_y < \theta_v < \theta_u$). Για γωνίες μεγαλύτερες της θ_v η αντοχή, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, πέφτει απότομα.



Σχήμα 2.13 Αστοχία σε διάτμηση μετά τη διαρροή σε κάμψη, αλλά πριν την αστοχία σε κάμψη

2.7 Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Αφού καθοριστούν οι καμπύλες $F-\delta$ των μελών μιας κατασκευής όπως επίσης και οι στάθμες επιτελεστικότητας επί αυτών, είναι δυνατό πλέον να κατασκευαστεί η καμπύλη ικανότητας όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτήν τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας συνολικά για όλη την κατασκευή, όπως στο Σχήμα 2.14. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο καθορισμός των σημείων επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής δεν είναι προφανής και απαιτεί καλή κρίση μηχανικού. Αυτό συμβαίνει διότι μια στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αντιστοιχεί πάντοτε στο σημείο που το πρώτο σημείο της κατασκευής φτάσει στη στάθμη αυτή. Επειδή η κατασκευή απαρτίζεται από πολλά μέλη είναι πιθανόν μερικά στοιχεία να έχουν υπερβεί κάποια στάθμη επιτελεστικότητας αλλά η κατασκευή σαν σύνολο να βρίσκεται ακόμα κάτω από αυτή.



Σχήμα 2.14 Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας

Με αυτή την λογική γίνεται ο διαχωρισμός των στοιχείων μιας κατασκευής σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Πρωτεύοντα ορίζονται τα στοιχεία που συμβάλλουν στην αντοχή και ευστάθεια της κατασκευής υπό σεισμικά φορτία, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντα.

Για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας, οι παραμορφώσεις και οι βλάβες στα δευτερεύοντα στοιχεία είναι εν γένει μεγαλύτερες από ότι στα πρωτεύοντα. Εάν κατά την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας προκύψει ότι ένα μικρό ποσοστό των στοιχείων υπερβαίνει μια στάθμη επιτελεστικότητας, ο μηχανικός έχει την δυνατότητα να ορίσει αυτά τα στοιχεία ως δευτερεύοντα, αυξάνοντας έτσι το όριο παραμόρφωσης της κατασκευής στο συγκεκριμένο επίπεδο επιτελεστικότητας.

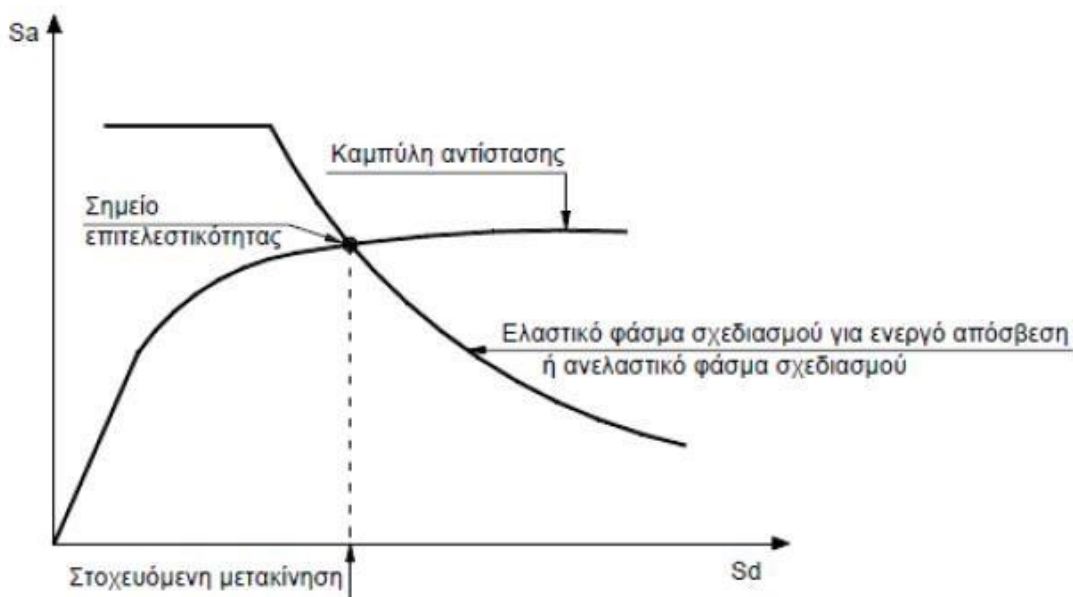
Μετά τον διαχωρισμό των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, μπορούν να ορισθούν οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής, π.χ. ως τα σημεία όπου το πρώτο πρωτεύον στοιχείο φτάνει στην αντίστοιχη στάθμη επιτελεστικότητας.

2.8 Έλεγχος στοχευόμενης ικανότητας

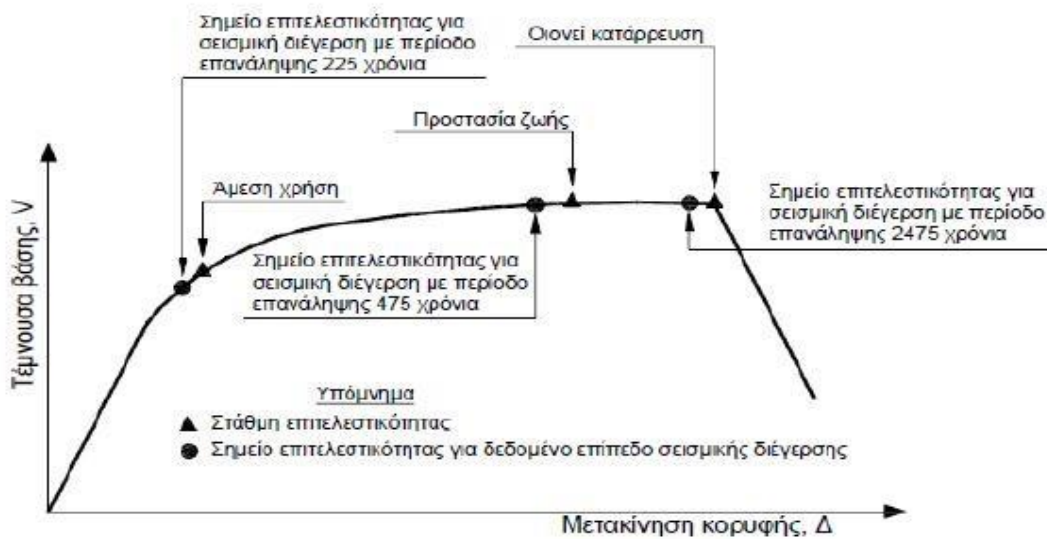
Για δεδομένη περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού, υπολογίζεται κατ' αρχήν η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευόμενη μετακίνηση – target displacement) που ορίζει το σημείο επιτελεστικότητας (performance point) της κατασκευής γι' αυτό τον σεισμό. Ο ακριβέστερος τρόπος υπολογισμού αυτής της μετακίνησης είναι με μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας. Η μέθοδος αυτή, όμως, απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ενώ τα αποτελέσματα δεν είναι κατ' ανάγκη αξιόπιστα, καθώς εξαρτώνται από την επιλογή της σεισμικής δράσης. Ως απλοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιούνται άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι, όπως την μέθοδο των συντελεστών ή με στατική μη γραμμική ανάλυση (pushover), η ακρίβεια των οποίων όμως είναι αμφισβητήσιμη.

Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη μετακίνηση της κορυφής της κατασκευής σημειώνεται στην καμπύλη ικανότητας το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας για τις οποίες γίνεται έλεγχος (Σχήμα 2.15). Διαπιστώνεται έτσι εάν έχει υπερβληθεί ή όχι κάποιος στόχος σεισμικής ικανότητας.

Για τη στοχευόμενη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε κάποια στάθμη σεισμικής δόνησης, μπορεί να ελεγχθεί σε ποιο σημείο της δικής του καμπύλης F-δ βρίσκεται κάθε στοιχείο. Στοιχεία, στα οποία υπάρχει υπέρβαση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας, πρέπει να ενισχυθούν και να επαναληφθεί η διαδικασία.



Σχήμα 2.15 Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος



Σχήμα 2.16 Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας

2.9 Διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)

2.9.1 Βασικές παραδοχές της μεθόδου:

- Στη στατική ανελαστική ανάλυση το προσομοίωμα του κτιρίου θα συνεκτιμά με άμεσο τρόπο τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου δύναμης-παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων.
- Το προσομοίωμα αυτό θα υποβάλλεται σε οριζόντια φορτία κατανομημένα κατά τρόπο ανάλογο με τις αδρανειακές δυνάμεις του σεισμού, τα οποία θα αυξάνονται μονότονα, εν γένει μέχρις ότου κάποιο δομικό στοιχείο δεν είναι πλέον σε θέση να φέρει τα κατακόρυφα φορτία του. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει η καμπύλη αντίστασης του κτιρίου, η οποία εν γένει χαράσσεται σε όρους τέμνουσας βάσης- μετακίνησης χαρακτηριστικού σημείου του κτιρίου(κόμβος ελέγχου), το οποίο συνήθως επιλέγεται να είναι το κέντρο μάζας του δώματος της κατασκευής. Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη βάση για όλους τους απαιτούμενους ελέγχους ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας.
- Αφού επιλεγεί η σεισμική δράση (αποτίμησης ή ανασχεδιασμού), ο έλεγχος ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας γίνεται για τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου που αντιστοιχεί στη σεισμική αυτή δράση. Ελέγχεται ότι για τη μετακίνηση αυτή η παραμόρφωση (γωνία στροφής κατά ή μετά τη διαρροή) των πλάσιμων δομικών στοιχείων δεν συνεπάγεται βαθμό βλάβης μμεγαλύτερο από εκείνον που γίνεται ανεκτός για τη σκοπούμενη στάθμη επιτελεστικότητας του κτιρίου.
- Όταν δεν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός, η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου (στοχευόμενη μετακίνηση δ_t) που προκαλείται από τη σεισμική δράση (αποτίμησης ή

ανασχεδιασμού) μπορεί να εκτιμηθεί με βάση το φάσμα μετακινήσεων που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα συμβατή με τη μετακίνηση του κτιρίου.

- Για τον προσδιορισμό της στοχευόμενης μετακίνησης επιτρέπεται η χρήση ευρέως αποδεκτών απλοποιητικών μεθόδων, όπως περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

2.9.2 Προϋποθέσεις εφαρμογής

- Η στατική ανελαστική μέθοδος εφαρμόζεται σε κτίρια στα οποία η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική.
- Όταν η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, επιτρέπεται να εφαρμόζεται η στατική ανελαστική ανάλυση, υπό τον όρο ότι θα εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μια συμπληρωματική δυναμική ελαστική ανάλυση. Στην περίπτωση αυτή, διεξάγονται όλοι οι έλεγχοι και με τις δύο μεθόδους, ενώ επιτρέπεται μια αύξηση κατά 25 % των τιμών των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα κριτήρια ελέγχου και των δύο μεθόδων.

2.9.3 Προσομοίωση και ανάλυση

- Η καμπύλη αντίστασης, δηλαδή η σχέση ανάμεσα στην τέμνουσα βάσεως και την οριζόντια μετακίνηση του κόμβου ελέγχου θα υπολογίζεται για μετακινήσεις του κόμβου ελέγχου οι οποίες θα κυμαίνονται από μηδέν μέχρι και πέρα από την μετακίνηση για την οποία θα γίνει ο έλεγχος.
- Τα κατακόρυφα φορτία των στοιχείων θα συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα, ώστε να συνδυάζονται με τα οριζόντια φορτία σύμφωνα με τον σεισμικό συνδυασμό. Τα οριζόντια φορτία θα εφαρμόζονται εν γένει σε δύο αντίθετες διευθύνσεις και ο έλεγχος θα γίνεται για τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν σε κάθε στοιχείο.
- Το αναλυτικό προσομοίωμα θα υιοθετεί τέτοιο βαθμό διακριτοποίησης ώστε να λαμβάνεται υπόψη η σχέση έντασης-παραμόρφωσης κάθε περιοχής στην οποία μπορεί να εμφανιστεί ανελαστική συμπεριφορά.

2.9.4 Καθορισμός κόμβου ελέγχου

Ο κόμβος ελέγχου της στοχευόμενης μετακίνησης θα λαμβάνεται εν γένει στο κέντρο μάζας της οροφής του κτιρίου. Για τα κτίρια με σοφίτες ή μικρούς οικίσκους στο δώμα ο κόμβος ελέγχου θα λαμβάνεται στην οροφή του πλήρους υποκείμενου ορόφου. Η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου θα υπολογίζεται από την ανάλυση του προσομοιώματος για τα οριζόντια στατικά φορτία.

2.9.5 Κατανομή σεισμικών φορτίων

Τα οριζόντια στατικά φορτία θα εφαρμόζονται στη στάθμη κάθε διαφράγματος, σύμφωνα με την κατανομή των αδρανειακών φορτίων του σεισμού. Για όλες τις αναλύσεις απαιτείται η εφαρμογή τουλάχιστον δύο διαφορετικών καθ' ύψος κατανομών, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του τρόπου κατανομής των φορτίων λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς

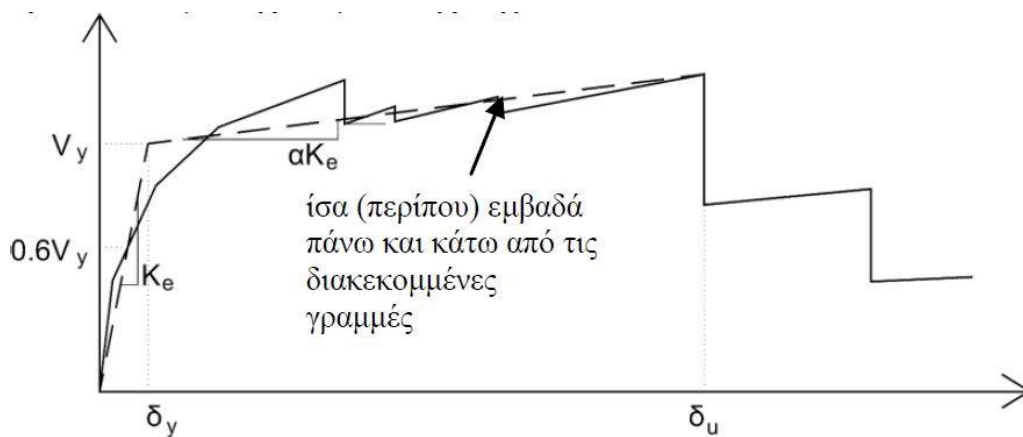
ορισμένων περιοχών του φορέα, αλλά και λόγω της επιρροής ανώτερων ιδιομορφών. Σύμφωνα με τον ΕΚ8-1, μπορούν να εφαρμοστούν οι εξής κατανομές:

- «Ομοιόμορφη», βασισμένη σε οριζόντια φορτία ανάλογα ως προς τη μάζα κάθε ορόφου ανεξάρτητα από τη στάθμη του (ομοιόμορφη επιτάχυνση απόκρισης).
- «Ιδιομορφική», ανάλογη προς οριζόντια φορτία συμβατά προς την κατανομή οριζόντιων φορτίων στην υπό εξέταση διεύθυνση, όπως προκύπτει από ελαστική ανάλυση.

2.9.6 Εξιδανικευμένη καμπύλη αντίστασης

Η μη-γραμμική σχέση δύναμης μετακίνησης που συνδέει την τέμνουσα βάσεως και τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου, θα μετατρέπεται σε μια εξιδανικευμένη καμπύλη για τον υπολογισμό της ισοδύναμης πλευρικής δυσκαμψίας K_e και της αντίστοιχης δύναμης διαρροής του κτιρίου.

Η εξιδανικευμένη καμπύλη αντίστασης συνίσταται να είναι διγραμμική με κλίση πρώτου κλάδου K_e και κλίση δεύτερου κλάδου ίση με αK_e . Οι δύο ευθείες που συνθέτουν τη διγραμμική καμπύλη μπορεί να προσδιορίζεται γραφικά με κριτήριο την ισότητα των εμβαδών των χωρίων που προκύπτουν εκατέρωθεν της εξιδανικευμένης καμπύλης.

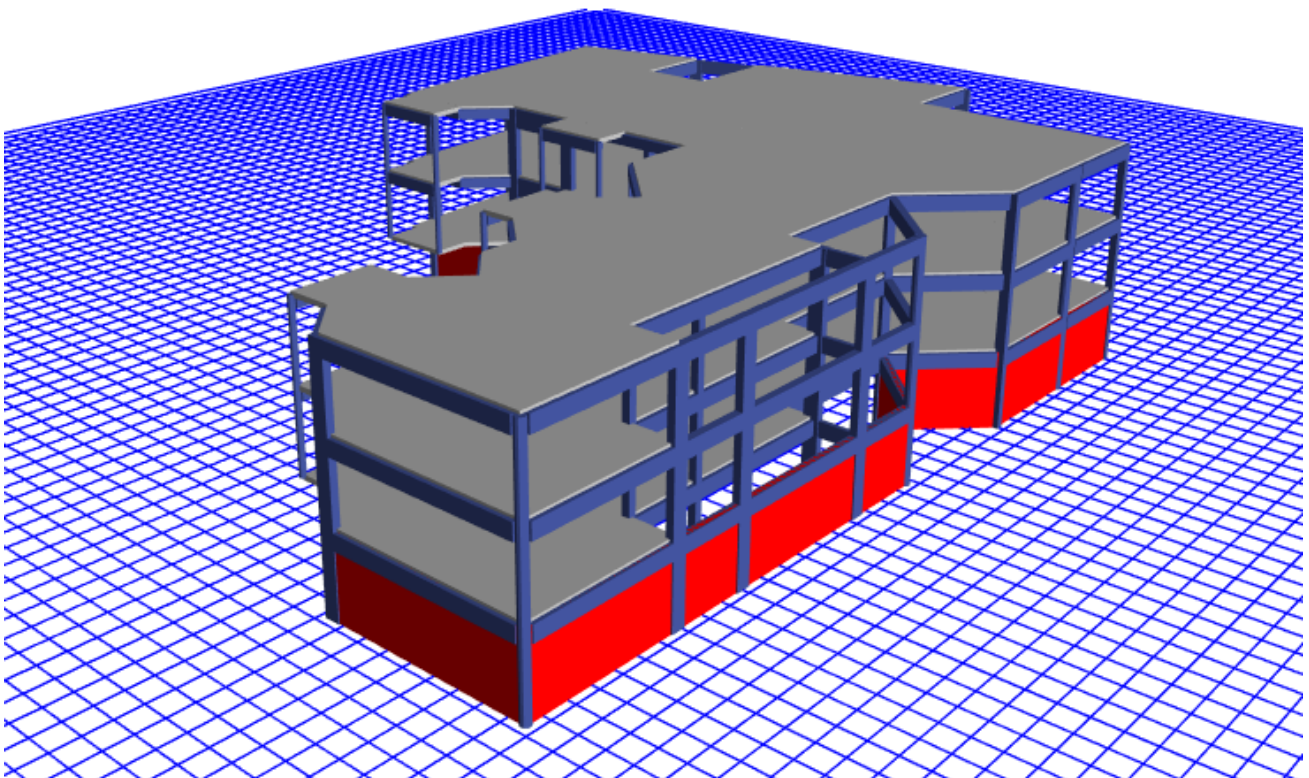


Σχήμα 2.17 Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

3 Περιγραφή και προσομοίωση κτιρίου

3.1 Εισαγωγή

Το υπό μελέτη κτίριο είναι ένα υφιστάμενο κτίριο στο κέντρο της Αθήνας το οποίο είναι λειτουργικό μέχρι σήμερα. Κατασκευάστηκε το 1987 με φέροντα οργανισμό από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

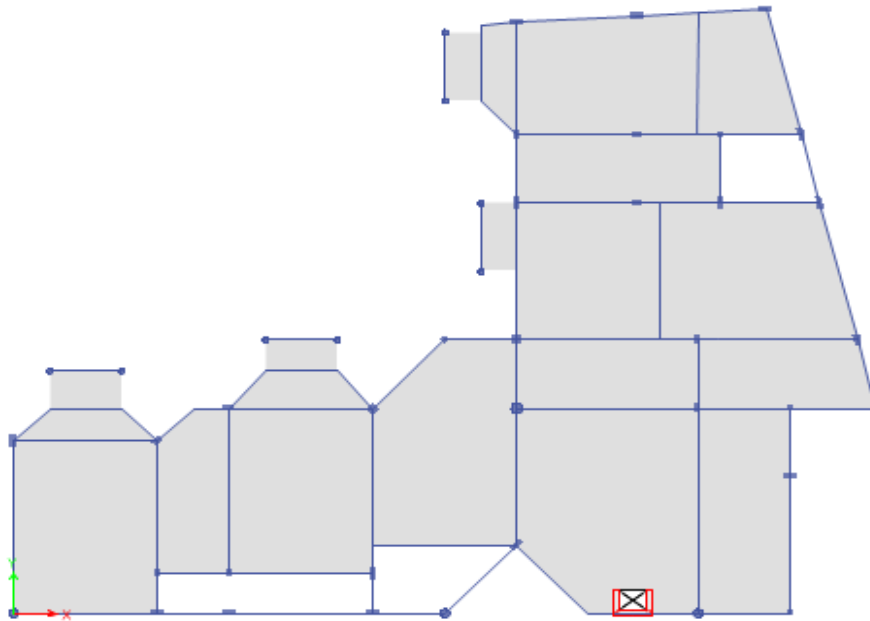


Σχήμα 3.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση φορέα

3.2 Μορφολογία φέροντος οργανισμού

Το κτίριο είναι μια 2-όροφη κατασκευή με ένα υπόγειο συνολικής επιφάνειας 990m².

Στα υπόγεια υπάρχουν ισχυρά τοιχεία, περιμετρικά χωρίς να υπάρχουν εσωτερικά. Τα υποστυλώματα σε αυτό το επίπεδο είναι κυρίως ορθογωνικά και οι διατομές τους ελαττώνονται στους ανώτερους ορόφους.



Σχήμα 3.2 Κάτοψη τυπικού ορόφου

Και οι δύο όροφοι είναι όμοιοι σε διάταξη. Πλαισιακή λειτουργία δεν υπάρχει σε καμία από τις δύο διευθύνσεις.

