

Αποτίμηση και Αντισεισμικής Αναβάθμιση Υφισταμένης Κατασκευής από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με βάση τους Ευρωκώδικες και τον KAN.ΕΠΕ

Απόστολος Ανδρέου

Πολιτικός Μηχανικός

Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

apostoliss.andreou@gmail.com, std147856@ac.eap.gr

Κωνσταντίνος Ρεπαπής

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ

Μέλος ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

crepapis@uniwa.gr

Περίληψη – Οι υφιστάμενες κατασκευές αποτελούν την πλειονότητα των κτιρίων στην χώρα μας. Ένα μεγάλο ποσοστό έχει κατασκευασθεί πριν το 1985 σύμφωνα με παλαιότερους ή χωρίς αντισεισμικούς κανονισμούς, με αποτέλεσμα να είναι καίρια η ανάγκη αποτίμησης της φέρουσας ικανότητάς τους. Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς και στην συνέχεια την αντισεισμική αναβάθμιση μιας πολυώροφης υφιστάμενης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς. Πραγματοποιούνται ανελαστικές στατικές αναλύσεις και ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας από τις οποίες προκύπτουν ανεπάρκειες. Στην συνέχεια διερευνώνται διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης και επιλέγεται η τοποθέτηση νέων τοιχωμάτων σε συνδυασμό με την ενίσχυση με χρήση FRP σε υποστυλώματα και δοκούς του κτιρίου. Πραγματοποιούνται νέες ανελαστικές αναλύσεις και προκύπτει η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ενίσχυσης που επιλέχθηκε.

Λέξεις-Κλειδιά: Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής, Ανελαστική Στατική Ανάλυση, Ανελαστική Δυναμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας, Ενίσχυση.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υφιστάμενες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, στο μεγαλύτερο ποσοστό τους έχουν κατασκευαστεί πριν 1985 χωρίς να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο του σεισμού ή στις περιπτώσεις που σχεδιάστηκαν με κάποιον αντισεισμικό κανονισμό, τα σεισμικά φορτία ήταν αρκετά μικρότερα από αυτά που προτείνουν οι σύγχρονοι κανονισμοί. Επιπρόσθετα, οι μη ορθές κατασκευαστικές πρακτικές που ακολουθούσαν παλιά, σε συνδυασμό με την χαμηλή ποιότητα των υλικών αλλά και τη φυσική φθορά τους από την ενανθράκωση και την διάβρωση, καθιστούν το σύνολο των παλαιών κατασκευών σεισμικά ευάλωτες. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την σεισμική συμπεριφορά υφισταμένων κτιρίων (Φέκας, 2015; Zembaty & De Stefano, 2016; Χατζηβασιλειάδης, 2019; Naveen et al., 2019; Repapis & Zeris, 2019, 2020). Από τις αναλύσεις των κτιρίων έχει δείχθει και η σημαντική επιρροή των τοιχοπληρώσεων, η

συνεισφορά των οποίων πρέπει να εξετάζεται κατά την αποτίμηση μιας κατασκευής. Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς και στην συνέχεια την αντισεισμική αναβάθμιση μιας πολυώροφης υφιστάμενης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που καλείται να ακολουθήσει ο μελετητής μηχανικός για ένα έργο αποτίμησης ή/και ανασχεδιασμού σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ακολουθεί την εξής πορεία:

- Συγκέντρωση στοιχείων για την υφιστάμενη κατασκευή και επαλήθευση αυτών σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση.
- Επιλογή στάθμης επιτελεστικότητας σε συνεννόηση με τον κύριο του έργου.
- Επιλογή μεθόδου ανάλυσης και προκαταρκτική ανάλυση της κατασκευής
- Τελική ανάλυση/αποτίμηση
- Εκτίμηση και λήψη της βέλτιστης απόφασης για την ενίσχυση με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

III. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

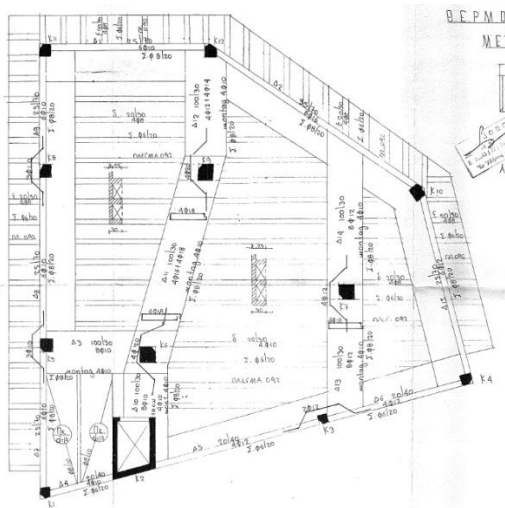
A. Περιγραφή Κτιρίου και Προσομοίωση

Το υπό μελέτη κτίριο αποτελείται από ισόγειο με πατάρι, 1^ο, 2^ο, 3^ο, 4^ο όροφο και δώμα. Βρίσκεται στην περιοχή του Μεταξουργείου στην Αθήνα και ανεγέρθηκε το 1978 σύμφωνα με τον κανονισμό σκυροδέματος του 1954 και με τον αντισεισμικό κανονισμό του 1959. Για άγνωστες αιτίες, το κτίριο δεν ολοκληρώθηκε ποτέ και οι εργασίες ολοκλήρωσης σταμάτησαν στο στάδιο της σκυροδέτησης, πλην του ισόγειου και του παταριού όπου λειτουργεί σήμερα ως κατάστημα. Το κτίριο παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες τόσο γεωμετρικές όσο και κατασκευαστικές. Αρχικά, η κάτοψη του κτιρίου από τον πρώτο όροφο και άνω έχει την μορφή Π δημιουργώντας ένα τύπου αίθριο στην πίσω πλευρά του. Οι πλάκες του φορέα είναι δοκιδωτές μίας διεύθυνσης και όλες οι

εσωτερικές δοκοί έχουν την μορφή ενισχυμένων ζωνών με πλάτος του ενός μέτρου και ύψος 0.30m. Επιπρόσθετα, οι τοιχοποιίες έχουν κατασκευαστεί μόνο στα δύο πρώτα επίπεδα όπως παρουσιάζονται στο υπολογιστικό προσομοίωμα παρακάτω και θεωρείται ότι επιδρούν με δυσμένεια στην απόκριση του φορέα κατά την σεισμική διέγερση, εντείνοντας την στρεπτική ευαισθησία και δημιουργώντας φαινόμενα “κοντών” υποστρωμάτων στον πρώτο όροφο. Η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου φαίνεται στο Σχήμα 1 ενώ στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ο ξυλότυπος οροφής του ισόγειου. Η ποιότητα των υλικών ήταν σκυρόδεμα κατηγορίας B225 και χάλυβας StIII για τον διαμήκη οπλισμό και StI τον εγκάρσιο.



Σχήμα 1. Υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου.



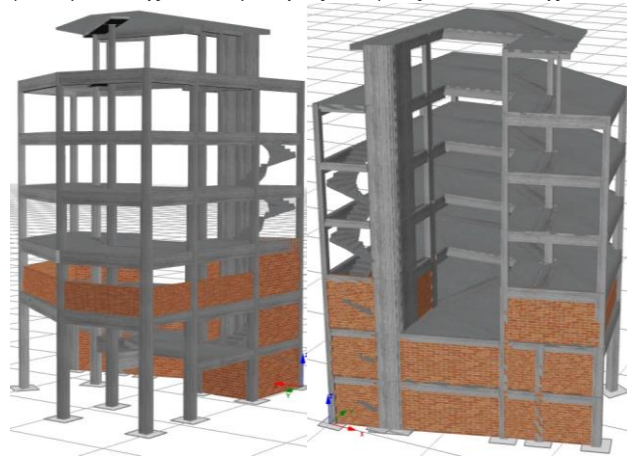
Σχήμα 2. Ξυλότυπος οροφής ισόγειου.

