



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αποτίμηση έναντι σεισμού και ενίσχυση
υφιστάμενης κατασκευής από οπλισμένο
σκυρόδεμα στην περιοχή της Καλαμάτας

Διπλωματική Εργασία

Μαρία Ξενούλη

Επιβλέπων: Εμμανουήλ Βουγιούκας

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου κ. Εμμανουήλ Βουγιούκα, για τη βοήθεια του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, τόσο με τις γνώσεις του αλλά και με την οπτική του στα διάφορα ζητήματα που ανέκυψαν.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ιωάννη Καπογιάννη για τη βοήθεια που μου πρόσφερε σε θέματα λογισμικού.

Ακόμα, ευχαριστώ τον κ. Βασίλειο Τζαμουράνη, διευθυντή της Τεχνικής Υπηρεσίας του Δήμου Καλαμάτας για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα υφιστάμενο κτήριο, παρέχοντας μου όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που διέθετε, αλλά και την κ. Ιωάννα Ραβάνη, Αναπληρώτρια Υπεύθυνη ΚΠΕ Καλαμάτας που μου επέτρεψε να περιηγηθώ στο υπό μελέτη κτήριο, δίνοντάς μου χρήσιμες υποδείξεις για τις παθογένειές του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συνεχή υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Αντικείμενο Εργασίας.....	1
2	Βασικές έννοιες αντισεισμικού σχεδιασμού και αποτίμησης.....	2
2.1	Γενικά.....	2
2.2	Σεισμική δράση	3
2.3	Πλαστιμότητα.....	3
2.3.1	Πλάστιμα και ψαθυρά στοιχεία	4
2.4	Στάθμες Επιτελεστικότητας κατασκευής.....	5
2.5	Πλαστικές Αρθρώσεις	5
2.6	Καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου.....	6
2.7	Καμπύλη ικανότητας.....	7
2.8	Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας.....	8
2.9	Δημιουργία ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος	9
2.10	Τοιχοποιία.....	9
2.11	Σεισμική αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών	10
2.11.1	Γενικά.....	10
2.11.2	Στατική ανελαστική ανάλυση.....	11
2.11.3	Αποτίμηση συμπεριφοράς	11
3	Περιγραφή και Προσομοίωση Κατασκευής	12
3.1	Γενικά.....	12
3.2	Λογική σχεδιασμού του υπό μελέτη φορέα	13
3.3	Περιγραφή κτηρίου	14
3.3.1	Κοντά υποστυλώματα.....	14
3.3.2	Κλειστός εξώστης με φυτευτά υποστυλώματα.....	14
3.3.3	Αποφλοίωση σκυροδέματος και ενανθράκωση οπλισμών	15
3.4	Προσομοίωση φορέα.....	16
3.4.1	Γενικά.....	16
3.4.2	Υλικά.....	18
3.4.3	Γραμμικά Στοιχεία	19
3.4.4	Επιφανειακά Στοιχεία	19
3.4.5	Διαγώνιοι θλιπτήρες τοιχοποιίας	20
3.4.6	Στηρίξεις	20

3.4.7	Φορτία Βαρύτητας	20
3.4.8	Σεισμικά Φορτία	21
3.4.9	Ταλαντούμενη Μάζα	22
3.4.10	Πλαστικές Αρθρώσεις.....	22
4	Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς	24
4.1	Ιδιομορφική ανάλυση.....	24
4.2	Εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων	24
4.3	Καθορισμός παραμέτρων στατικής ανελαστικής ανάλυσης.....	25
4.4	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης.....	25
4.4.1	Κατά Χ.....	25
4.4.2	Κατά Υ.....	29
4.5	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης με συνεκτίμηση της τοιχοποιίας.....	32
4.5.1	Κατά Χ.....	32
4.5.2	Κατά Υ.....	34
5	Προτάσεις επέμβασης στην κατασκευή.....	36
5.1	Γενικά.....	36
5.1.1	Επεμβάσεις.....	36
5.1.2	Επισκευές.....	36
5.1.3	Ενισχύσεις.....	36
5.1.4	Ψαθυρή συμπεριφορά υποστυλωμάτων	36
5.2	Αποτίμηση συμπεριφοράς μετά την ενίσχυση	37
5.2.1	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	38
5.2.2	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά Χ.....	39
5.2.3	Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά Υ.....	41
5.2.4	ADRS καμπύλες κατά Χ.....	43
5.2.5	ADRS καμπύλες κατά Υ.....	44
6	Συμπεράσματα	45
7	Βιβλιογραφία	48

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την αποτίμηση της συμπεριφοράς έναντι σεισμού υφιστάμενης κατασκευής, μελετημένης το 1975 στην περιοχή της Καλαμάτας. Για τη σεισμική αποτίμηση χρησιμοποιήθηκαν κατά βάση οι διατάξεις του Ελληνικού Κανονισμού Επεμβάσεων. Κατόπιν, λόγω ανεπάρκειας της κατασκευής σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς προτείνεται ενίσχυσή της και αποτιμάται η συμπεριφορά της ενισχυμένης κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή προσομοιώνεται στο λογισμικό ETABS v15.2.0 και εκτιμάται η φέρουσα ικανότητά του φορέα, με συνεκτίμηση της συνεισφοράς της τοιχοποιίας και μη, με χρήση της μεθόδου στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover). Στη συνέχεια ενισχύεται και εκτελείται μια ακόμη ανάλυση pushover στον καινούριο φορέα για να ελεγχθεί η επάρκειά του.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται 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 1975, in Kalamata. For the seismic assessment there were used the regulations of the Greek Code of Retrofitting. Thence, due to the inadequacy of the construction according to the existing regulations, a retrofitting method is proposed and the behavior of the construction is evaluated again.

More specifically, the construction is simulated using the software ETABS v15.2.0 and the carrying capacity of the building is estimated, considering the contribution of the masonry as well, using the method of static inelastic analysis (pushover). Then, the building is retrofitted and is subjected to another pushover analysis to check its adequacy.

Finally, the conclusions are presented after creating of the model, evaluating 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.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1 ΠΛΑΣΤΙΜΗ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΛΟΥΣ	4
ΣΧΗΜΑ 2.2 ΠΙΘΑΝΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΛΟΥΣ	6
ΣΧΗΜΑ 2.3 ΙΔΕΑΤΗ ΚΑΜΠΥΛΗ F-Δ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	7
ΣΧΗΜΑ 2.4 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	8
ΣΧΗΜΑ 2.5 ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	8
ΣΧΗΜΑ 2.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΘΛΙΒΟΜΕΝΗ ΡΑΒΔΟΣ - ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	10
ΣΧΗΜΑ 2.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΔΟΠΛΗΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΗΣ	10
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΟΡΕΑ	12
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΟΠΛΙΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΓΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	13
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΘΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	14
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΚΛΕΙΣΤΟΣ ΕΞΩΣΤΗΣ ΣΤΟΝ ΟΡΟΦΟ	15
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	15
ΣΧΗΜΑ 3.6 ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΤΟΥ ΟΡΟΦΟΥ	16
ΣΧΗΜΑ 3.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	17
ΣΧΗΜΑ 3.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	17
ΣΧΗΜΑ 3.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	18
ΣΧΗΜΑ 3.10 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ	19
ΣΧΗΜΑ 3.11 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΘΛΙΠΤΗΡΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ	20
ΣΧΗΜΑ 3.12 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	21
ΣΧΗΜΑ 3.13 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ ΔΟΚΟΥ	22
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ X+0,3Y	26
ΣΧΗΜΑ 4.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ X-0,3Y	26
ΣΧΗΜΑ 4.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ -X+0,3Y	26
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ -X-0,3Y	27
ΣΧΗΜΑ 4.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ADRS ΦΟΡΕΑ ΚΑΤΑ X	28
ΣΧΗΜΑ 4.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ Y+0,3X	29
ΣΧΗΜΑ 4.7 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ Y-0,3X	29
ΣΧΗΜΑ 4.8 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ -Y-0,3X	30
ΣΧΗΜΑ 4.9 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ -Y+0,3X	30
ΣΧΗΜΑ 4.10 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ADRS ΦΟΡΕΑ ΚΑΤΑ Y	31
ΣΧΗΜΑ 4.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ X+0,3Y	32
ΣΧΗΜΑ 4.12 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ X-0,3Y	32
ΣΧΗΜΑ 4.13 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ -X+0,3Y	33
ΣΧΗΜΑ 4.14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ -X-0,3Y	33
ΣΧΗΜΑ 4.15 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ Y+0,3X	34
ΣΧΗΜΑ 4.16 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ Y-0,3X	34
ΣΧΗΜΑ 4.17 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ -Y-0,3X	35
ΣΧΗΜΑ 4.18 ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ -Y+0,3X	35
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΦΟΡΕΑ ΜΕ Α) ΥΠΟΣΤΥΛΩΣΗ ΠΛΑΚΑΣ Β) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΙΧΙΟΥ	37
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ X+0,3Y	39
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ X-0,3Y	39
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ -X+0,3Y	40
ΣΧΗΜΑ 5.5 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ -X-0,3Y	40
ΣΧΗΜΑ 5.6 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ Y+0,3X	41
ΣΧΗΜΑ 5.7 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ Y-0,3X	41
ΣΧΗΜΑ 5.8 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ -Y-0,3X	42
ΣΧΗΜΑ 5.9 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ -Y+0,3X	42
ΣΧΗΜΑ 5.10 ADRS ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΚΑΤΑ X	43
ΣΧΗΜΑ 5.11 ADRS ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΚΑΤΑ Y	44

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΤΙΜΕΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ	38

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η Ελλάδα είναι μια χώρα στην οποία εκδηλώνονται σεισμοί που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες ανθρώπινες και υλικές απώλειες. Με αφετηρία το 1959, όπου συντάχθηκε και άρχισε να ισχύει ο πρώτος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, γίνονται προσπάθειες θέσπισης μεθοδολογιών και κριτηρίων σχεδιασμού με στόχο την προστασία έναντι σεισμού των νέων κατασκευών. Από τότε και μέχρι σήμερα δημιουργούνται καινούριοι κανονισμοί και εμπλουτίζονται οι παλαιότεροι, με τις αναγκαίες τροποποιήσεις, συμπληρώσεις και διευκρινήσεις, με κριτήριο τις εξελίξεις στην τεχνολογία και την επιστήμη, αλλά και την αποτίμηση της απόκρισης των υφιστάμενων κατασκευών σε σεισμούς που έχουν συμβεί. Με αυτό τον τρόπο έχουν δημιουργηθεί διάφορες γενιές κτηρίων, με τα δικά τους ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, ανάλογα με τον κανονισμό που υιοθετήθηκε κατά τη μελέτη τους.

Η υιοθέτηση μιας λογικής σχεδιασμού, μεθόδου υπολογισμών ή και ακόμη τεχνικής επισκευών και ενισχύσεων αποτελεί μια μεγάλη ευθύνη για το μελετητή μηχανικό. Ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), δημιουργήθηκε με σκοπό να βοηθήσει το μελετητή στην προσπάθεια του να κατανοήσει τις ποικίλες συμπεριφορές των υπαρχόντων δομημάτων, και ύστερα να τις τροποποιήσει και να τους προσδώσει τις επιθυμητές, εάν αυτό κριθεί σκόπιμο.

1.2 Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση ενός υφιστάμενου βιομηχανικού κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, σχεδιασμένου το 1975, η αποτίμηση της σεισμικής επάρκειας του και η διατύπωση ενδεχόμενων προτάσεων ενίσχυσης. Σκοπός της αποτίμησης είναι η εκτίμηση της διαθέσιμης φέρουσας ικανότητας του κτηρίου και ο έλεγχος ικανοποίησης των ελάχιστων υποχρεωτικών απαιτήσεων που επιβάλλονται από τους κανονισμούς.

Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά του κτηρίου ελέγχεται σύμφωνα με τη χρήση σύγχρονων κανονισμών και διατάξεων όπως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο Ευρωκώδικας 8 και η προσομοίωση και ανάλυση του κτηρίου γίνονται στο λογισμικό ETABS 2015 V15.0.0

Στα Κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται η πορεία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι απαραίτητες έννοιες που θα πρέπει να κατανοηθούν για να διεξαχθεί μια διαδικασία σεισμικής αποτίμησης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του φορέα στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αποτίμηση της κατασκευής με τη μέθοδο της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης. Στο Κεφάλαιο 5 προτείνονται μέθοδοι επέμβασης στην κατασκευή με σκοπό τη βελτίωση της συμπεριφοράς του. Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται γενικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις σε σχέση με την αποτίμηση της κατασκευής και τη μέθοδο που προτάθηκε για την ενίσχυσή της.

2 Βασικές έννοιες αντισεισμικού σχεδιασμού και αποτίμησης

2.1 Γενικά

Προκειμένου να εκπονηθούν αξιόπιστες μελέτες, ο μελετητής δομοστατικός μηχανικός θα πρέπει να αντιληφθεί το σκεπτικό που διέπει τον σχεδιασμό των κατασκευών, τις θεμελιώδεις βάσεις σχεδιασμού τους. Το σκεπτικό αυτό αναφέρεται στην επιλογή των φορτίων και δυνάμεων σχεδιασμού, στις τεχνικές και διαδικασίες που ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό, στις προτιμήσεις μας για συγκεκριμένες διαμορφώσεις δομικών συστημάτων και υλικών αλλά και στους στόχους που έχουν τεθεί για οικονομική βελτιστοποίηση. Επιπλέον, επειδή τυπικά αποδεχόμαστε υψηλότερο κίνδυνο βλάβης από σεισμικές δυνάμεις σχεδιασμού παρά από άλλα συγκρίσιμα ακραία φορτία (π.χ. μέγιστο κινητό φορτίο), το σημαντικότερο θέμα που καλείται να κατανοήσει εις βάθος ο μελετητής είναι το σκεπτικό που αναφέρεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Η ιδιαιτερότητα της σεισμικής δράσης έναντι των υπόλοιπων φορτίσεων στις οποίες πρέπει να αντέχει μια κατασκευή προκύπτει από δύο, κυρίως, λόγους. Πρώτον, οι παράμετροι του σεισμού που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατασκευών είναι πολυάριθμες και εκτιμώνται μόνο με πιθανοτικό τρόπο και δεύτερον, οι πολύ υψηλές επιταχύνσεις που ενδέχεται να δεχτεί μια κατασκευή στη διάρκεια ζωής της, έχουν σχετικά μικρή πιθανότητα εκδήλωσης. Αυτή η τυχηματικότητα της σεισμικής δράσης, οδηγεί και σε πιθανολογικό καθορισμό των παραμέτρων αντισεισμικού σχεδιασμού.

Ακόμα και εάν καταφέρει να καθοριστεί ο μέγιστος σεισμός που θα εμφανιστεί σε μια περιοχή, η απαίτηση να κατασκευάζονται όλα τα κτήρια έτσι ώστε να αντέχουν αυτό το σεισμό χωρίς καμία βλάβη (ελαστικά), η απαίτηση δηλαδή για πλήρη αντισεισμική προστασία θεωρείται οικονομικά επαχθής, διότι θα απαιτούνταν η μεταφορά πόρων από άλλους τομείς ζωτικής σημασίας για το κοινωνικό σύνολο. Είναι λοιπόν συνηθισμένο να γίνεται σχεδιασμός για αντοχές που είναι κλάσμα της αντοχής που αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή και να προσδοκούμε ότι οι κατασκευές θα επιβιώσουν από ένα σεισμό με τη βοήθεια μεγάλων ανελαστικών παραμορφώσεων και διάχυσης ενέργειας που αντιστοιχούν σε σοβαρή καταπόνηση του υλικού.

Η έμφαση στο σχεδιασμό μετατίθεται λοιπόν από την αντίσταση στις σεισμικές δυνάμεις, στην υπεκφυγή αυτών των δυνάμεων. Η μετελαστική συμπεριφορά των κατασκευών αποτελεί βασικό κριτήριο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, καθώς είναι αποδεκτό ότι κάποιες μετελαστικές μορφές παραμόρφωσης οδηγούν στην αστοχία, ενώ κάποιες άλλες παρέχουν πλαστιμότητα. Έτσι ενθαρρύνεται περισσότερο η χρήση μορφών κατασκευών που είναι πιθανότερο να διαθέτουν πλαστιμότητα παρά αυτών που δεν τη διαθέτουν μέσω διατάξεων που συντελούν στην κανονικότητα της κατασκευής και με προσεκτική επιλογή των θέσεων που αναπτύσσονται μετελαστικές παραμορφώσεις (πλαστικές αρθρώσεις).

Έτσι, καθώς η πλήρης αποφυγή των βλαβών κατά τη διάρκεια ενός σεισμού κρίνεται αδύνατη, προτάθηκαν από την Ένωση Δομοστατικών Μηχανικών της Καλιφόρνια το 1967 και θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως ελάχιστες απαιτήσεις σεισμικής επίδοσης των κατασκευών οι εξής θεμελιώδεις στόχοι σχεδιασμού:

- Για συχνούς και μικρής έντασης (ασθενείς) σεισμούς, που εκδηλώνονται περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, η κατασκευή πρέπει να παραμείνει ελαστική, δηλαδή να μην υποστεί ζημιές.

- Για μέσης έντασης σεισμούς, που εκδηλώνονται περιστασιακά (λίγες φορές) κατά τη συμβατική διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, γίνονται αποδεκτές και επιδιορθώσιμες βλάβες, κυρίως σε μη φέροντα στοιχεία.
- Για ισχυρούς σεισμούς, που εκδηλώνονται σπάνια και έχουν ένταση τουλάχιστον της ίδιας τάξης με τους ισχυρότερους σεισμούς που εκδηλώθηκαν ή εκτιμάται ότι θα εκδηλωθούν στην περιοχή της κατασκευής, γίνονται αποδεκτές μεγαλύτερες, ακόμη και εκτεταμένες, βλάβες στο φέροντα οργανισμό, αλλά λαμβάνονται μέτρα ώστε η πιθανότητα κατάρρευσης να είναι επαρκώς μικρή.
- Σημαντικά για το κοινωνικό σύνολο κτήρια και κτήρια των οποίων η κατάρρευση θα προκαλούσε σημαντικές απώλειες σε μια ευρύτερη περιοχή θα πρέπει ακόμα και μετά από έναν ισχυρό σεισμό να παραμείνουν λειτουργικά.

Η παραπάνω φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού υιοθετείται από τους περισσότερους κανονισμούς για την αποτίμηση και ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών.

2.2 Σεισμική δράση

Το επίπεδο της σεισμικής δράσης ορίζεται σε σχέση με την περίοδο επανάληψης T_R σεισμού για πιθανότητα υπέρβασης p του μεγέθους σχεδιασμού σε t_d χρόνια. Χρησιμοποιούνται λοιπόν διάφορες τιμές για την εδαφική επιτάχυνση a_{gR} , που έχουν προκύψει από μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας και αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς $T_R=475$ χρόνια, δηλαδή κατά μέσο όρο συμβαίνουν μία φορά κάθε 475 χρόνια. Θεωρώντας ότι οι σεισμοί που συμβαίνουν σε κάθε περιοχή ακολουθούν την κατανομή Poisson, περίοδος επανάληψης 475 χρόνια σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα 10% να συμβεί σεισμός στα επόμενα 50 χρόνια (συνήθης διάρκεια ζωής των κατασκευών), ο οποίος θα προκαλέσει εδαφική επιτάχυνση μεγαλύτερη από a_{gR} . Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες ορίζονται διαφορετικές εδαφικές επιταχύνσεις a_{gR} , όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 Τιμές ενεργού επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών στην Ελλάδα. Πέρα από την περιοχή στην οποία βρίσκεται η κατασκευή, για τον προσδιορισμό της εδαφικής επιτάχυνσης που θα χρησιμοποιηθεί λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως η σπουδαιότητα του κτηρίου καθώς και το έδαφος στο οποίο αυτό εδράζεται.

Πίνακας 2.1 Τιμές ενεργού επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών στην Ελλάδα

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} (g)
Z1	0,16
Z2	0,24
Z3	0,36

2.3 Πλαστιμότητα

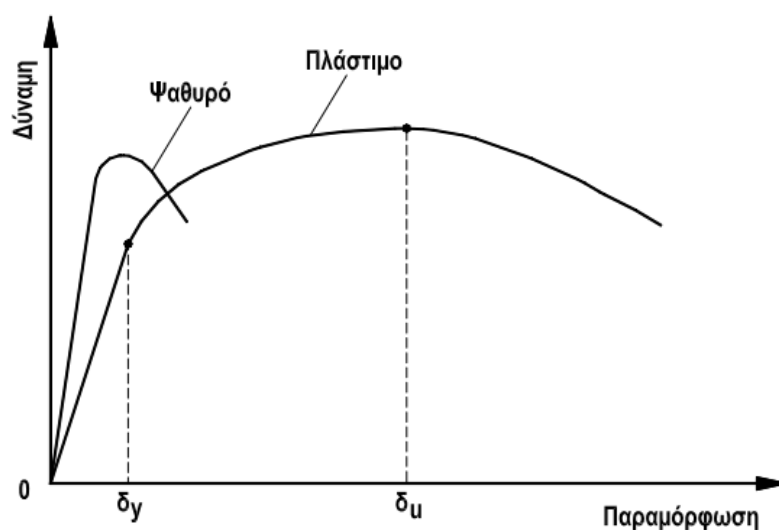
Η σεισμική ικανότητα ενός στοιχείου ή και ενός ολόκληρου δομικού συστήματος μπορεί να χαρακτηριστεί κυρίως από τρεις βασικές ιδιότητες: τη δυσκαμψία, την αντοχή και την πλαστιμότητα. Η δυσκαμψία χαρακτηρίζει την ελαστική απόκριση, η αντοχή τα όρια μεταξύ ελαστικής και μετελαστικής απόκρισης και η πλαστιμότητα είναι αυτή που χαρακτηρίζει τη μετελαστική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου ή δομήματος.