Γενικά το κτίριο αποτελείται από γραμμικά στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος(δοκούς και υποστυλώματα) και έχει ισχυρά στοιχεία δυσκαμψίας(τοιχεία) μόνο στο υπόγειο και ένα πυρήνα στην περιοχή του ασανσέρ. Από τη διάταξη των στοιχείων αυτών φαίνεται να υπάρχει εκκεντρότητα του κέντρου μάζας ως προς το κέντρο στροφής της κατασκευής και αναμένεται να εμφανιστούν σημαντικές στροφές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

3.3 Προσομοίωση φορέα

3.3.1 Γενικά

Η προσομοίωση του φορέα έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού ETABS 2017.0.1 Αρχικά, καθορίστηκε ο τρισδιάστατος κάρναβος του κτιρίου σύμφωνα με την αποτύπωση του κτιρίου που πραγματοποιήθηκε πρόσφατα. Οι δοκοί και τα υποστυλώματα προσομοιάζονται με γραμμικά στοιχεία πλαισίου έξι βαθμών ελευθερίας. Οι πλάκες ορίστηκαν ως επιφανειακά στοιχεία, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το ίδιο βάρος τους και να καταναίμουν τα επιφανειακά φορτία, που θα οριστούν στη συνέχεια, στις δοκούς. Επίσης είναι απαραίτητα στοιχεία για να ορίσουμε τη διαφραγματική λειτουργία που έχουν στην κατασκευή. Τα τοιχώματα προσομοιώθηκαν με επιφανειακά-πεπερασμένα στοιχεία. Οι στηρίξεις της κατασκευής θεωρήθηκαν πακτώσεις.

3.3.2 Υλικά

Για να ορίσουμε τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε ακολουθούμε τα εξής βήματα:
Define -> materials properties -> add new material

Το σκυρόδεμα έχει μέση αντοχή 17,77 MPa, με μέτρο ελαστικότητας $E_{cm}=29\text{GPa}$ και ειδικό βάρος 25kN/m^3 . Επειδή υπάρχει υψηλή στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (Σ.Α.Δ.) επιλέγεται συντελεστής ασφαλείας υλικού $\gamma_c=1.35$.

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It is organized into several sections:

- General Data:** Material Name: B225; Material Type: Concrete; Directional Symmetry Type: Isotropic; Material Display Color: Yellow; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Material Weight and Mass:** Radio buttons for "Specify Weight Density" (selected) and "Specify Mass Density"; Weight per Unit Volume: 24,9926 kN/m³; Mass per Unit Volume: 2548,538 kg/m³.
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 29000 MPa; Poisson's Ratio, U: 0,2; Coefficient of Thermal Expansion, A: 0,00001 1/C; Shear Modulus, G: 12083,33 MPa.
- Design Property Data:** Button: Modify/Show Material Property Design Data...
- Advanced Material Property Data:** Buttons: Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties...
- Buttons:** OK, Cancel

Σχήμα 3.3 Ορισμός σκυροδέματος

Ο χάλυβας τόσο του κύριου οπλισμού όσο και των συνδετήρων έχει αντοχή 430MPa, μέτρο ελαστικότητας 200GPa και ειδικό βάρος 77kN/m³. Ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού είναι $\gamma_s=1.05$.

Material Property Data

General Data

Material Name: St III

Material Type: Rebar

Directional Symmetry Type: Uniaxial

Material Display Color: [Color Swatch] Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

Specify Weight Density Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 76,9729 kN/m³

Mass per Unit Volume: 7849,047 kg/m³

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E: 199947,98 MPa

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0,0000117 1/C

Design Property Data

Modify/Show Material Property Design Data...

Advanced Material Property Data

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

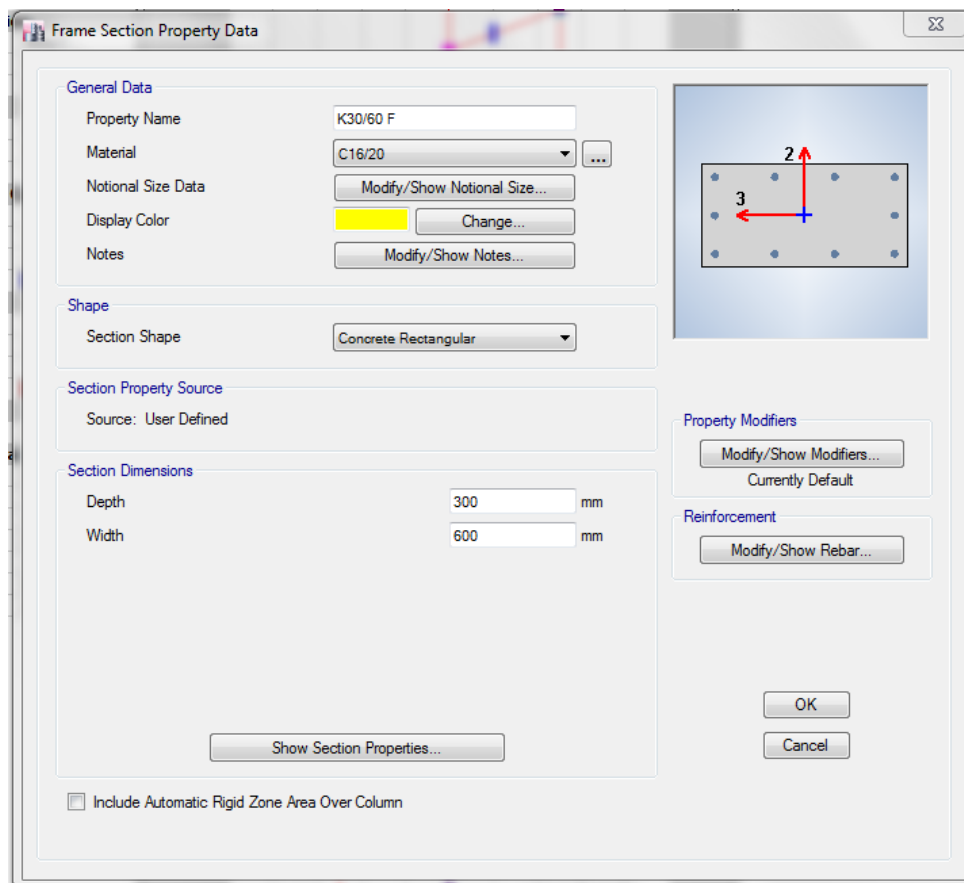
OK Cancel

Σχήμα 3.4 Ορισμός χάλυβα οπλισμών

3.3.3 Ορισμός φερόντων στοιχείων

3.3.3.1 Δοκοί και υποστυλώματα

Οι διατομές των υποστυλωμάτων και των δοκών είναι ορθογωνικές ως επί το πλείστον, ωστόσο υπάρχουν και μερικά κυκλικά υποστυλώματα. Οι διαστάσεις και οι οπλισμοί τους ποικίλουν και μειώνονται από όροφο σε όροφο.

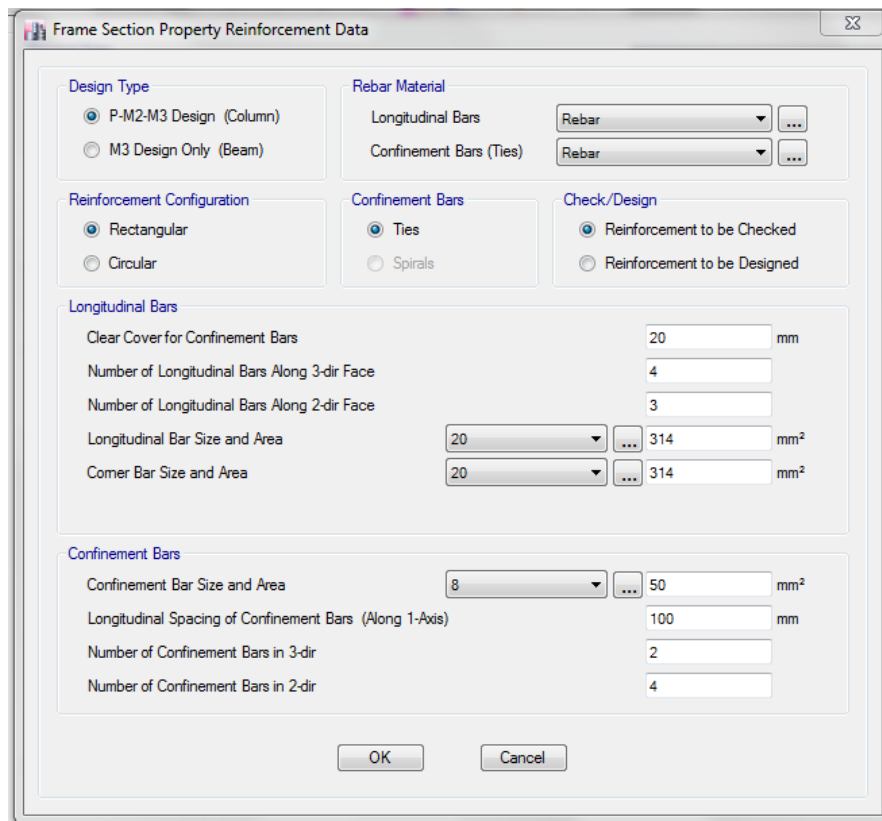


Σχήμα 3.5 Ορισμός διαστάσεων διατομής

Η διαδικασία που ακολουθούμε για να ορίσουμε τις δοκούς και τα υποστυλώματα είναι η εξής: Define -> sections properties -> frame sections -> add new property

Ορίζουμε το σχήμα της διατομής, το υλικό και τις διαστάσεις στα αντίστοιχα πεδία του παραθύρου.

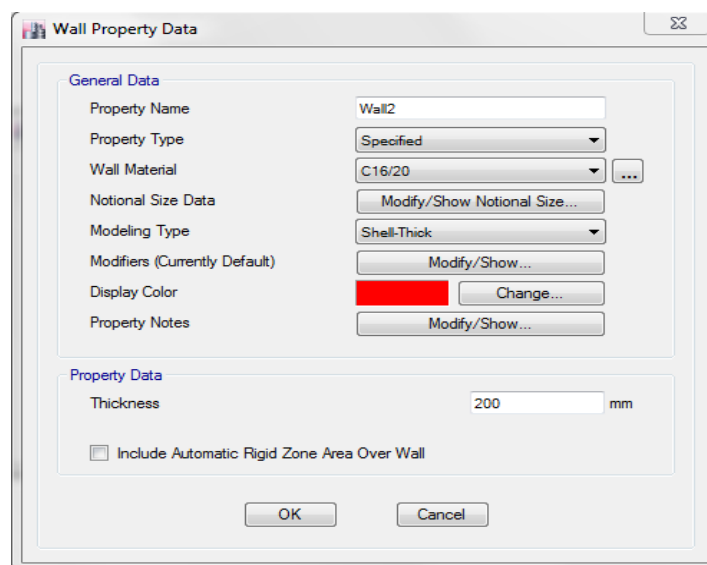
Στο παραπάνω παράθυρο, στην επιλογή 'modify-show rebar' επιλέγουμε τον τύπο του γραμμικού στοιχείου (δοκός ή υποστυλώμα), το υλικό των οπλισμών και την διάταξη τους.



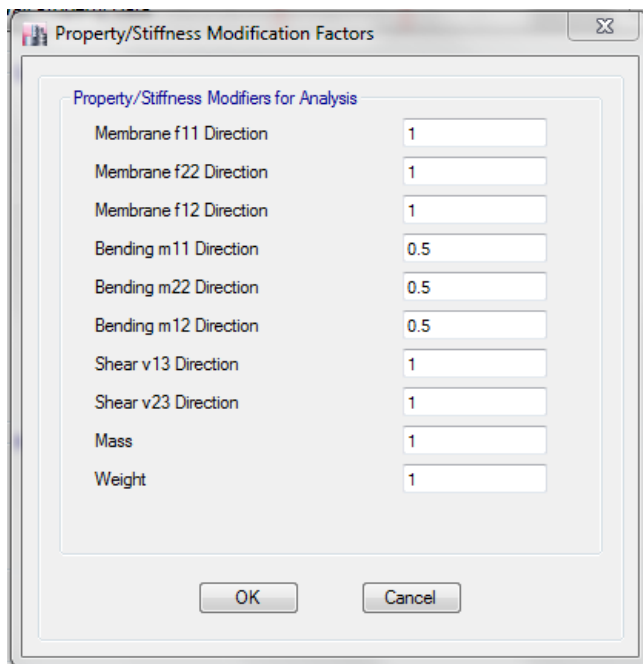
Σχήμα 3.6 Ορισμός οπλισμών μέλους

3.3.3.2 Τοιχεία

Τα τοιχεία ορίζονται ως επιφανειακά-πεπερασμένα στοιχεία. Για να οριστούν τα τοιχεία επιλέγουμε Define -> sections properties -> wall sections -> add new property. Έπειτα ορίζουμε το υλικό και το πάχος του.

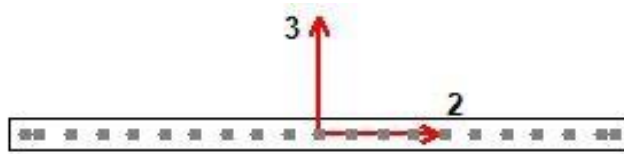


Επειδή είναι ρηγματωμένα ορίζουμε την δυσκαμψία τους στο 0,5EI όπως προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ..



Σχήμα 3.7 Ορισμός δυσκαμψίας τοιχείων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Επιλέγουμε στα τοιχεία να έχουν την δυνατότητα ανάπτυξης πλαστικής άρθρωσης έναντι ροπής κάμψης στον ισχυρό άξονα με την μέθοδο wall fiber hinge. Με την μέθοδο αυτή το πρόγραμμα χωρίζει το τοίχειο κατά μήκος σε ίνες (fibers), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, οι οποίες είναι ορισμένες να έχουν το υλικό του σκυροδέματος και τον οπλισμό κάμψης που αντιστοιχεί στην κάθε ίνα.



Σχήμα 3.8 Προσομοίωση τοιχείου με τη μέθοδο wall fiber hinge

Καθώς φορτίζουμε το τοίχειο με μια οριζόντια φόρτιση στην κορυφή του (περίπτωση προβόλου) αυτό αναπτύσσει ορθές τάσεις στις ίνες. Όταν κάποιας ίνας το υλικό φτάσει την τάση διαρροής πλαστικοποιείται και συνεχίζεται η διαδικασία με μειωμένη πλέον την δυσκαμψία του τοιχείου μέχρις ότου κάποια ίνα ξεπεράσει τα ανεκτά όρια παραμόρφωσης.

Χαρακτηριστικά για ένα μεμονωμένο τοίχειο ύψους 25m και πλάτους 5m, πακτωμένο στη βάση του, και για μια οριζόντια φόρτιση προκύπτει η καμπύλη ικανότητας του όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.14

Pushover Curve - Base Shear vs Monitored Displacement

Summary Description

This is the base shear vs monitored displacement data for a pushover analysis.

Input Data

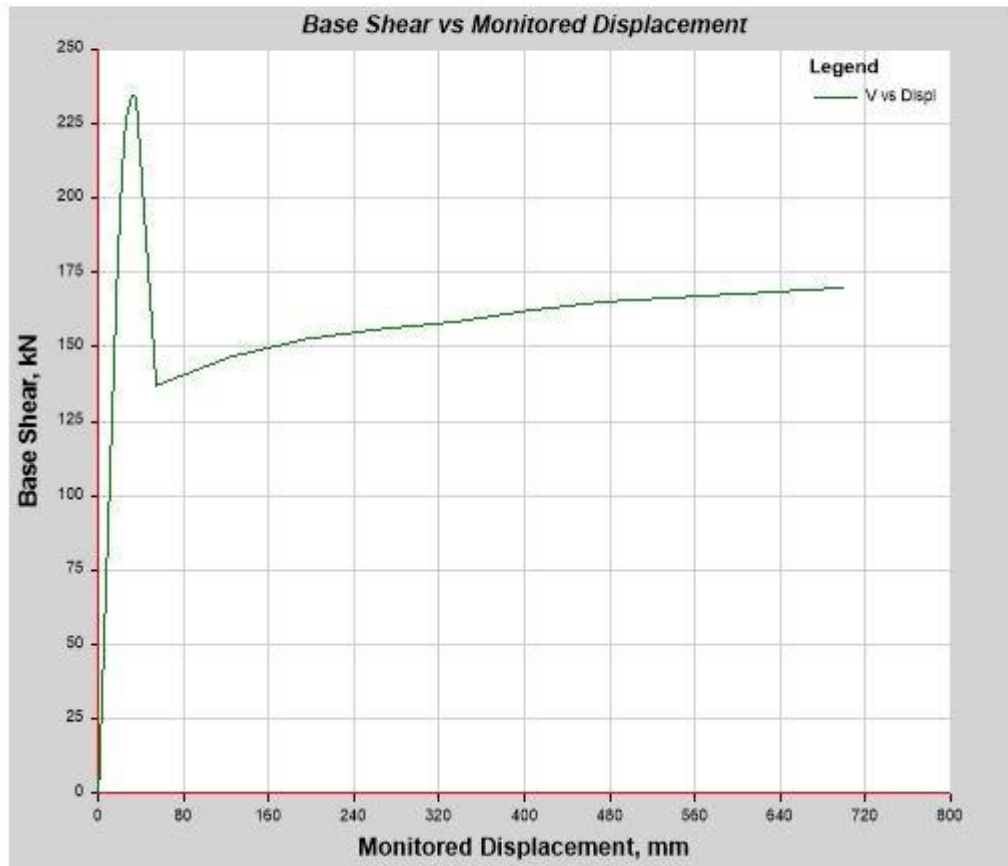
Name Pushover5

Load Case PUSHX

Plot Type

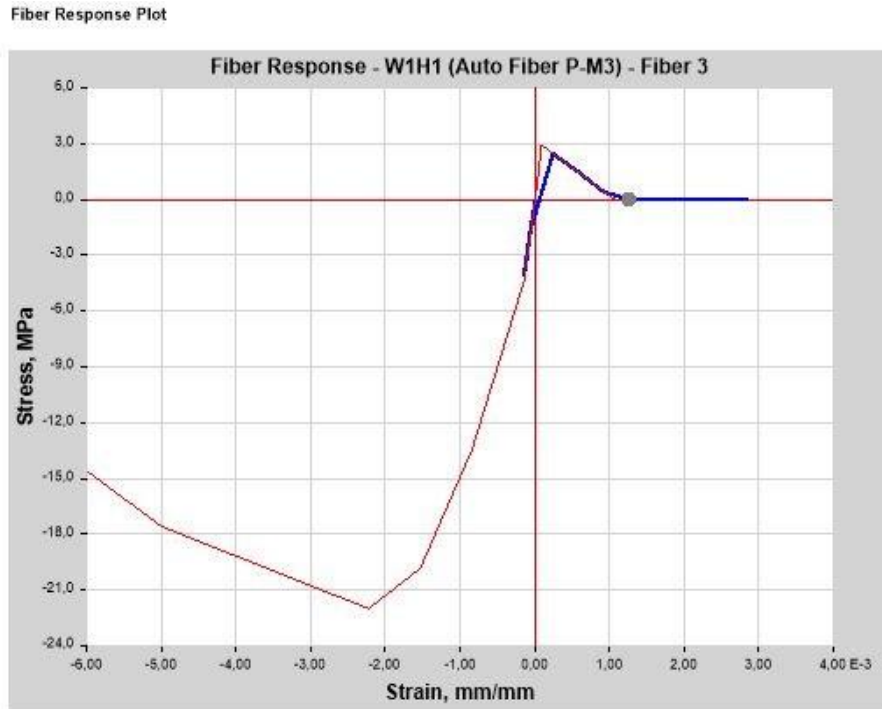
V vs Displ

Plot



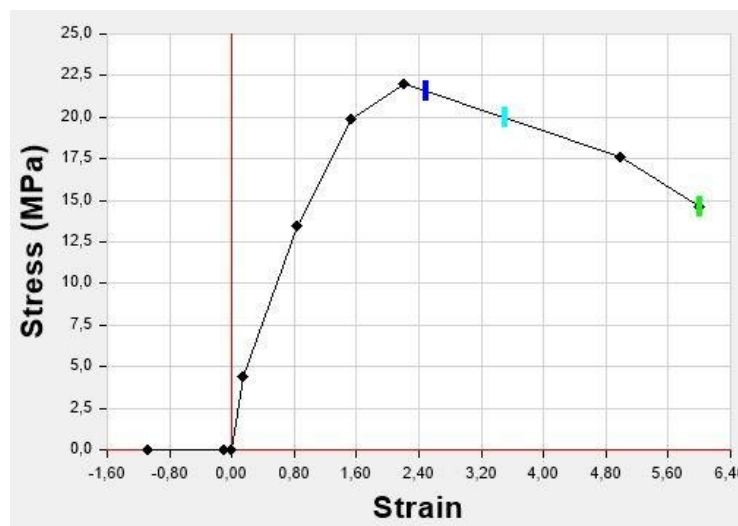
Σχήμα 3.9 Καμπύλη ικανότητας τοιχείου

Παρατηρούμε ότι το τοιχείο αποκρίνεται ελαστικά μέχρι την ροπή διαρροής και μετά μπαίνει σε πλαστική ζώνη, ωστόσο η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική ζώνη δεν είναι ομαλή, καθώς το τοιχείο φαίνεται να έχει μικρότερη αντοχή στη πλαστική ζώνη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό του σκυροδέματος μπορεί να αναπτύξει κάποιες μικρές εφελκυστικές τάσεις οι οποίες σε διατομές μεγάλης κλίμακας προσδίδουν στην διατομή μια σημαντική αύξηση της αντοχής. Μόλις το σκυρόδεμα φτάσει την παραμόρφωση διαρροής στο εφελκυσμένο τμήμα της διατομής η εφελκυστική αντοχή του χάνεται λόγω ρηγμάτωση και η ροπή αντοχής μειώνεται. Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται πως από ένα σημείο και μετά το σκυρόδεμα παύει να αναλαμβάνει εφελκυστική τάση.



Σχήμα 3.10 Συμπεριφορά ίνας σκυροδέματος στην εφελκυστική ζώνη

Η παραδοχή αυτή είναι σωστή για ένα υφιστάμενο κτίριο που γνωρίζουμε ότι το σκυρόδεμα είναι αρηγματώτο. Στο παρόν κτίριο έχουν εμφανιστεί ρωγμές στα συγκεκριμένα σημεία οπότε η παραδοχή αυτή δεν ισχύει στην συγκεκριμένη περίπτωση.



Σχήμα 3.11 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ρηγατομένου σκυροδέματος

Για το ίδιο τοίχειο, εάν τροποποιήσουμε το σκυρόδεμα έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ρηγματώση του (πρακτικά μηδενίζουμε την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος), (Σχήμα 3.16) η καμπύλη ικανότητας του τοίχειου αλλάζει και παίρνει την μορφή του Σχήματος 3.17

Pushover Curve - Base Shear vs Monitored Displacement

Summary Description

This is the base shear vs monitored displacement data for a pushover analysis.