Η αποτίμηση πραγματοποιήθηκε για στάθμη επιτελεστικότητας B2+ «Σημαντικές Βλάβες». Πραγματοποιήθηκε αποτύπωση του κτιρίου και ανίχνευση οπλισμών και διαπιστώθηκαν κάποιες διαφορές σε σχέση με την αρχική μελέτη καθώς δεν κατασκευάστηκαν κάποιοι πρόβολοι. Για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών πραγματοποιήθηκαν προσεισμικοί έλεγχοι (μακροσκοπικός/οπτικός έλεγχος, μη καταστροφικοί έλεγχοι – κρουσιμετρήσεις και μέτρηση μεταβολής ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, πυρηνοληψίες). Η μέση και η

χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμήθηκε ως 30.4 MPa και 26.1 MPa, αντίστοιχα.

Η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ) ελήφθη ως «Ικανοποιητική», καθώς η ΣΑΔ_Υ που σχετίζεται με το επίπεδο γνώσεων των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, σκυροδέματος και χάλυβα, η ΣΑΔ_Γ που σχετίζεται με το επίπεδο γνώσης για τα γεωμετρικά στοιχεία του δομήματος και η ΣΑΔ_Λ που σχετίζεται με το επίπεδο γνώσης για τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες (διάταξη οπλισμών και λεπτομέρειες όπλισης) των επιμέρους δομικών στοιχείων, ελήφθησαν ως «Ικανοποιητικές».

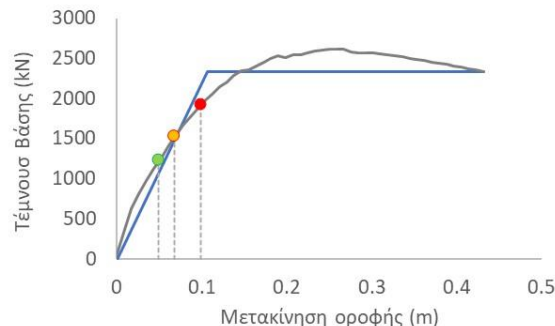
Για την σεισμική αποτίμηση του φορέα έγινε χρήση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover) και της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας και ακολούθησε μια σύγκριση των δύο αναλύσεων ως προς τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Οι αναλύσεις έγιναν με την χρήση του λογισμικού SeismoBuild. Το προσομοίωμα φαίνεται στο Σχήμα 3. Θεωρήθηκε πλήρης πάκτωση στην βάση των υποστρωμάτων ισόγειου και αγνοήθηκε το φαινόμενο της ενδοσιμότητας εδάφους-κατασκευής.



Σχήμα 3. Προσομοίωμα υφιστάμενου φορέα (δύο όψεις).

Β. Αποτελέσματα Ανελαστικών Στατικών Αναλύσεων

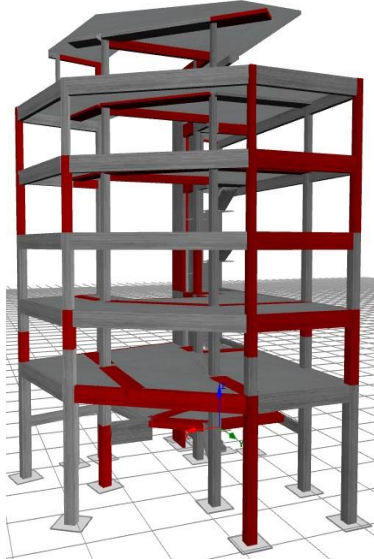
Πραγματοποιήθηκαν 64 αναλύσεις για διάφορους συνδυασμούς. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4 φαίνεται η καμπύλη ικανότητας και η στοχευόμενη μετακίνηση για τις στάθμες επιτελεστικότητας A2, B2+ και Γ1, για ομοιόμορφη κατανομή πλευρικών φορτίων για τον συνδυασμό x+0.3y+eccx.



Σχήμα 4. Καμπύλη ικανότητας κτιρίου για τον συνδυασμό x+0.3y+eccx, για ομοιόμορφη κατανομή πλευρικών φορτίων.