Πλαστιμότητα ορίζεται η ικανότητα ενός στοιχείου ή συστήματος να παραμορφώνεται πέρα της ελαστικής περιοχής, χωρίς ουσιαστική μείωση της αντοχής. Αυτό γίνεται μέσω της απορρόφησης

της σεισμικής ενέργειας με υστερητική συμπεριφορά. Ποσοτικά, η πλαστιμότητα αποδίδεται ως ο λόγος της συνολικής ικανότητας για παραμόρφωση ενός στοιχείου, ελαστικής και ανελαστικής, προς την αντίστοιχη μέγιστη ελαστική παραμόρφωση:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Όταν διατίθεται επαρκής πλαστιμότητα η συμπεριφορά ενός στοιχείου χαρακτηρίζεται ως πλάστιμη, ενώ όταν θραύεται αμέσως μετά το τέλος της ελαστικής περιοχής η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ψαθυρή. Συγκριτικά, αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Πλάστιμη και ψαθυρή συμπεριφορά μέλους

Στα δομικά στοιχεία, η πλαστιμότητα μπορεί να αναπτυχθεί μόνο αν τα συστατικά υλικά είναι κι αυτά πλάστιμα/όλκιμα. Για παράδειγμα, το σκυρόδεμα και η τοιχοποιία είναι εγγενώς ψαθυρά υλικά κατάλληλα για την ανάληψη θλιπτικών τάσεων, ενώ ο χάλυβας εντεινόμενος σε εφελκυσμό μπορεί και παρέχει επαρκή πλαστιμότητα. Η πλαστιμότητα μιας κατασκευής εξασφαλίζεται μέσω της πλάστιμης συμπεριφοράς των μελών της. Σκοπός της διαστασιολόγησης κατασκευών από σκυρόδεμα ή τοιχοποιία και χάλυβα είναι ο συνδυασμός των υλικών αυτών με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθούν πλάστιμα μέλη, ικανά να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις μετελαστικής παραμόρφωσης που επιβάλλονται από τους σεισμούς και να τοποθετηθούν στις κατάλληλες θέσεις στην κατασκευή.

2.3.1 Πλάστιμα και ψαθυρά στοιχεία

Πλάστιμα ορίζονται τα στοιχεία στα οποία η αστοχία σε κάμψη προηγείται αυτής σε διάτμηση. Η συμπεριφορά τους χαρακτηρίζεται από ικανότητα παραλαβής μεγάλων παραμορφώσεων, ακόμα και μετά τη διαρροή. Αντίθετα, ψαθυρά ορίζονται στοιχεία στα οποία η διατμητική αστοχία προηγείται της καμπτικής. Τα στοιχεία αυτά αστοχούν χωρίς προειδοποίηση και γενικώς αποφεύγονται κατά το σχεδιασμό.

Για να οριστεί η καμπύλη F-δ ενός στοιχείου είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε εάν η διατμητική αστοχία προηγείται της καμπτικής έτσι ώστε να τροποποιηθεί κατάλληλα το διάγραμμα M-θ που αντιστοιχεί στην κάμψη.

2.4 Στάθμες Επιτελεστικότητας κατασκευής

Σύμφωνα με τη λογική σχεδιασμού και αποτίμησης των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας καθορίζονται τα αποδεκτά επίπεδα ζημιών ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού, δηλαδή ο επιδιωκόμενος στόχος σεισμικής ικανότητας. Ο στόχος αυτός καθορίζεται ως συνδυασμός του αποδεκτού επιπέδου ζημιών στην κατασκευή και του επιπέδου της σεισμικής δράσης.

Σε γενικές γραμμές, από όλους τους κανονισμούς ορίζονται οι εξής τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για το φέροντα οργανισμό και τα μη-φέροντα στοιχεία, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών:

- Άμεση Χρήση μετά το σεισμό (Immediate occupancy): Το επίπεδο βλαβών είναι τέτοιο ώστε καμία λειτουργία να μη διακόπτεται κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά από αυτόν, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες.
- Προστασία ζωής (Life safety): Αναμένεται να εμφανιστούν βλάβες οι οποίες είναι επισκευάσιμες και δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ή σοβαρού τραυματισμού ατόμων ή σημαντικών ζημιών σε αντικείμενα που βρίσκονται στην κατασκευή. Για την επαναχρησιμοποίηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.
- Οιονεί κατάρρευση (Structural stability): Αναμένεται να εμφανιστούν εκτεταμένες, μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα βλάβες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά η ικανότητα αντίστασης σε οριζόντια φορτία έχει μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μη διαθέτει άλλα περιθώρια ασφάλειας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης σε μετασεισμούς. Ο κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού ατόμων από πτώσεις στοιχείων της κατασκευής είναι μεγάλος, εντός και εκτός αυτής. Για τη επαναχρησιμοποίηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτούνται εκτεταμένες επιδιορθώσεις, ενώ είναι πιθανόν να μην είναι τεχνικά ή οικονομικά δυνατή η επισκευή της.

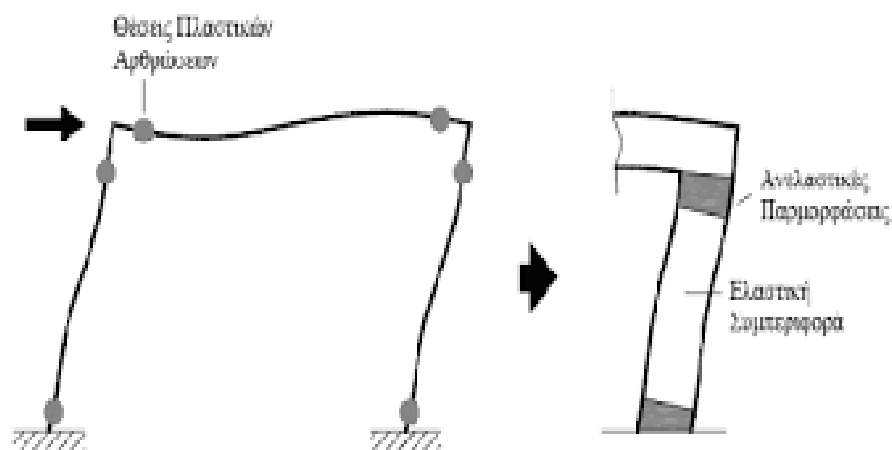
Η τοποθέτηση των σημείων που αντιστοιχούν στις παραπάνω στάθμες επιτελεστικότητας θα πρέπει να γίνει με προσοχή από τον μελετητή μηχανικό και δεν είναι προφανής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι συστάσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για διαχωρισμό των μελών της κατασκευής σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Πρωτεύοντα ορίζονται τα στοιχεία που συμβάλλουν στην αντοχή και ευστάθεια της κατασκευής υπό σεισμικά φορτία, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντα. Με αυτό το διαχωρισμό μπορούν να οριστούν οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής ως προς τις στάθμες επιτελεστικότητας των πρωτεύοντων στοιχείων της

2.5 Πλαστικές Αρθρώσεις

Η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας, που αποτελεί προϋπόθεση για την πλαστική συμπεριφορά ενός στοιχείου, όπως αναφέρεται πιο πάνω, γίνεται μέσω των πλαστικών αρθρώσεων, των θέσεων των μελών δηλαδή στις οποίες αναμένεται ανελαστική συμπεριφορά. Στην πραγματικότητα η ανελαστικοποίηση του στοιχείου δεν είναι σημειακή, αλλά περιλαμβάνει κάποιο τμήμα του, που ονομάζεται ανελαστική περιοχή και στο οποίο οι εφελκόμενοι χάλυβες βρίσκονται σε σημείο διαρροής. Το υπόλοιπο τμήμα κάθε μέλους εξακολουθεί να συμπεριφέρεται ελαστικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Η ανελαστική περιοχή, εφόσον είναι κατάλληλα σχεδιασμένη, έχει τη δυνατότητα να υφίσταται στροφή (πλαστική στροφή) χωρίς ουσιαστική αύξηση της δρώσας ροπής, συμπεριφέρεται δηλαδή σαν άρθρωση. Το μήκος της ανελαστικής αυτής περιοχής αντιπροσωπεύεται από το ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης l_p , εντός του οποίου η πλαστική καμπυλότητα θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή, ίση με τη μέγιστη καμπυλότητα που παρατηρείται στην περιοχή.

Στα πλαίσιακά συστήματα οι θέσεις πλαστικών αρθρώσεων εντοπίζονται στα άκρα των δοκών, στην κεφαλή και βάση των υποστυλωμάτων καθώς και σε περιοχές μεγάλων συγκεντρωμένων φορτίων.



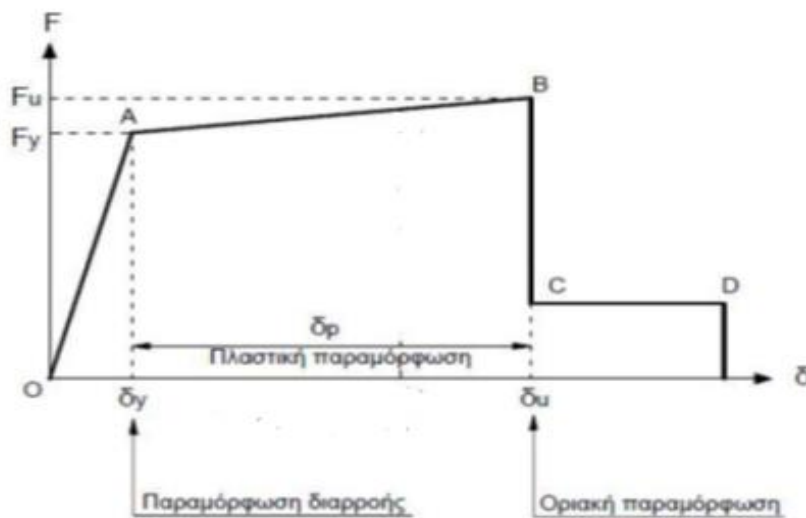
Σχήμα 2.2 Πιθανές θέσεις πλαστικών αρθρώσεων και ανελαστική συμπεριφορά μέλους

2.6 Καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου

Για να οριστεί η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής, πρέπει να δημιουργηθούν οι καμπύλες ικανότητας των στοιχείων που την αποτελούν. Για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα η καταλληλότερη επιλογή ζεύγους έντασης-μετακίνησης είναι η ροπή κάμψης M και η γωνία στροφής χορδής θ στα άκρα του στοιχείου. Το διάγραμμα που προκύπτει λαμβάνεται στην ιδεατή του μορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

Ο πρώτος ευθύγραμμος κλάδος (OA) εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι τη διαρροή του στοιχείου και η αντίσταση M_y μπορεί να λαμβάνεται ίση με την οριακή αντίσταση του στοιχείου για τον οριακό τρόπο αστοχίας. Η τιμή της παραμόρφωσης στη διαρροή θ_y υπολογίζεται αφού έχει ληφθεί υπόψη η συμβολή της κάμψης και της διάτμησης καθώς και η ενδεχόμενη εξόλκευση των οπλισμών.

Ο μετελαστικός κλάδος (AB) επιτρέπεται να λαμβάνεται οριζόντιος (δηλαδή $M_y=M_u$) μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας του στοιχείου, θ_u . Αστοχία παρατηρείται κατά τη σημαντική και συχνά απότομη μείωση της αντοχής του στοιχείου της τάξης του 80%.



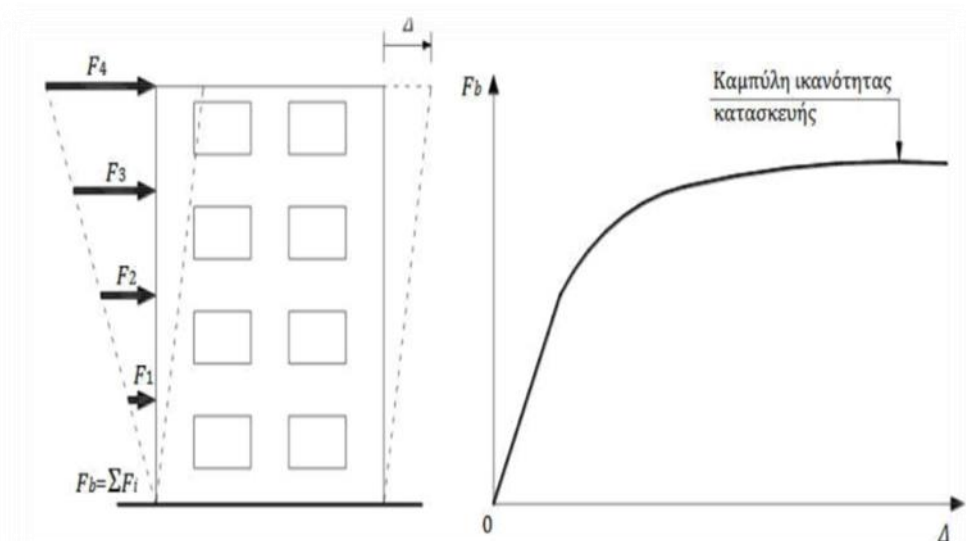
Σχήμα 2.3 Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου

Μετά την παραμόρφωση αστοχίας θ_u παρόλο που η αντίσταση του στοιχείου μειώνεται σημαντικά, δε μηδενίζεται. Για λόγους προσομοίωσης της απόκρισης και επειδή είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια το μέγεθος της απομένουσας αντίστασης αυτής, η απομένουσα αντοχή M_{res} λαμβάνεται περί το 25% της αρχικής. Ο κλάδος (CD) αναφέρεται στην απομένουσα ικανότητα του στοιχείου και ουσιαστικά, μετά το σημείο D θεωρείται ότι δεν είναι σε θέση να παραλάβει ούτε τα κατακόρυφα φορτία.

Στο Κεφάλαιο 7 του ΚΑΝ.ΕΠΕ προτείνονται προσομοιώματα για τον υπολογισμό της αντίστασης (αντοχής), της δυσκαμψίας και της ικανότητας μετελαστικής παραμόρφωσης δομικών στοιχείων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι σχέσεις για υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία και τη διαρροή, της ροπής διαρροής καθώς και των μεγεθών που αναφέρονται στην αντίσταση σε τέμνουσα όπως προτείνονται στο Παράρτημα 7 του κανονισμού.

2.7 Καμπύλη ικανότητας

Οι στάθμες επιτελεστικότητας ορίζονται στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη σχέση μεταξύ επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και μετατόπισης της κορυφής. Η κατασκευή της γίνεται με υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου, με δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους. Ως κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τριγωνική, η πρώτη ιδιομορφή ή ακόμα και συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών. Με τη χρήση των κατανομών αυτών γίνονται στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογίζεται η μετακίνηση κορυφής σε κάθε βήμα, αφού ληφθεί υπόψη η μειωμένη δυσκαμψία των μελών που έχουν διαρρεύσει. Τέλος, γίνεται εξιδανίκευση αυτής της καμπύλης και μετατρέπεται σε μία διγραμμική καμπύλη, βάσει της οποίας προσδιορίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση και γίνονται όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας

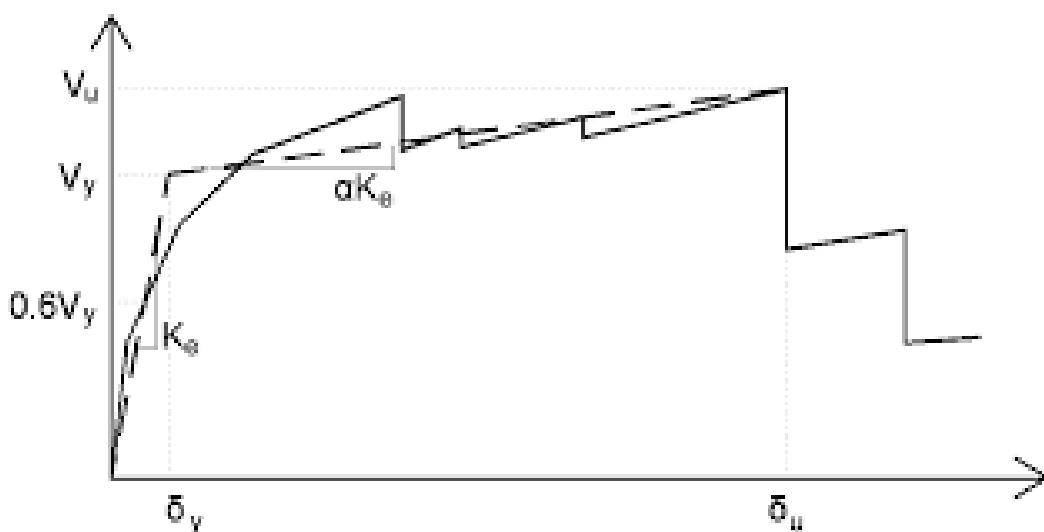


Σχήμα 2.4 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής

2.8 Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας

Η δημιουργία μιας εξιδανικευμένης, απλούστερης, διγραμμικής καμπύλης αντιπροσωπευτικής για τη συμπεριφορά της κατασκευής μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Η μέθοδος που επιλέγεται είναι παραπλήσια της μεθόδου που προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η εξιδανικευμένη καμπύλη είναι γραμμική με κλίση του πρώτου κλάδου K_e και του δεύτερου κλάδου αK_e , με α μη αρνητικό αριθμό όχι μεγαλύτερο από το 0,10. Η κλίση K_e λαμβάνεται ως η επιβατική τιμή για στάθμη αντοχής ίσης με το 60% της μέγιστης αντίστασης. Ως V_y λαμβάνεται η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται στην κατασκευή μειωμένη κατά 75-85 %. Από το σημείο διαρροής ξεκινάει ο δεύτερος κλάδος της καμπύλης, με ανηγμένη κλίση α , ο οποίος σταματάει για τη μετακίνηση την οποία η κατασκευή χάνει σημαντικό κομμάτι της αντοχής της. Σχηματικά, αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας κατασκευής

2.9 Δημιουργία ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

Η πλέον διγραμμική καμπύλη ικανότητας θα πρέπει να μετατραπεί σε μορφή συγκρίσιμη με αυτή του φάσματος αποτίμησης, δηλαδή σε μορφή ADRS (Acceleration – Displacement Response Spectrum), ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Το σύστημα αυτό εξαρτάται από την κατανομή των φορτίων καθ' ύψος που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της καμπύλης ικανότητας. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η παραδοχή ότι οι μετακινήσεις ακολουθούν την κατανομή της ιδιομορφής με τη μεγαλύτερη ιδιομορφική μάζα στη διεύθυνση στην οποία μελετάται (δεσπόζουσα ιδιομορφή). Η μετατροπή σε φασματική επιτάχυνση και μετακίνηση γίνεται ακολουθώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{➤ } Sa &= \frac{F_b}{a m_{\text{tot}}}, & \text{με } \alpha &= \frac{[\sum m_i \varphi_i]^2}{m_{\text{tot}} \sum m_i \varphi_i^2} \\ \text{➤ } Sd &= \frac{\Delta}{\Gamma}, & \text{με } \Gamma &= \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} \end{aligned}$$

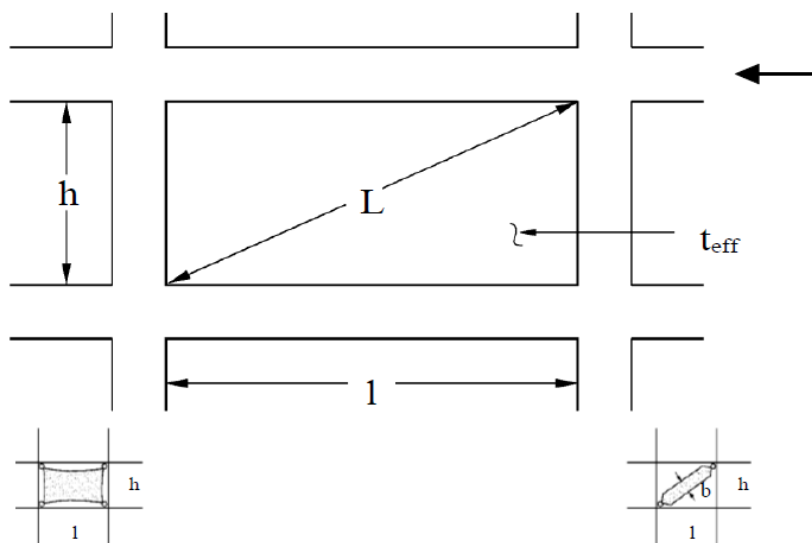
Όπου το a δηλώνει το ποσοστό της συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση και το Γ είναι ο συντελεστής συμμετοχής της ιδιομορφής που επιλέγεται για την κατανομή. Τα φ_i , αναφέρονται στη μετακίνηση του διαφράγματος του κάθε ορόφου, σχετίζονται με την ιδιομορφή που επιλέγεται ως αυτή που ορίζει την κίνηση και κανονικοποιούνται ως προς το μέγιστο.