Input Data

Name Pushover6

Load Case PUSHX

Plot Type V vs Displ

Plot

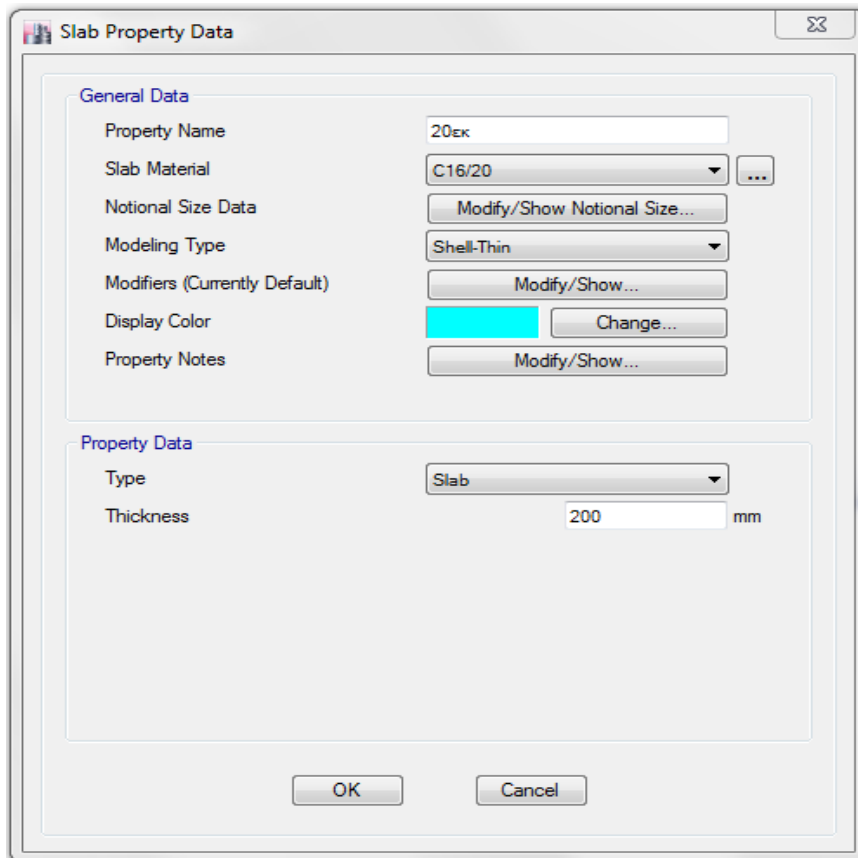


Σχήμα 3.12 Καμπύλη ικανότητας τοιχείου μη-λαμβάνοντας υπόψη την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

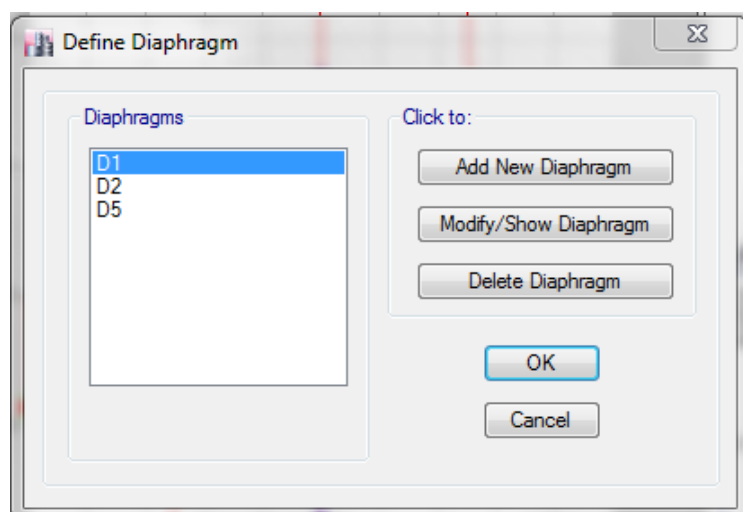
Η προσομοίωση αυτή είναι αντιπροσωπευτική της συμπεριφοράς του τοιχείου έναντι κάμψης, και δίνει περίπου τα ίδια αποτελέσματα με την προτεινόμενη μέθοδο του FEMA 356 και του πολυστρωματικού μοντέλου (Y.M.Fahjan & J.Kubin & M.T.Tan, Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings, ECEE 2014).

3.3.3.3 Πλάκες-διαφράγματα

Οι πλάκες του κτιρίου ορίζονται ως επιφανειακά στοιχεία χωρίς πεπερασμένα στοιχεία, αφού δεν μας ενδιαφέρει η ανάλυση τους στην παρούσα φάση. Για να οριστούν ακολουθούμε την εξής διαδικασία Define -> sections properties -> slab sections -> add new property.



Πρέπει έπειτα οι πλάκες να οριστούν ως διαφράγματα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ίση μετακίνηση όλων των σημείων στο επίπεδο του εκάστοτε ορόφου και να διανεμηθούν οι οριζόντιες φορτίσεις ανάλογα με τη δυσκαμψία των κατακόρυφων στοιχείων. Μέσω της διαφραγματικής λειτουργίας μπορούμε να θεωρήσουμε πλέον τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά όροφο (δύο μετακινήσεις και μία στροφή). Για να συμβεί αυτό επιλέγουμε τις πλάκες σε κάθε όροφο ξεχωριστά και επιλέγουμε Assign -> Shell -> Diaphragms -> Add new Diaphragm



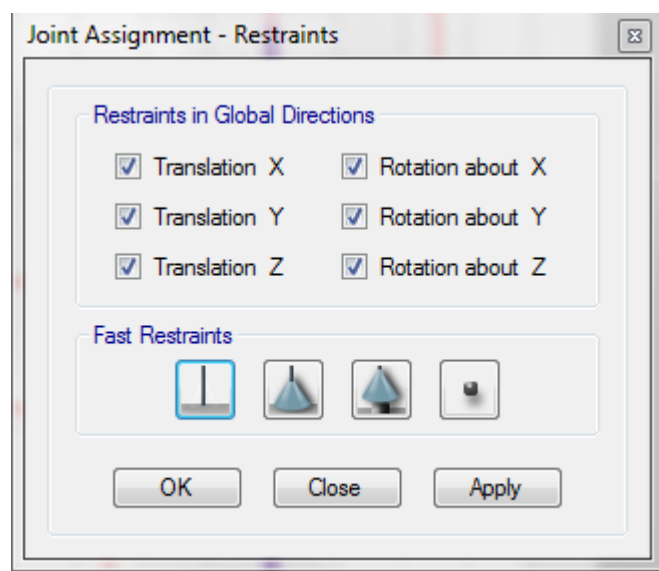
Σχήμα 3.13 & 3.14 Ορισμός διαφραγμάτων

3.4.5 Διαγώνιοι θλιπτήρες τοιχοποιίας

Η τοιχοποιία προσομοιώνεται με δύο χιαστί θλιπτήρες ανά φάτνωμα, που ορίζονται έτσι ώστε να παραλαμβάνουν μόνο θλιπτικά φορτία. Αφού οριστεί το υλικό τους, εισάγεται στο λογισμικό η διατομή των ισοδύναμων θλιπτήρων, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως ορίστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Τοποθετούνται στο φορέα και στη συνέχεια επιλέγεται να λειτουργούν μόνο υπό θλίψη μέσω της εντολής Assign -> Frame -> Tension/Compression Limits, όπου και ορίζεται όριο εφελκυσμού στο 0. Ακόμα, για να διασφαλιστεί ότι δε θα παραλάβουν ροπές, επιλέγονται και μέσω της εντολής Assign -> Frame -> Releases/Partial Fixity απελευθερώνεται η στροφή κατά M2 και M3. Για την προσομοίωση της αστοχίας τους χρησιμοποιούνται πλαστικές αρθρώσεις στο κέντρο κάθε θλιπτήρα.

3.3.3.4 Στηρίξεις φορέα

Θεωρούμε τις στηρίξεις του φορέα επί του εδάφους πλήρεις πακτώσεις. Για να ορίσουμε τις στηρίξεις του φορέα πηγαίνουμε στη βάση του κτιρίου επιλέγουμε όλα τα Joints και ακολουθούμε την εξής διαδικασία Assign -> Joints -> Restrains



Σχήμα 3.15 Ορισμός πακτώσεων στις στηρίξεις

3.3.4 Καθορισμός φορτίων κτιρίου

Τα κατακόρυφα φορτία που επιβάλλονται στη κατασκευή είναι τα εξής:

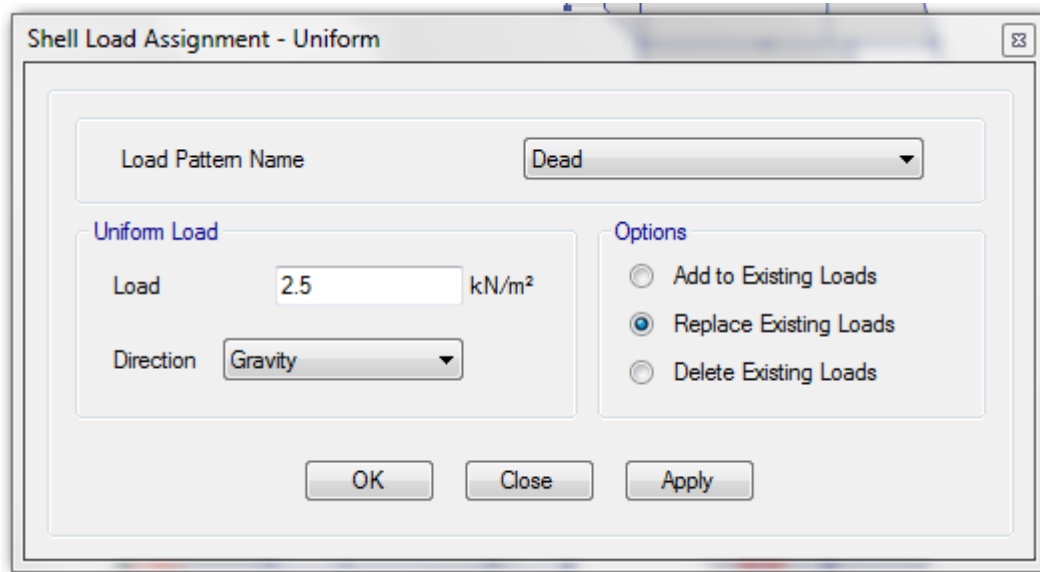
Μόνιμα:

Ίδιο βάρος οπλισμένου σκυροδέματος	25.00 kN/m ³
Επικαλύψεις δαπέδων	2.00 kN/m ²
Επικαλύψεις δώματος	1.50 kN/m ²
Φορτία τοιχοποιίας	3.5kN/m ²

Κινητά:

Δαπέδων	2.00 kN/m ²
Κλιμακοστασίων	5.00 kN/m ²
Δώματος (μη βατό)	0.50 kN/m ²

Εισάγουμε τα φορτία αυτά στις πλάκες αφού επιλέξουμε τις πλάκες με τη διαδικασία Assign -> Shell Loads -> Uniform. Τα φορτία αυτά μοιράζονται αυτόματα στις δοκούς μέσω των δυσκαμψιών των στοιχείων.

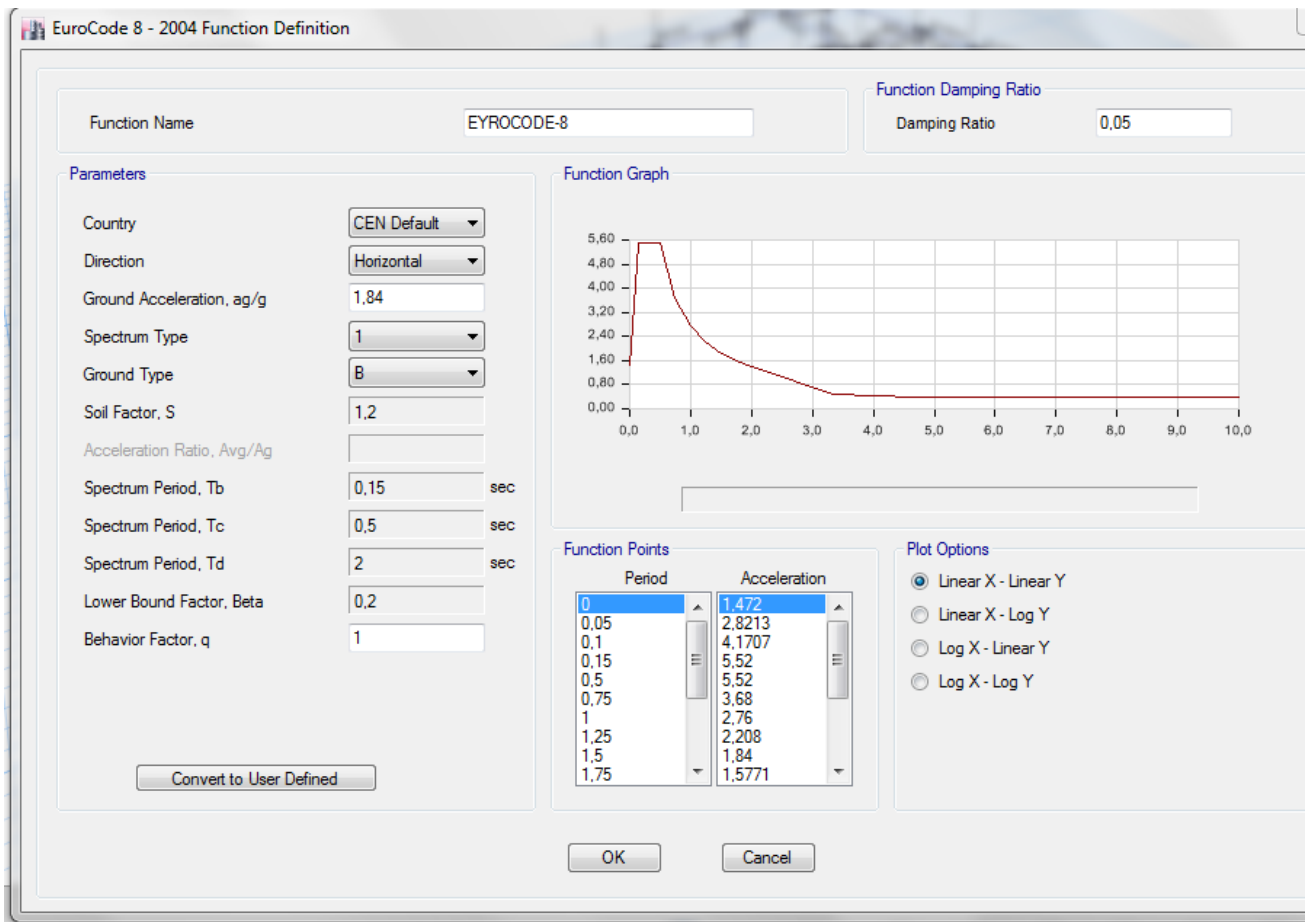


Σχήμα 3.16 Ορισμός φορτίων στις πλάκες

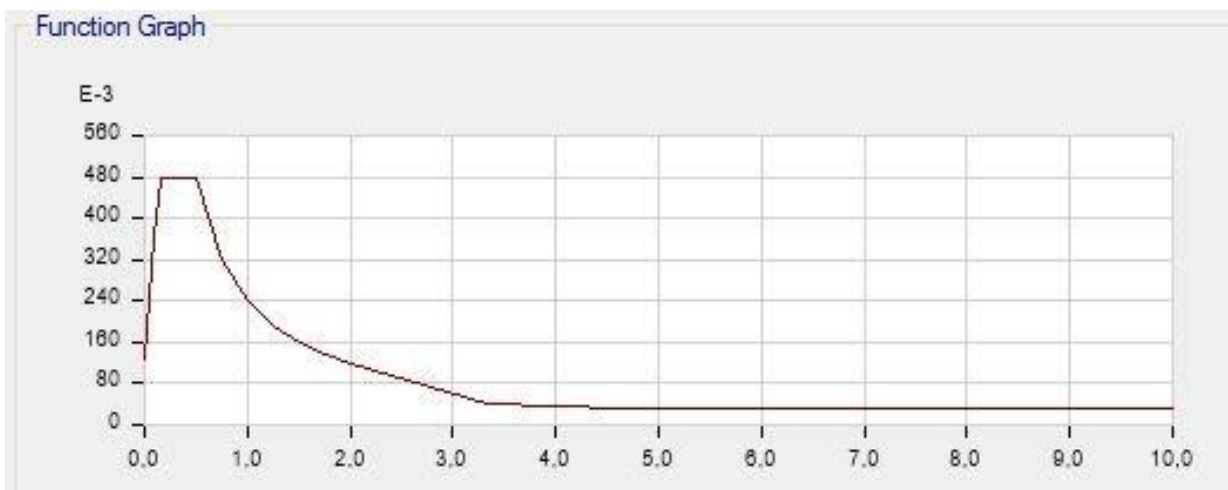
Η οριζόντια φόρτιση είναι η σεισμική όπως αυτή προβλέπεται από τον ΕΚ 8

Παράμετροι σεισμικής δράσης:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας:	Ζώνη 1	$\alpha=0,16$
Κατηγορία σπουδαιότητας:	$\Sigma 3$	$\gamma_1=1,15$
Κατηγορία εδάφους:	B	$T_B=0,15s$
		$T_C=0,50s$
Ποσοστό απόσβεσης		$\zeta=5\%$
Κατηγορία Εδάφους		B ($S=1.20$)

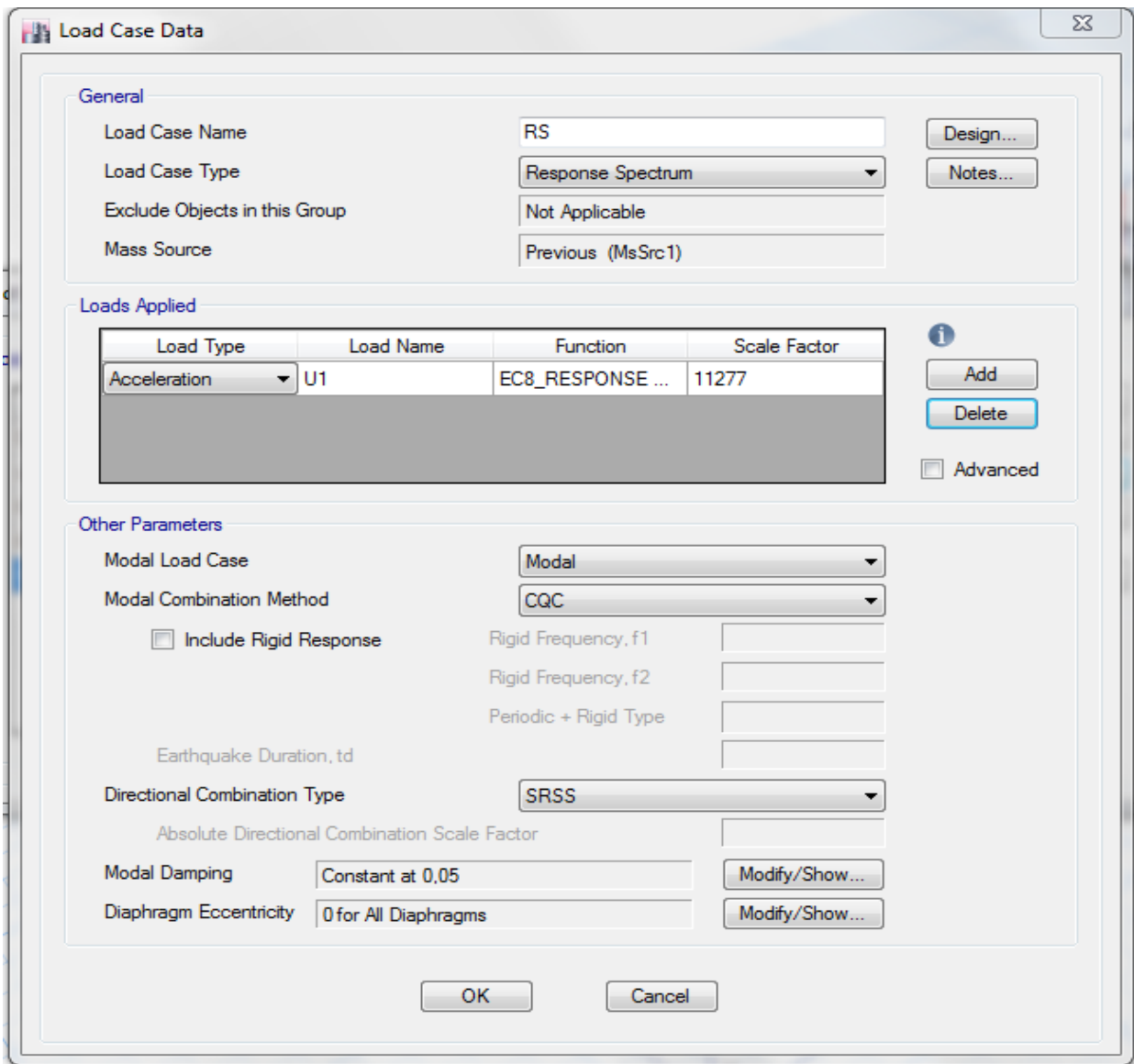


Σχήμα 3.17 Εισαγωγή παραμέτρων φάσματος



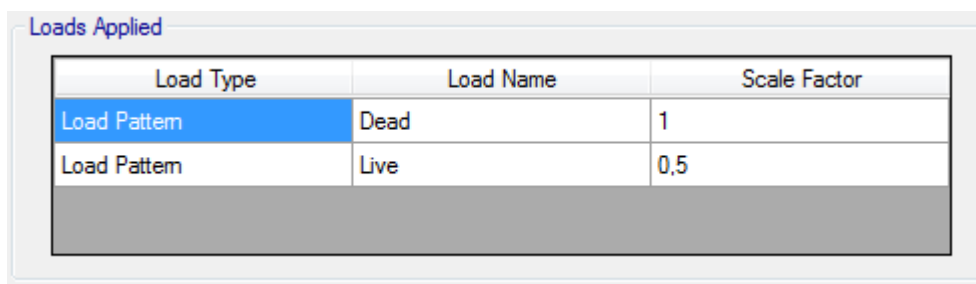
Σχήμα 3.18 Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού

Ορίζουμε το φάσμα για την κατηγορία εδάφους B και ελέγχουμε την τιμή του εκάστοτε σεισμού σχεδιασμού με το ‘scale factor’.



Σχήμα 3.19 Καθορισμός οριζόντιας φόρτισης για την ανάλυση

Επιλέγουμε τυχηματική εκκεντρότητα 5% στα διαφράγματα. Η επαλληλία των ιδιομορφών της κατασκευής γίνεται με τη μέθοδο CQC ενώ η επαλληλία των δράσεων στις δύο διευθύνσεις γίνεται με τη μέθοδο SRSS. Η ταλαντευόμενη μάζα κατά τη διάρκεια του σεισμού προκύπτει από τα κατακόρυφα φορτία και είναι σύμφωνα με τον κανονισμό $g+0.5q$ (definemass source).



Σχήμα 3.20 Ταλαντευόμενη μάζα κτιρίου κατά την διάρκεια του σεισμού

3.3.5 Προσομοίωση πλαστικών αρθρώσεων

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπολογίζεται για κάθε διατομή της κατασκευής (δοκούς και υποστυλώματα) η γωνία στροφής διαρροής θ_y , η ροπή διαρροής M_y και η γωνία στροφής κατά την αστοχία θ_u . Στα υποστυλώματα θεωρήσαμε σταθερή αξονική δύναμη η οποία προέκυψε από την φόρτιση $g+0.3q$.