Τα αποτελέσματα των ανελαστικών στατικών αναλύσεων έδειξαν επάρκεια του συνόλου των μελών του φορέα ως προς τον έλεγχο γωνίας στροφής του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τον έλεγχο διάτμησης,

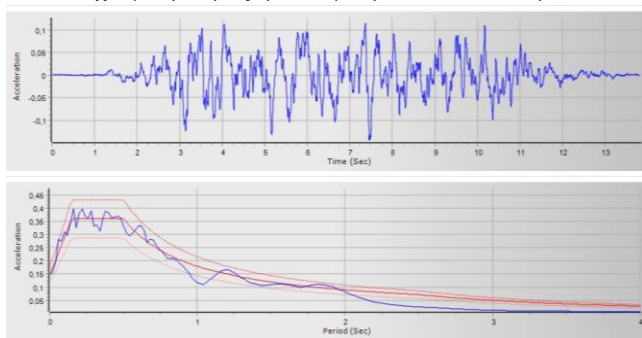
όπου εκεί βρέθηκε πως αστοχεί σημαντικό πλήθος των μελών όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Παρατηρείται η αρνητική επίδραση των υφιστάμενων τοιχοπληρώσεων στην απόκριση του φορέα κατά την σεισμική καταπόνηση. Παρατηρούνται αρκετές αστοχίες σε κοντά υποστυλώματα που δημιουργούνται εξαιτίας των τοιχοπληρώσεων. Επίσης αστοχούν υποστυλώματα στο ισόγειο λόγω της μη κανονικής κατανομής των τοιχοπληρώσεων τόσο σε κάτοψη όσο και καθ' ύψος.



Σχήμα 5. Διατμητικές αστοχίες μελών. Ανελαστική στατική ανάλυση.

C. Αποτελέσματα Ανελαστικών Δυναμικών Αναλύσεων

Για τις ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιήθηκαν 7 ζεύγη τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων (για την διεύθυνση x και y), συμβατά με το φάσμα του κανονισμού. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα και το αντίστοιχο φάσμα, μαζί με το φάσμα του κανονισμού.

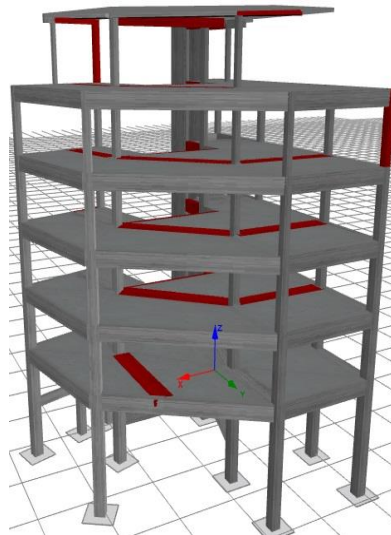


Σχήμα 6. Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα 1 και το αντίστοιχο φάσμα.

Όπως και στην περίπτωση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, έτσι και στην ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας τα μέλη του φορέα δεν παρουσίασαν ανεπάρκειες στον έλεγχο της γωνίας στροφής. Αντίθετα, στον έλεγχο ως προς την επάρκεια σε διάτμηση εμφάνισαν αστοχίες μελών, καθιστώντας τον διατμητικό έλεγχο καθοριστικό ως προς την αποτίμηση του φορέα (Σχήμα 7).

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων, και με τις δύο μεθόδους προκύπτουν αστοχίες διατμητικού χαρακτήρα. Η μέθοδος της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας όμως, δίνει ευμενέστερα αποτελέσματα, αφού αρκετά λιγότερα μέλη

του φορέα φαίνεται να αστοχούν, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης.



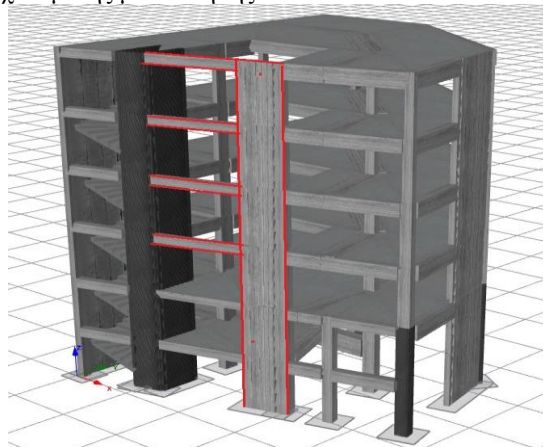
Σχήμα 7. Διατμητικές αστοχίες μελών. Ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας.