2.10 Τοιχοποιία

Σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα επιλέγεται η χρήση τοιχοποιίας για τη δημιουργία διαχωριστικών τοίχων και φατνωμάτων πλήρωσης, η οποία συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη στο προσομοίωμα. Όμως, μέσω πειραματικών δεδομένων και παρατήρησης της απόκρισης υφιστάμενων κατασκευών σε σεισμούς οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η τοιχοποιία μπορεί να επιδράσει θετικά ή αρνητικά στη συμπεριφορά μιας κατασκευής κατά τη σεισμική φόρτιση. Η αλληλεπίδραση των τοιχοπληρώσεων με τα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος οδηγεί στην τροποποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής αλλά και τον τρόπο παραλαβής του φορτίου από τα φέροντα στοιχεία.

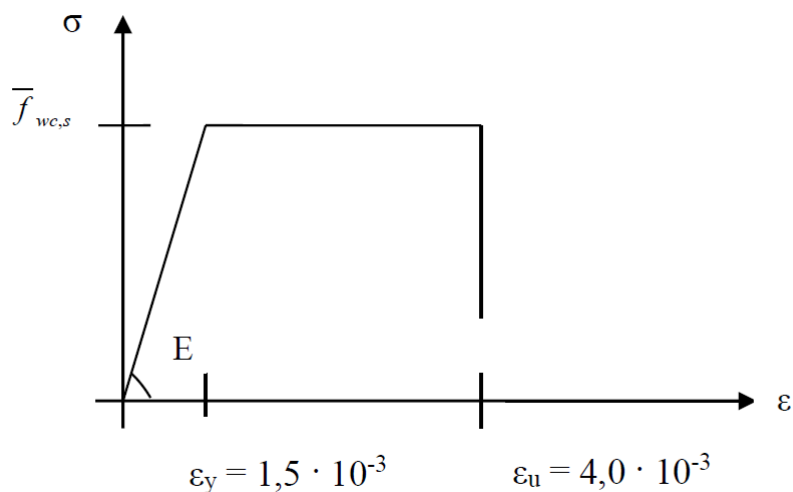
Για την παρούσα εργασία επιλέγεται να προσομοιωθεί η τοιχοποιία μέσω ζεύγος χιαστί ισοδύναμων διαγωνίων με μονόπλευρο καταστατικό νόμο, δηλαδή λειτουργία μόνο σε θλίψη. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ισοδύναμων θλιβόμενων διαγωνίων (βλ. Σχήμα 2.6) εκτιμώνται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 7 του ίδιου κανονισμού ως εξής:

- Το ισοδύναμο πάχος t της θλιβόμενης διαγωνίου λαμβάνεται ίσο με το συνολικό πάχος της τοιχοπλήρωσης, για ενιαίες κατά τη διατομή τοιχοπληρώσεις.
- Το ισοδύναμο πλάτος b της θλιβόμενης διαγωνίου εκτιμάται με βάση την ισοδυναμία και το συμβιβαστό των τάσεων και παραμορφώσεων και λαμβάνεται ίσο με το 15% του καθαρού μήκους της διαγωνίου του φατνώματος.
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού λαμβάνεται ίσο με $E=1000f_m$, με f_m τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας και το μέτρο διάτμησης G απλοποιητικά μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το 40% του μέτρου ελαστικότητας E .



Σχήμα 2.6 Ισοδύναμη θλιβόμενη ράβδος - γεωμετρικά στοιχεία

Ακόμα, ορίζεται το προσομοίωμα σ - ϵ για κάθε θλιβόμενη διαγώνια ράβδο. Η επιλογή της τιμής αντοχής της τοιχοποιίας γίνεται ερήμην, για μέση ποιότητα δόμησης και σφήνωσης, σύμφωνα με το Παράρτημα 3.1 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και λαμβάνεται ίση με 1,50 MPa και ακόμα, θεωρείται ότι μετά την αστοχία η εναπομένουσα αντοχή είναι μηδενική και γίνεται χρήση του διαγράμματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων άοπλης τοιχοπλήρωσης

2.11 Σεισμική αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών

2.11.1 Γενικά

Από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνονται για την εκπόνηση μελετών αποτίμησης ή ενίσχυσης η ελαστική στατική ανάλυση, η ελαστική δυναμική ανάλυση, η ανελαστική στατική ανάλυση και η ανελαστική δυναμική ανάλυση. Η επιλογή της μεθόδου σχετίζεται με τις γενικότερες απαιτήσεις προσομοίωσης και ελέγχων, την επιλεγείσα στάθμη επιτελεσματικότητας ή και ενδεχόμενες μορφολογικές ιδιαιτερότητες του υπό μελέτη κτηρίου, όπως η κανονικότητα.

Οι ελαστικές μέθοδοι δίνουν μια καλή εικόνα για τη συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι το σημείο της πρώτης διαρροής, ενώ οι ανελαστικές μέθοδοι επειδή λαμβάνουν υπόψη τις ανακατανομές των εσωτερικών εντάσεων λόγω των πλαστικοποιήσεων οδηγούν σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η εφαρμογή της στατικής ανελαστικής ανάλυσης, κύριος στόχος της οποίας είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός.

2.11.2 Στατική ανελαστική ανάλυση

Σύμφωνα με τη μέθοδο, καθορίζεται η καμπύλη αντίστασης, η σχέση δηλαδή ανάμεσα στην τέμνουσα βάσεως και την οριζόντια μετακίνηση του κόμβου ελέγχου, ο οποίος λαμβάνεται στο κέντρο μάζας της οροφής του κτηρίου. Στο προσομοίωμα λαμβάνονται τα κατακόρυφα φορτία των στοιχείων σύμφωνα με το συνδυασμό $G+\psi Q$, και τα οριζόντια φορτία, τα οποία εφαρμόζονται σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις στη στάθμη κάθε διαφράγματος (πλάκα ορόφου). Τα οριζόντια φορτία αυξάνονται μονότονα μέχρις ότου κάποιο δομικό στοιχείο να μην είναι πλέον σε θέση να φέρει τα κατακόρυφα φορτία του.

Ο έλεγχος ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας γίνεται για τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου που αντιστοιχεί στη σεισμική δράση που επιλέγεται και στη συνέχεια ελέγχεται ότι η παραμόρφωση των πλαστικών δομικών στοιχείων της κατασκευής είναι αποδεκτή. Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής μπορεί να γίνει είτε με ανάλυση της χρονοϊστορίας της απόκρισης του κτιρίου για σειρά σεισμικών διεγέρσεων, είτε με απλοποιητικές μεθόδους που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση της κατανομής των σεισμικών φορτίων της κατασκευής επιλέγεται η ομοιόμορφη κατανομή, βασισμένη σε οριζόντια φορτία ανάλογα ως προς τη μάζα κάθε ορόφου (ομοιόμορφη επιτάχυνση απόκρισης).

2.11.3 Αποτίμηση συμπεριφοράς

Η καμπύλη ικανότητας του κτηρίου θα πρέπει να συγκριθεί με το φάσμα που έχει οριστεί για την αποτίμηση, για να ελεγχθεί η απόκριση της κατασκευής κατά το αναμενόμενο σεισμικό γεγονός. Οι δύο καμπύλες μετατρέπονται σε συγκρίσιμη μορφή (φάσμα ADRS) και ελέγχεται εάν συναντώνται. Εάν οι καμπύλες δεν τέμνονται, σημαίνει ότι η κατασκευή δε θα καταφέρει να αποκριθεί και θα καταρρεύσει χωρίς να συναντήσει τη σεισμική απαίτηση. Όταν η καμπύλη απαίτησης και η καμπύλη ικανότητας τέμνονται, ο σεισμικός στόχος έχει επιτευχθεί, δηλαδή η κατασκευή θα μπορέσει να αντεπεξέλθει στο σεισμό που ορίστηκε. Εάν έχουν οριστεί Στάθμες Επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής ακόμα θα πρέπει να ελέγχεται ότι η στοχευόμενη μετακίνηση βρίσκεται πριν από την απαιτούμενη Στάθμη Επιτελεστικότητας.

3 Περιγραφή και Προσομοίωση Κατασκευής

3.1 Γενικά

Το υπό μελέτη κτήριο είναι ένα κτήριο από οπλισμένο σκυρόδεμα με δύο ορόφους και υπόγειο, που βρίσκεται στην περιοχή της Καλαμάτας. Πρόκειται για ένα πρώην βιομηχανικό κτήριο, το οποίο κατασκευάστηκε ως εργοστάσιο τυποποίησης σταφίδας και αργότερα στέγασε και το δημαρχείο της Καλαμάτας για κάποια χρόνια. Πλέον, στον όροφό του λειτουργεί το Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καλαμάτας, ενώ το υπόλοιπο κτήριο δε χρησιμοποιείται και παραμένει κλειστό. Λόγω της ηλικίας της αλλά και των εμφανών φθορών από το χρόνο κρίνεται πως η κατασκευή χρήζει αναβάθμισης.

Η κατασκευή του κτηρίου έγινε το έτος 1975 και η μελέτη του με βάση τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 1954) και τον αντισεισμικό κανονισμό του 1959 (ΕΑΚ 1959). Δεν έχει υποστεί καμία επέμβαση, προσθήκη ή αλλαγή μετά την αρχική κατασκευή του ως προς το φέροντα οργανισμό ή το στατικό του σύστημα. Το 2011, έγινε μια γεωμετρική αποτύπωση του φορέα της κατασκευής και παρατηρήθηκε ότι έχουν τηρηθεί όσα αναφέρονται στη μελέτη.



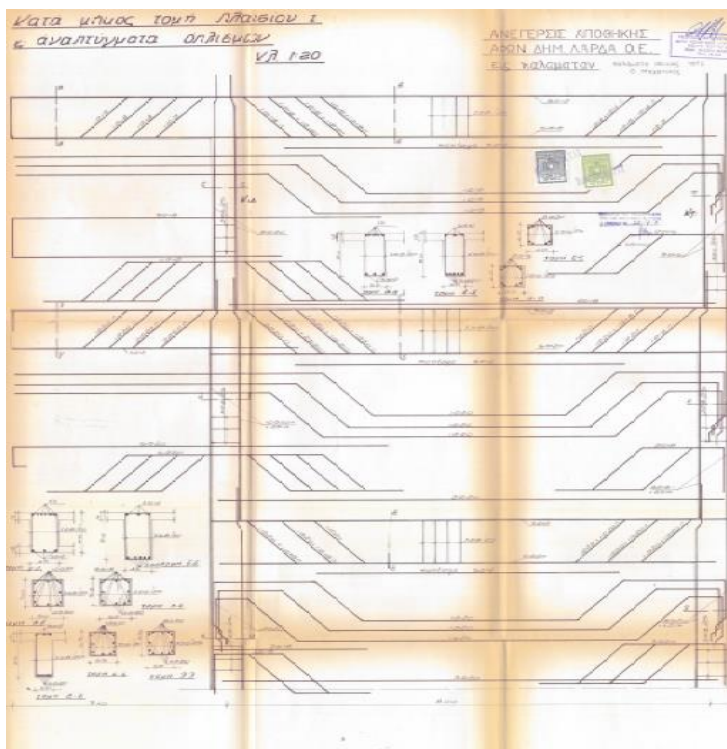
Σχήμα 3.1 Φωτογραφία του υπό μελέτη φορέα

Η προσομοίωση του φορέα έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού ETABS 2015 V15.0.0, της εταιρείας Computers and Structures μέσω ενός χωρικού προσομοιώματος, που αποτελείται από γραμμικά και επιφανειακά στοιχεία.

3.2 Λογική σχεδιασμού του υπό μελέτη φορέα

Το κτήριο έχει κατασκευαστεί τη δεκαετία του 1970 και μελετηθεί με τις ισχύουσες διατάξεις της εποχής. Τα κτήρια της δεκαετίας αυτής σχεδιάζονται με βάση τις επιτρεπόμενες τάσεις, με χαμηλό σεισμικό συντελεστή, με απλοποιημένα προσομοιώματα για την ανάλυση και χωρίς τις ειδικές πρόσφατες διατάξεις για ικανοτικό σχεδιασμό και όπλιση των κρίσιμων περιοχών.

Ο διαφορετικός αυτός τρόπος σχεδιασμού γίνεται φανερός και στο συγκεκριμένο κτήριο. Οι σημαντικές διαφορές που παρατηρούνται σε σχέση με τους ισχύοντες κανονισμούς είναι οι σχετικά μικρές διατομές των γραμμικών στοιχείων και ιδιαίτερα των υποστυλωμάτων, η ανεπάρκεια του εγκάρσιου οπλισμού και η έλλειψη αγκύρωσης, η απουσία περίσφιγξης, καθώς και τα γενικά μικρά ποσοστά οπλισμού των διατομών. Ακόμα, η μελέτη του κτηρίου γίνεται με σεισμικό συντελεστή $\varepsilon=0,08$, που θεωρείται πολύ μικρός σε σχέση με την τριπλάσια τιμή που προτείνεται πλέον για τη συγκεκριμένη σεισμική ζώνη. Τέλος, σημαντική διαφορά παρατηρείται και στη διάταξη των οπλισμών των δοκών, όπου οι μισές ράβδοι του εφελκόμενου οπλισμού των ανοιγμάτων των δοκών κάμπτονται προς τα άνω στις περιοχές των στηρίξεων, διάταξη που πλέον υιοθετείται μόνο στις πλάκες. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η όπλιση πλαισίου της κατασκευής με τα αναπτύγματα των οπλισμών, όπου και φαίνεται η κάμψη τους προς τα πάνω στις στηρίξεις.



Σχήμα 3.2 Όπλιση πλαισίου και αναπτύγματα οπλισμών σύμφωνα με τη μελέτη της κατασκευής

3.3 Περιγραφή κτηρίου

Η κάτοψη του κτηρίου είναι τραπεζοειδής, με αναλογία περίπου 4:5 και το συνολικό εμβαδόν της κατασκευής είναι περί τα 2100 m². Το ύψος του υπογείου είναι 3,50 m, ενώ του ισογείου και του ορόφου 4m. Ο φέρων οργανισμός της κατασκευής είναι πλαισιακού τύπου με παράλληλα πλαίσια κατά τη μια διεύθυνση, κατάλληλα οπλισμένα. Στο υπόγειο της κατασκευής διαθέτει επίσης τοιχώματα, περιμετρικά σε μορφή Π. Το κτήριο είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ περιμετρικά υπάρχει τοιχοποιία πλήρωσης (μπατική).

Σύμφωνα με το τεύχος υπολογισμών της μελέτης του κτηρίου, χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας B225, χάλυβας διαμηκών οπλισμών St III και χάλυβας εγκάρσιων οπλισμών St I.

Στο φορέα της κατασκευής παρατηρούνται οι παθογένειες που περιγράφονται παρακάτω και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση και ενίσχυσή του.

3.3.1 Κοντά υποστυλώματα

Κοντά υποστυλώματα ονομάζονται στοιχεία με λόγο διάτμησης $a_s=M/(V h)$ μικρότερο του 2,5. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη συμπεριφορά η οποία εκδηλώνεται κυρίως υπό σεισμικές συνθήκες και χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή. Διακρίνονται σε «φύσει», όταν προβλέπονται από τον κανονισμό και «θέσει», όταν τοίχος πλήρωσης που βρίσκεται σε επαφή με υποστυλώματα δεν συνεχίζει σε όλο το ύψος του ορόφου.

Περιμετρικά στην κατασκευή σε όλους τους ορόφους υπάρχουν διαδοχικά επιμήκη παράθυρα φωτισμού, που δημιουργούν καθ' ύψος διακοπή και εξαναγκάζουν τα υποστυλώματα να λειτουργήσουν σαν «θέσει» κοντά. Αναμένεται λοιπόν διατμητικού τύπου ψαθυρή αστοχία κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης λόγω της διαμόρφωσης αυτής.



Σχήμα 3.3 Θέσει κοντά υποστυλώματα στην οροφή του υπογείου της κατασκευής

3.3.2 Κλειστός εξώστης με φυτευτά υποστυλώματα

Το κτήριο έχει έναν κλειστό εξώστη τύπου έρκερ μήκους 3,30 m στο ύψος του ορόφου. Το πρόβλημα που αναμένεται να προκύψει είναι η υπέρμετρη καταπόνηση του προβόλου από στρέψη κατά την παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων γενικά, καθώς και κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

Επί του εξώστη είναι τοποθετημένα φυτευτά υποστυλώματα, ορθογωνικής διατομής (20x70) cm. Τα υποστυλώματα αυτά επιβαρύνουν τα δοκάρια, τα οποία θα πρέπει να υποβληθούν σε ελέγχους επάρκειας καθώς από την ευστάθειά τους επηρεάζεται η ευστάθεια ολόκληρης της κατασκευής.



Σχήμα 3.4 Κλειστός εξώστης στον όροφο

3.3.3 Αποφλοιώση σκυροδέματος και ενανθράκωση οπλισμών

Στο φέροντα οργανισμό της κατασκευής, λόγω παλαιότητας αλλά και πρότερων σεισμικών καταπονήσεων παρατηρείται αποφλοιώση του σκυροδέματος. Με μια πρόχειρη αποτίμηση της κατάστασης του φορέα, ήδη από το εξωτερικό του, φαίνεται η προχωρημένη αποφλοιώση του σκυροδέματος, που έχει οδηγήσει στην εμφάνιση των οπλισμών γίνεται αντιληπτή η ανάγκη αποκατάστασης των βλαβών αυτών. Στο εσωτερικό του κτηρίου, παρατηρείται μια αντίστοιχη κατάσταση, με απόσπαση κομματιών του σκυροδέματος από την πλάκα και εμφάνιση του οπλισμού της.



Σχήμα 3.5 Αποφλοιώση σκυροδέματος και εμφάνιση οπλισμών στο εξωτερικό της κατασκευής



Σχήμα 3.6 Αποφλοίσωση σκυροδέματος στην πλάκα του ορόφου

Για μια ορθή προσομοίωση της παρούσας κατάστασης του κτηρίου θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις και να εκτιμηθεί πόσο έχουν προχωρήσει οι βλάβες των στοιχείων έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι μειωμένες διατομές των μελών, λόγω απώλειας υλικού. Κατά την προσομοίωση του φορέα για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι λειτουργούν οι πλήρεις διατομές, όπως εμφανίζονται στη μελέτη της κατασκευής.