Η γωνία στροφής κατά την διαρροή για δοκούς ή υποστυλώματα, θ_y , προκύπτει από την σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.:

Το μέγεθος "γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης" δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_u^{pl} = \left[\left(\frac{1}{r} \right)_u - \left(\frac{1}{r} \right)_y \right] L_{pl}$$

Αντιστοίχως, το μέγεθος "πλαστική γωνία στροφής χορδής" δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_u^{pl} = \left[\left(\frac{1}{r} \right)_u - \left(\frac{1}{r} \right)_y \right] L_{pl} \left(1 - \frac{0.5L_{pl}}{L_s} \right) = \Phi_u^{pl} \left(1 - \frac{0.5L_{pl}}{L_s} \right) \quad (3)$$

(Πρακτικά το άκρο χορδής αφίσταται εκ της ιδεατής θέσης πλαστικής άρθρωσης κατά $0.5L_{pl}$.) Τέλος η "γωνία στροφής χορδής στην αστοχία" δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_u = \theta_y + \left[\left(\frac{1}{r} \right)_u - \left(\frac{1}{r} \right)_y \right] L_{pl} \left(1 - \frac{0.5L_{pl}}{L_s} \right) = \theta_y + \theta_u^{pl} \quad (4)$$

Όπου ο 1^{ος} όρος εκφράζει την συμβολή των καμπτικών παραμορφώσεων, ο 2^{ος} όρος τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος L_s , ενώ ο 3^{ος} όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου.

Στην συνέχεια ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας των μελών:

- ΑΧ (Άμεση Χρήση) ορίζεται να είναι στο σημείο διαρροής της διατομής (θ_y , M_y), όπου $\theta_{pl}=0$
- ΠΖ (Προστασία Ζωής) ορίζεται στο σημείο $(1/2(\theta_y+\theta_u)/\gamma_{rd}$, M_y) με $\theta_{pl}=1/2(\theta_y+\theta_u)/\gamma_{rd} - \theta_y$
- ΟΚ (Οιονεί κατάρρευση) στο σημείο $(\theta_u/\gamma_{rd}$, M_y) με $\theta_{pl}=\theta_u/\gamma_{rd} - \theta_y$

Μετά την γωνία στροφής κατά την αστοχία θ_u η διατομή έχει μια απομένουσα αντοχή. Αυτή είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το μέτρο της και η παραμόρφωση μέχρι την τελική-ολική κατάρρευση. Κάνουμε την παραδοχή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και την θεωρούμε ίση με το 25% της M_y για παραμορφώσεις έως και $1,5\theta_u$. Πέραν του σημείου αυτού το στοιχείο δεν έχει πλέον καμία φέρουσα ικανότητα.

Συμπληρώνοντας τα παραπάνω στοιχεία ανηγμένα ως προς τη γωνία διαρροής θ_y στα αντίστοιχα πεδία του παραθύρου (Σχήμα 3.24), έχουμε αποτυπώσει πλήρως την συμπεριφορά των δομικών στοιχείων του κτιρίου όπως αυτά προβλέπονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Για την εκτέλεση της ανάλυσης χρησιμοποιείται η δυνατότητα προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς του φορέα σε συγκεκριμένα σημεία (hinges).

Η στροφή για το πρώτο τμήμα AB λαμβάνεται ίση με 0, διότι στο τμήμα αυτό η διατομή συμπεριφέρεται ακόμα ελαστικά, με το σημείο B να αντιπροσωπεύει το σημείο διαρροής. Το σημείο C αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αντοχή, το D την απομένουσα αντοχή μετά τη στροφή αστοχίας και το E αναφέρεται στο σημείο που έρχεται η πλήρης αστοχία.

Στις δοκούς επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν πλαστικές αρθρώσεις τύπου M3 διότι κρίσιμη θεωρείται η αστοχία λόγω κάμψης περί τον τοπικό άξονα 3. Ο ορισμός των πλαστικών αρθρώσεων έγινε μέσω της εντολής: Define → Section Properties → Frame/Wall Nonlinear Hinges → Add New Property και επιλογή της πλαστικής άρθρωσης τύπου M3. Κατόπιν, εισάγεται η ροπή διαρροής, καθώς και οι γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία, όπως ορίστηκε προηγουμένως σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Παρουσιάζεται ενδεικτικά ο ορισμός της πλαστικής άρθρωσης δοκού πλαισίου του υπογείου.

The screenshot displays the 'Hinge Property Data for YpP3a - Moment M3' dialog box. It is divided into several sections:

- Displacement Control Parameters:** A table with columns 'Point', 'Moment/SF', and 'Rotation/SF'. The points are color-coded: E- (blue), D- (orange), C- (purple), B- (pink), A (grey), B (pink), C (purple), D (orange), and E (orange).
- Load Carrying Capacity Beyond Point E:** Options for 'Drops To Zero' (selected) and 'Is Extrapolated'.
- Scaling for Moment and Rotation:** Checkboxes for 'Use Yield Moment' and 'Use Yield Rotation'. Input fields for 'Positive' and 'Negative' values for Moment SF and Rotation SF.
- Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF):** Checkboxes for 'Immediate Occupancy', 'Life Safety', and 'Collapse Prevention'. Input fields for 'Positive' and 'Negative' values.
- Diagram:** A small schematic of a frame with hinges indicated at various points.
- Type:** Radio buttons for 'Moment - Rotation' (selected) and 'Moment - Curvature'. Input for 'Hinge Length' and a checked 'Relative Length' checkbox.
- Hysteresis Type and Parameters:** A dropdown menu for 'Hysteresis' set to 'Isotropic'.
- Hinge Property Name:** A text field containing 'YpP3a'.
- Hinge Type:** Radio buttons for 'Force Controlled (Brittle)' and 'Deformation Controlled (Ductile)' (selected). A dropdown menu for 'Moment M3'.
- Buttons:** 'Modify/Show Hinge Property...', 'OK', and 'Cancel'.

Σχήμα 3.21 Ορισμός πλαστικής άρθρωσης δοκού

Στα υποστυλώματα ακολουθείται η αντίστοιχη διαδικασία με αυτή που ακολουθείται στις δοκούς, με τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων όμως να γίνεται σύμφωνα με την αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης και διαξονικής κάμψης, συνεπώς επιλογή πλαστικών αρθρώσεων τύπου P-M2-M3. Οι γωνίες στροφής χορδής κατά τη διαρροή και κατά την αστοχία ορίζονται όπως πριν, ενώ επιπλέον χρειάζεται να προσδιοριστεί και η επιφάνεια αλληλεπίδρασης των μεγεθών.

Για να οριστεί η πλαστική άρθρωση σε κάποιο γραμμικό μέλος επιλέγεται το μέλος και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή Assign→Hinge. Στο πεδίο που εμφανίζεται επιλέγεται το Add, για τον ορισμό των ιδιοτήτων της πλαστικής άρθρωσης το άκρο i και το άκρο j του μέλους, ορίζοντας 0 ή 1 στην επιλογή Relative Distance αντίστοιχα.

3.3.6 Ταλαντευόμενη Μάζα

Η μάζα της κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί από το πρόγραμμα, προκύπτει σύμφωνα με τον κανονισμό από τα κατακόρυφα φορτία $G+\psi Q$ και εισάγεται στο λογισμικό με την εντολή: Define→Mass Source→Modify/Show Mass Source. Το λογισμικό, μετατρέπει τα φορτία του συνδυασμού σε επικόμβιες μάζες και υπολογίζει έτσι τις ιδιομορφές του κτιρίου.

Αποτίμηση συμπεριφοράς κατασκευής μέσω στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover)

4 Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς

4.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Πριν ξεκινήσει η σεισμική αποτίμηση της κατασκευής γίνεται μια ελαστική ανάλυση για να προσδιοριστούν οι ιδιομορφές του κτηρίου και να σχηματιστεί μια εικόνα για τη συμπεριφορά του. Ιδιομορφές είναι χαρακτηριστικές μορφές ταλάντωσης στις οποίες αποκρίνεται η κατασκευή εάν διεγερθεί με συχνότητα ίση με μια από τις συχνότητες τους (ιδιοσυχνότητες). Μια σημαντική ιδιότητά τους είναι ότι η κίνηση μιας κατασκευής ανά πάσα στιγμή μπορεί να περιγραφεί ως άθροισμα των ιδιομορφικών αποκρίσεων της.

ιδιομορφική ανάλυση έγινε προκειμένου να υπολογιστούν οι ιδιοπερίοδοι, οι ιδιομορφές, τα ποσοστά συμμετοχής των μαζών σε κάθε ιδιομορφή και κυρίως η δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής (στροφική ή μεταφορική).

Πίνακας 4.1 Ποσοστά ενεργοποιούμενης μάζας ιδιομορφών

	Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	RZ
	Modal	1	0,384	0,024	0,892	0	0,084
	Modal	2	0,353	0,896	0,048	0	0,057
	Modal	3	0,319	0,088	0,048	0	0,864

Φαίνεται ότι κατά τη διεύθυνση X δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι η 2η με ποσοστό συνολική μάζα 90%, κατά τη διεύθυνση Y είναι η 1η με ποσοστό συμμετοχής στη συνολική μάζα 89%. Η 3η ιδιομορφή είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για τη στροφική κίνηση της κατασκευής περί τον Z άξονα, με ποσοστό συμμετοχής 86%. Η κατασκευή φαίνεται να διαθέτει παρόμοια δυσκαμψία κατά τους δυο άξονες.

4.2 Εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων

Αρχικά, θα πρέπει να οριστεί μια αρχική συνθήκη από την οποία θα ξεκινάει να γίνεται η οριζόντια ανάλυση. Ως αρχική συνθήκη ορίζεται η κατακόρυφη φόρτιση $G+\psi_2Q$, με $\psi_2=0,5$. Η συνθήκη αυτή ορίζεται μέσω της εντολής Define -> Load Cases -> Add New Case. Ορίζεται ο τύπος της φόρτισης ως μη-γραμμικός στατικός για να μπορεί να θεωρηθεί αρχική συνθήκη στις οριζόντιες φορτίσεις που θα οριστούν παρακάτω.

Το φορτίο εφαρμόζεται ολόκληρο και επιλέγεται να αποθηκευτεί μόνο το τελευταίο στάδιο της φόρτισης.

Ελέγχεται και επιβεβαιώνεται ότι το κτήριο είναι σε θέση να φέρει τα κατακόρυφα φορτία του και ότι ελάχιστα στοιχεία έχουν μπει στην πλαστική περιοχή.

4.3 Καθορισμός παραμέτρων στατικής ανελαστικής ανάλυσης

Με σημείο εκκίνησης το πέρας της ανελαστικής επιβολής των κατακόρυφων φορτίων, χρειάζεται να οριστούν οι οριζόντιες φορτίσεις. Για να είναι επαρκής η ανάλυση, η κατασκευή θα πρέπει να ελεγχθεί και στις δύο διευθύνσεις και για τις δύο φορές (θετική-αρνητική). Για κάθε κατεύθυνση σεισμικής φόρτισης λαμβάνεται και η συνεισφορά κατά 30% της άλλης διεύθυνσης. Οι κατανομές που ορίστηκαν φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Συνδυασμοί φορτίσεων για ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων

Κατά X	Κατά Y
$X+0,3Y$	$Y+0,3X$
$X-0,3Y$	$Y-0,3X$
$-X+0,3Y$	$-Y+0,3X$
$-X-0,3Y$	$-Y-0,3X$

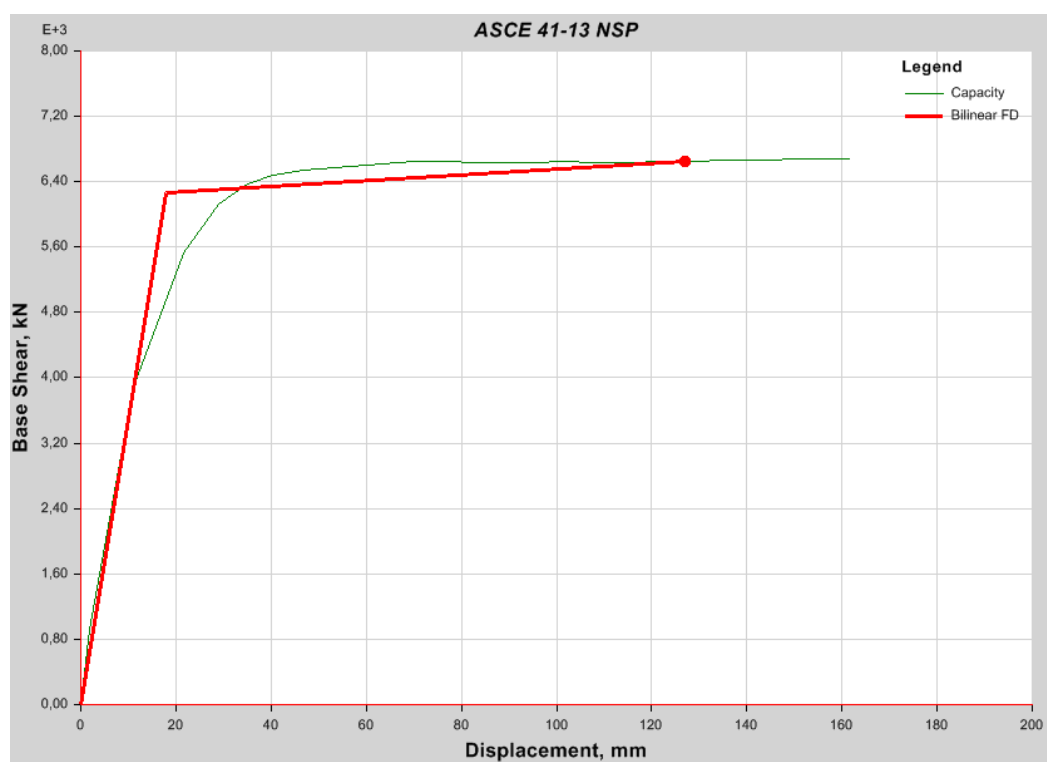
Οι φορτίσεις ορίζονται με την ίδια εντολή που ορίζονται και τα κατακόρυφα φορτία, ορίζεται όμως ως αρχική συνθήκη η φόρτιση $G+\psi Q$, η οποία περιγράφηκε παραπάνω. Η φόρτιση της κατασκευής γίνεται μέσω ελεγχόμενης μετακίνησης του κόμβου ελέγχου (Displacement Control) έτσι ώστε να παρέχεται επαρκής εικόνα της ανελαστικής απόκρισης του κτηρίου και μετά την υπέρβαση της μέγιστης τέμνουσας βάσης που αναπτύσσεται.

4.4 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης

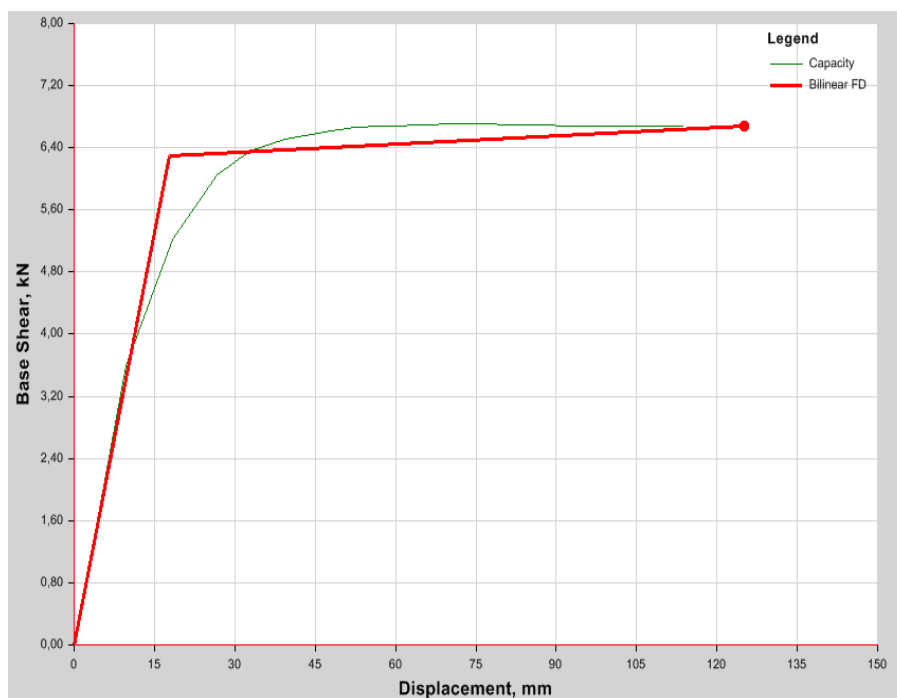
4.4.1 Κατά Χ

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης κορυφής για τους συνδυασμούς φόρτισης που έχουν οριστεί σύμφωνα με τα παραπάνω.

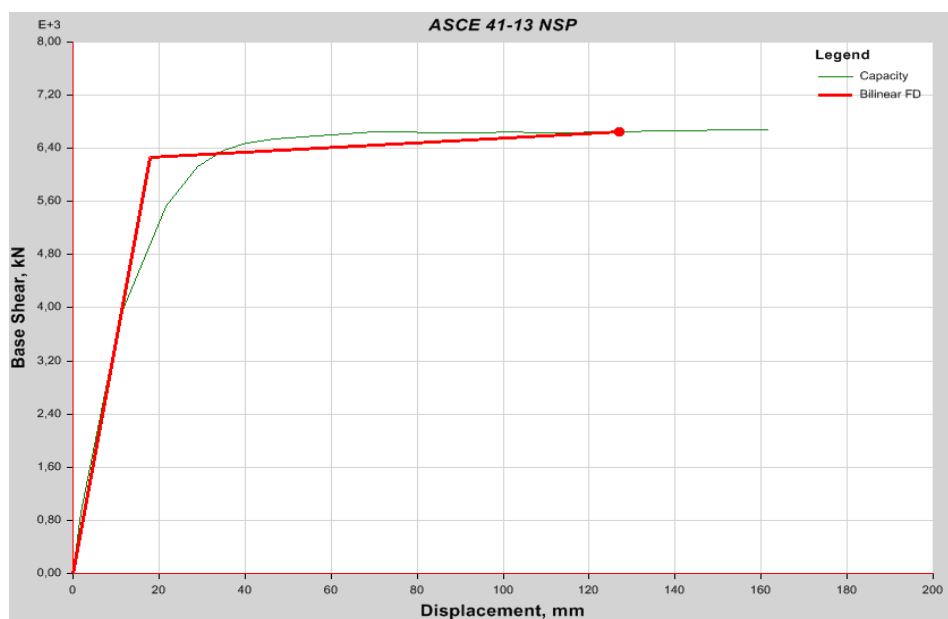
Οι καμπύλες αυτές κρίνεται σκόπιμο να μετατραπούν σε εξιδανικευμένες καμπύλες δύναμης-μετατόπισης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι αυτή που προτείνεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και αντιστοιχεί σε διγραμμική καμπύλη με κλίση πρώτου κλάδου K_e και δεύτερου κλάδου αK_e . Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται για κάθε φόρτιση το διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης κορυφής όπως προέκυψε από το πρόγραμμα και η αντίστοιχη διγραμμική καμπύλη, όπως προέκυψε με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.



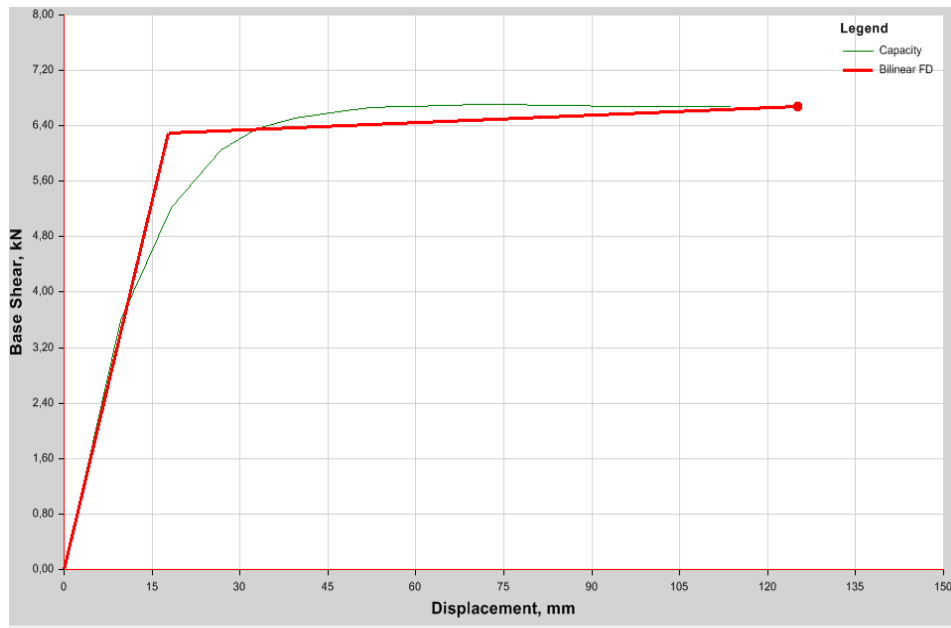
Σχήμα 4.1 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση $X+0,3Y$



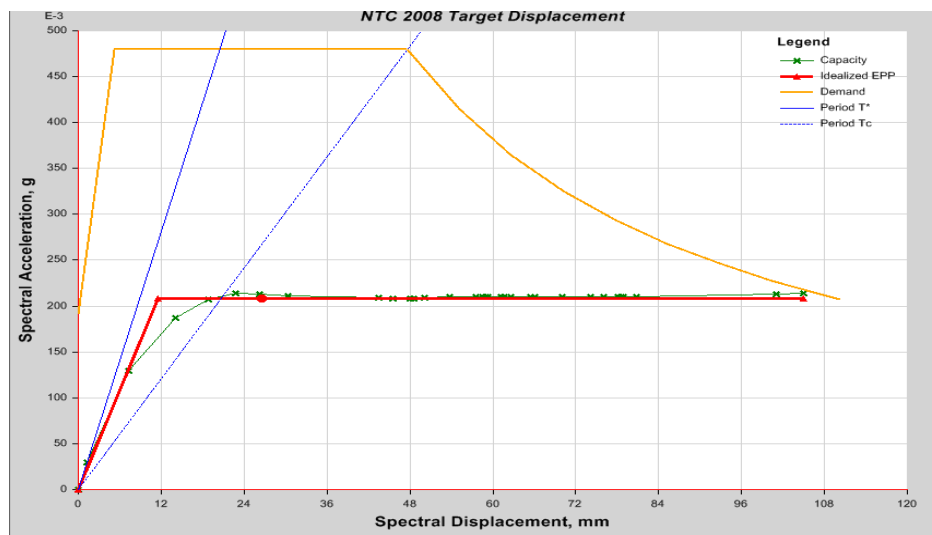
Σχήμα 4.2 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση X-0,3Y