D. Ανασχεδιασμός Υφιστάμενης Κατασκευής

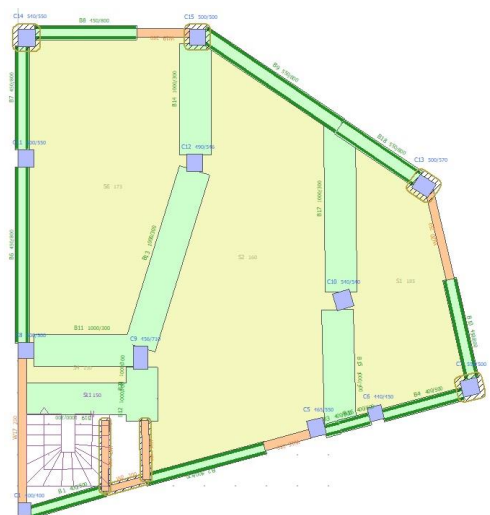
Η διαδικασία του ανασχεδιασμού και της ενίσχυσης μιας κατασκευής που καλείται να ακολουθήσει ο μελετητής μηχανικός είναι ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική καθώς δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη συνταγή που θα οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα (Δρίτσος, 2005; Antoniou, 2023). Αρκετές φορές χρειάζεται να δοκιμαστούν διαφορετικά προσομοιώματα ενισχύσεων ή και συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων, ώστε να προκύψει η καλύτερη δυνατή οικονομοτεχνική λύση, η οποία θα πρέπει ταυτόχρονα να ικανοποιεί και τους κανονιστικούς ελέγχους ασφαλείας. Οι μέθοδοι ενίσχυσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το αν ενισχύουν τον φορέα ως σύνολο ή αν ενισχύουν τοπικά τα μέλη του. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι της κατασκευής διατμητικών τοιχωμάτων, οι μεταλλικοί διαγώνιοι σύνδεσμοι, η σεισμική μόνωση βάσης και οι αποσβεστήρες. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι ενίσχυσης με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, τα FRP, η ενίσχυση με μεταλλικά ελάσματα και το εκτοξευμένο σκυρόδεμα.

Για την ενίσχυση της κατασκευής της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκαν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης, έγιναν αρκετές δοκιμές και αποφασίστηκε πως η βέλτιστη μέθοδος ενίσχυσης αποτελεί έναν συνδυασμό κατασκευής νέων περιμετρικών τοιχωμάτων για την συνολική αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής, μανδυνών οπλισμένου σκυροδέματος στις περιμετρικές δοκούς και ενίσχυσης με FRP ορισμένων υποστυλωμάτων και του πυρήνα του ανελκυστήρα. Επιπρόσθετα, από τον πρώτο όροφο και πάνω όπου υπάρχει ένας τύπος αίθριου σχήματος Π σε κάτοψη, αποφασίστηκε να κατασκευασθούν περιμετρικές δοκοί ώστε να δημιουργηθούν πλαίσια για την καλύτερη απόκριση του φορέα. Τέλος, καθαιρέθηκε όλη η κατασκευή του δώματος πλην της απόληξης του πυρήνα του ανελκυστήρα, καθώς δεν είχε καμία χρήση πέρα από το να προσθέτει νεκρά βάρη. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το προσομοίωμα του ενισχυμένου φορέα και στο Σχήμα 9 μια ενδεικτική κάτοψη του ενισχυμένου φορέα. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του

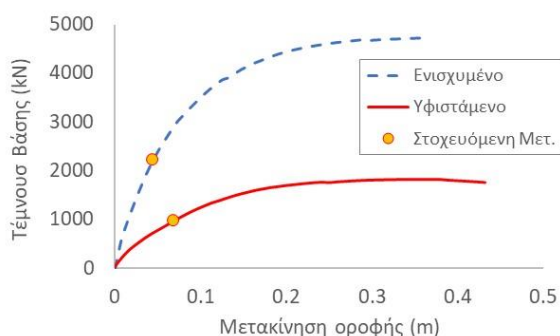
αρχικού και του ενισχυμένου φορέα (για ιδιομορφική κατανομή πλευρικών φορτίων για τον συνδυασμό $x+0.3y+eccx$). Είναι εμφανής η αύξηση της αντοχής του ενισχυμένου φορέα, καθώς και η μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης.