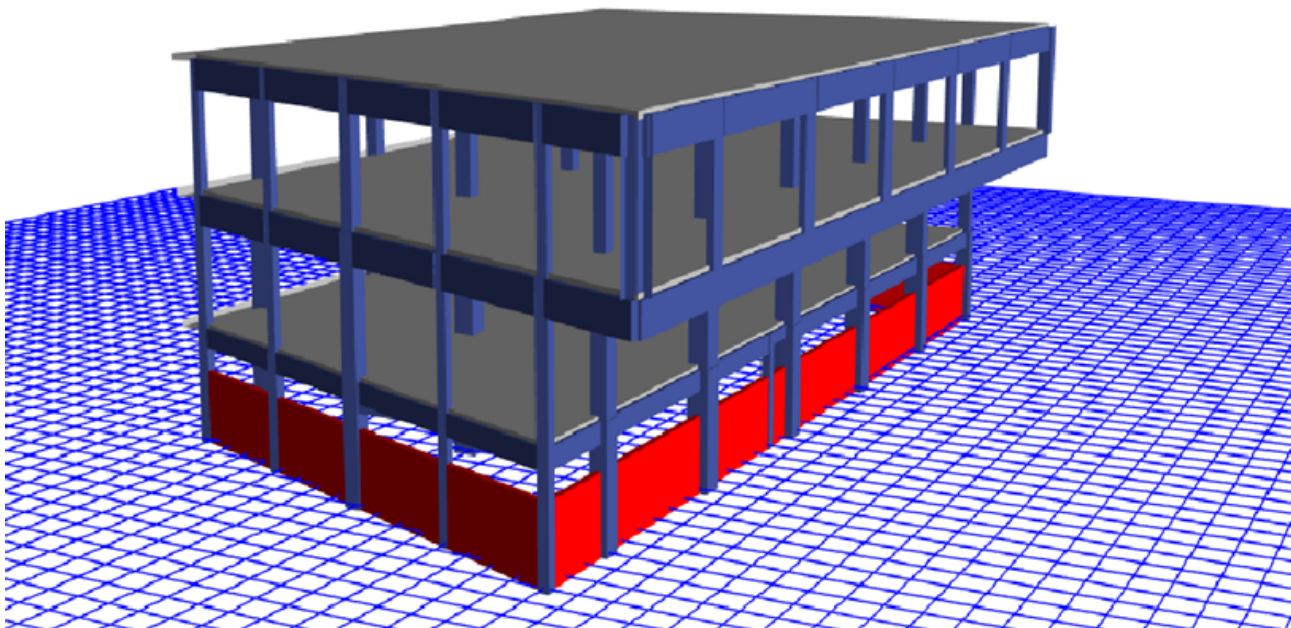
3.4 Προσομοίωση φορέα

3.4.1 Γενικά

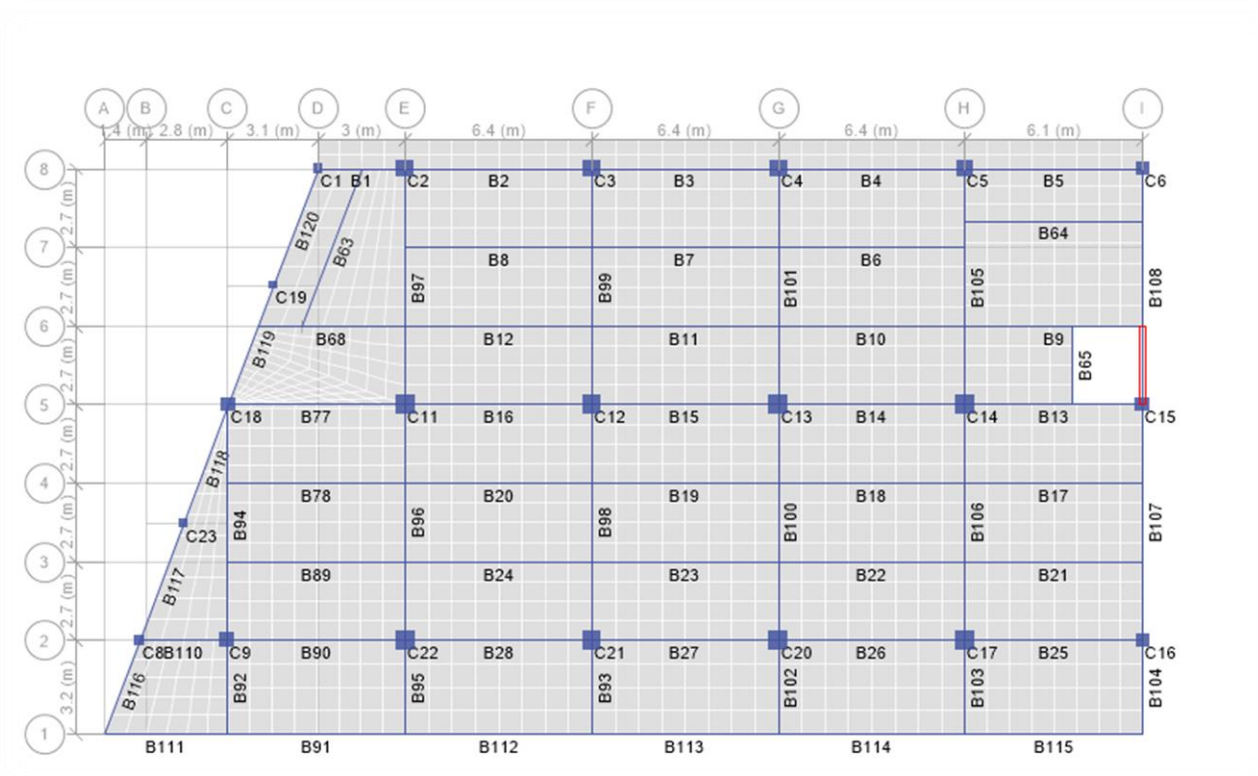
Για την προσομοίωση του φορέα δημιουργήθηκε ένας τρισδιάστατος κάρναβος, βασιζόμενος στα σχέδια της αρχικής μελέτης της κατασκευής. Ορίστηκαν τα υλικά και ύστερα τα δομικά στοιχεία του φορέα, τα οποία προσομοιώθηκαν με τα αντίστοιχα στοιχεία που διατίθενται στο λογισμικό. Ορίστηκε ακόμα η διαφραγματική λειτουργία των πλακών καθώς και οι στηρίξεις της κατασκευής. Στη συνέχεια ορίζονται τα κατακόρυφα φορτία της κατασκευής και τα δεδομένα για τα σεισμικά φορτία (επιτάχυνση εδάφους), καθώς και ο νόμος που διέπει την ανελαστική συμπεριφορά των στοιχείων της.

Στο προσομοίωμα αγνοήθηκε αρχικά η συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων στη δυσκαμψία της κατασκευής, όχι όμως και στη μάζα, αφού τα φορτία τους λαμβάνονται υπόψη με την επιβολή του κατάλληλου κατανεμημένου φορτίου στις περιμετρικές δοκούς.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Ενδεικτικά παρουσιάζεται και η κάτοψη του ισογείου.



Σχήμα 3.7 Προσομοίωση φορέα στο λογισμικό



Σχήμα 3.8 Προσομοίωση οροφής ισογείου στο λογισμικό

3.4.2 Υλικά

Στο φορέα δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία επί τόπου επιθεώρηση ως προς τις ποιότητες των υλικών, ωστόσο επειδή κατά τη διαδικασία αποτύπωσης δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές στο φορέα της κατασκευής ως προς αυτά που είχαν δηλωθεί στη μελέτη εκτιμάται ότι το ίδιο θα συμβαίνει και στην ποιότητα των υλικών. Λαμβάνεται Ικανοποιητική Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων, με συντελεστές ασφαλείας δεδομένων $\gamma_c=1,30$ και $\gamma_s=1,15$ και χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές αντοχής των υλικών, ως μία εκτίμηση της πραγματικής αντοχής τους.

Η κατηγορία σκυροδέματος είναι B225 και αντιστοιχεί σε μέση αντοχή κυβικού δοκιμίου 22,5MPa. Ο χάλυβας των διαμήκων οπλισμών είναι Stahl III ορίζεται με μέση τιμή διαρροής 430 MPa και αστοχίας 630MPa και ο χάλυβας των συνδετήρων είναι ποιότητας Stahl I με μέση τιμή διαρροής 310 MPa και αστοχίας 420MPa, ενώ και οι δύο ορίζονται με μέτρο ελαστικότητας $E_{sm}=200$ Gpa. Στο λογισμικό η εισαγωγή των υλικών γίνεται μέσω της εντολής:

Define → Material Properties → Add New Material και στη συνέχεια επιλέγεται το είδος του υλικού.

Ορίζονται τα χαρακτηριστικά των υλικών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.

The image shows two overlapping dialog boxes from a software application. The primary dialog, titled "Material Property Data", is used for defining material properties. It is organized into several sections: "General Data" (Material Name: B225, Material Type: Concrete, Directional Symmetry Type: Isotropic), "Material Weight and Mass" (Specify Weight Density selected, 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), "Design Property Data" (with a "Modify/" button), and "Advanced Material Property Data" (with a "Nonlinear Material Dat" button). A secondary dialog, "Material Property Design Data", is overlaid on the bottom right, showing "Material Name and Type" (B225, Concrete, Isotropic) and "Design Properties for Concrete Materials" (Characteristic Concrete Cylinder Strength, fck: 17.77 MPa, Lightweight Concrete checkbox, Shear Strength Reduction Factor). Both dialogs have "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

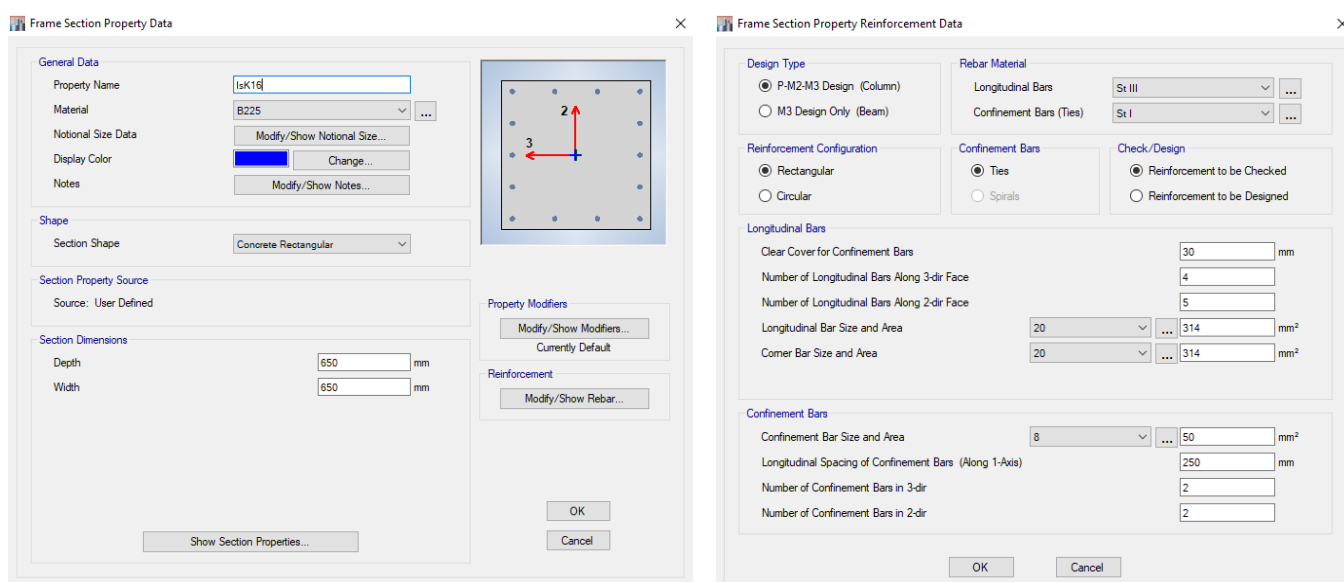
Σχήμα 3.9 Ορισμός υλικών - σκυρόδεμα

3.4.3 Γραμμικά Στοιχεία

Οι δοκοί και τα υποστυλώματα του φορέα προσομοιώνονται με γραμμικά-ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία πλαισίου έξι βαθμών ελευθερίας. Οι διατομές τους είναι ως επί το πλείστο ορθογωνικές, ενώ υπάρχουν και δύο γωνιακά υποστυλώματα μορφής Γ. Οι διαστάσεις και οι διαμήκεις οπλισμοί των στοιχείων ποικίλουν και μειώνονται από όροφο σε όροφο. Σε όλες τις δοκούς, οι συνδετήρες είναι $\Phi 8/200$, στα υποστυλώματα υπογείου-ισογείου οι συνδετήρες είναι $\Phi 8/250$, ενώ στου ορόφου $\Phi 6/250$.

Ο ορισμός τους γίνεται μέσω της εντολής Define→ Section Properties→ Frame Sections→ Add New Property. Αρχικά ορίζεται το σχήμα της διατομής και στη συνέχεια στο πεδίο που εμφανίζεται ορίζονται το υλικό της διατομής καθώς και τα γεωμετρικά της στοιχεία. Στη συνέχεια μέσω της εντολής Modify/Show Rebar, επιλέγεται ο τύπος δομικού στοιχείου (δοκός/υποστύλωμα) και εισάγονται οι λεπτομέρειες όπλισης στο λογισμικό.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες όπλισης του υποστυλώματος K16 του ισογείου.



Σχήμα 3.10 Ορισμός διατομής υποστυλώματος

3.4.4 Επιφανειακά Στοιχεία

Τα τοιχώματα και οι πλάκες ορίζονται ως επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία μέσω της εντολής Define→ Section Properties→ Wall Sections/Slab Sections αντίστοιχα. Μέσω της εντολής Add New Property εισάγονται τα δεδομένα όπως το υλικό και το πάχος.

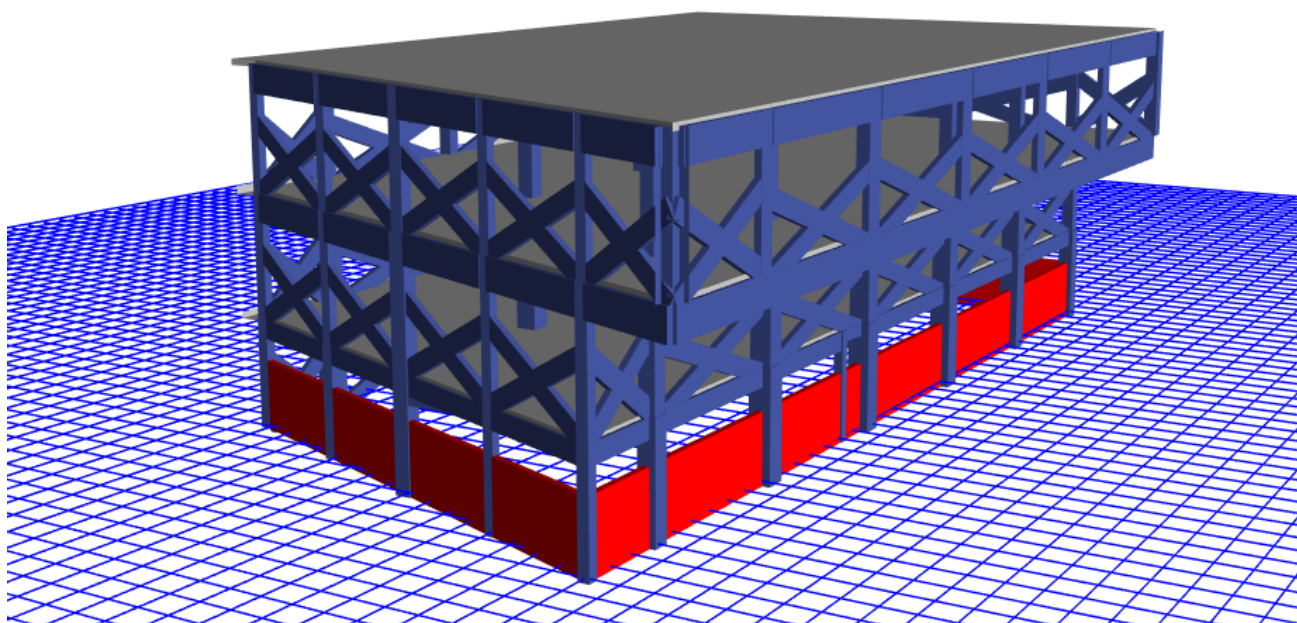
Για τα τοιχία θεωρείται απομειωμένη δυσκαμψία στο 0,5EI, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. μέσω της επιλογής Modifiers, όπου ορίζονται συντελεστές m11, m22 και m12 ίσοι με 0,5 κατά τη διάρκεια ορισμού τους, όπως περιγράφεται πιο πάνω.

Για τις πλάκες, το ίδιο βάρος τους λαμβάνεται αυτόματα από το λογισμικό και τα φορτία που εισάγονται σε αυτές μοιράζονται στις δοκούς σύμφωνα με τις δυσκαμψίες τους. Ο ορισμός των πλακών είναι απαραίτητος για τη διαφραγματική λειτουργία του φορέα. Έτσι διασφαλίζεται η ίση μετακίνηση όλων των σημείων στο επίπεδο του ορόφου και πλέον μπορούμε να θεωρήσουμε τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά όροφο (δύο μετακινήσεις και μία στροφή). Αυτό γίνεται μέσω της εντολής

Assign→ Shell→ Diaphragms→ Modify/Show Definitions→Add New Diaphragm, αφού πρώτα επιλεγθούν τα οριζόντια στοιχεία του κάθε ορόφου που συμμετέχουν στο διάφραγμα.

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. Η προσομοίωση τη φορέα με διαγώνιους θλιπτήρες φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 Απεικόνιση φορέα με προσομοίωση διαγώνιων θλιπτήρων τοιχοποιίας

3.4.6 Στηρίξεις

Τα περιμετρικά τοιχεία του υπογείου θεωρήθηκε ότι προσφέρουν επαρκή δυσκαμψία και έτσι οι στηρίξεις του φορέα επί του εδάφους θεωρούνται πλήρεις πακτώσεις. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της εντολής: Assign→ Joint→ Restraints αφού πρώτα επιλέχθηκαν όλοι οι κόμβοι στη στάθμη της θεμελίωσης.

3.4.7 Φορτία Βαρύτητας

Τα κατακόρυφα φορτία που επιβάλλονται στην κατασκευή διακρίνονται σε μόνιμα και κινητά, ανάλογα με τις διακυμάνσεις τους στο χρόνο. Στο λογισμικό μπορούν να ομαδοποιηθούν, ανάλογα με το είδος τους, σε Load Patterns. Στην περίπτωση μας ομαδοποιούνται σε:

- Dead: Περιλαμβάνει τα μόνιμα φορτία λόγω του ίδιου βάρους του φορέα (υπολογίζεται απευθείας από το λογισμικό) καθώς και τα φορτία λόγω επικαλύψεων ($0,8 \text{ kN/m}^2$)

- Super Dead: Περιλαμβάνει τα μόνιμα φορτία λόγω τοιχοπληρώσεων, μειωμένα για τον υπολογισμό των ανοιγμάτων (4,5 kN/m)
- Live: Περιλαμβάνει τα κινητά φορτία δαπέδων και εξωστών (2 kN/m² για δάπεδα, 5kN/m² για εξώστες)

Τα φορτία τοιχοποιίας λαμβάνονται ως γραμμικά κατανεμημένα στις δοκούς, ενώ τα υπόλοιπα φορτία (μόνιμα και κινητά) ως επιφανειακά ομοιόμορφα κατανεμημένα στις πλάκες. Η εισαγωγή τους στο λογισμικό γίνεται με τις εξής εντολές: Assign→ Frame/Shell Loads→ Distributed/Uniform, αφού επιλεχθούν τα στοιχεία (γραμμικά ή επιφανειακά) που πρέπει να εφαρμοστούν.

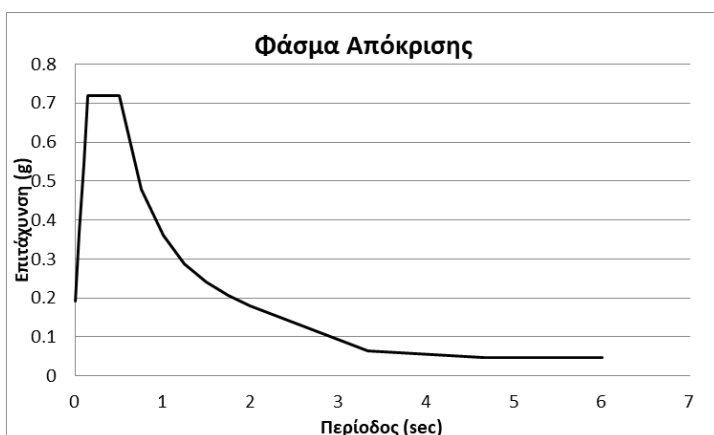
3.4.8 Σεισμικά Φορτία

Οι σεισμικές δράσεις σχεδιασμού ορίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους ως δύο οριζόντιες (κάθετες μεταξύ τους) και μία κατακόρυφη συνιστώσα, στατιστικά ανεξάρτητες, και εκφράζονται με τη βοήθεια φασμάτων απόκρισης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή. Η έντασή τους καθορίζεται από τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού, ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας στην οποία βρίσκεται το έργο.

Το υπό μελέτη κτήριο βρίσκεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2 (Καλαμάτα), δηλαδή η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού είναι 0,24g, εδράζεται σε έδαφος κατηγορίας B και ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας II. Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 ορίζεται για τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς: $\alpha_{gR}=0,24 \text{ g}$
- Συντελεστής σπουδαιότητας: $\gamma_I=1,00$
- Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης (οπλισμένο σκυρόδεμα): $\zeta=5\%$
- Συντελεστής εδάφους: $S=1,20$

Εισάγοντας τις παραπάνω παραμέτρους στο λογισμικό μέσω της εντολής Define→ Functions→ Response Spectrum→ Add New Function και για συντελεστή συμπεριφοράς $q=1$, προκύπτει το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του ΕΚ8, το θα χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι παράμετροι που ορίστηκαν στο λογισμικό, καθώς και το προκύπτον φάσμα απόκρισης.



Parameters	
Country	CEN Default
Direction	Horizontal
Ground Acceleration, a_{gR} /g	0.24
Spectrum Type	1
Ground Type	B
Soil Factor, S	1.2
Acceleration Ratio, Avg/Ag	
Spectrum Period, T_b	0.15 sec
Spectrum Period, T_c	0.5 sec
Spectrum Period, T_d	2 sec
Lower Bound Factor, Beta	0.2
Behavior Factor, q	1

Σχήμα 3.12 Ορισμός σεισμικής δράσης για την αποτίμηση

3.4.9 Ταλαντούμενη 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.

3.4.10 Πλαστικές Αρθρώσεις

Για την εκτέλεση της ανάλυσης χρησιμοποιείται η δυνατότητα προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς του φορέα σε συγκεκριμένα σημεία (hinges). Έτσι, ορίζεται σε κάθε διατομή που αναμένεται να σχηματιστεί πλαστική άρθρωση ο νόμος που διέπει την ανελαστική συμπεριφορά της, η οποία έχει υπολογιστεί σύμφωνα με το Παράρτημα του Κεφαλαίου 7 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Η πλαστική άρθρωση σε μια διατομή ενεργοποιείται μόνο όταν η ροπή από την ανάλυση ξεπεράσει την αντίστοιχη ροπή διαρροής. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο συμπεριφέρεται ελαστικά και οι πλαστικές αρθρώσεις που έχουν τοποθετηθεί δε λαμβάνονται καθόλου υπόψη. Ακόμα, έγινε η παραδοχή ότι η απομένουσα αντοχή είναι ίση με το 25% της ροπής διαρροής για παραμορφώσεις έως και 1,5θμ.