Σχήμα 4.3 Σύγκριση απόκρισης φορέα και διγραμμικοποίηση -X+0,3Y



Σχήμα 4.4 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση -X-0,3Υ

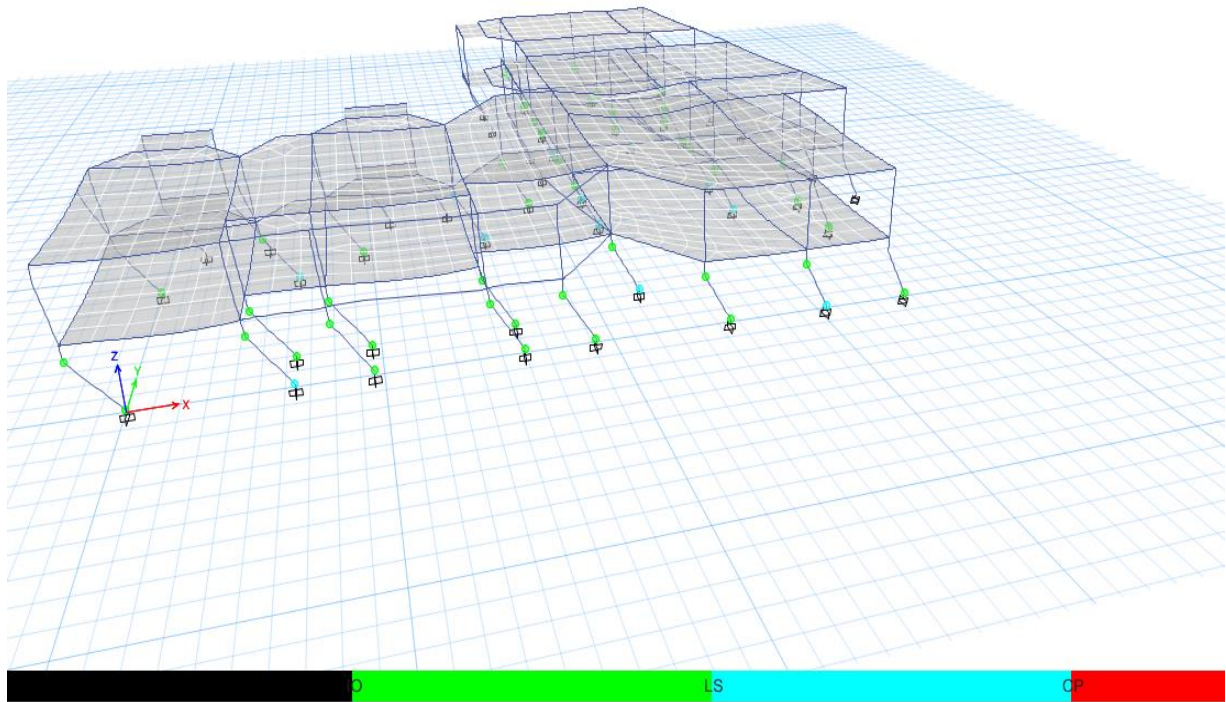


Σχήμα 4.5 Καμπύλες ADRS φορέα κατά X + 0.3Υ

Όπως φαίνεται και πιο πάνω, σχηματικά, μετατρέπεται η καμπύλη σε φάσμα ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum), δηλαδή ορίζεται ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα με την κατασκευή και δημιουργείται η καμπύλη απόκρισής του σε ένα σύστημα αξόνων μετακίνησης-επιτάχυνσης του ισοδύναμου μονοβαθμίου.

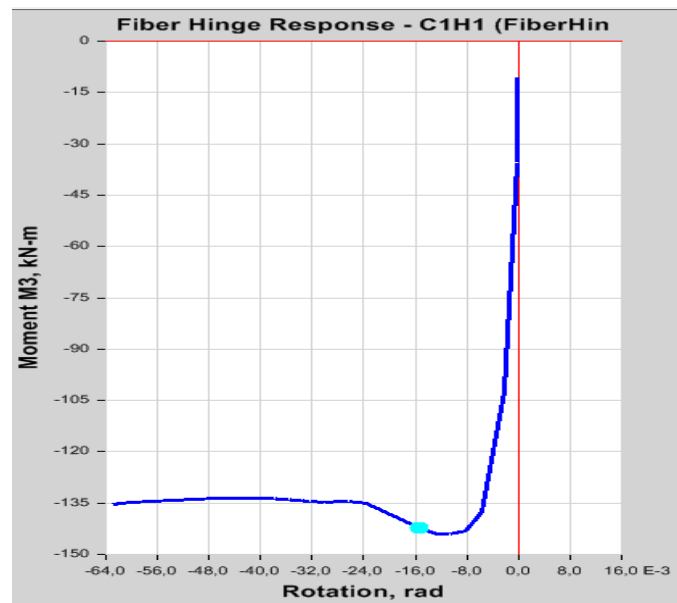
Για την κατασκευή του μονοβαθμίου γίνεται η θεώρηση ότι οι μετακινήσεις της κατασκευής ακολουθούν την 2η ιδιομορφή. Στο ίδιο σύστημα τοποθετείται και η καμπύλη του φάσματος απόκρισης του Ευρωκώδικα 8, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.

Βάσει τη στοχευμένη μετακίνηση βλέπω αν για κάποια στοιχεία έχει επιτευχθεί η στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία ελέγχω.



Σχήμα 4.6 Απόκριση φορέα

Όπως φαίνεται στον παραμορφωμένο φορέα αρκετά στοιχεία κυρίως τα υποστυλώματα έχουν πιάσει τη στάθμη επιτελεστικότητας προστασία ζωής. Βλέπουμε ότι υπάρχει διαρροή κυρίως των υποστυλωμάτων στη βάση του κτιρίου και όχι των δοκών πράγμα που συμβαίνει λόγω το ότι όταν κατασκευαζόταν το κτίριο δεν εφαρμοζόταν ο ικανοτικός σχεδιασμός.

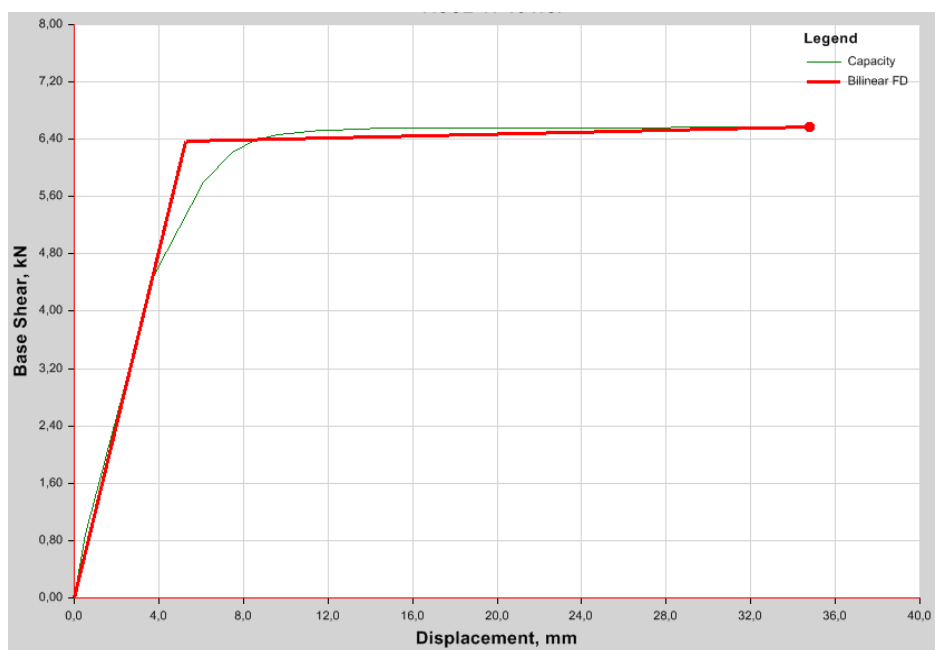


Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ροπής – στροφής υποστυλώματος C59

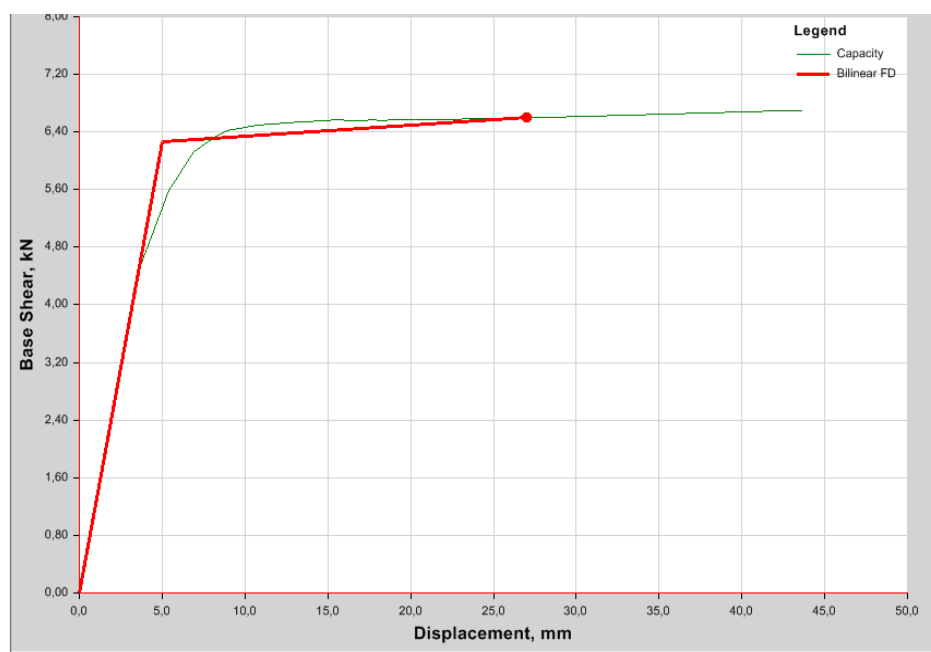
Στο σχήμα .. παρουσιάζεται ενδεικτικά η το διάγραμμα ροπής στροφής σε μία από τις κολώνες που έχουν πιάσει τη στάθμη επιτελεστικότητας. Άρα η απόκριση της κατασκευής δεν επαρκεί για το σεισμό που ορίστηκε και θα χρειαστεί ενίσχυση.

4.4.2 Κατά Υ

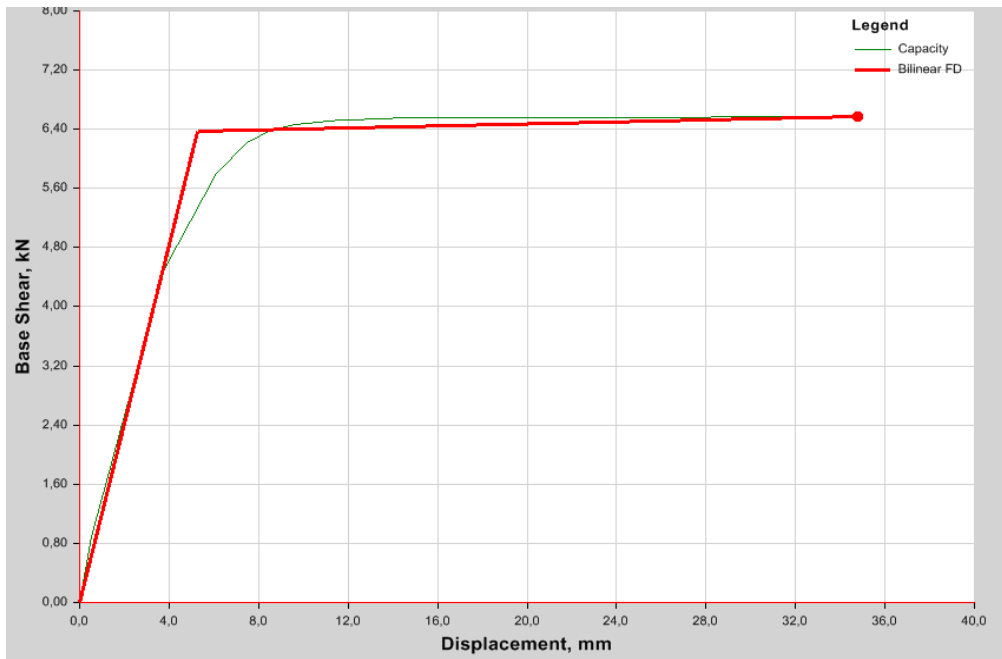
Αντίστοιχα λοιπόν, προκύπτουν τα διαγράμματα F-δ για τη διεύθυνση Υ και οι αντίστοιχες διγραμμικές καμπύλες τους, που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



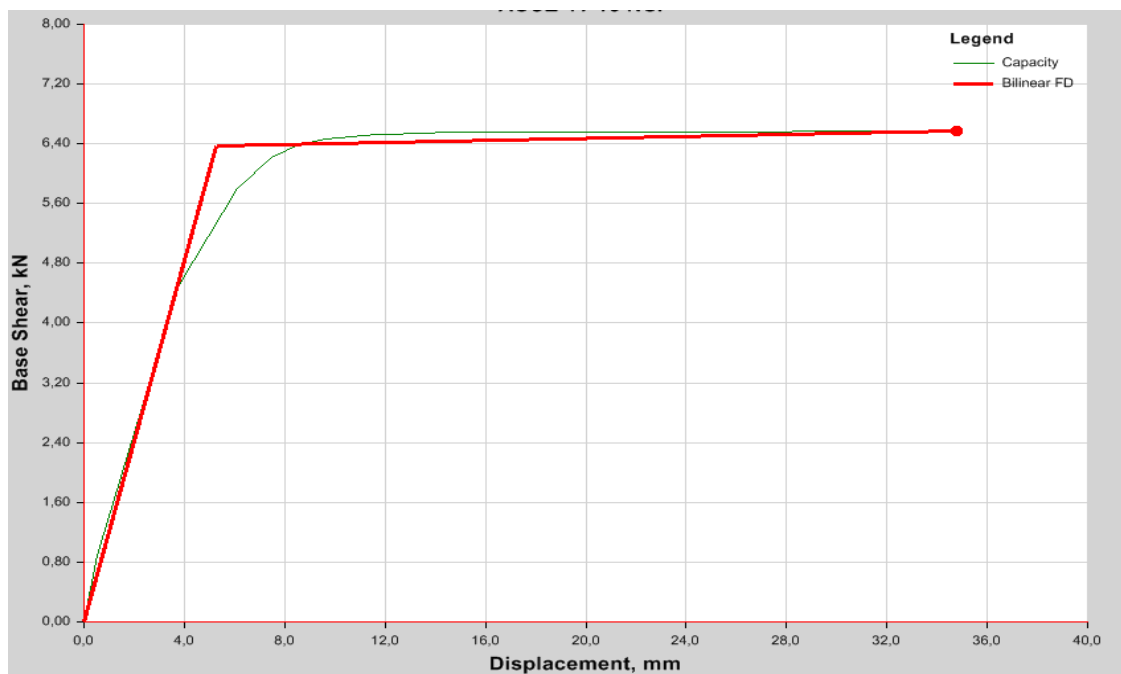
Σχήμα 4.8 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση +Υ+0,3Χ



Σχήμα 4.9 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση +Υ-0,3Χ

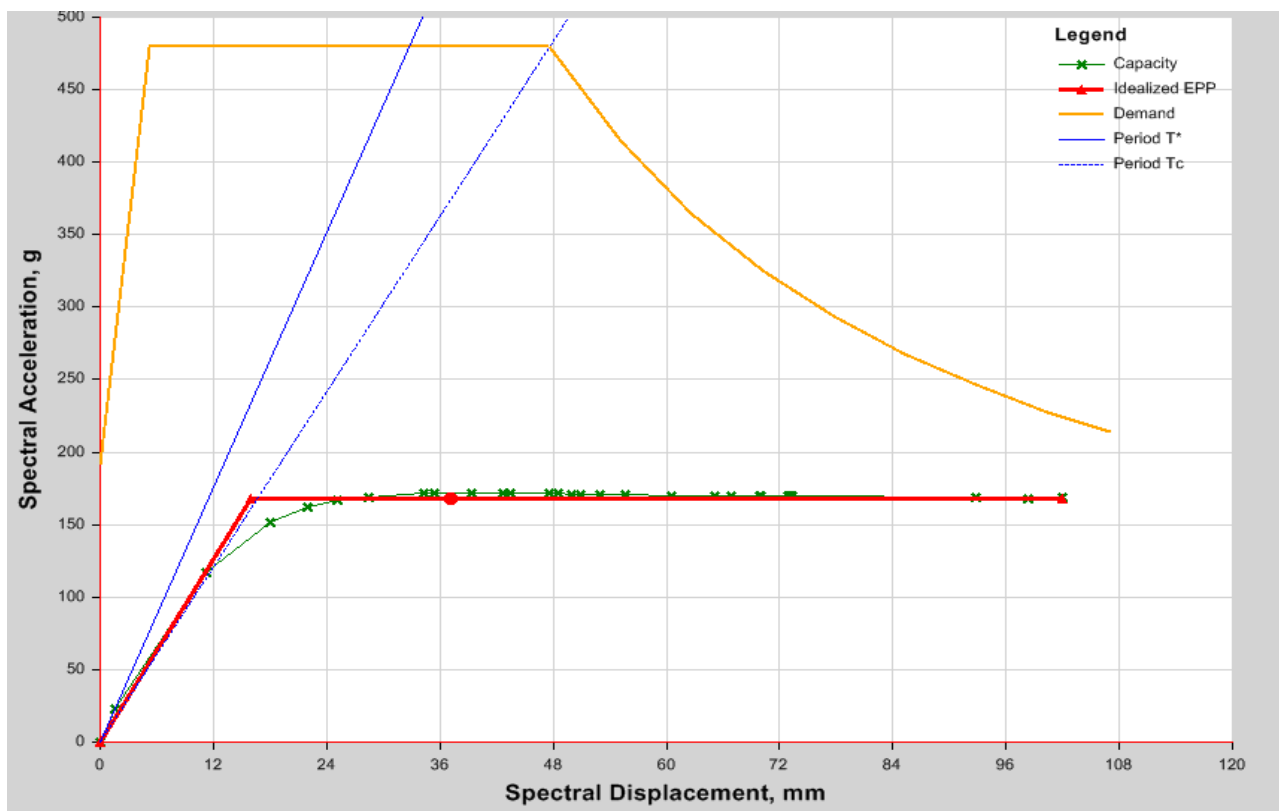


Σχήμα 4.10 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση -Y-0,3X



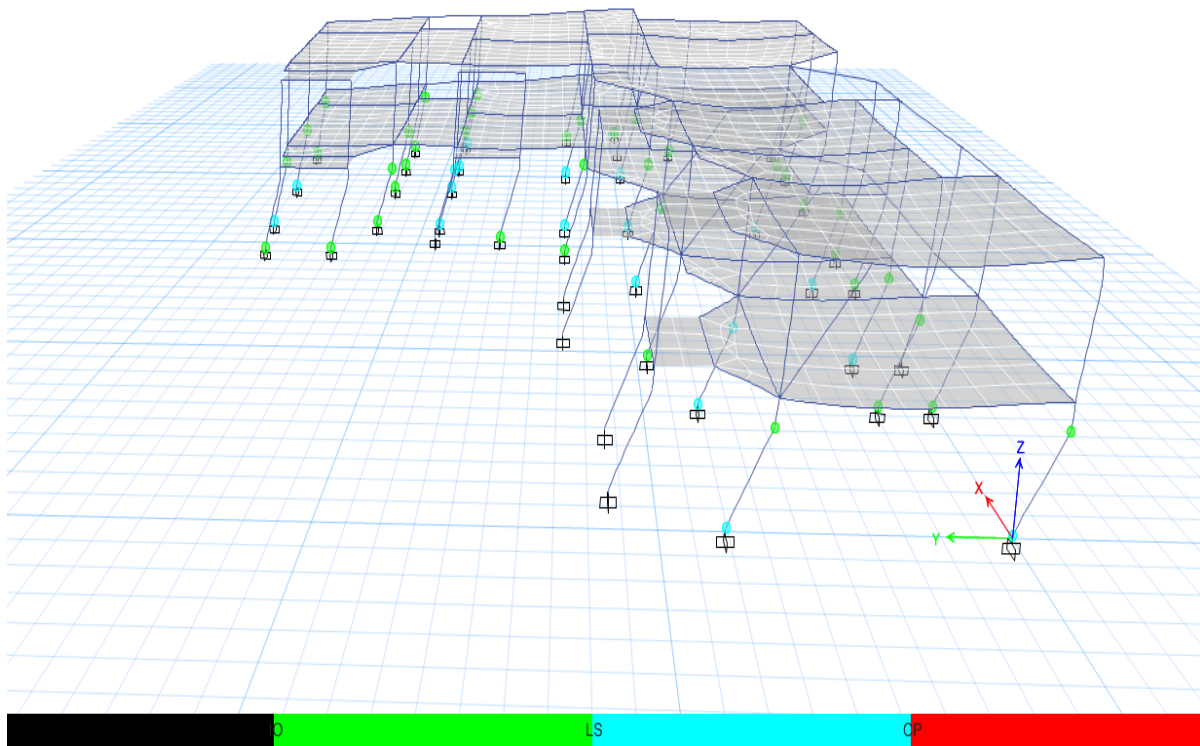
Σχήμα 4.11 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση -Y+0,3X

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη διεύθυνση X και προκύπτουν τα διαγράμματα ADRS του που συγκρινόμενα με το φάσμα απαίτησης δείχνουν την ανεπάρκεια της κατασκευής και ως προς την Y διεύθυνση.



Σχήμα 4.12 Καμπύλες ADRS φορέα κατά +Y+0,3X

Όπως προηγουμένως για τη συγκεκριμένη στοχευμένη μετακίνηση βλέπουμε την απόκριση του φορέα.