Σχήμα 8. Δημιουργία νέων πλαισίων στην πίσω όψη του φορέα.



Σχήμα 9. Ενδεικτική κάτοψη ενισχυμένου ορόφου.



Σχήμα 10. Καμπύλη ικανότητας κτιρίου για τον συνδυασμό $x+0.3y+eccx$ για ιδιομορφική κατανομή πλευρικών φορτίων.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι υφιστάμενες κατασκευές αποτελούν την πλειονότητα των κτιρίων στην χώρα μας και είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με παλαιότερους ή χωρίς αντισεισμικούς κανονισμούς, με αποτέλεσμα να είναι καίρια η ανάγκη αποτίμησης της φέρουσας ικανότητάς τους. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η αποτίμηση της σεισμικής

συμπεριφοράς και στην συνέχεια η αντισεισμική αναβάθμιση μιας πολυώροφης υφιστάμενης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς.

Για την αποτίμηση της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν ανελαστικές στατικές αναλύσεις και ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας από τις οποίες προέκυψαν ανεπάρκειες.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η σεισμική ικανότητα του φορέα κρίνεται ανεπαρκής να παραλάβει τις σεισμικές ωθήσεις για τον σεισμό σχεδιασμό, για στάθμη επιτελεσματικότητας B2+. Και οι δύο μη γραμμικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση του φορέα, η ανελαστική στατική ανάλυση και η δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας, έδειξαν επάρκεια όλων των μελών ως προς τον κανονιστικό έλεγχο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. της γωνίας στροφής. Δεν συνέβη το ίδιο όμως και για τον έλεγχο της διάτμησης όπου αμφότερες οι αναλύσεις παρουσίασαν ανεπάρκειες σε αρκετά μέλη.

Η δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας παρουσίασε ευμενέστερα αποτελέσματα ως προς το πλήθος των υποστρωμάτων που αστοχούν.

Στην συνέχεια διερευνήθηκαν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης και συνδυασμός αυτών. Τελικά επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν κάποιες καθολικές παρεμβάσεις στον φορέα, οι οποίες λειτουργούν ευνοϊκά ως προς την γενική συμπεριφορά του δομήματος και στην συνέχεια να ενισχυθούν τοπικά και μεμονωμένα μέλη ως προς την αντοχή, και την πλαστιμότητά τους. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ως πρόταση ενίσχυσης η τοποθέτηση νέων τοιχωμάτων σε συνδυασμό με την ενίσχυση με χρήση FRP σε υποστρώματα και μανδύων σε δοκούς του κτιρίου. Από τις νέες ανελαστικές στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ενίσχυσης που επιλέχθηκε.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Antoniou, S. (2023). «Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings», Publishing Wiley Blackwell.
- Naveen S. E., Abraham, N. M., & Kumari A. S. D.. (2019). Analysis of Irregular Structures under Earthquake Loads. *Procedia Structural Integrity*, 14, 806-819.
- Repapis, C. C., & Zeris, C. A. (2020). Performance investigation of existing RC buildings with height irregularity using the IDA procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(12), 1944-1974.
- Zembaty, Z., & De Stefano, M. (Eds.). (2016). *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures II*. Switzerland: Springer.
- Δρίτσος, Σ.Η. (2005). «Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα», Πάτρα
- Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός Μέρος 3 :Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων, EN 1998-3, 2005.
- Ο.Α.Σ.Π., 2022. «Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2022)», Ομάδα Μελέτης για τη Σύνταξη Κανονισμού Επεμβάσεων σε Κτίριο από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Κείμενο εφαρμογής (3η Αναθεώρηση 2022)
- Φέκας, Κ. (2015), Αποτίμηση υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με ελαστική και ανελαστική ανάλυση σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ., Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Χατζηβασιλειάδης, Α. (2019), Αποτίμηση και ανάλυση της συμπεριφοράς και επάρκειας ενός πολυώροφου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, τόσο με ελαστικές όσο και με ανελαστικές μεθόδους, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.