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.

Hinge Property Data for YpP3a - Moment M3

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-0.25	-0.00416
D-	-0.25	-0.002774
C-	-1	-0.002774
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1	0.002643
D	0.25	0.002643
E	0.25	0.003965

Displacement Control Parameters

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Scaling for Moment and Rotation

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Hinge Property Data

Hinge Property Name: YpP3a

Hinge Type: Deformation Controlled (Ductile)

Moment M3

Modify/Show Hinge Property...

OK Cancel

Σχήμα 3.13 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.

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 αποκρίσεών της.

Η 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

Ιδιομορφή	Περίοδος (sec)	Ux	Uy	Rz
1	0,431	0,6738	0,0092	0,0105
2	0,41	0,0251	0,4761	0,201
3	0,283	0,0061	0,1603	0,4354
4	0,168	0,0393	0,063	0,0251
5	0,155	0,0536	0,0457	0,0017
6	0,116	0,0001	0,0635	0,1096
7	0,075	0,0563	0,0638	0,0427
8	0,065	0,1122	0,0488	0,0049
9	0,048	0,0015	1,33E-05	0,0002

Φαίνεται ότι κατά τη διεύθυνση X δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι η 1^η με ποσοστό συμμετοχής στη συνολική μάζα 67%, κατά τη διεύθυνση Y είναι η 2^η με ποσοστό συμμετοχής στη συνολική μάζα 47%. Η 3^η ιδιομορφή είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για τη στροφική κίνηση της κατασκευής περί τον Z άξονα, με ποσοστό συμμετοχής 43%. Η κατασκευή φαίνεται να διαθέτει μεγαλύτερη δυσκαμψία κατά το X άξονα σε σχέση με τον Y.

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+ψQ, με ψ=0,3. 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

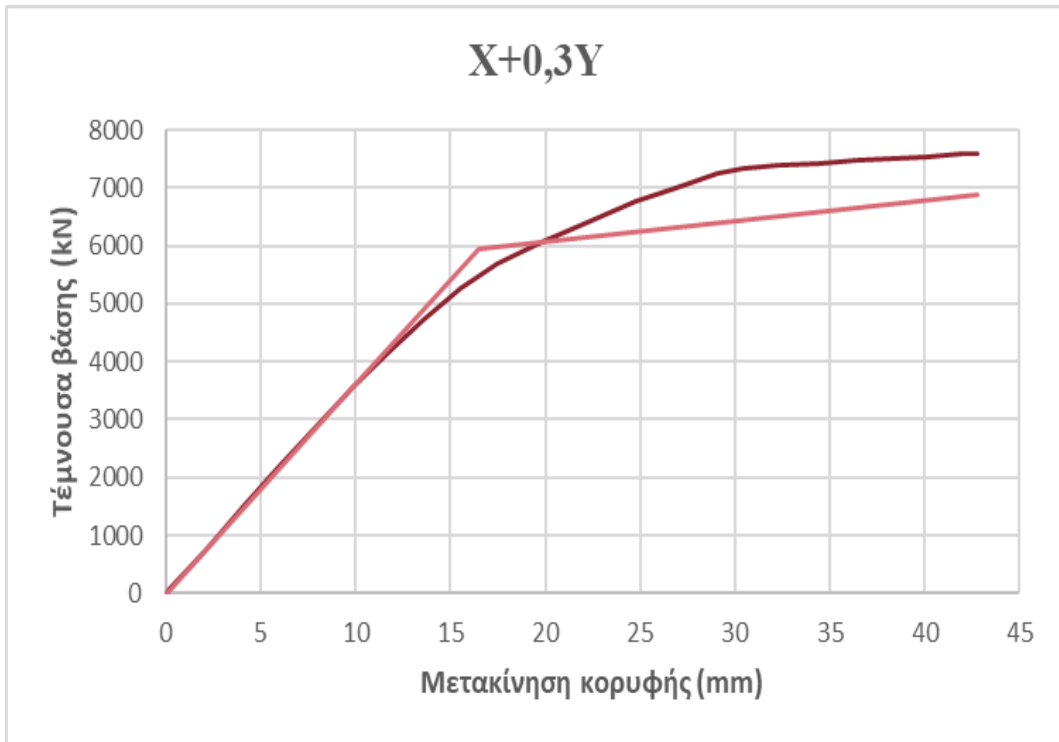
Οι φορτίσεις ορίζονται με την ίδια εντολή που ορίζονται και τα κατακόρυφα φορτία, ορίζεται όμως ως αρχική συνθήκη η φόρτιση G+ψQ, η οποία περιγράφηκε παραπάνω. Η φόρτιση της κατασκευής γίνεται μέσω ελεγχόμενης μετακίνησης του κόμβου ελέγχου (Displacement Control) έτσι ώστε να παρέχεται επαρκής εικόνα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

4.4 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης

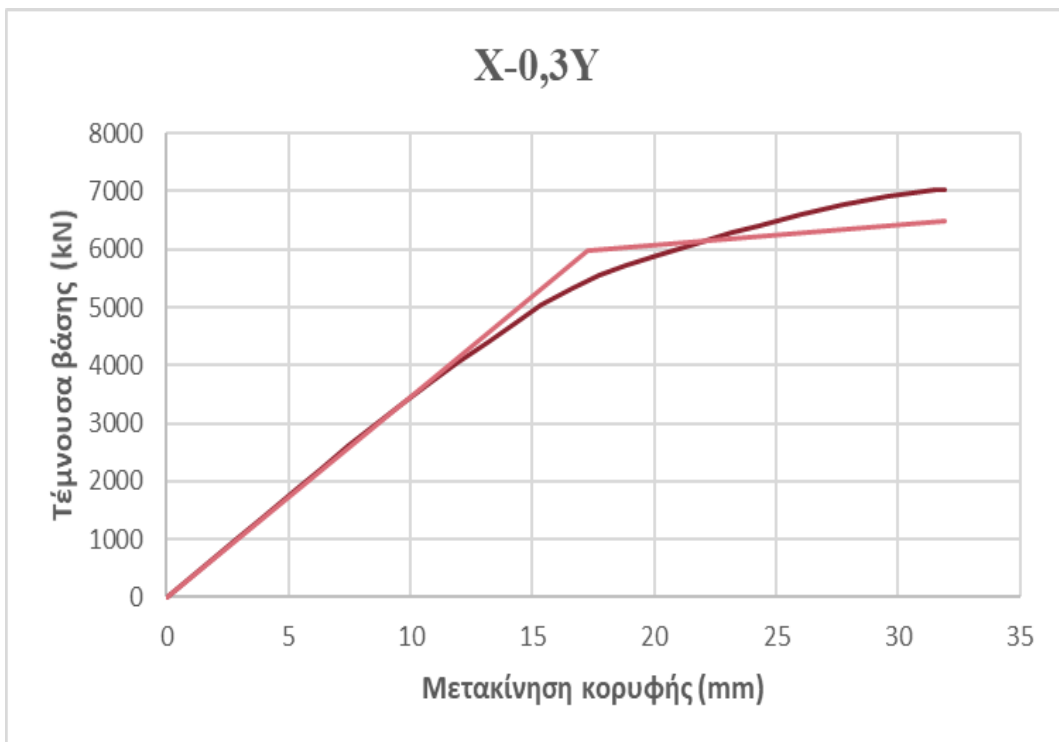
4.4.1 Κατά X

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

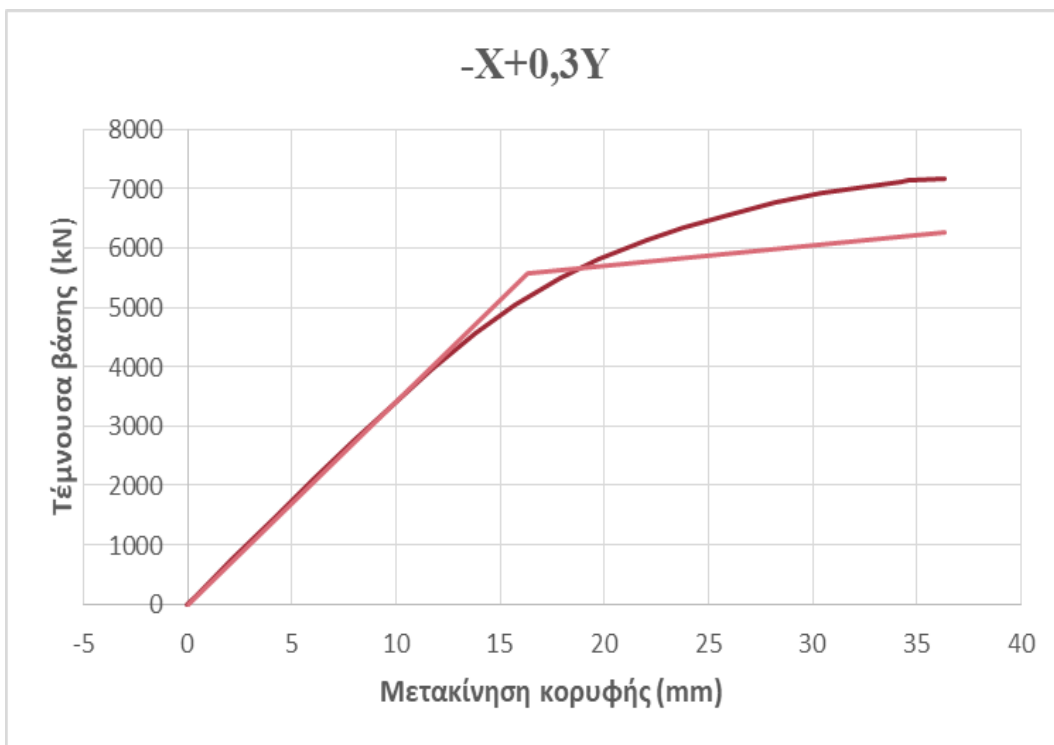
Οι καμπύλες αυτές κρίνεται σκόπιμο να μετατραπούν σε εξιδανικευμένες καμπύλες δύναμης-μετατόπισης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι αυτή που προτείνεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και αντιστοιχεί σε διγραμμική καμπύλη με κλίση πρώτου κλάδου K_e και δεύτερου κλάδου αK_e . Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται για κάθε 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.



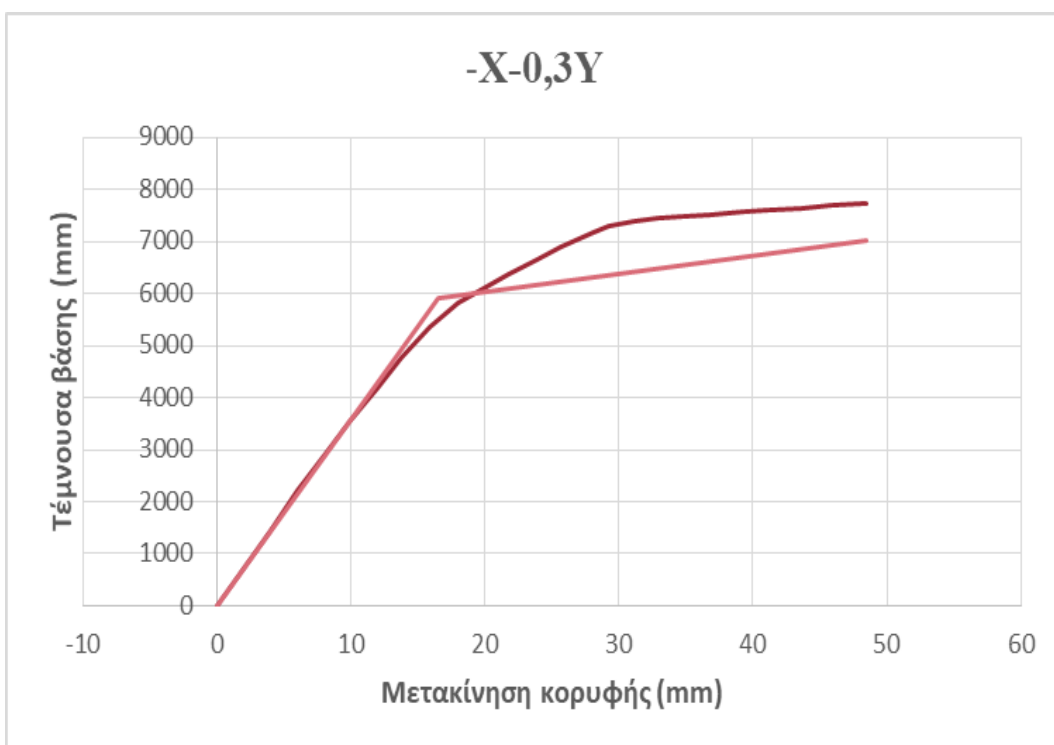
Σχίμα 4.1 Καμπύλη ικανότηας και διγραμμικοποίηση X+0,3Y



Σχίμα 4.2 Καμπύλη ικανότηας και διγραμμικοποίηση X-0,3Y

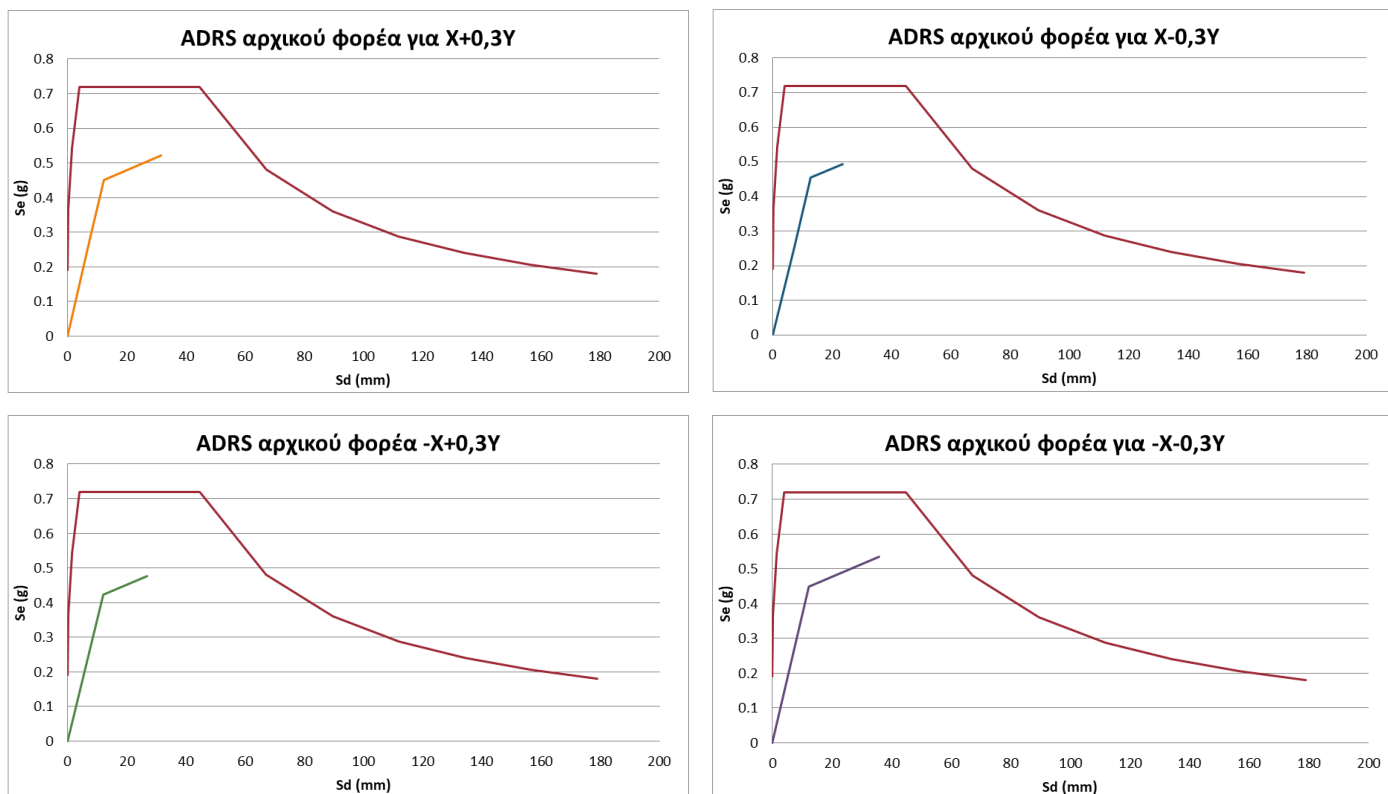


Σχήμα 4.4 Σύγκριση απόκρισης φορέα και διγραμμικοποίηση -X+0,3Y



Σχήμα 4.5 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση -X-0,3Y

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 1^η ιδιομορφή. Στο ίδιο σύστημα τοποθετείται και η καμπύλη του φάσματος απόκρισης του Ευρωκώδικα 8, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Εάν το φάσμα απόκρισης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος τέμνει το φάσμα απαίτησης του Ευρωκώδικα σημαίνει ότι η κατασκευή θα μπορέσει να αντεπεξέλθει στον αναμενόμενο σεισμό αποτίμησης. Σε άλλη περίπτωση, η κατασκευή δεν μπορεί να παραλάβει το σεισμικό φορτίο που ορίστηκε και θα πρέπει να ενισχυθεί καταλλήλως.

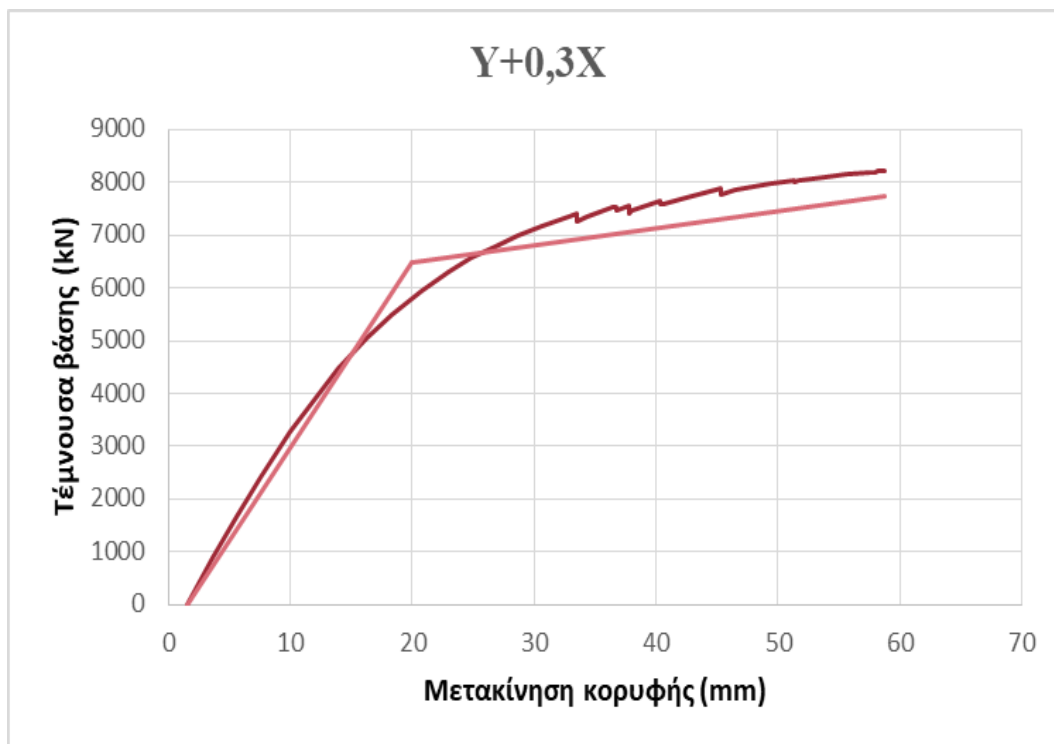


Σχήμα 4.6 Καμπύλες ADRS φορέα κατά X

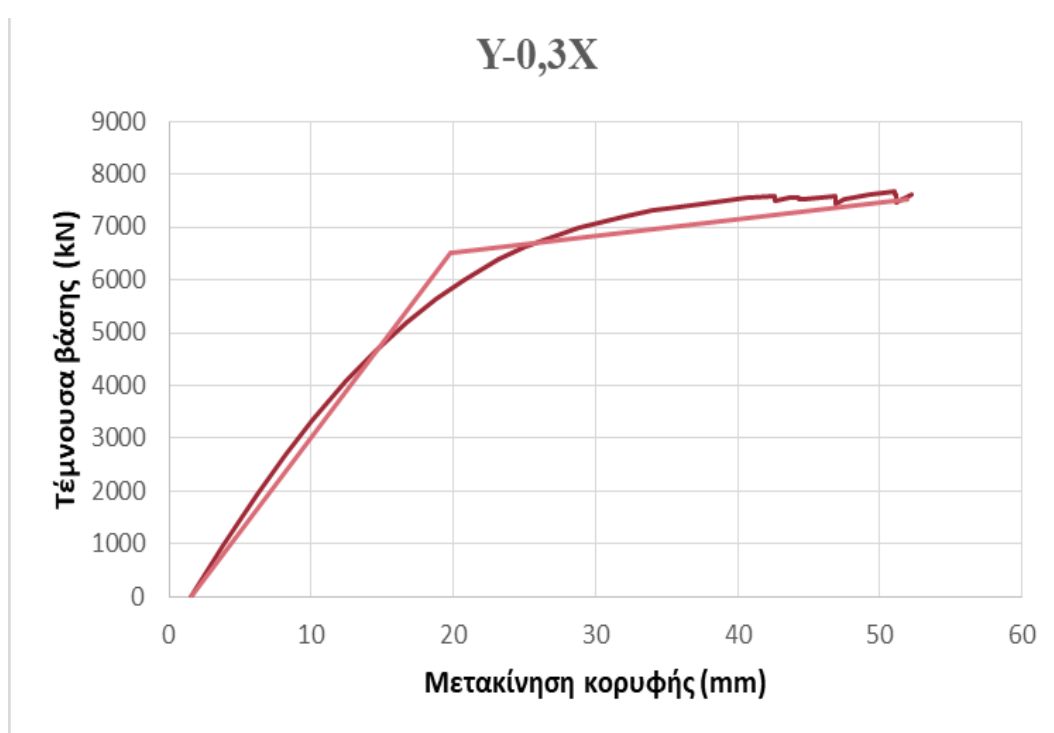
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, η απόκριση της κατασκευής δεν είναι επαρκής για το σεισμό που ορίστηκε για την αποτίμηση και η κατασκευή θα χρειαστεί ενίσχυση.