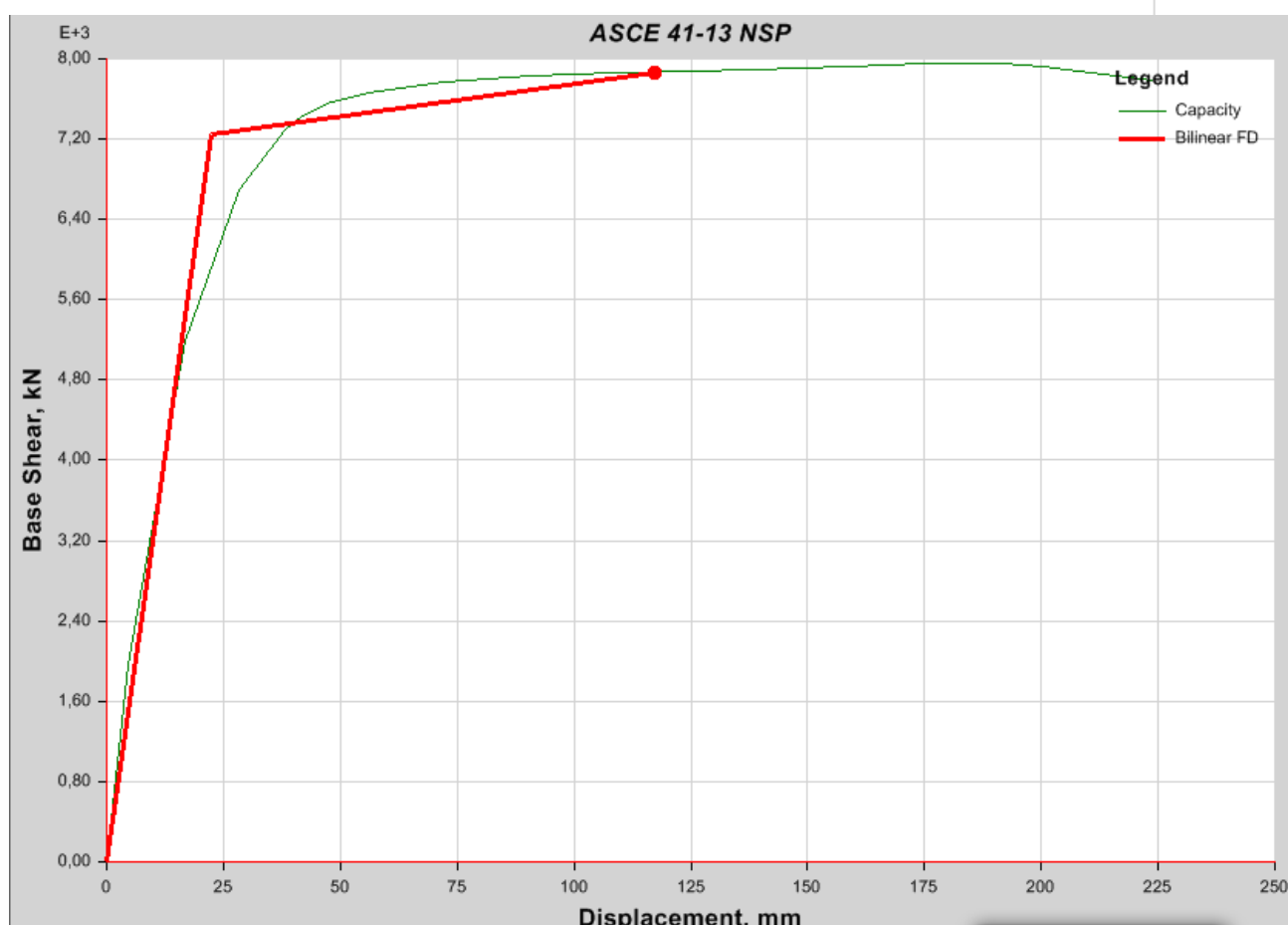
Σχήμα 4.13 Απόκριση φορέα

Όπως και προηγουμένως φαίνεται στον παραμορφωμένο φορέα αρκετά στοιχεία κυρίως τα υποστυλώματα έχουν πιάσει τη στάθμη επιτελεστικότητας προστασία ζωής.

4.5 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης με συνεκτίμηση της τοιχοποιίας

Προστίθενται διαγώνιοι θλιπτήρες χιαστί σε κάθε φάτνωμα περιμετρικά της κατασκευής με τον τρόπο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, για να εκτιμηθεί η συνεισφορά της τοιχοποιίας κατά τη σεισμική φόρτιση. Εκτελούνται λοιπόν αναλύσεις για τους προαναφερθέντες συνδυασμούς φορτίσεων και συγκρίνεται η απόκριση της κατασκευής με τοιχοπλήρωση και χωρίς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

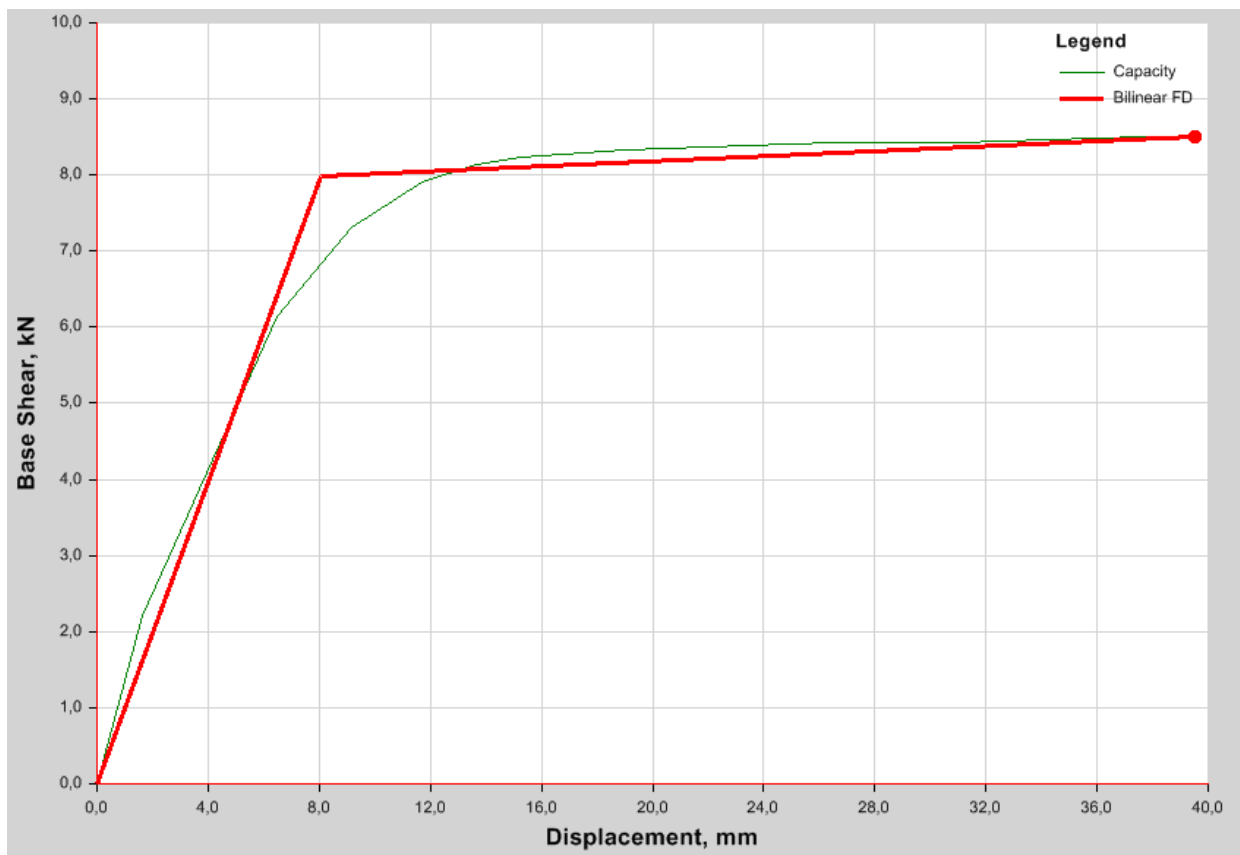
4.5.1 Κατά X



Σχήμα 4.14 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία +X+0,3Y

Δίνεται ενδεικτικά η καμπύλη Δύναμης – Μετατόπισης του φορέα για τη διεύθυνση X+0,3 Y. Η απόκριση του φορέα φαίνεται πολύ καλύτερη με τη συνεκτίμηση της τοιχοποιίας. Φαίνεται η κατασκευή να έχει πιο ελαστική συμπεριφορά. Η κλίση της καμπύλης του τοιχοπληρωμένου φορέα, που αντιστοιχεί στη δυσκαμψία του, είναι μεγαλύτερη. Για την ίδια μετακίνηση κορυφής ο τοιχοπληρωμένος φορέας αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις αντίστασης και απορροφά μεγαλύτερη σεισμική ενέργεια.

4.5.2 Κατά Υ



Σχήμα 4.15 Απόκρισης φορέα με τοιχοποιία Υ+0,3Χ

Όπως και κατά τη Χ διεύθυνση, ο φορέας φαίνεται να αναπτύσσει μια πιο ελαστική συμπεριφορά με τη συνεκτίμηση της τοιχοποιίας και να μια μεγαλύτερη τέμνουσα βάσης για κάθε συνδυασμό. Επομένως, κρίνεται ότι η συνεισφορά της τοιχοπλήρωσης είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης μέσω της ευνοϊκής επίδρασης της με την αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του φορέα.

5 Προτάσεις επέμβασης στην κατασκευή

5.1 Γενικά

Η κατασκευή δεν επαρκεί έναντι της σεισμικής καταπόνησης που ορίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.

5.1.1 Επεμβάσεις:

Επέμβαση ορίζεται ως οποιαδήποτε διαδικασία με σκοπό τη στοχευόμενη μεταβολή των υφισταμένων μηχανικών χαρακτηριστικών ενός στοιχείου ή δομήματος και έχει, ως συνέπεια, την τροποποίηση της απόκρισής του. Οι επεμβάσεις που γίνονται μπορούν να χαρακτηριστούν ως επισκευές ή ως ενισχύσεις ανάλογα με το σκοπό τον οποίο επιτελούν. Επισκευές αποτελούν οι επεμβάσεις οι οποίες έχουν ως σκοπό την αποκατάσταση των προ βλάβης μηχανικών χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων ενός δομήματος και επαναφέρουν στο φορέα την αρχική του φέρουσα ικανότητα. Οι ενισχύσεις έχουν ως στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας ή πλαστιμότητας του δομήματος και οδηγούν σε καλύτερη στάθμη από αυτή του αρχικού σχεδιασμού.

Στην υπό μελέτη κατασκευή προτείνονται ένας τρόπος επέμβασης, οι ενισχύσεις.

5.1.2 Ενισχύσεις

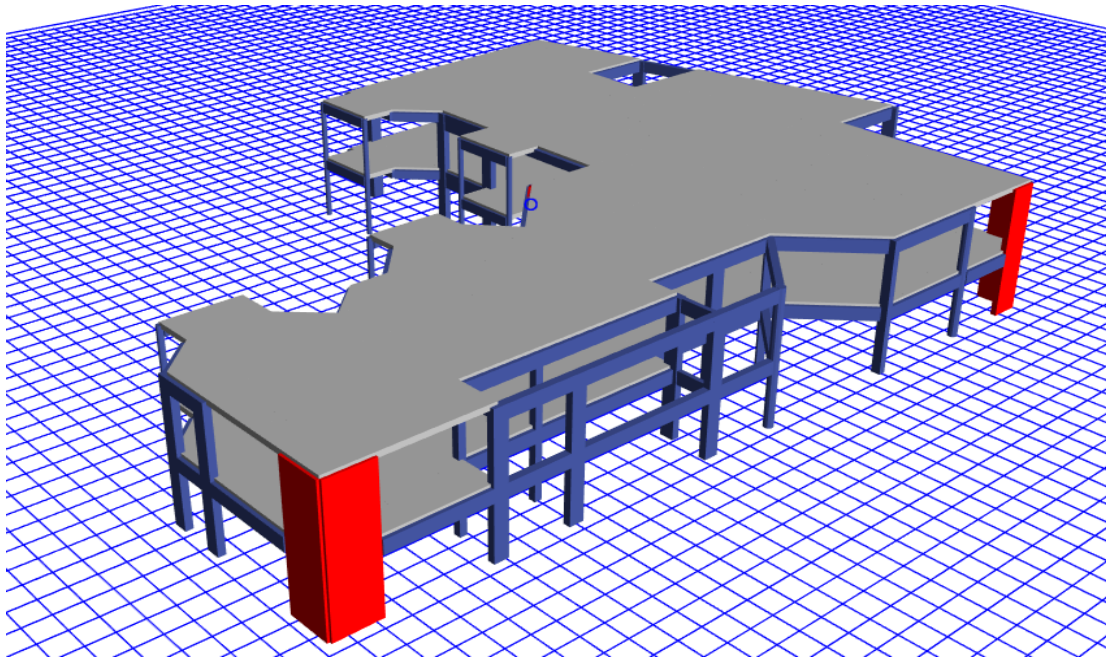
Προτείνεται η κατασκευή 4 τοιχείων περιμετρικά του δομήματος διαστάσεων 1.20 X 0.20, για την αύξηση της δυσκαμψίας κατά την X και Y διεύθυνση και η ενίσχυση με μανδύες στα υποστυλώματα που συντρέχουν, ώστε να αποκτήσουν μια πιο πλαστική συμπεριφορά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα νέα τοιχεία είναι σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβας οπλισμών B500C.

5.1.3 Ψαθυρή συμπεριφορά υποστυλωμάτων

Όπως αναφέρθηκε, το κτήριο, σχεδιασμένο σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τη λογική της εποχής του, παρουσιάζει ανεπάρκεια στην όπλιση των υποστυλωμάτων έναντι τέμνουσας δύναμης. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των υποστυλωμάτων φαίνεται ότι τα περισσότερα αστοχούν ψαθυρά, λόγω αυτού. Ακόμα, ο τρόπος αγκύρωσης των συνδετήρων που υλοποιείται στο φορέα, κρίνεται ανεπαρκής, καθώς δεν κλείνουν προς τα μέσα. Έτσι, προτείνεται η ενίσχυση των υποστυλωμάτων έναντι τέμνουσας, με στόχο η αστοχία τους να έρθει πλαστικά, προερχόμενη από καμπτική καταπόνηση. Προτείνεται η ενίσχυση με σύνθετα υλικά, όπως ινοπλισμένα πολυμερή, ή η περίσφιγξη μέσω μανδύων. Ειδικότερα για τα περιμετρικά υποστυλώματα του υπογείου, λόγω της παρουσίας των φεγγιτών στα σημεία που διακόπτεται η επαφή τους με το τοιχίο του υπογείου συγκεντρώνονται μεγάλες δυνάμεις, συνεπώς πέρα από την αύξηση της διατμητικής αντοχής τους προτείνεται να εξεταστεί και το γέμισμα των φεγγιτών για την αποφυγή της αστοχίας με μορφή κοντού υποστυλώματος

5.2 Αποτίμηση συμπεριφοράς μετά την ενίσχυση

Η διαδικασία που ακολουθείται στο Κεφάλαιο 4 για τον ορισμό των καινούριων υλικών, στοιχείων και νόμων ανελαστικής συμπεριφοράς καθώς και ανάλυσης της κατασκευής επαναλαμβάνεται με την προσθήκη του τοιχίου και των υποστυλωμάτων και ο καινούριος ενισχυμένος φορέας φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Επεμβάσεις στο φορέα με δημιουργία τοιχίου

5.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

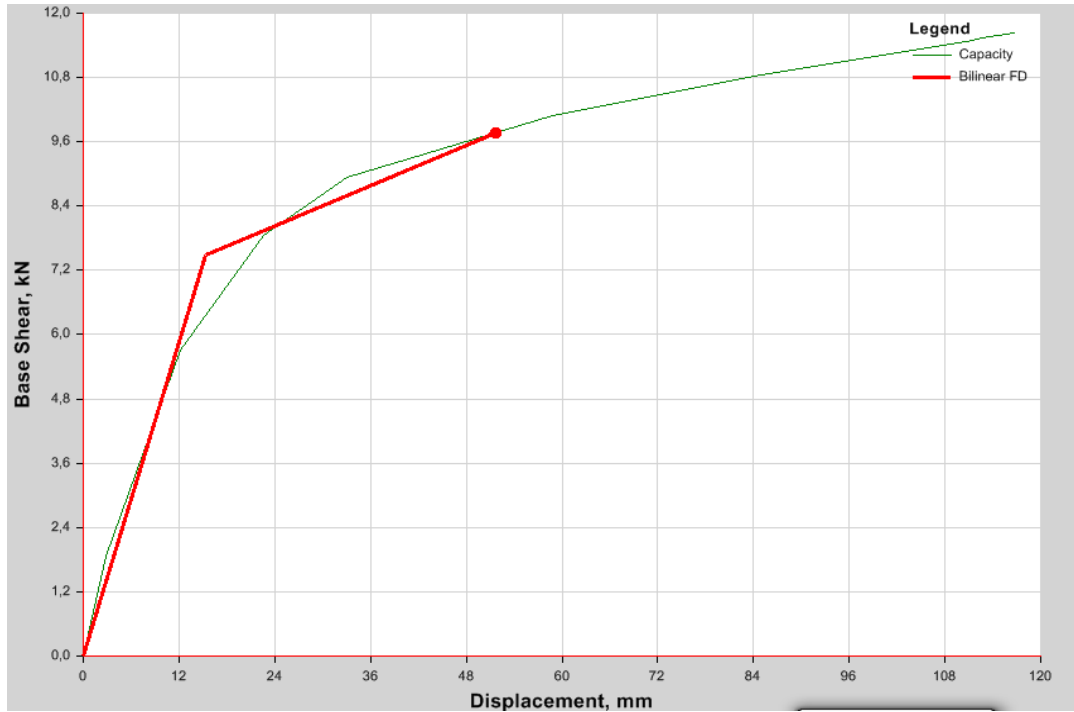
Εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής άλλη μια φορά για να προσδιοριστούν οι καινούριες ιδιομορφές του κτηρίου, λόγω της καινούριας διαμόρφωσης του. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ακόμα, αναμενόμενα, οι καινούριες ιδιομορφές του φορέα φαίνεται να έχουν χαμηλότερες ιδιοπεριόδους λόγω της συνολικής αύξησης της δυσκαμψίας του. Όπως και πριν, η 1η ιδιομορφή ελέγχει την κίνηση κατά X, με ποσοστό συμμετοχής στη συνολική μάζα 61%, η 2η την κίνηση κατά Y, με ποσοστό συμμετοχής 67% και η 3η αναφέρεται στη στροφική κίνηση περί τον Z άξονα, με ποσοστό συμμετοχής 83%.

Πίνακας 5.1 Ποσοστά ενεργοποιούμενης μάζας ιδιομορφών ενισχυμένου φορέα

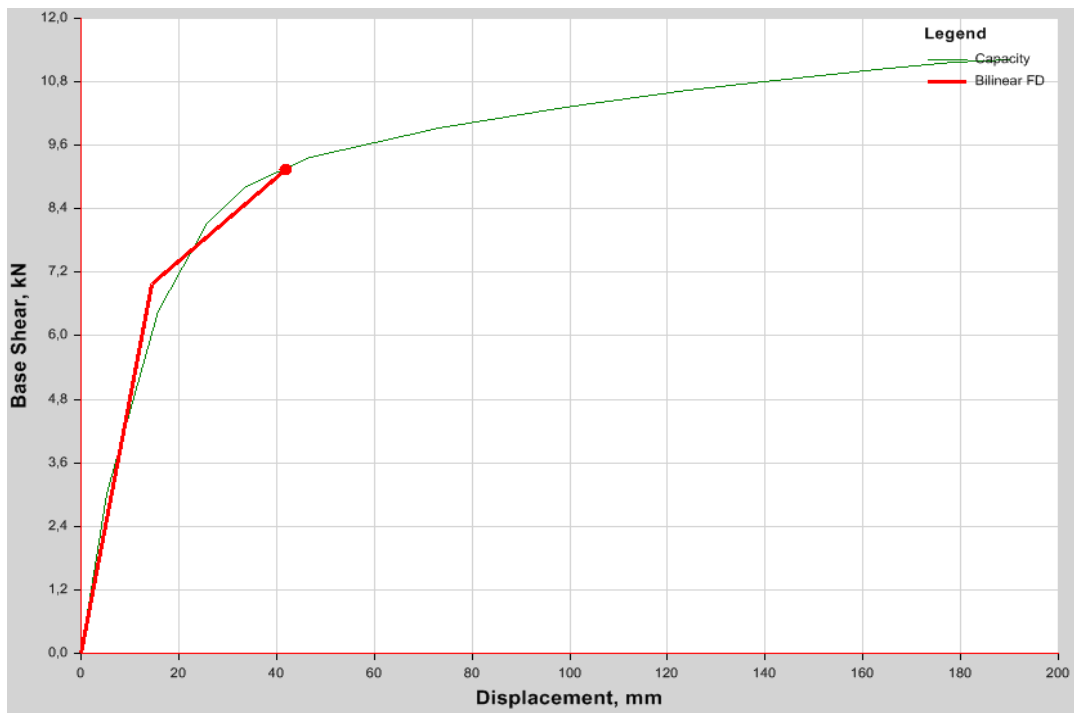
	Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	RZ
▶	Modal	1	0,273	0,614	0,296	0	0,09
	Modal	2	0,266	0,33	0,668	0	0,002
	Modal	3	0,208	0,087	0,084	0	0,829

5.2.2 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά X

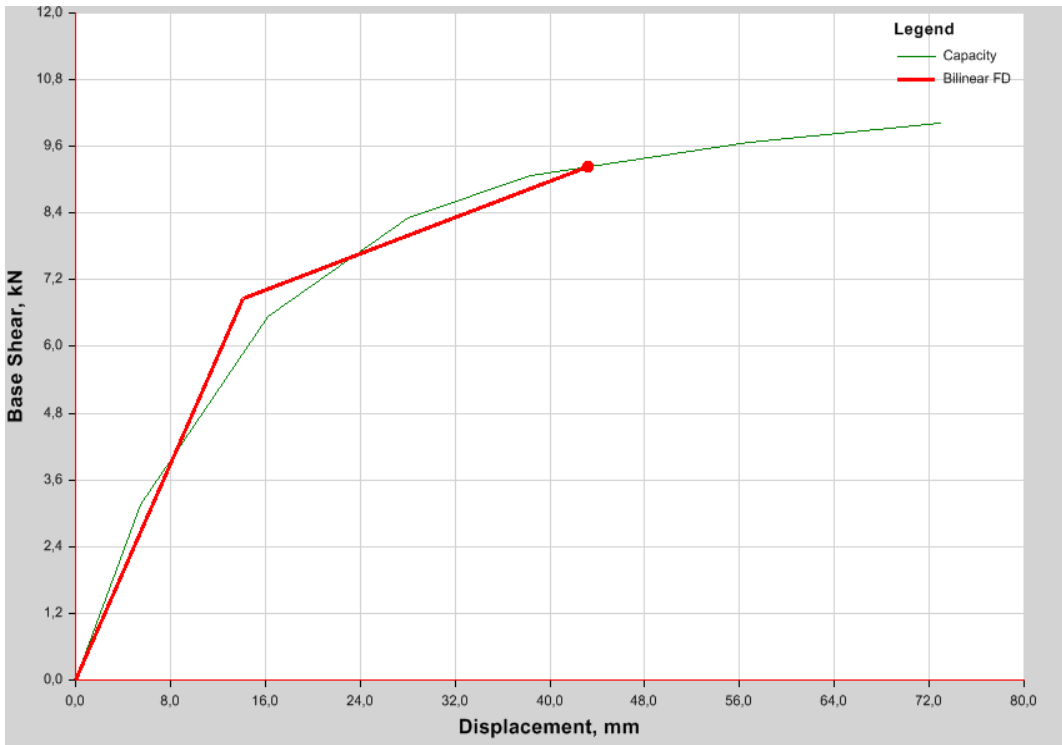
Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κορυφής για κάθε συνδυασμό φόρτισης φαίνονται στα σχήματα παρακάτω, μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες που προέκυψαν από την ανάλυση του μη ενισχυμένου φορέα. Παρατηρείται μια πιο ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς τα τοιχεία παραλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό της σεισμικής δύναμης, ενώ παράλληλα φαίνεται πως αυξάνεται και η μέγιστη φέρουσα ικανότητα της.