4.4.2 Κατά Y

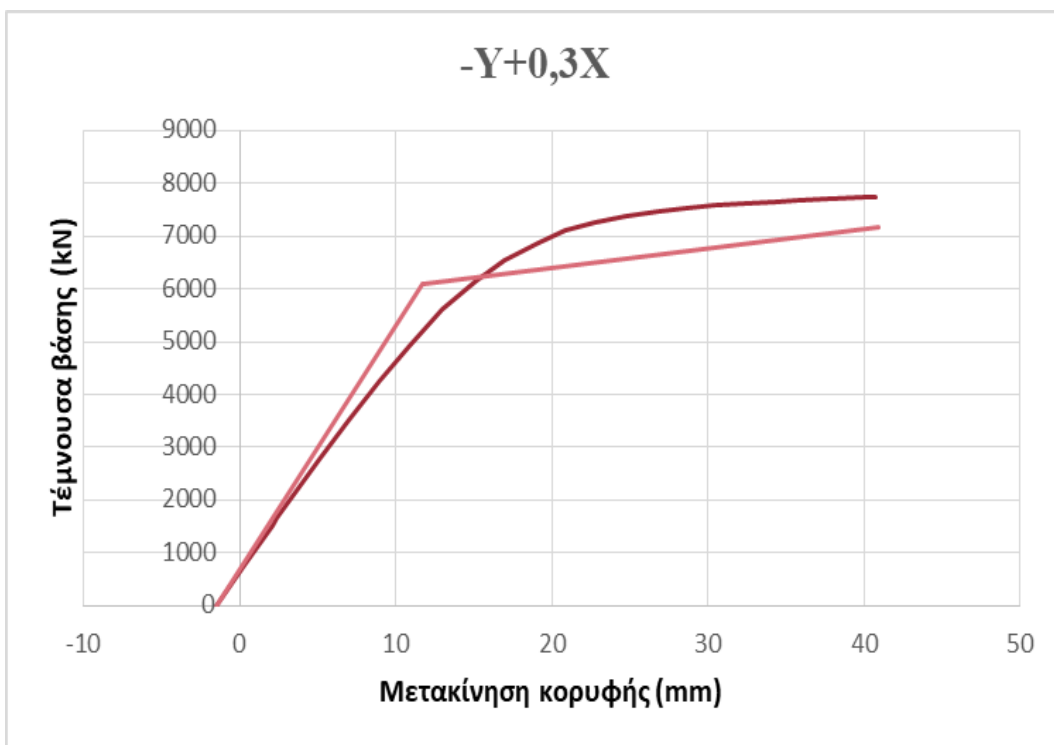
Αντίστοιχα λοιπόν, προκύπτουν τα διαγράμματα F-δ για τη διεύθυνση Y και οι αντίστοιχες διγραμμικές καμπύλες τους, που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



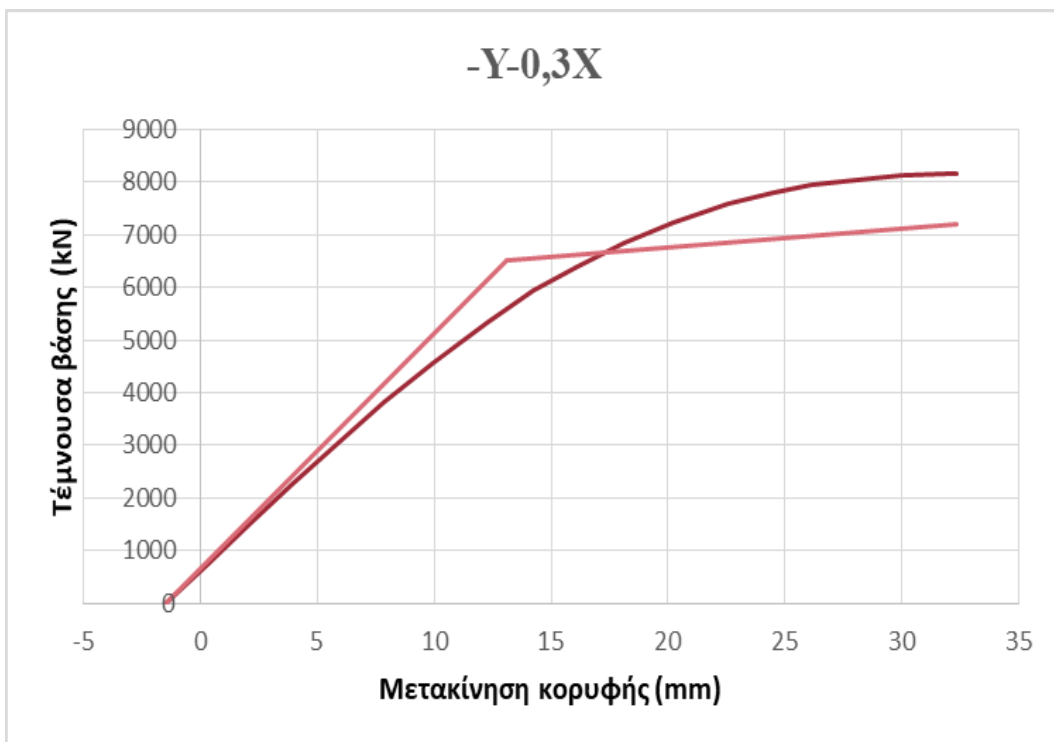
Σχήμα 4.7 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση Y+0,3X



Σχήμα 4.8 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση Y-0,3X

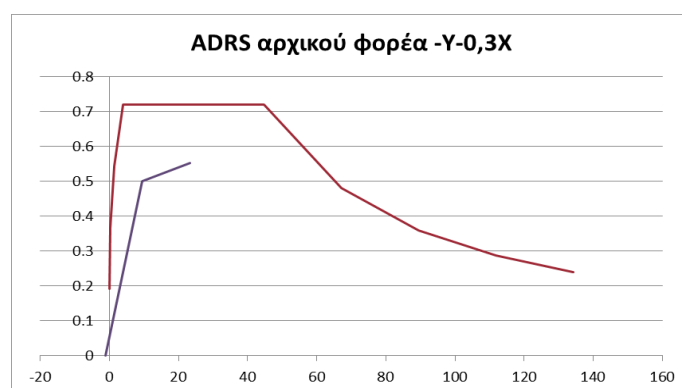
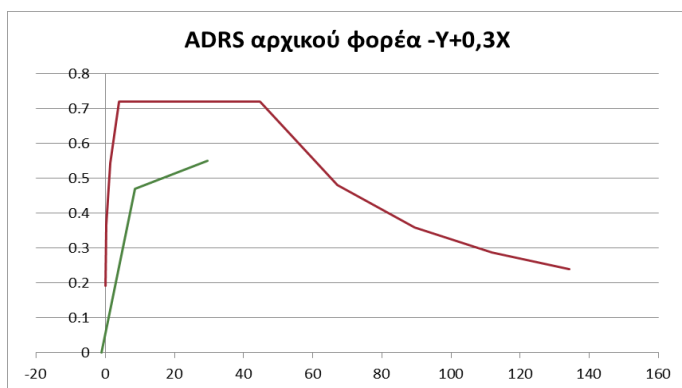
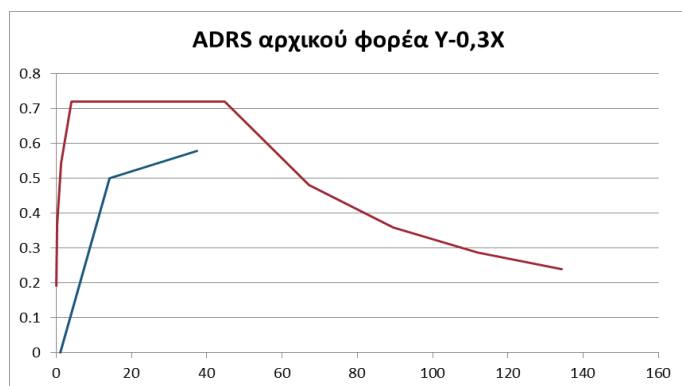
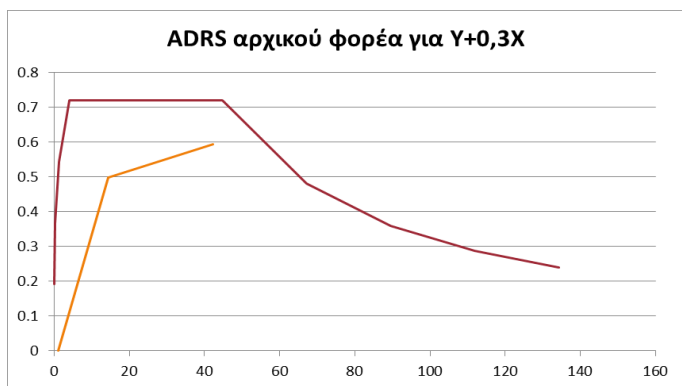


Σχήμα 4.10 Καμπύλη ικανότητας και διγραμμικοποίηση -Y+0,3X



Σχήμα 4.9 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.

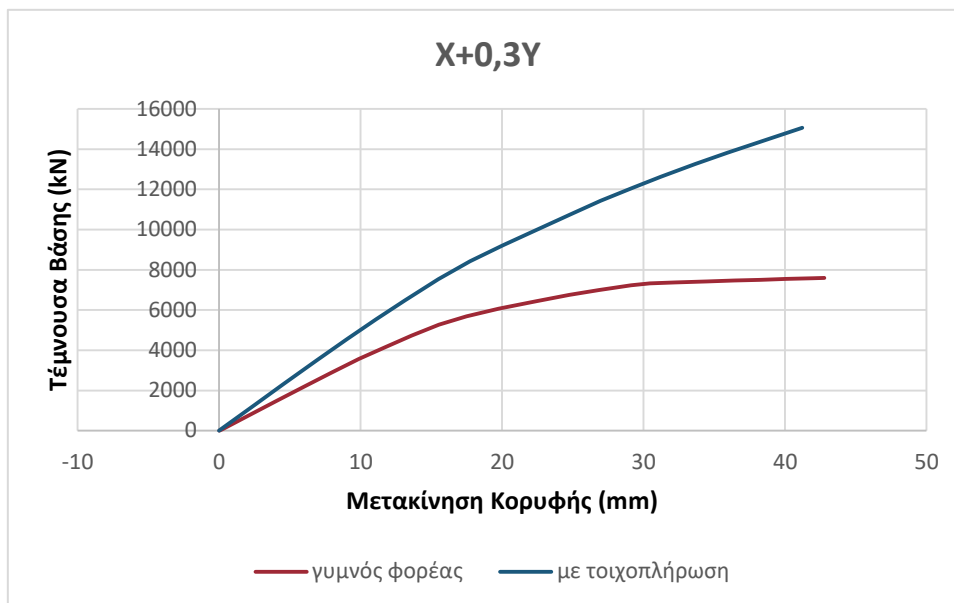


Σχήμα 4.11 Καμπύλες ADRS φορέα κατά Y

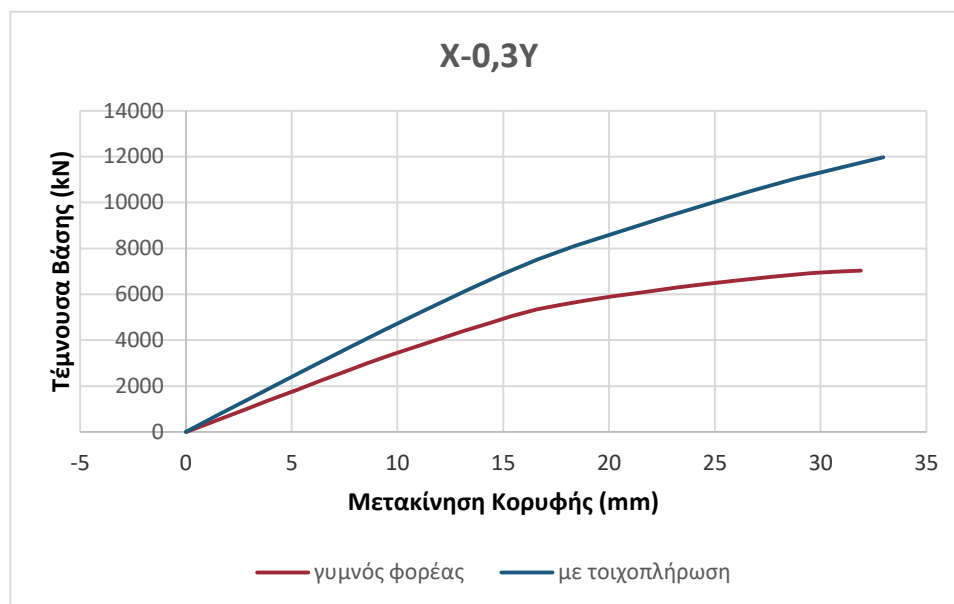
4.5 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης με συνεκτίμηση της τοιχοποιίας

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.

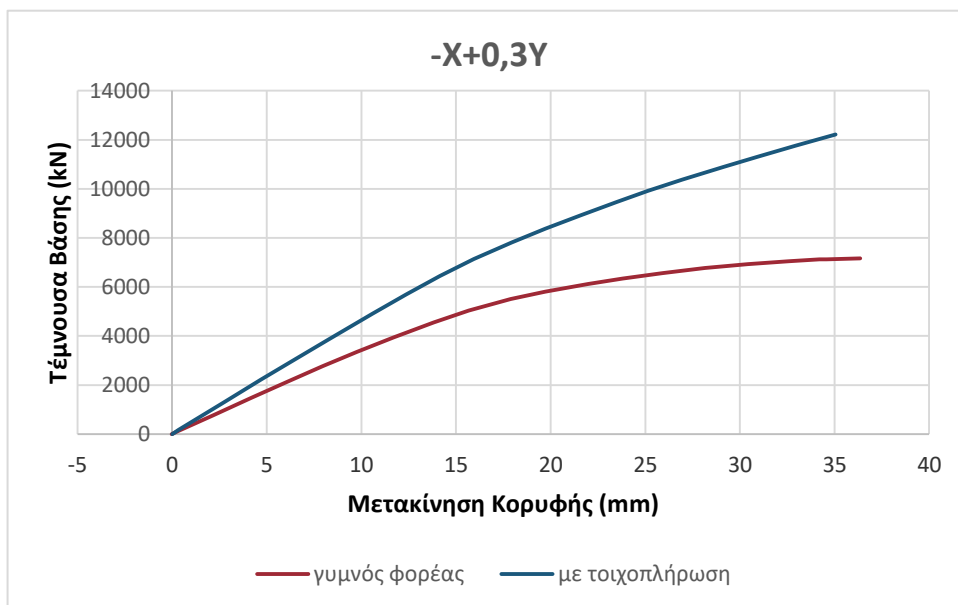
4.5.1 Κατά Χ



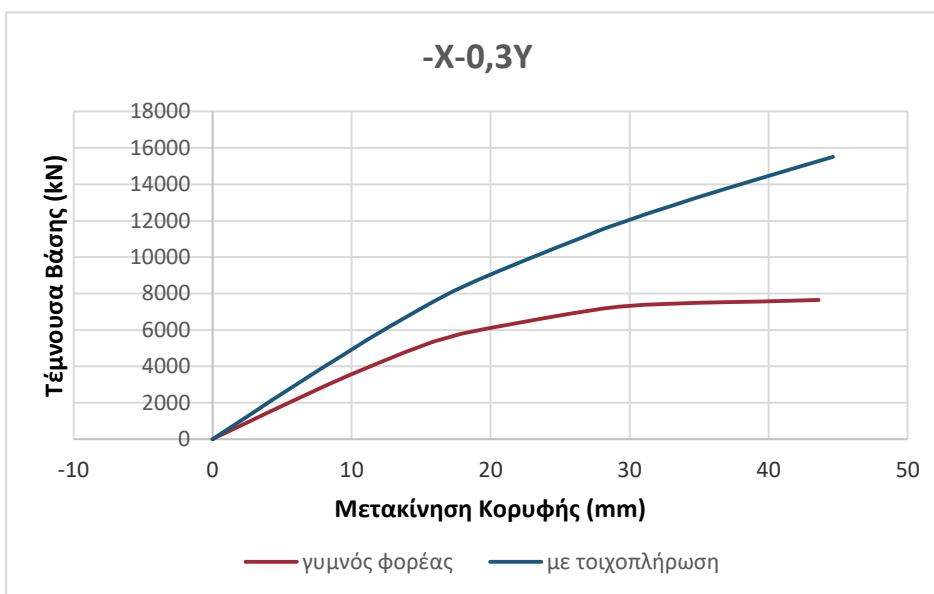
Σχήμα 4.12 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία X+0,3Y



Σχήμα 4.13 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία X-0,3Y



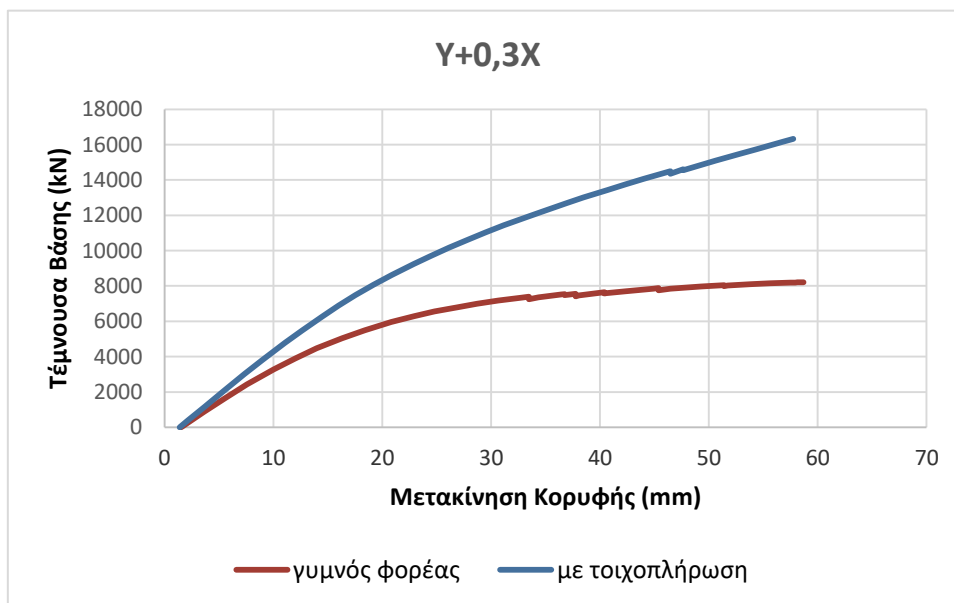
Σχήμα 4.14 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία -X+0,3Y



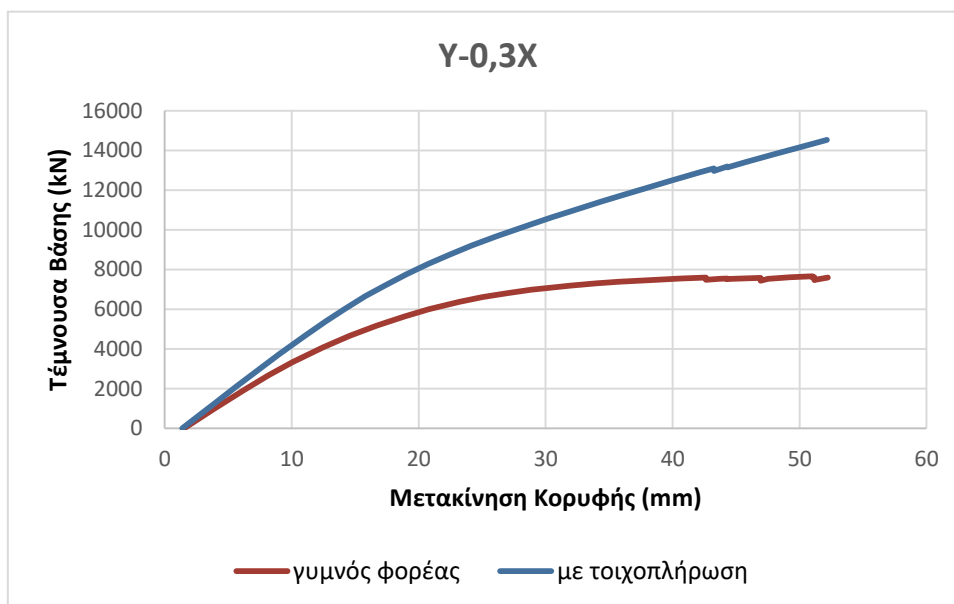
Σχήμα 4.15 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία -X-0,3Y

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.

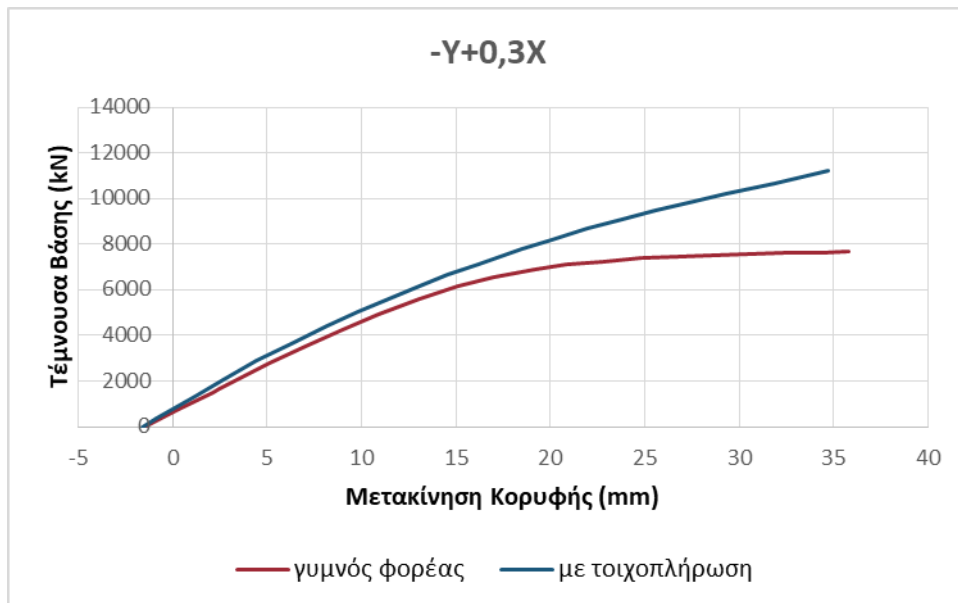
4.5.2 Κατά Υ



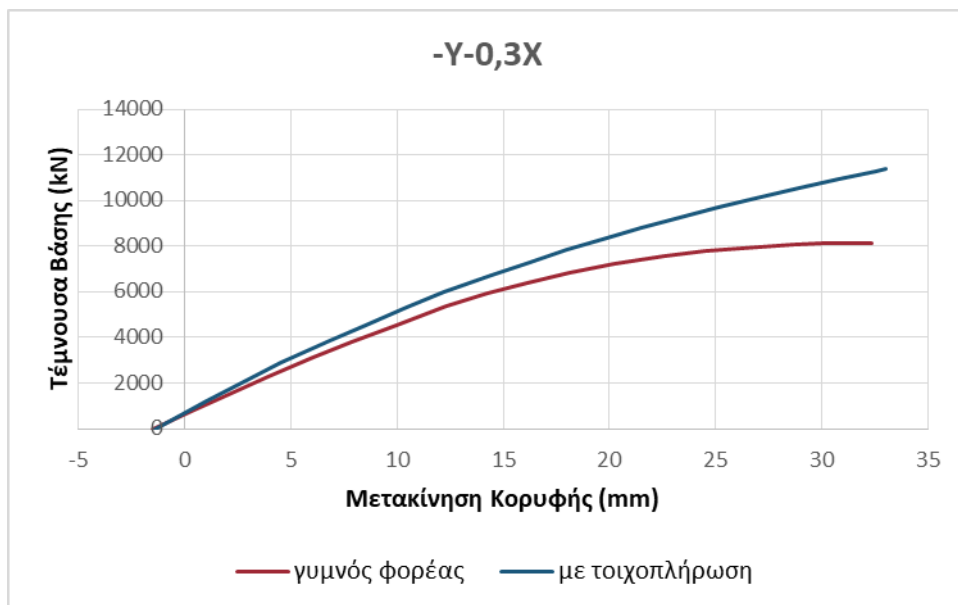
Σχήμα 4.16 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία Y+0,3X



Σχήμα 4.17 Σύγκριση απόκρισης φορέα με τοιχοποιία Y-0,3X



Σχήμα 4.19 Σχήμα απόκρισης φορέα με τοιχοποιία -Υ+0,3Χ



Σχήμα 4.18 Σύγκριση 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. Επιπλέον, χρήζει προστασίας και επιδιόρθωσης λόγω των εμφανών φθορών στα φέροντα και μη στοιχεία της.

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 και οι δύο τρόποι επέμβασης, ενισχύσεις αλλά και επισκευές.

5.1.2 Επισκευές

Η αποφλοίωση της επικάλυψης του σκυροδέματος με τη συνεπακόλουθη διάβρωση του οπλισμού καθώς και οι ρωγμές που παρατηρούνται στα στοιχεία της κατασκευής θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με τα κατάλληλα μέτρα.

Για την αποκατάσταση των μικρών ρωγμών στην τοιχοποιία προτείνεται η χρήση κονιαμάτων, ενώ για μεγαλύτερες ρωγμές και τη συγκόλληση παλαιού και νέου σκυροδέματος και οπλισμών προτείνεται η χρήση ρητινών. Στις διατομές που το σκυρόδεμα έχει αποφλοιωθεί και ο οπλισμός έχει διαβρωθεί θα πρέπει να εξεταστεί αναλυτικότερα πόσο έχει προχωρήσει η διάβρωση του χάλυβα για να προταθεί σύστημα για την αναστολή της διάβρωσης ενδεχόμενη ενίσχυση της διατομής.

5.1.3 Ενισχύσεις

Ο μη ενισχυμένος φορέας ήδη από τα κατακόρυφα φορτία του αναπτύσσει μια ροπή, λόγω του κλειστού προβόλου στη βορινή πλευρά του. Προτείνεται η υποστύλωση της πλάκας του ορόφου, με σκοπό την ανακούφισή της αλλά και την μείωση της καθ' ύψος μη κανονικότητας. Η κατασκευή ενισχύεται με 7 υποστλώματα διατομής 75x75 cm, από σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβα οπλισμών B500C.

Παράλληλα, προτείνεται η δημιουργία ενός τοιχίου στη νότια πλευρά του δομήματος, για την αύξηση της δυσκαμψίας κατά την Y διεύθυνση, που όπως φαίνεται από τις αναλύσεις είναι και η ασθενέστερη. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο τοιχίο είναι τα ίδια με αυτά των υποστυλωμάτων, δηλαδή σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβα οπλισμών B500C.

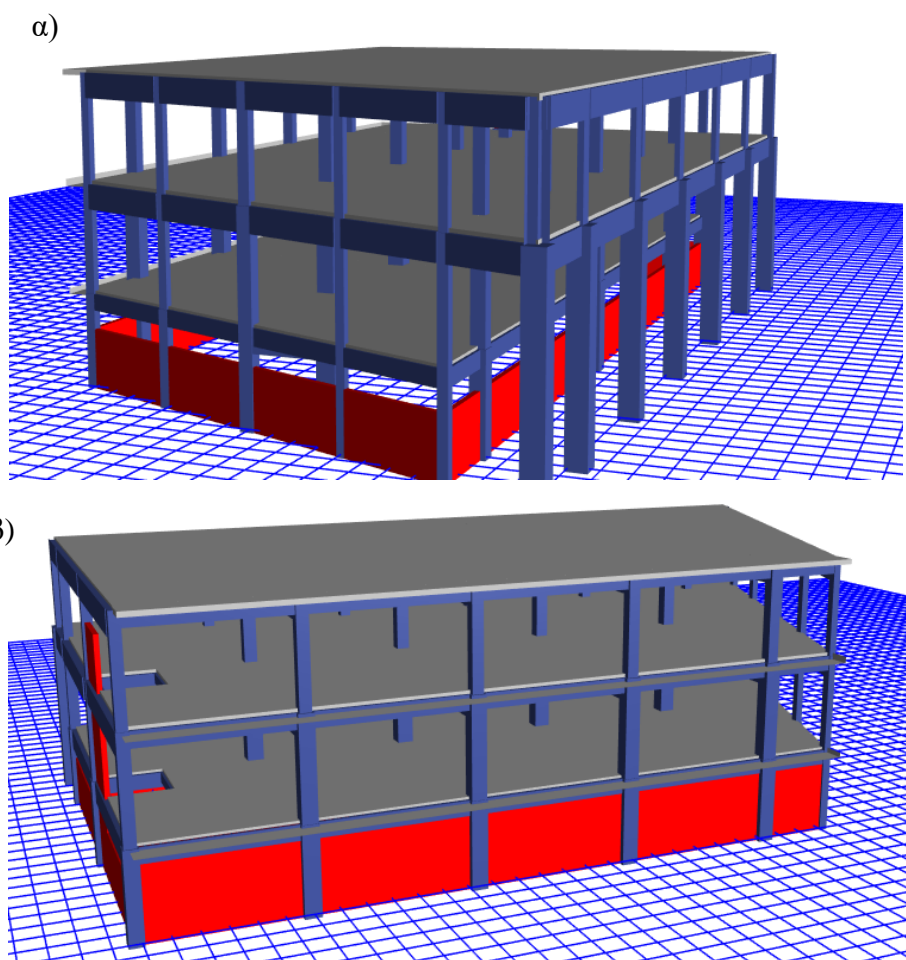
5.1.4 Ψαθυρή συμπεριφορά υποστυλωμάτων

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 πλάστιμα, 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 α) υποστύλωση πλάκας β) δημιουργία τοιχίου

Οι καμπύλες ικανότητας της κατασκευής μετατρέπονται σε καμπύλες ADRS ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και τοποθετούνται οι στάθμες επιτελεστικότητας στην καμπύλη. Ελέγχεται η συμπεριφορά του ΙΜΣ σε σχέση με την απαίτηση του ΕΚ8, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

5.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

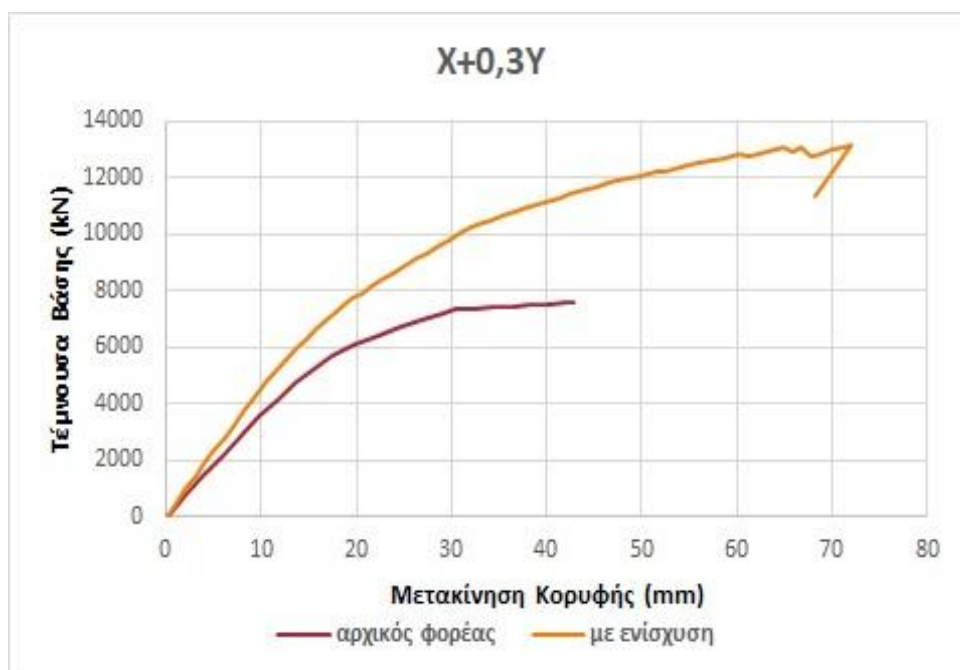
Εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής άλλη μια φορά για να προσδιοριστούν οι καινούριες ιδιομορφές του κτηρίου, λόγω της καινούριας διαμόρφωσης του. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ακόμα, αναμενόμενα, οι καινούριες ιδιομορφές του φορέα φαίνεται να έχουν χαμηλότερες ιδιοπερίόδους λόγω της συνολικής αύξησης της δυσκαμψίας του. Όπως και πριν, η 1^η ιδιομορφή ελέγχει την κίνηση κατά X, με ποσοστό συμμετοχής στη συνολική μάζα 61%, η 2^η την κίνηση κατά Y, με ποσοστό συμμετοχής 48% και η 3^η αναφέρεται στη στροφική κίνηση περί τον Z άξονα, με ποσοστό συμμετοχής 45%.

Πίνακας 5.1 Ποσοστά ενεργοποιούμενης μάζας ιδιομορφών ενισχυμένου φορέα

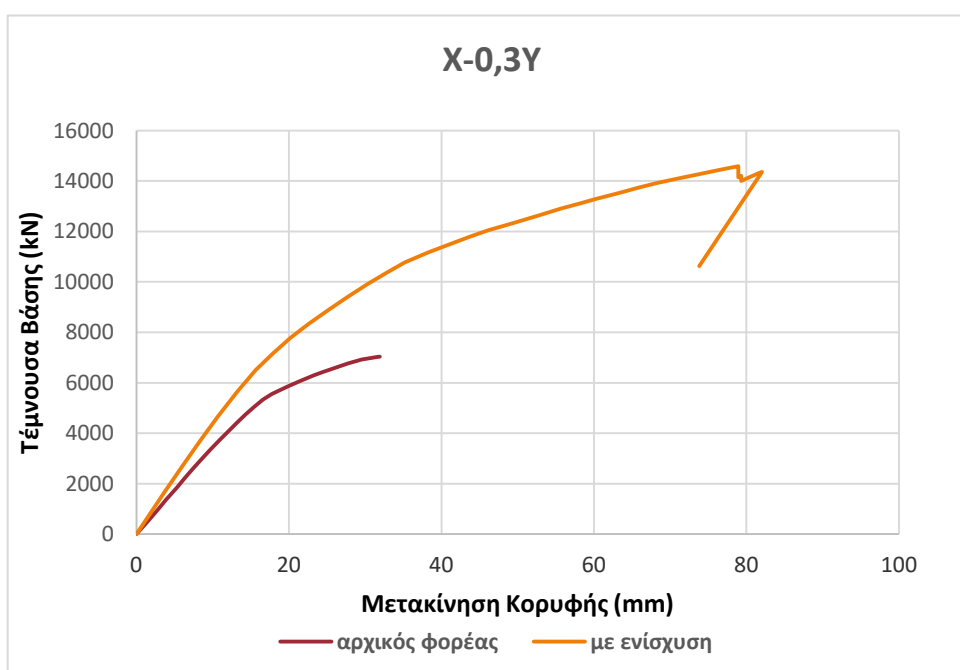
Ιδιομορφή	Περίοδος (sec)	U _x	U _y	R _z
1	0.391	0.6101	0.0115	0.0174
2	0.357	0.0325	0.4882	0.1454
3	0.268	0.013	0.1274	0.452
4	0.156	0.0321	0.0814	0.0246
5	0.146	0.0716	0.0509	0.0003
6	0.112	0.0008	0.0551	0.1216
7	0.069	0.0001	0.1106	0.0427
8	0.058	0.1985	2.26E-05	0.0051
9	0.048	0.0011	4.72E-06	0.0002

5.2.2 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά X

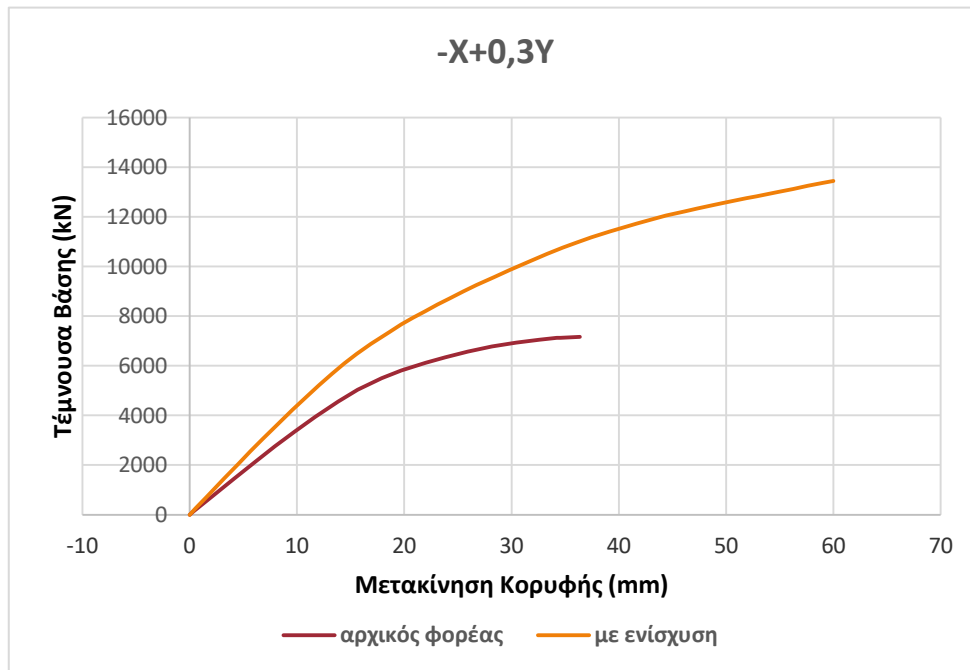
Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κορυφής για κάθε συνδυασμό φόρτισης φαίνονται στα σχήματα παρακάτω, μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες που προέκυψαν από την ανάλυση του μη ενισχυμένου φορέα. Παρατηρείται μια πιο πλάστιμη συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς αυξάνεται ο λόγος της μέγιστης μετακίνησης ως προς τη μετακίνηση διαρροής, ενώ παράλληλα φαίνεται πως αυξάνεται και η μέγιστη φέρουσα ικανότητα της.