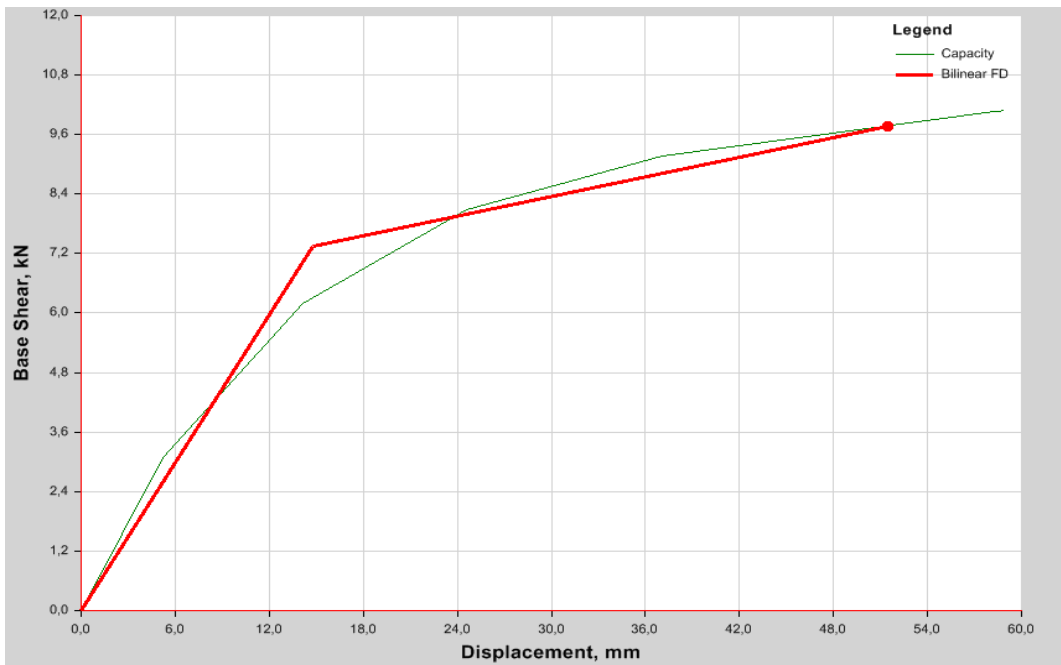
Σχήμα 5.2 Ενισχυμένος φορέας X+0,3Y



Σχήμα 5.3 Ενισχυμένος φορέας X-0,3Y



Σχήμα 5.4 Ενισχυμένος φορέας $-X+0,3Y$

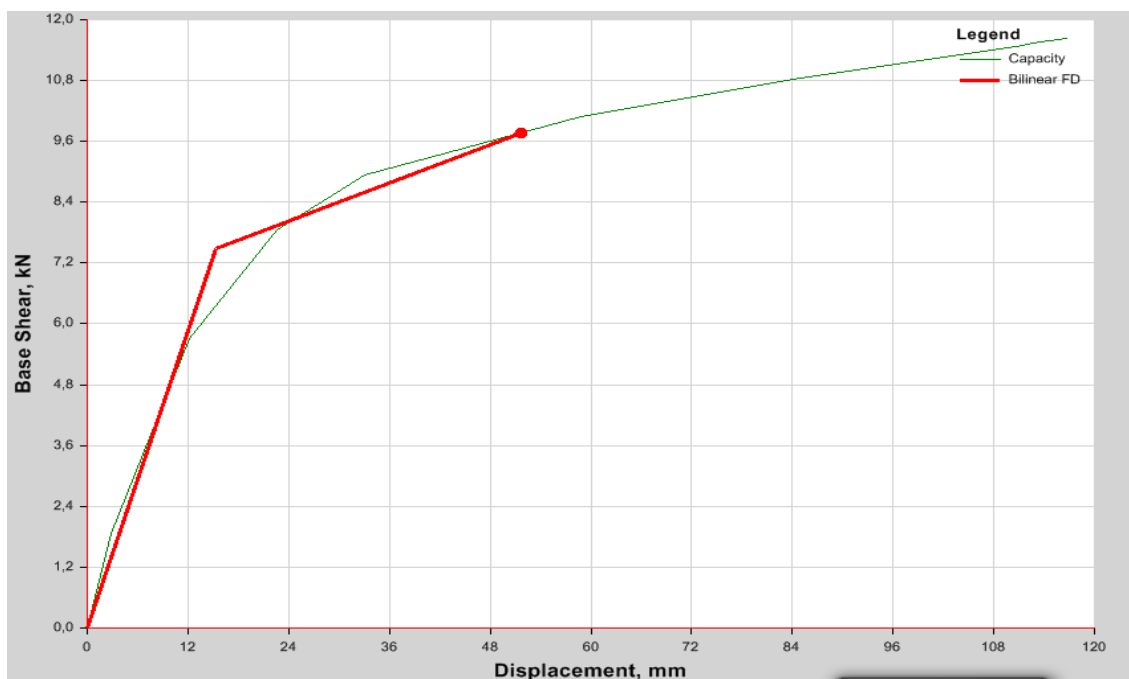


Σχήμα 5.5 Ενισχυμένος φορέας $-X-0,3Y$

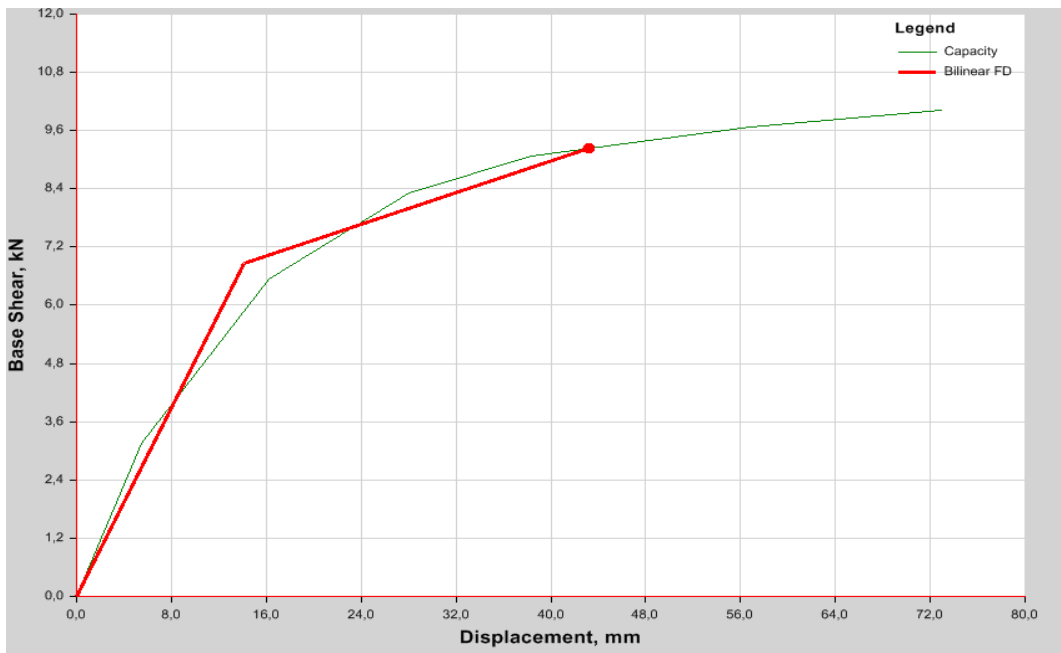
Κρίνεται λοιπόν πως οι επεμβάσεις φέρουν ευστάθεια στην κατασκευή, η οποία πλέον μπορεί και απορροφά περισσότερη σεισμική ενέργεια.

Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά Υ

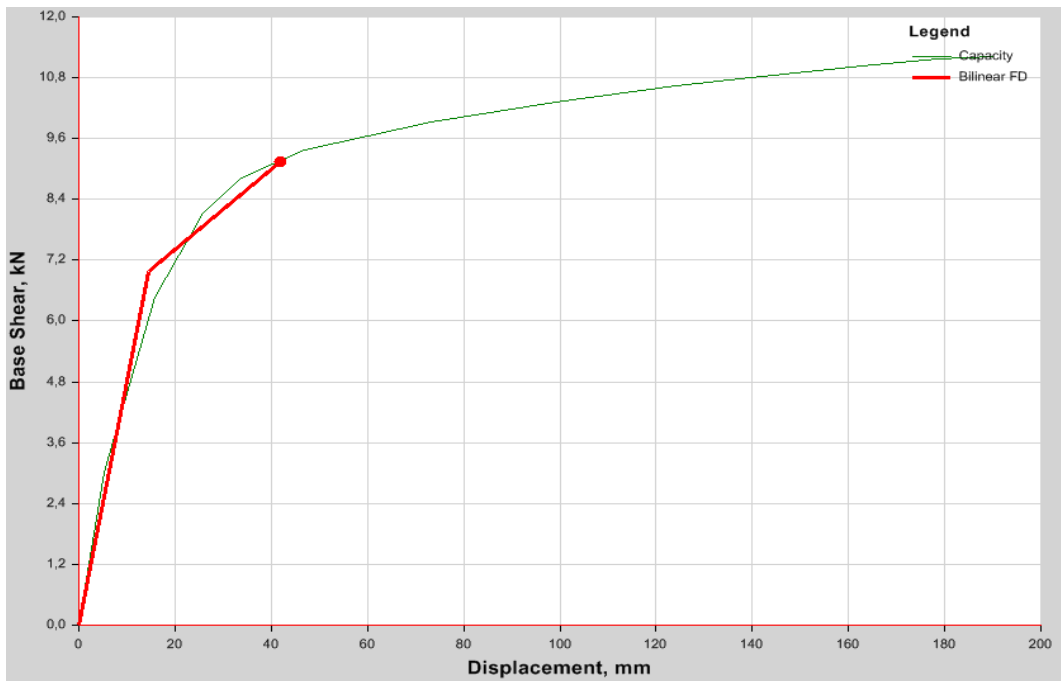
Αντίστοιχα, παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κορυφής για τους συνδυασμούς φόρτισης κατά Υ. Αντίστοιχη μεταβολή στη συμπεριφορά της κατασκευής παρατηρείται και κατά τη διεύθυνση αυτή, η οποία θεωρείται ότι προκύπτει από την τοπική αύξηση της πλαστιμότητας των μελών, μέσω των ενισχύσεων που προτείνονται αλλά και από την αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του φορέα μέσω των προσθηκών νέων τοιχείων στο φέρονται οργανισμό. Η αύξηση της δυσκαμψίας που συνεπάγεται η προσθήκη των τοιχείων επιτρέπει παραλαβή από το φορέα μεγαλύτερων σεισμικών δυνάμεων ενώ η κατασκευή αποκτά μεγαλύτερη ευστάθεια και ο καινούριος μηχανισμός κατάρρευσης που αναπτύσσει επιτρέπει την αύξηση επιτρεπόμενων παραμορφώσεων.



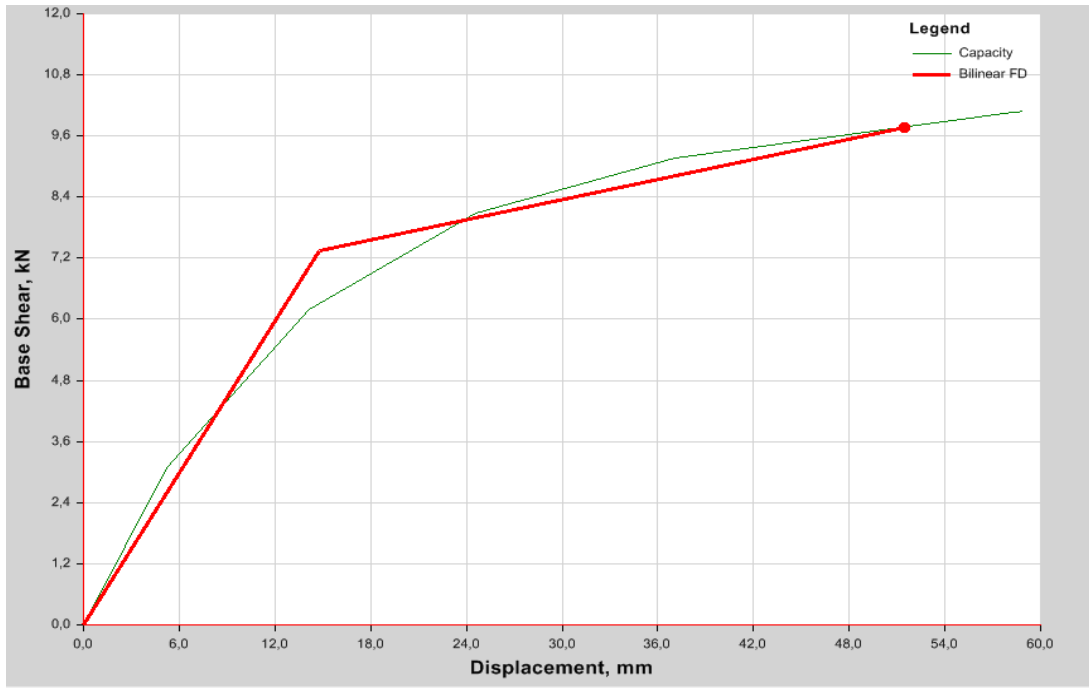
Σχήμα 5.6 Ενισχυμένος φορέας Υ+0,3Χ



Σχήμα 5.7 Ενισχυμένος φορέας Υ-0,3Χ



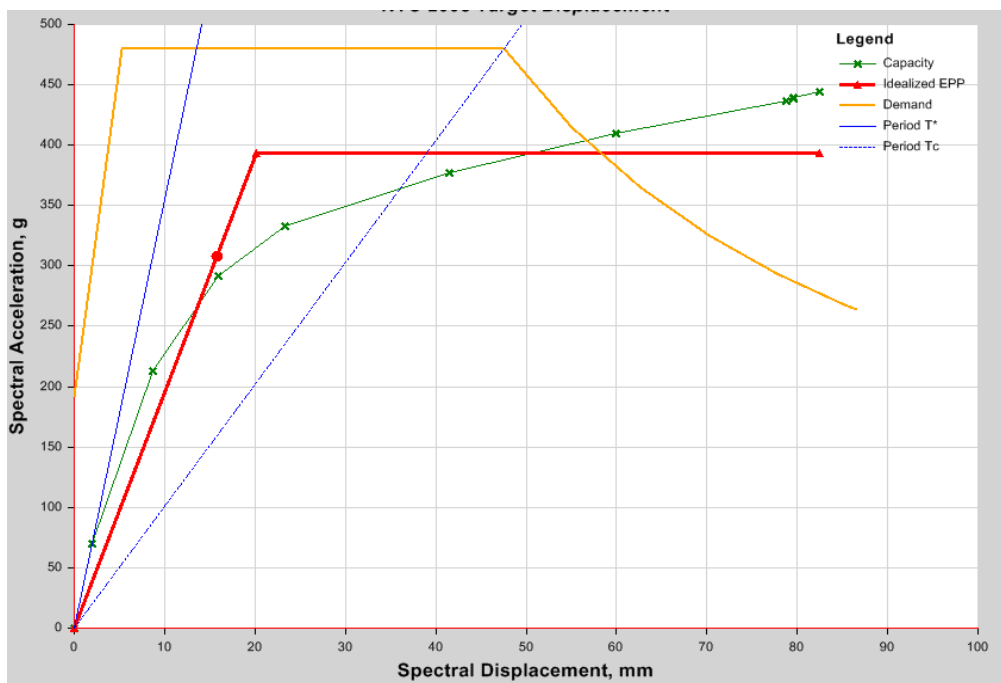
Σχήμα 5.8 Ενισχυμένος φορέας -Υ-0,3Χ



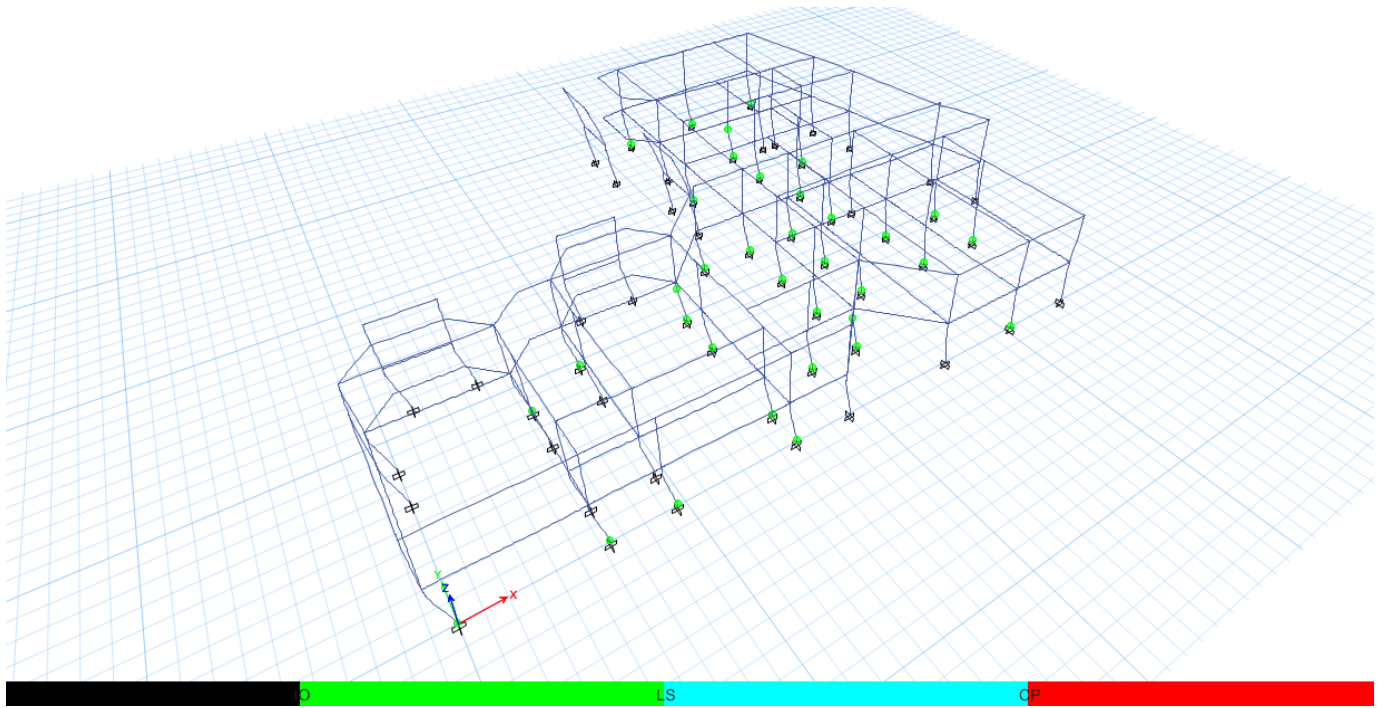
Σχήμα 5.9 Ενισχυμένος φορέας $-Y+0,3X$

5.2.4 ADRS καμπύλη κατά X

Οι καμπύλες διγραμμοποιούνται και μετατρέπονται σε μορφή ADRS για τη σύγκρισή τους με το φάσμα απαίτησης του Ευρωκώδικα 8. Για τη μετατροπή σε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα θεωρείται ότι η κατασκευή ταλαντώνεται σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή.