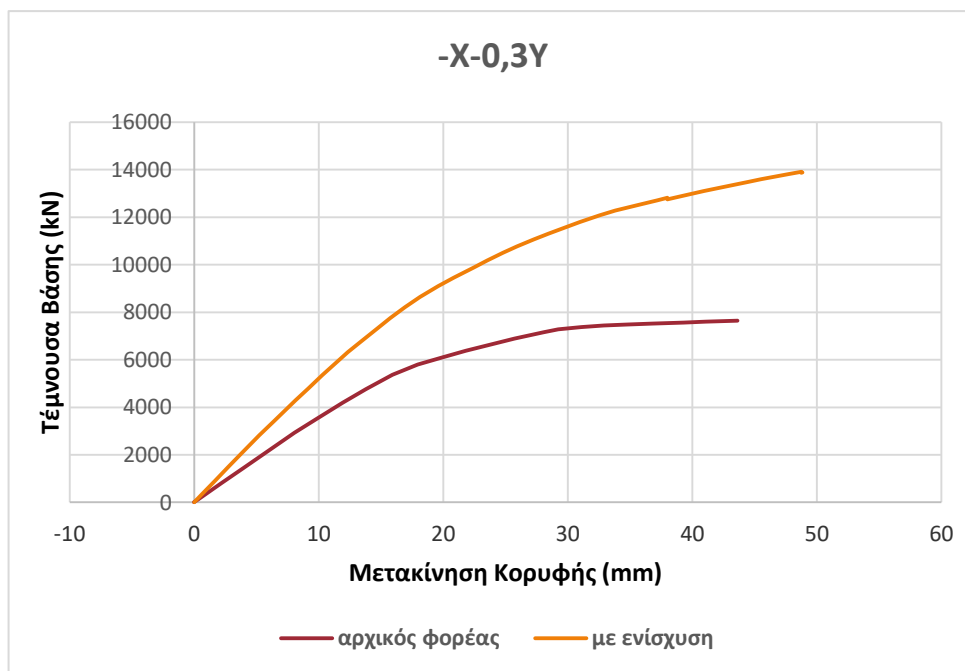
Σχήμα 5.2 Ενισχυμένος φορέας X+0,3Y



Σχήμα 5.3 Ενισχυμένος φορέας X-0,3Y



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

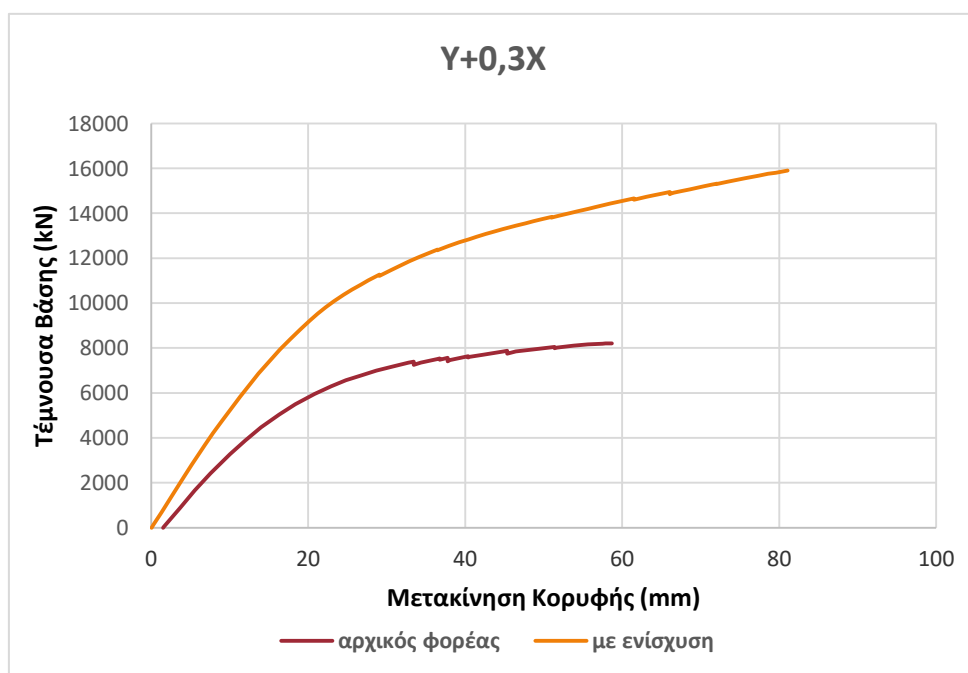


Σχήμα 5.5 Ενισχυμένος φορέας $-X-0,3Y$

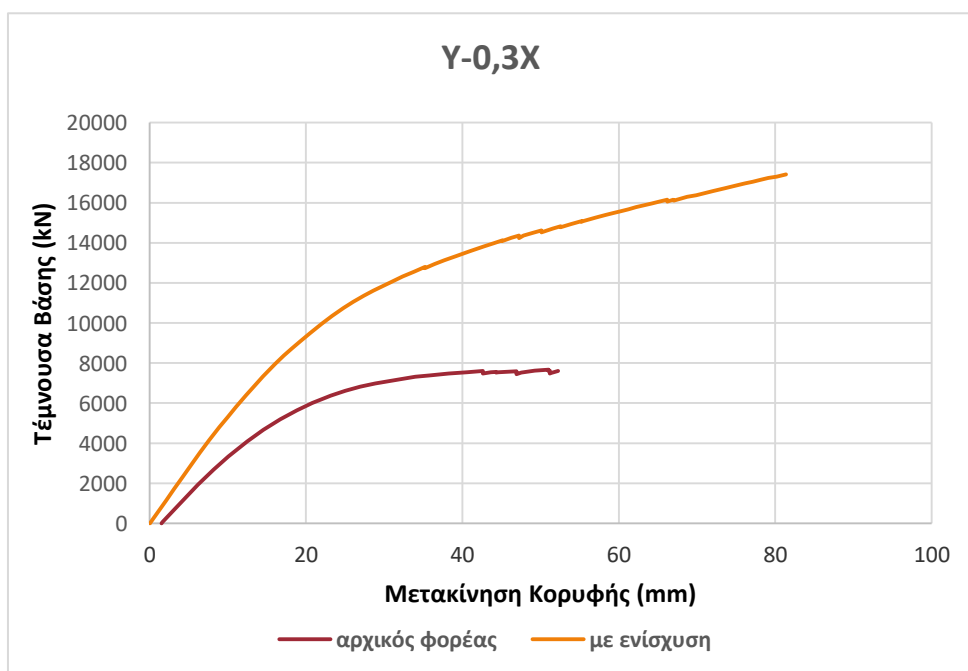
Κρίνεται λοιπόν πως οι επεμβάσεις φέρουν ευστάθεια στην κατασκευή, η οποία πλέον μπορεί και απορροφά περισσότερη σεισμική ενέργεια αλλά και να επιτρέπει στα μέλη της να αναπτύσσουν πλαστική συμπεριφορά κατά τη X διεύθυνση.

5.2.3 Αποτελέσματα στατικής ανελαστικής ανάλυσης κατά Υ

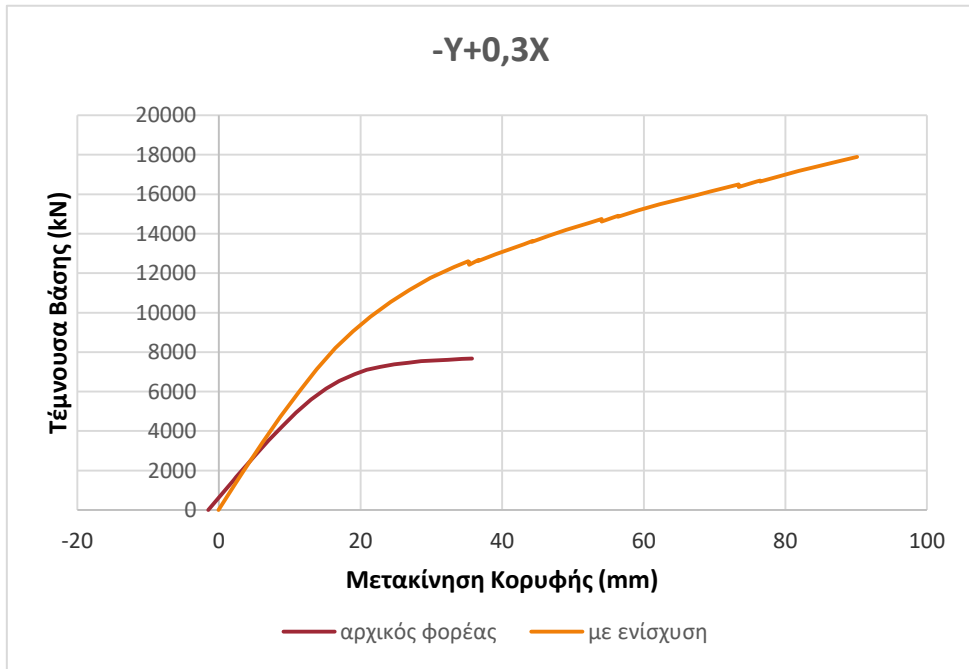
Αντίστοιχα, παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κορυφής για τους συνδυασμούς φόρτισης κατά Υ. Αντίστοιχη μεταβολή στη συμπεριφορά της κατασκευής παρατηρείται και κατά τη διεύθυνση αυτή, η οποία θεωρείται ότι προκύπτει από την τοπική αύξηση της πλαστιμότητας των μελών, μέσω των ενισχύσεων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



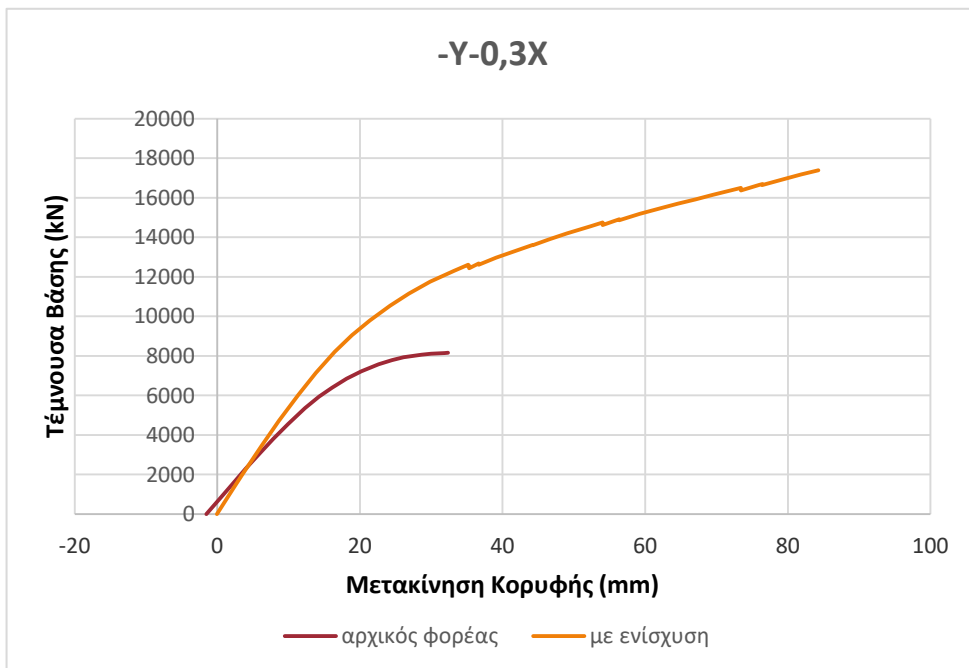
Σχήμα 5.6 Ενισχυμένος φορέας Y+0,3X



Σχήμα 5.7 Ενισχυμένος φορέας Y-0,3X



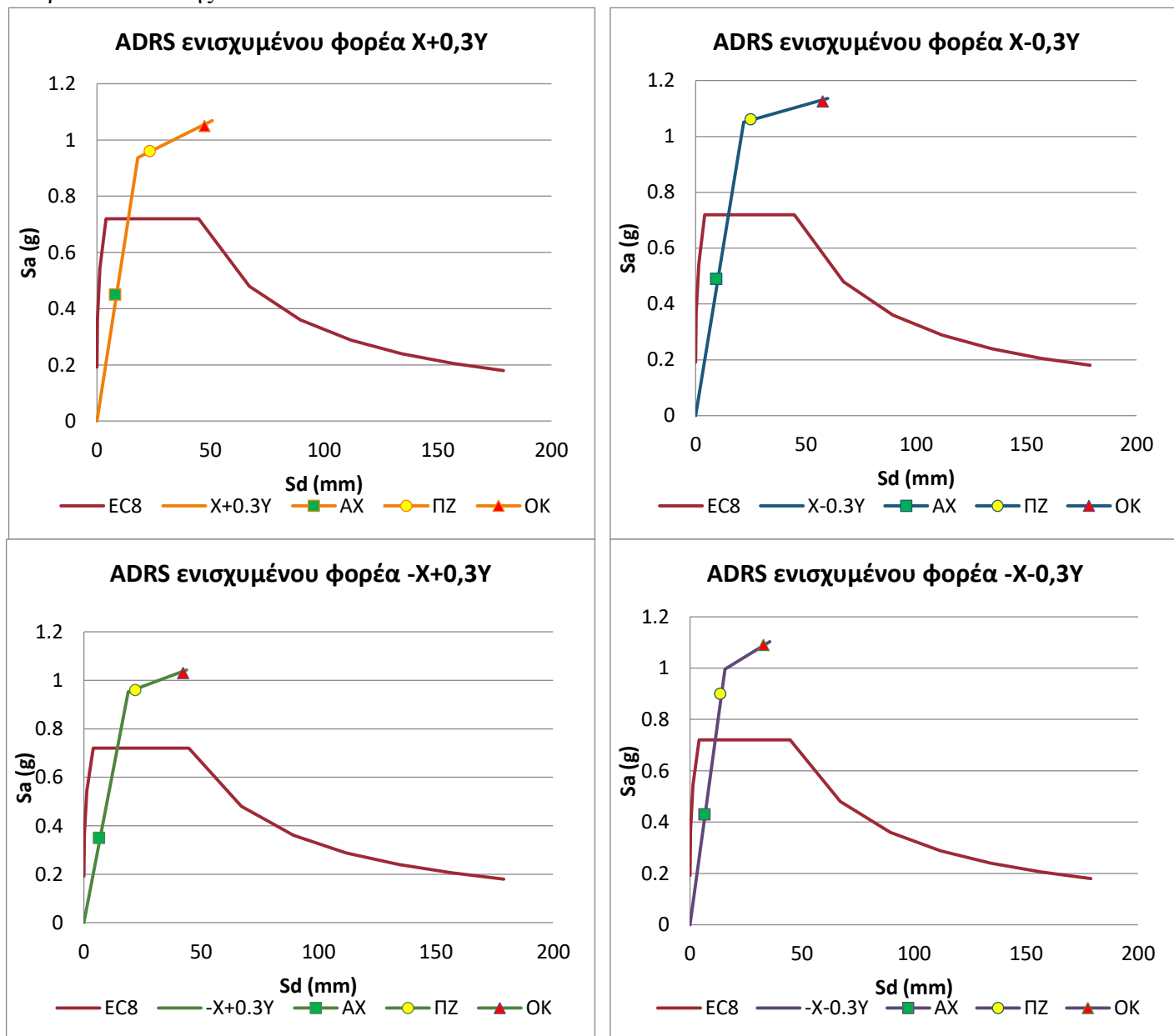
Σχήμα 5.9 Ενισχυμένος φορέας -Y+0,3X



Σχήμα 5.8 Ενισχυμένος φορέας -Y-0,3X

5.2.4 ADRS καμπύλες κατά X

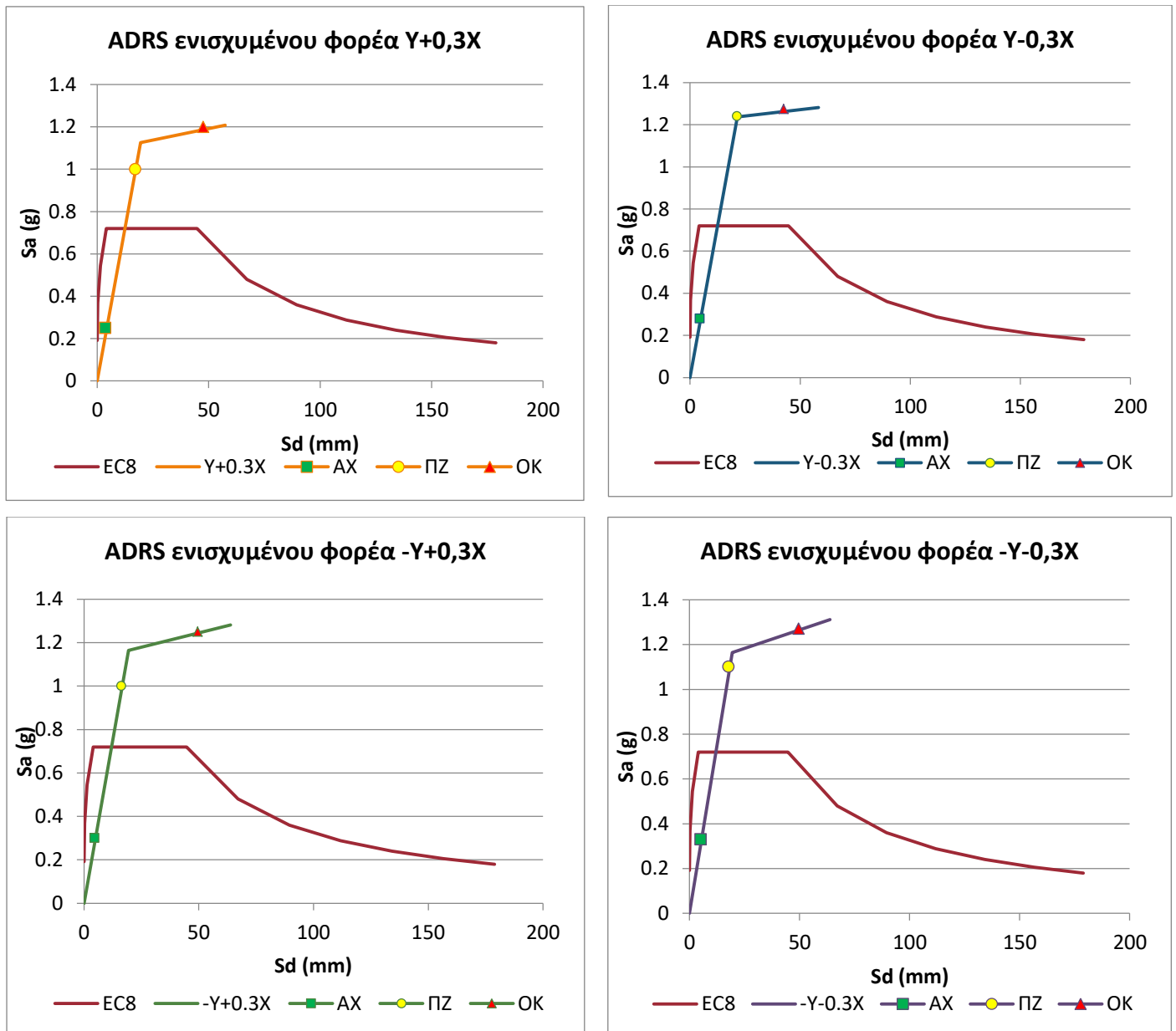
Οι καμπύλες διγραμικοποιούνται και μετατρέπονται σε μορφή ADRS για τη σύγκρισή τους με το φάσμα απαίτησης του Ευρωκώδικα 8. Για τη μετατροπή σε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα θεωρείται ότι η κατασκευή ταλαντώνεται σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή. Οι καινούριες καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 5.10. Σε αυτές τις καμπύλες έχουν σημειωθεί οι Στάθμες Επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση (ΑΜ), Προστασία Ζωής (ΠΖ) και Οιονεί Κατάρρευση (ΟΚ), όπως έχουν οριστεί προηγουμένως. Φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ο στόχος σεισμικού σχεδιασμού που έχει τεθεί, καθώς η κατασκευή κατά το σεισμό αποτίμησης που ορίστηκε βρίσκεται πριν το σημείο επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής.



Σχήμα 5.10 ADRS καμπύλες ενισχυμένου φορέα κατά X

5.2.5 ADRS καμπύλες κατά Y

Η συμπεριφορά της κατασκευής κατά Y θεωρείται ότι ορίζεται από την 2^η ιδιομορφή, βάσει της οποίας προκύπτει η καμπύλη ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματός του, διγραμμικοποιημένη σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί πιο πριν. Το σημείο επιτελεστικότητας βρίσκεται πριν από τις στάθμες Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση, δηλαδή η ενίσχυση κρίνεται επαρκής.



Σχήμα 5.11 ADRS καμπύλες ενισχυμένου φορέα κατά Y

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αποτιμάται η σεισμική συμπεριφορά κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, μελετημένης ως βιομηχανικό κτήριο σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις το 1975, 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 υποστυλώματα, τα οποία δεν έχουν τον απαραίτητο οπλισμό διάτμησης, πόσο μάλλον περίσφιγξης, για να μπορέσουν να αποκριθούν με πλάστιμο τρόπο.

Η επίδραση της τοιχοποιίας κρίνεται μεγάλης σημασίας για την απόκριση του φορέα τόσο μέσω της ευμενούς επιρροής της στην αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής αλλά κυρίως λόγω των δυσμενών επιπτώσεων που μπορεί να έχει στα περιμετρικά υποστυλώματα η διακοπή της. Θεωρείται, λοιπόν, 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. Για τη δυσμενή επίδραση της τοιχοποιίας στην ασυνέχεια των υποστυλωμάτων και τη δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων

Το κτήριο 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 του με επτά καινούρια υποστυλώματα και ένα 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 αποτίμησης φαίνεται να λειτουργεί, καθώς παρατηρείται ότι ο φορέας πλέον είναι σε θέση να φέρει τα οριζόντια φορτία του σεισμού αποτίμησης. Το τοίχωμα, που προτείνεται να κατασκευαστεί στο υπόγειο προσφέρει σημαντική δυσκαμψία στην κατασκευή, ιδιαίτερα κατά την Υ διεύθυνση, όπου και ο φορέας υστερεί, ενώ λειτουργικά δεν εμποδίζει κάποια λειτουργία, καθώς τα φατνώματα που προτείνεται να κατασκευαστεί είναι πλήρως τοιχοπληρωμένα. Τα υποστυλώματα που προτείνεται να κατασκευαστούν για την υποστύλωση της πλάκας του κλειστού προβόλου προφέρουν ευστάθεια στην κατασκευή, η οποία επιτρέπει στα μέλη της να αναπτύξουν μια πιο πλαστική συμπεριφορά αλλά και με την κατάλληλη όπλιση και περίσφιγξη είναι σε θέση να βοηθήσει στο μηχανισμό παραλαβής των οριζόντιων σεισμικών φορτίων. Τα καινούρια υποστυλώματα αλλάζουν την αρχιτεκτονική της κατασκευής, καθώς πλέον δημιουργείται μια στοά στην όψη του κτηρίου, παρέμβαση που αισθητικά συνάδει με την αρχιτεκτονική των γύρω κτηρίων και προσδίδει ενδιαφέρον στον ίδιο το φορέα.

Για να κριθεί ασφαλής και επαρκής ο καινούριος φορέας όμως θα πρέπει να μελετηθεί το μέγεθος της διάβρωσης των οπλισμών του και η ενίσχυσή των διατομών με κατάλληλα μέσα, καθώς και να γίνουν οι απαραίτητες επισκευές στα φέροντα και μη στοιχεία του για την πλήρη αποκατάσταση της λειτουργικότητας του φορέα λόγω των βλαβών που έχουν προκύψει με την πάροδο του χρόνου.

7 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].