Σχήμα 5.10 ADRS ενισχυμένου φορέα $X+0,3Y$

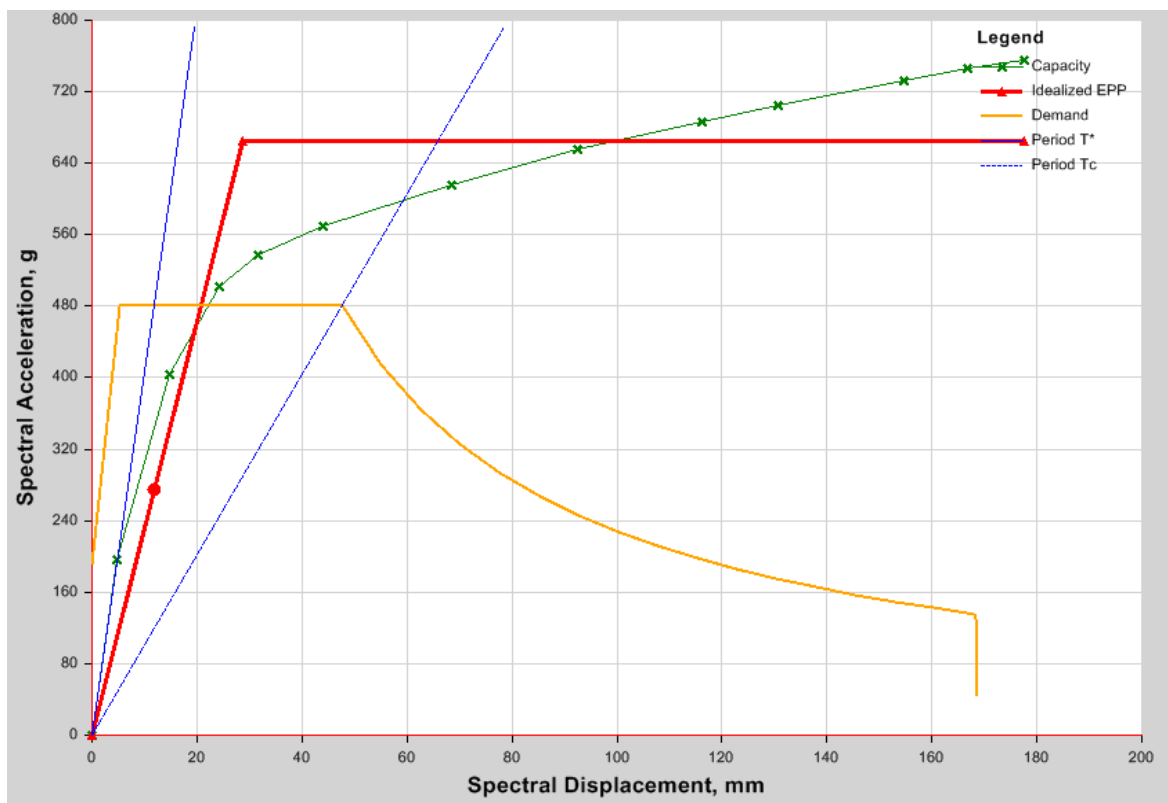


Σχήμα 5.11 Απόκριση ενισχυμένου φορέα $X+0,3Y$

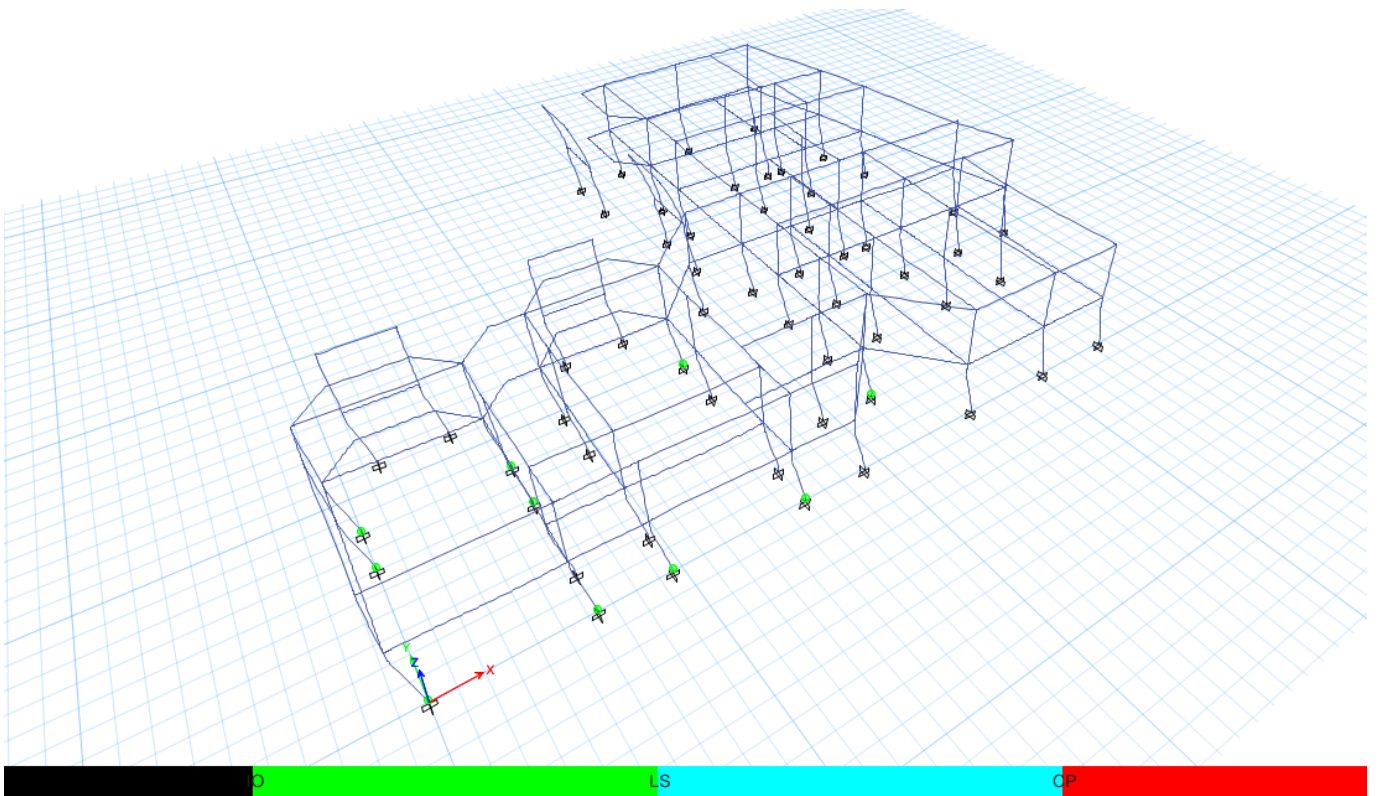
Όπως φαίνεται στον παραμορφωμένο φορέα για τη στοχευμένη μετακίνηση μόνο μερικά στοιχεία έχουν φτάσει στη στάθμη επιτελεστικότητας άμεση χρήση που βρίσκεται πριν από την προστασία ζωής για την οποία και ελέγχουμε.

5.2.5 ADRS καμπύλες κατά Υ

Η συμπεριφορά της κατασκευής κατά Υ θεωρείται ότι ορίζεται από την 2^η ιδιομορφή, βάσει της οποίας προκύπτει η καμπύλη ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματός του, διγραμμοποιημένη σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί πιο πριν. Βλέπουμε αρκετά ελαστική συμπεριφορά του φορέα μας που σημαίνει ότι για τη στοχευόμενη μετακίνηση βρίσκεται ακόμη στην ελαστική περιοχή. Το σημείο επιτελεστικότητας βρίσκεται πριν από τις στάθμες Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση, δηλαδή η ενίσχυση κρίνεται επαρκής.



Σχήμα 5.12 ADRS ενισχυμένου φορέα Υ+0,3X

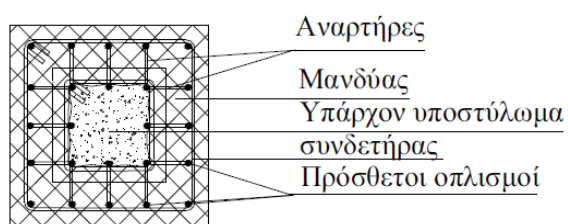
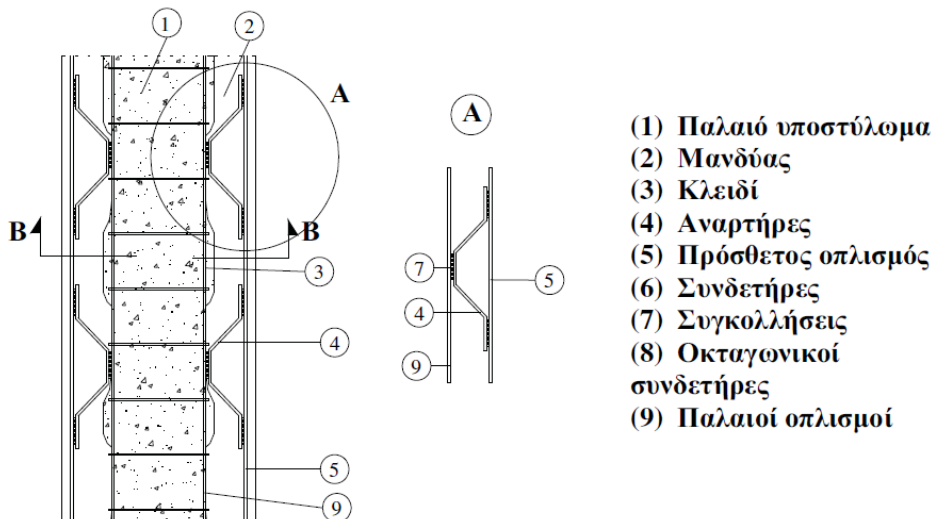


Σχήμα 5.13 Απόκριση ενισχυμένου φορέα $\gamma+0,3X$

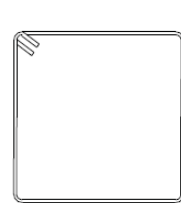
Παρατηρούμε ότι ελάχιστα στοιχεία έχουν φτάσει τη στάθμη επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση και αυτό συμβαίνει καθώς αυξήθηκε όπως φαίνεται κατά πολύ η δυσκαμψία κατά τη διεύθυνση Y.

6 Ενίσχυση του Φορέα

Για να γίνει η διαδικασία της δημιουργίας περιμετρικών τοιχείων πρέπει να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία.



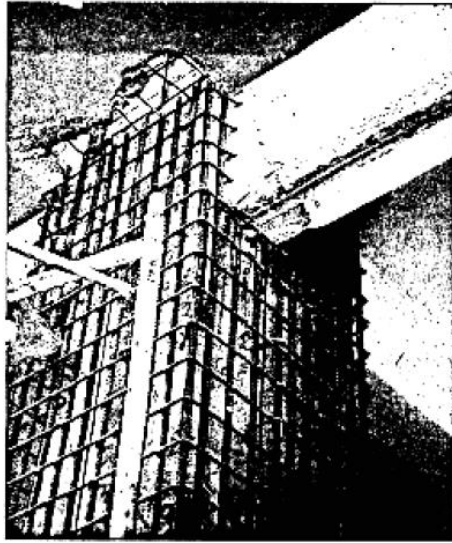
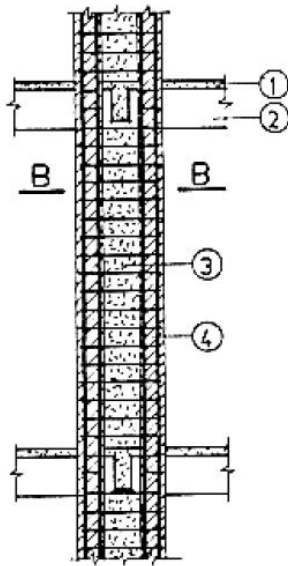
Τομή Β-Β



συνδετήρας



αναρτήρας



- (1) Υφιστάμενη πλάκα
- (2) Υφιστάμενη δοκός
- (3) Υφιστάμενο υποστύλωμα
- (4) Μανδύας

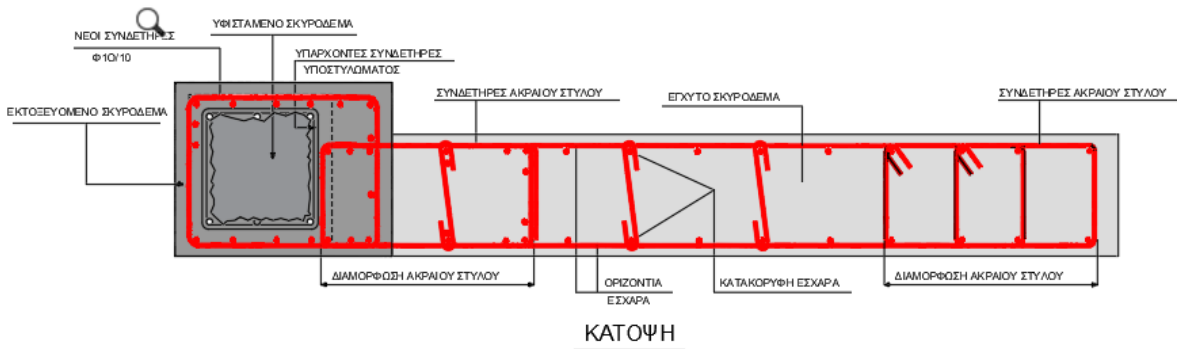
Διαδικασία κατασκευής τοιχείων.

- Αποφορτίζονται και υποστυλώνονται οι πλάκες και οι δοκοί που συντρέχουν στο υποστύλωμα.
- Απομακρύνεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και αποκαθίσταται η συνέχεια του υποστυλώματος επισκευάζοντας τις τυχόν προϋπάρχουσες τοπικές βλάβες.
- Αποκαλύπτονται οι οπλισμοί σε θέσεις που έχουν προεπιλεγεί για συγκόληση με τους νέους οπλισμούς.
- Διανοίγονται και προετοιμάζονται οι οπές στις θέσεις αγκύρωσης των νέων ράβδων οπλισμού στις θέσεις που προβλέπονται βλήτρα.
- Εκτραχύνεται η επιφάνεια του σκυροδέματος με επιμέλεια σε βάθος 6mm με κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό έτσι ώστε να απομακρυνθεί η εξωτερική επιδερμική στρώση τσιμεντοπολτού και να αποκαλυφθούν τα αδρανή.
- Καθαρίζεται επιμελώς η επιφάνεια χρησιμοποιώντας αέρα υπό πίεση, και το εσωτερικό των οπών με αναρρόφηση από τον πυθμένα.
- Αγκυρώνονται στα άκρα τους οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού με χημική πάκτωση (χρήση κόλλας). Για κατασκευαστική ευκολία είναι δυνατόν να μην αγκυρωθούν απευθείας οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού, αλλά να προηγηθεί αγκύρωση μικρότερων τμημάτων ράβδων οπλισμού επί των οποίων στη συνέχεια θα ματιστούν οι νέες ράβδοι.
- Αγκυρώνονται τα μηχανικά ή χημικά βλήτρα (εφόσον και όπου προβλέπεται).
- Τοποθετούνται και ηλεκτροσυγκολλούνται τα χαλύβδινα παρεμλήματα σύνδεσης παλαιών και νέων οπλισμών εφόσον προβλέπονται συγκολλήσεις.
- Τοποθετούνται νέοι συνδετήρες.
- Γίνεται ο τελικός καθαρισμός των επιφανειών με αέρα και νερό υπό πίεση.
- Διαβρέχεται η επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος τουλάχιστον έξι ώρες πριν τη σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος. Η διαβροχή πρέπει να γίνεται και στον ξυλότυπο.

- Σκυροδετείτε ο μανδύας και ακολουθούν τα μέτρα συντήρησης σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκτροδέματος. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται καθώς χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η συστολή ξήρανσης είναι μεγαλύτερη.
- Έπειτα γίνεται κατασκευή μονολιθικά του τοιχείου με το ενισχυμένο υποστύλωμα με έγχυτο σκυρόδεμα.

Σημείωση:

Όλοι οι σπλισμοί θα αγκυρωθούν στα υφιστάμενα τοιχεία υπογείου.



Κόστος ενίσχυσης.

Παρακάτω υπολογίζεται το κόστος των εργασιών για την ενίσχυση..

2. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ				
2.01 Καθαιρ. Πλινθοδ. με συνήθη κονίαμα	m3	11,71	11,74 €	137,48 €
2.02 Καθαιρ. Πλινθοδ. με ισχυρό κονίαμα	m3		14,68 €	
2.03 Καθαίρεσεις αόπλου σκυροδέματος	m3		41,08 €	
2.04 Καθαίρεσεις οπλισμένου σκυροδέματος	m3	19,52	64,56 €	1.260,21 €
2.05 Καθαίρεσεις επιχρισμάτων	m2	58,56	4,10 €	240,10 €
2.06 Καθαίρεσεις τοίχων δια την διαμόρφωση θυρών	τεμάχιο		14,68 €	
2.07 Καθαίρεσεις ξύλινων ή σιδηρών θυρών & παραθύρων	m2		8,80 €	
2.08 Αποξήλωση σκελετού στέγης πάσης φύσεως	m2		1,50 €	
2.09 Αποξήλωση υλικών επικάλυψης στέγης (κεραμίδια, πάνελ κτλ)	m2		0,80 €	
2.10 Αποξήλωση κιγκλιδωμάτων	m2		0,80 €	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ				1.637,78 €
3. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ - ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΣ				
3.01 Οπλισμένο σκυρόδεμα	m3		146,74 €	
3.02 Ελαφρά οπλ. σκυρόδεμα (με πλέγμα)	m3		105,64 €	
3.03 Ελαφρό Μπετόν	m3		70,44 €	
3.04 Άοπλο σκυρόδεμα δαπέδων	m2		5,86 €	
3.05 Εξισωτικές στρώσεις	m2		4,10 €	
3.06 Επιφάνειες εμφανούς σκυροδέματος	m2		5,86 €	
3.07 Σενάζ δρομικά	τρέχων μ.		7,04 €	
3.08 Σενάζ μπατικά	τρέχων μ.		11,74 €	
3.09 Μανδύας χυτού σκυροδέματος	m3	11,71	234,78 €	2.749,74 €
3.10 Μανδύας εκτοξευομένου σκυροδέματος	m2	95,26	46,96 €	4.473,30 €
3.11 Σιδηροδοσί ως φέρων οργανισμός	kg	1.405,20	1,80 €	2.529,36 €
ΣΥΝΟΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ				9.752,40 €
5. ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ				
5.01 Ασβεστοτσιμεντοκονιαματα τριπτά	m2	117,12	5,86 €	686,32 €
5.02 Τσιμεντοκονιάματα τριπτά με διογκωμένο περλίτη στη 2 στ	m2		6,46 €	
5.03 Ασβεστοτσιμεντοκονιαματα με κάλυψη σαγρε	m2		7,04 €	
5.04 Αρτιφισιέλ τριπτά	m2		8,80 €	
5.05 Επιχρίσματα χωριάτικου τύπου	m2		7,64 €	
5.06 Επιχρίσματα τραβηκτά	m2		29,34 €	
ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΩΝ				686,32 €

Άρα το σύνολο των εργασιών ανέρχεται στα 12.076,51 €.

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αποτιμάται η σεισμική συμπεριφορά κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, μελετημένης ως κτίριο εκπαιδευτηρίων σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις το 1987, με ένα ιδιαίτερο στατικό σύστημα, με τη χρήση της μεθόδου στατικής ανελαστικής ανάλυσης. Φαίνεται ότι οι κατασκευαστικές απαιτήσεις εκείνης της εποχής είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες σημερινές, με τα κτήρια της περιόδου αυτής να έχουν μικρότερο ποσοστό οπλισμού, υλικά χαμηλότερης ονομαστικής αντοχής και με χαμηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας. Συνεπώς, η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθείται κατά τη σεισμική αποτίμηση τους θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες αυτές αλλά και να εκτιμά σωστά πόσο επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά των υπό μελέτη κτηρίων.

Η μέθοδος της στατικής ανελαστικής ανάλυσης κρίνεται σχετικά απλή στην εφαρμογή, αλλά αρκετά απαιτητική σε θεωρητικό υπόβαθρο και ευαίσθητη στην προσομοίωση καθώς φάνηκε να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στα αποτελέσματα ανάλογα με τα δεδομένα που εισήχθησαν, όπως η μορφή του προφίλ των επιβαλλόμενων οριζόντιων σεισμικών φορτίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αποτίμηση. Σαν μέθοδος ανάλυσης μπορεί να παράσχει μια προσεγγιστική εκτίμηση των απαιτούμενων παραμορφώσεων των κρίσιμων διατομών της κατασκευής, να ανιχνεύσει περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλες απαιτήσεις και παραμορφώσεις καθώς και να αξιολογήσει την ευστάθεια της συνολικά. Έτσι για την προκαταρκτική μελέτη μιας κατασκευής που έχει στόχο τη δημιουργία μιας εικόνας της απόκρισης ενός δομήματος κατά τη διάρκεια της σεισμικής δράσης κρίνεται επαρκής και αξιόπιστη.

Τα γραμμικά στοιχεία του κτηρίου κρίνονται ανεπαρκώς οπλισμένα, κυρίως εάν συγκριθεί η διαστασιολόγησή τους με τη διαστασιολόγηση που θα προέκυπτε βάσει των κανονισμών που ισχύουν σήμερα. Η ανεπάρκεια οπλισμού διαφαίνεται εντονότερα στον εγκάρσιο οπλισμό, ιδιαίτερα στα υποστύλωματα, τα οποία δεν έχουν τον απαραίτητο οπλισμό διάτμησης, πόσο μάλλον περίσφιγξης, για να μπορέσουν να αποκριθούν με πλάστιμο τρόπο.

Η επίδραση της τοιχοποιίας δεν κρίνεται μεγάλης σημασίας για την απόκριση του φορέα μέσω της ευμενούς επιρροής της στην αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής καθώς η διάταξη των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη δεν παρουσιάζει κανονικότητα. Παρόλα αυτά θεωρείται χρήσιμη η μελέτη της επίδρασής της σε σχέση με την αύξηση της δυσκαμψίας και τη συνεπακόλουθη αλλαγή του τρόπου απόκρισης του φορέα. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η προσομοίωση της τοιχοποιίας είναι πολλοί και δεν έχουν δοκιμαστεί όλοι πλήρως. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και αντίστοιχων έργων οι διαγώνιοι θλιπτήρες θεωρούνται εύχρηστο και απλό εργαλείο, που συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους που έχουν προταθεί δε δημιουργεί ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο. Επίσης εκτιμάται η δυσμενής επίδραση της τοιχοποιίας λόγω μη κανονικότητας της διάταξής τους σε κάτοψη.

Το κτίριο παρά τις παθογένειές του, φαίνεται να έχει, αν και ανεπαρκή για τους στόχους που έχουν τεθεί, μια καλή συμπεριφορά έναντι σεισμικής φόρτισης, ιδιαίτερα εάν ληφθεί υπόψη η ευμενής επίδραση της τοιχοποιίας στη συνολική δυσκαμψία και απόκριση της κατασκευής. Προτείνεται η ενίσχυσή με περιμετρικά τοίχωμα, έτσι ώστε να υπερβεί τις σεισμικές απαιτήσεις και να μπορέσει να αντεπεξέλθει στις αναμενόμενες σεισμικές δράσεις. Παράλληλα, παρατηρώντας ότι πολλά υποστυλώματα, κρίσιμα για το μηχανισμό ανάληψης φορτίων αστοχούν με ψαθυρό τρόπο προτείνεται η ενίσχυση τους με μανδύες, για να αποκτήσουν μια πιο πλάστιμη συμπεριφορά.

Η προτεινόμενη μέθοδος ενίσχυσης φαίνεται να λειτουργεί, καθώς παρατηρείται ότι ο φορέας πλέον είναι σε θέση να φέρει τα οριζόντια φορτία του σεισμού αποτίμησης. Τα τοίχωμα, που προτείνεται να κατασκευαστούν προσφέρουν σημαντική δυσκαμψία στην κατασκευή, πράγμα που φαίνεται και από την ιδιομορφική απόκριση του κτιρίου, ενώ λειτουργικά δεν εμποδίζει κάποια λειτουργία, καθώς τα φαντώματα που προτείνεται να κατασκευαστεί είναι πλήρως τοιχοπληρωμένα.

8 Βιβλιογραφία

Αβραμίδης Ι., Αθανατοπούλου Α., Μορφίδης Κ., Σέξτος Α. (2017) ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ Ο/Σ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

Ζέρης Χ., Σταθόπουλος Χ. (2008). ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΣ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΙΣ

Κίρτας Ε., Παναγόπουλος Γ. (2015) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Δ.Κ. Μπάρος, Σ. Η. Δρίτσος (2006). ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΔΟΧΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Νικολάου Α. (2017). ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΑ ΕΛΑΦΡΩΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ, Διπλωματική Εργασία

Παναγόπουλος Γ, Κάππος Α. Ι (2009). ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Ρεπαπής Κ., Ζέρης Χ., Βιντζηλαίου Ε. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΠΕΡΑΝΤΟΧΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟ Ω.Σ.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) (2017). ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2^η Αναθεώρηση.

Πενέλης Γ. Γ., Κάππος Α.Ι. (1990). ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ψυχάρης Ι.Ν. (2015). ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Computers&Structures Inc. (2005) CSI ANALYSIS REFERENCE MANUAL

Paulay T., Priestley M.J.N (1996). ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

Tomazevic Miha (2004). ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ [μετάφραση Φυλλίτσα Καραντώνη].

ΟΑΣΠ (2001) : «Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια»

Σπυράκος Κων/νος (2004) : «Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία»