Προσεισμικός Έλεγχος και Αποτίμηση Φέρουσας Ικανότητας Υφιστάμενης Κατασκευής. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων και της Επίδρασης διαφόρων Παραμέτρων.

Ιακωβίνα Καλαφατά

Πολιτικός Μηχανικός και Μεταπτ. Φοιτητής ΣΜΑ, ΕΑΠ

iakovina.kalafata@gmail.com, std147861@ac.eap.gr

Κωνσταντίνος Ρεπαπής

Καθηγητής ΠΑΔΑ και Μέλος ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

crepapis@uniwa.gr

Περίληψη – **Η εργασία πραγματεύεται τη σεισμική συμπεριφορά υφιστάμενου κτιρίου, το οποίο επιλέχθηκε λόγω του μικτού φέροντος οργανισμού του, που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία. Η αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας του κτιρίου πραγματοποιείται μέσω προσεγγιστικών μεθόδων (πρωτοβάθμιος και δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος) και ανελαστικών στατικών αναλύσεων, τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους, ενώ διερευνάται και η επιρροή παραμέτρων όπως οι τοιχοπληρώσεις και τα κοντά υποστυλώματα. Το κτίριο κατατάσσεται στην κατηγορία Κ4 του δευτεροβάθμιου ελέγχου και στη σεισμική κλάση Β4+, ενώ με τις προτεινόμενες επεμβάσεις επιτυγχάνεται η ελάχιστη απαιτούμενη κλάση Β3+.**

Λέξεις-Κλειδιά: Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας, προσεισμικός έλεγχος, ανελαστική ανάλυση, κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας, FESPA

Ι. Εισαγωγη

Η αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών αποτελεί βασικό αντικείμενο της σύγχρονης αντισεισμικής μηχανικής, ιδιαίτερα σε χώρες υψηλής σεισμικότητας όπως η Ελλάδα. Μεγάλο μέρος του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος έχει σχεδιαστεί με παλαιότερους αντισεισμικούς κανονισμούς ή ακόμη και χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό, γεγονός που δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για αξιόπιστη αποτίμηση της σεισμικής του επάρκειας. Για τον σκοπό αυτό, οι σύγχρονες διαδικασίες αποτίμησης βασίζονται στις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 (ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2022), αξιοποιώντας συνδυασμό επιτόπιων διερευνήσεων, πειραματικών ελέγχων και αριθμητικών αναλύσεων.

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει τη σημασία των μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης, και ιδιαίτερα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover Analysis), για την εκτίμηση της πραγματικής σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κατασκευών (Krawinkler & Seneviratna, 1998; Fajfar, 2000). Παράλληλα, έχει αποδειχθεί ότι η αξιοπιστία της αποτίμησης επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο γνώσης της κατασκευής, την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων (Repapis & Zeris, 2019), την ύπαρξη τοπικών ατελειών και την πραγματική κατάσταση των δομικών στοιχείων (Fardis, 2009). Ωστόσο, σημαντικό μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται είτε στην ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων είτε στην ανάλυση ιδανικοποιημένων αριθμητικών προσομοιωμάτων, ενώ περιορισμένες είναι οι εφαρμογές που συνδυάζουν το σύνολο της διαδικασίας προσεισμικής αξιολόγησης με αναλυτική αποτίμηση και σχεδιασμό επεμβάσεων σε πραγματικό υφιστάμενο κτίριο.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ολοκληρωμένη αποτίμηση της στατικής και σεισμικής επάρκειας υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται διαδοχικά ο πρωτοβάθμιος, ο δευτεροβάθμιος και ο τριτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος. Για τον τριτοβάθμιο έλεγχο πραγματοποιούνται επιτόπιες και εργαστηριακές διερευνήσεις για τον προσδιορισμό των πραγματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και αναπτύσσεται τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, το οποίο αξιολογείται μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Το εξεταζόμενο κτίριο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.

Η κύρια συμβολή της εργασίας είναι η εφαρμογή και αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας αποτίμησης σε πραγματικό υφιστάμενο κτίριο, από το στάδιο του πρωτοβάθμιου προσεισμικού ελέγχου έως τον σχεδιασμό των απαιτούμενων επεμβάσεων ενίσχυσης. Παράλληλα, διερευνάται η επίδραση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η συμβολή των τοιχοπληρώσεων και η παρουσία κοντών υποστυλωμάτων, στην τελική σεισμική συμπεριφορά του φορέα και στην απαιτούμενη στρατηγική ενίσχυσης. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των διαδοχικών επιπέδων αξιολόγησης με τη μη γραμμική αποτίμηση αναδεικνύει τη χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας ως εργαλείο

λήψης τεχνικά τεκμηριωμένων αποφάσεων για την αξιολόγηση και ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών.



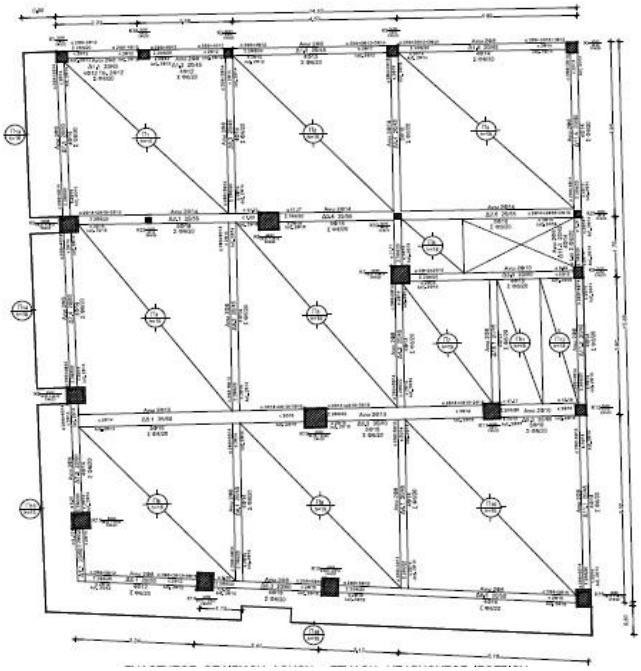
Σχήμα 1. Εξωτερικές όψεις του εξεταζόμενου κτιρίου.

ΙΙ. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε με στόχο την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της στατικής και σεισμικής επάρκειας υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία, καθώς και τον σχεδιασμό των απαραίτητων επεμβάσεων ενίσχυσης για την επίτευξη της απαιτούμενης σεισμικής κλάσης. Η διαδικασία βασίστηκε στις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), ακολουθώντας διαδοχικά στάδια διερεύνησης, αποτίμησης και ανασχεδιασμού.

Το εξεταζόμενο τριώροφο κτίριο (Σχήμα 1) βρίσκεται στην Αττική και ανεγέρθηκε κατά τα έτη 1965–1966, πριν από την ουσιαστική αναθεώρηση του Αντισεισμικού Κανονισμού το 1985. Αποτελείται από υπόγειο, ισόγειο, πατάρι μικρότερης επιφάνειας και δύο ορόφους, με συνολική δομημένη επιφάνεια ανωδομής 596.78 m^2 και επιφάνεια υπογείου 218.07 m^2, και στεγάζει καταστήματα. Η οικοδομική άδεια δεν περιλαμβάνει το υπόγειο, το πατάρι και τον τελευταίο όροφο. Ο φέρων οργανισμός είναι πλαισιακός από οπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς τοιχώματα στην ανωδομή, με περιμετρικά τοιχία υπογείου πάχους 20 cm. Ο τελευταίος όροφος έχει κατασκευαστεί με μικτό σύστημα υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσας τοιχοποιίας, η οποία εδράζεται απευθείας στην υποκείμενη πλάκα και όχι σε δοκούς. Επιπλέον, ορισμένα υποστυλώματα εδράζονται στην πλάκα του υπογείου χωρίς συνέχεια στη στάθμη του υπογείου. Το κτίριο βρίσκεται σε Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Z2 (a_{gR} = 0.24g), σε έδαφος κατηγορίας Β, και ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας ΙΙ.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε συλλογή και αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων στοιχείων του κτιρίου και εκτελέστηκε αναλυτική επιτόπια αυτοψία με σκοπό την επιβεβαίωση της γεωμετρίας του φέροντος οργανισμού (Σχήμα 2), την καταγραφή των δομικών στοιχείων, των τοιχοπληρώσεων καθώς και τον εντοπισμό βλαβών, φθορών ή μεταγενέστερων επεμβάσεων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη δομική συμπεριφορά του φορέα.



Σχήμα 2. Ξυλότυπος στάθμης ισογείου υφιστάμενου κτιρίου.

Για τη βελτίωση του επιπέδου γνώσης της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικοί έλεγχοι και δειγματοληψίες πυρήνων σκυροδέματος, ώστε να προσδιοριστούν οι πραγματικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών και να περιοριστούν οι αβεβαιότητες της ανάλυσης. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η μέση θλιπτική αντοχή εκτιμήθηκε κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. σε $f_{cm,cube}$ = 23.0 MPa (τυπική απόκλιση 5.0 MPa), που αντιστοιχεί σε $f_{cm,cyl}$ = 18.4 MPa. Η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή εκτιμήθηκε σε $f_{ck,cube}$ = 18.0 MPa και $f_{ck,cyl}$ = 14.4 MPa. Η Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων (ΣΑΔ) κρίθηκε «Υψηλή» για το σκυρόδεμα, «Ικανοποιητική» για τον χάλυβα και τις λεπτομέρειες όπλισης και «Ανεκτή» για τη γεωμετρία του φορέα. Επίσης, εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταβολής ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ώστε να σαρωθούν και να καταγραφούν οι οπλισμοί των δομικών μελών.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν ο πρωτοβάθμιος και ο δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του ΟΑΣΠ (ΟΑΣΠ, 2022, 2024; Ζώτου κ.ά., 2022), με στόχο την προκαταρκτική εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του κτιρίου. Κατά το στάδιο αυτό αξιολογήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα, η κανονικότητα σε κάτοψη και καθ' ύψος, η κατανομή των μαζών, η παρουσία κοντών υποστυλωμάτων, οι κατακόρυφες ασυνέχειες, η διαδρομή μεταφοράς των σεισμικών δράσεων, καθώς και η κατάσταση διατήρησης των δομικών στοιχείων.

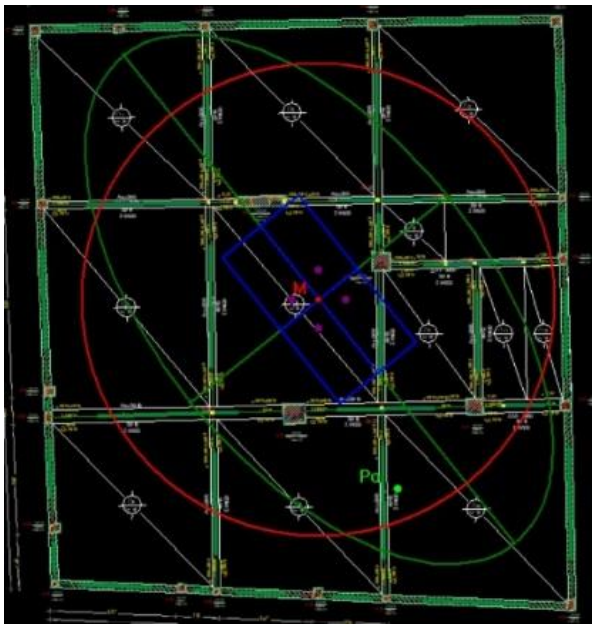
Στον πρωτοβάθμιο έλεγχο, με το δελτίο του ΟΑΣΠ ($6^η$ έκδοση, 2024), τα κριτήρια του σχεδιασμού χωρίς

αντισεισμικό κανονισμό και του μαλακού ορόφου ικανοποιήθηκαν πλήρως (100%), ενώ σε ποσοστό 75% βαθμολογήθηκαν ο κίνδυνος κρούσης με γειτονικά κτίρια, το ενδεχόμενο στρέψης, η μη κανονικότητα καθ' ύψος και τα κοντά υποστυλώματα. Η κακή κατάσταση λόγω ελλιπούς συντήρησης και η οριζόντια μη κανονικότητα βαθμολογήθηκαν με 25%. Τα ευρήματα αυτά κατέστησαν αναγκαία τη διενέργεια δευτεροβάθμιου ελέγχου.

Κατά την αυτοψία βρέθηκαν κάποια δομικά μέλη του φορέα με αποκόλληση σκυροδέματος και διάβρωση του οπλισμού (Σχήμα 3). Επίσης, το κτίριο δεν είναι κανονικό καθ' ύψος, είναι στρεπτικά εύκαμπτο (Σχήμα 4), υπάρχει έντονη ανισοκατανομή των μαζών ανά στάθμη και υπάρχουν και κοντά υποστυλώματα στη στάθμη του παταριού. Εντοπίστηκαν κάποιες προγενέστερες επεμβάσεις στον φέροντα οργανισμό, οι οποίες δεν έχουν συνεισφέρει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου έναντι σεισμού καθώς πραγματοποιήθηκαν δίχως μελέτη και ήταν τοπικές και επιφανειακές.



Σχήμα 3. Αποκόλληση σκυροδέματος και διάβρωση οπλισμού.



Σχήμα 4. Ξυλότυπος υπογείου και ένδειξη στρεπτικά εύκαμπτου κτιρίου.

Μέσω της προβλεπόμενης διαδικασίας του δευτεροβάθμιου ελέγχου βαθμολογήθηκαν τα κριτήρια τα οποία φέρουν τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας ως ακολούθως:

- Οξείδωση οπλισμών: β_{2x}=4, β_{2y}=4
- Κατανομή δυσκαμψίας σε κάτοψη – στρέψη: β_{5x}=4, β_{5y}=3
- Κατανομή δυσκαμψίας καθ' ύψος – μαλακός όροφος: β_{7x}=1, β_{7y}=1
- Κοντά υποστυλώματα: β_{9x}=4.52, β_{9y}=4.52

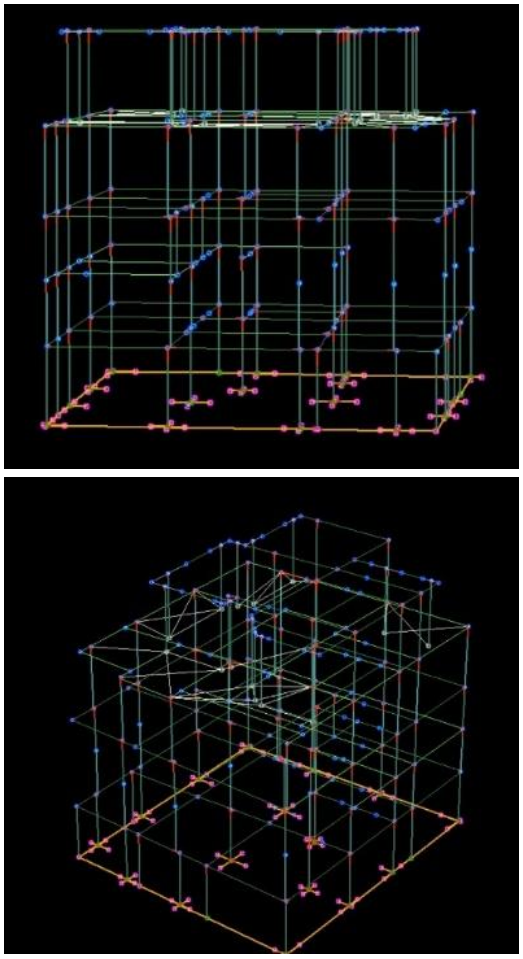
Η σεισμική απαίτηση υπολογίστηκε για ζώνη Z2, έδαφος κατηγορίας Β, γ_I = 1.0, δείκτη συμπεριφοράς q = 1.5 για τη στάθμη επιτελεστικότητας Β «Σημαντικές Βλάβες» και θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T_0 = 0.48 s, οπότε $S_d(T)$ = 3.924 m/s^2, με ταλαντούμενη μάζα M = 813.5 t (W = 7980 kN για τον συνδυασμό G+ψ_2Q). Η διαθέσιμη αντίσταση προέκυψε ως $V_R = \beta \times V_{R0}$, με $V_{R0} = \alpha_1 \times \Sigma V_{Ri}$. Προσδιορίστηκαν η σεισμική απαίτηση και η διαθέσιμη σεισμική αντίσταση του φορέα. Πιο αναλυτικά, υπολογίστηκε ότι V_{req} = 3192.0 kN, β_x = 0.64, β_y = 0.62, $V_{R,x}$ = 686.9 kN και $V_{R,y}$ = 523.8 kN, οπότε προέκυψαν λ_x = 4.92 και λ_y = 5.69, δείκτης προτεραιότητας ελέγχου λ = 569 και συντελεστής δ = 0.176 < 0.25.

Με βάση τους υπολογισμούς που διενεργήθηκαν, σύμφωνα με τον οδηγό του ΟΑΣΠ (2022) για τον δευτεροβάθμιο προσεισμικό έλεγχο, το εξεταζόμενο κτίριο κατατάχθηκε στην κατώτατη σεισμική κατηγορία Κ4.

Ακολούθως αναπτύχθηκε τρισδιάστατο υπολογιστικό προσομοίωμα του φέροντος οργανισμού στο λογισμικό FESPA (LH Λογισμική, 2026) (Σχήμα 5), στο οποίο εισήχθησαν τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Η αποτίμηση της σεισμικής επάρκειας πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή μη γραμμικών στατικών αναλύσεων (Pushover Analysis), μέσω των οποίων προσδιορίστηκε η διαθέσιμη φέρουσα ικανότητα του φορέα, η στοχευόμενη μετακίνηση, η εξέλιξη των πλαστικών αρθρώσεων και οι κρίσιμοι μηχανισμοί αστοχίας. Η αναλυτική αυτή αποτίμηση αποτελεί τον τριτοβάθμιο προσεισμικό έλεγχο. Η φέρουσα τοιχοποιία του τελευταίου ορόφου προσομοιώθηκε μαζί με τον υπόλοιπο φορέα και οι πεσσοί της ελέγχθηκαν εντός και εκτός επιπέδου. Εκτελέστηκαν 24 αναλύσεις, με ομοιόμορφη και ιδιομορφική κατανομή της πλευρικής φόρτισης, για διάφορους συνδυασμούς φοράς φόρτισης και εκκεντρότητας.

Με βάση τα αποτελέσματα της αποτίμησης διαπιστώθηκε η στατική ανεπάρκεια του φορέα καθώς η ικανότητα μετακίνησης της κατασκευής για τις στάθμες επιτελεστικότητας Σημαντικών Βλαβών (SD) και Οιονεί Κατάρρευσης (NC) είναι μικρότερη από τη στοχευόμενη, ενώ επίσης προέκυψαν αρκετοί λόγοι ανεπάρκειας δομικών μελών μεγαλύτεροι της μονάδας.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η στατική ενίσχυση του φορέα με στόχο την επίτευξη της απαιτούμενης ελάχιστης σεισμικής κλάσης Β3+ του εξεταζόμενου κτιρίου (για κτίρια σπουδαιότητας ΙΙ προ του 1985). Οι προτεινόμενες ενισχύσεις αφορούν θεμελιακή ενίσχυση με την κατασκευή νέας γενικής κοιτόστρωσης και συνδετήριων δοκών, ενίσχυση τοιχωμάτων υπογείου με μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενίσχυση υποστυλωμάτων με FRP, ενίσχυση δοκών με FRP και ενίσχυση πλακών με ανθρακοελάσματα.



Σχήμα 5. Τρισδιάστατη απεικόνιση προσομοίωσης μοντέλου.

Τέλος, διερευνήθηκε η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων, καθώς και η επίδραση της απουσίας κοντών υποστυλωμάτων. Πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη προσομοίωση στο λογισμικό FESPA (LH Λογισμική, 2026) και η επίλυση με μη γραμμική ανάλυση ανέδειξε ότι η συνεισφορά τους για τον συγκεκριμένο φορέα δεν αρκεί για την επίτευξη της απαιτούμενης σεισμικής κλάσης χωρίς στατικές ενισχύσεις.

ΙΙΙ. Επιλεγμενα Αποτελεσματα

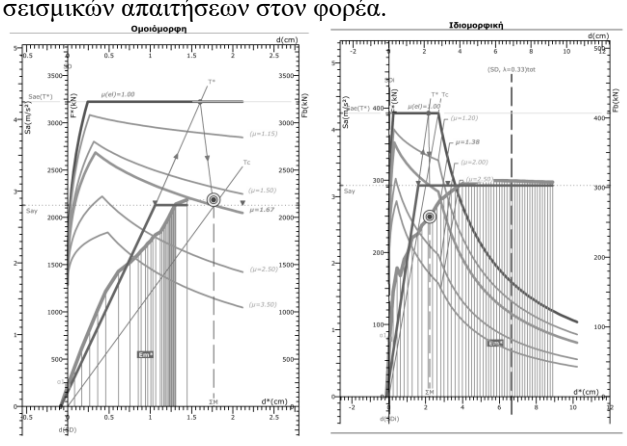
Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας επέτρεψε την ολοκληρωμένη αποτίμηση της στατικής και σεισμικής επάρκειας του εξεταζόμενου κτιρίου, καθώς και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων ενίσχυσης που σχεδιάστηκαν για την επίτευξη του απαιτούμενου επιπέδου στατικής και σεισμικής επάρκειας σύμφωνα με τις ισχύουσες κανονιστικές απαιτήσεις. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων του πρωτοβάθμιου και δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου, των επιτόπιων και εργαστηριακών διερευνήσεων, καθώς και των μη γραμμικών αναλύσεων, επέτρεψε τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας της πραγματικής κατάστασης του φέροντος οργανισμού και του τρόπου με τον οποίο αυτός αποκρίνεται σε έντονη σεισμική διέγερση.

Η αρχική αξιολόγηση του κτιρίου ανέδειξε ότι, παρά την ικανοποιητική γενική κατάσταση διατήρησής του, ο φέρων οργανισμός παρουσιάζει χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς τη σεισμική του συμπεριφορά. Από την επιτόπια αυτοψία διαπιστώθηκαν περιορισμένες τοπικές αποσαθρώσεις της επικάλυψης και εμφανής οξείδωση οπλισμών σε μικρό αριθμό υποστυλωμάτων, χωρίς όμως να παρατηρούνται εκτεταμένες βλάβες που να υποδηλώνουν γενικευμένη στατική ανεπάρκεια ή σοβαρή υποβάθμιση του φορέα.

Παράλληλα, η μορφολογία της κατασκευής χαρακτηρίζεται από έλλειψη τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος στην ανωδομή, ακανόνιστη διάταξη των εσωτερικών υποστυλωμάτων και μη κανονικότητα σε κάτοψη, στοιχεία τα οποία αυξάνουν τη στρεπτική ευαισθησία της κατασκευής και επηρεάζουν τη διαδρομή μεταφοράς των σεισμικών δράσεων.

Η εφαρμογή του πρωτοβάθμιου προσεισμικού ελέγχου επέτρεψε την προκαταρκτική εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του κτιρίου και ανέδειξε την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης μέσω αναλυτικότερων διαδικασιών. Στη συνέχεια, ο δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος παρείχε ποσοτική εκτίμηση τόσο της σεισμικής απαίτησης όσο και της διαθέσιμης σεισμικής αντίστασης της κατασκευής. Η αξιολόγηση των επιμέρους κριτηρίων κατέδειξε ότι η κανονικότητα του φορέα, η γεωμετρική διάταξη των κατακόρυφων στοιχείων, η κατάσταση διατήρησης των υλικών και η ύπαρξη τοπικών ατελειών αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική σεισμική συμπεριφορά του εξεταζόμενου κτιρίου. Ο δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κατέδειξε ότι το εξεταζόμενο κτίριο ανήκει στην σεισμική κατηγορία Κ4.

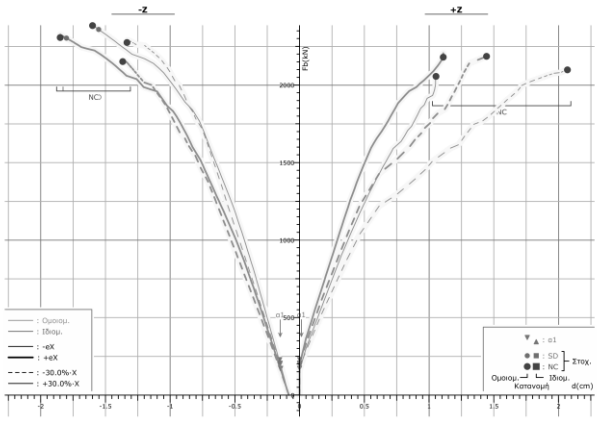
Ακολούθησε ο έλεγχος κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2022) και τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων έδειξαν ότι η υφιστάμενη κατασκευή δεν ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών για τις στάθμες επιτελεστικότητας SD και NC (Σχήμα 6). Οι μεγαλύτερες απαιτήσεις εντοπίστηκαν σε ορισμένα υποστυλώματα του ισογείου, όπου παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων και ανάπτυξη των πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η απουσία τοιχωμάτων και η ακανόνιστη διάταξη των κατακόρυφων στοιχείων οδηγούν σε αυξημένες στρεπτικές επιδράσεις και σε μη ομοιόμορφη κατανομή των σεισμικών απαιτήσεων στον φορέα.



Σχήμα 6. Διαγράμματα Απαίτησης – Ικανότητας (ADRS) για τη στάθμη SD: (α) διεύθυνση y, ομοιόμορφη κατανομή, (β) διεύθυνση x, ιδιομορφική κατανομή.

Από τη μη γραμμική ανάλυση αναδείχθηκε η στατική ανεπάρκεια του φορέα καθώς η ικανότητα μετακίνησης της κατασκευής για τις στάθμες επιτελεστικότητας SD και NC είναι μικρότερη από τη στοχευόμενη (Σχήμα 7), ενώ επίσης

προέκυψαν αρκετοί λόγοι ανεπάρκειας δομικών μελών μεγαλύτεροι της μονάδας. Σύμφωνα με την ανάλυση, η κατάταξη σε βασική σεισμική κλάση του εξεταζόμενου κτιρίου είναι Β4+. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας.

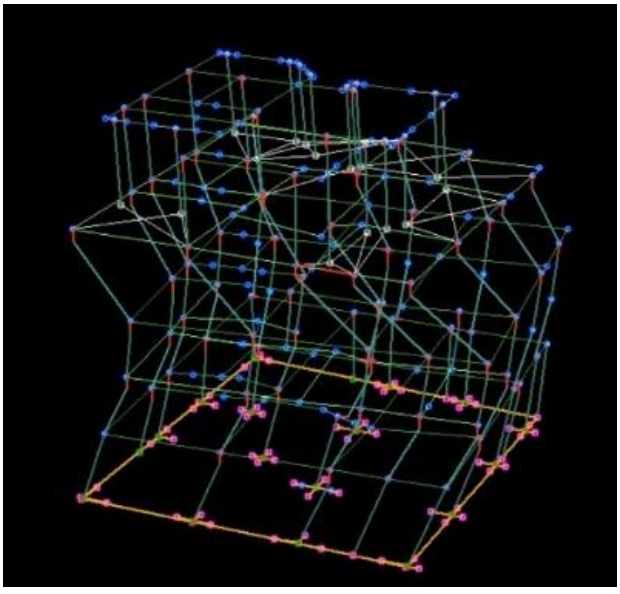


Σχήμα 7. Καμπύλες αντίστασης $F_b - d$ για τις 8 αναλύσεις στην διεύθυνση y της υφιστάμενης κατασκευής (ομοιόμορφη κατανομή).

Για τη στάθμη SD, η στοχευόμενη μετακίνηση προέκυψε $d_t = +2.6/-3.7$ cm στη διεύθυνση x και $+2.2/-1.8$ cm στη διεύθυνση y, με στοχευόμενη πλαστιμότητα $\mu_d = 3.59$ και συντελεστή $C_1 = 1.62$, ενώ κανένας στόχος αποτίμησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δεν ικανοποιείται ούτε για τη στάθμη SD ούτε για τη στάθμη NC. Η κατάταξη Β4+ προέκυψε για όλους τους ελέγχους των μελών οπλισμένου σκυροδέματος (κάμψη, διάτμηση, κόμβοι) και των πεσσών της φέρουσας τοιχοποιίας (εντός και εκτός επιπέδου). Τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων συνοψίζονται στον Πίνακα Ι.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι
ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ D_T (ΣΤΑΘΜΗ SD), ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ M_D ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΛΑΣΗ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

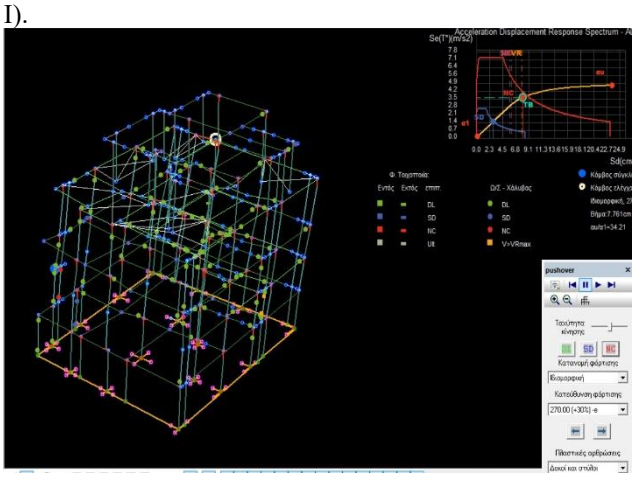
Σενάριο	$d_{t,x}$ (cm)	$d_{t,y}$ (cm)	μ_d	Κλάση
Υφιστάμενο	+2.6 / −3.7	+2.2 / −1.8	3.59	B4+
Με τοιχοπληρώσεις	+0.3 / −0.7	+0.4 / −0.5	1.00	B4+
Χωρίς κοντά υποστυλώματα	+1.1 / −2.5	+1.7 / −1.7	3.63	B4+
Ενισχυμένο	+4.0 / −4.2	+3.5 / −3.4	1.00	B3+



Σχήμα 8. Τρισδιάστατο μοντέλο με παραμορφώσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα της αποτίμησης σχεδιάστηκε ολοκληρωμένο πρόγραμμα επεμβάσεων ενίσχυσης, το οποίο περιλάμβανε θεμελιακή ενίσχυση με την κατασκευή νέας γενικής κοιτόστρωσης και συνδετήριων δοκών, την ενίσχυση τοιχωμάτων υπογείου με μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, την εφαρμογή μανδυών οπλισμένου σκυροδέματος σε επιλεγμένα υποστυλώματα, την ενίσχυση πλακών με ανθρακοελάσματα καθώς και τη χρήση σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) σε κρίσιμα δομικά στοιχεία (Δρίτσος, 2005). Οι επεμβάσεις σχεδιάστηκαν με στόχο όχι μόνο την αύξηση της αντοχής, αλλά και τη βελτίωση της πλαστιμότητας, της δυσκαμψίας και της συνολικής σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα.

Ο επανέλεγχος του ενισχυμένου φορέα κατέδειξε σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου. Παρατηρήθηκε αύξηση της διαθέσιμης φέρουσας ικανότητας, ευνοϊκότερη κατανομή των ανελαστικών παραμορφώσεων και αποτελεσματικότερη μεταφορά των σεισμικών δράσεων προς τη θεμελίωση. Παράλληλα, περιορίστηκαν οι τοπικές συγκεντρώσεις εντατικών μεγεθών στα κρίσιμα υποστυλώματα και αυξήθηκε η ικανότητα του φορέα να παραλαμβάνει με ασφάλεια τα πρόσθετα κατακόρυφα και οριζόντια φορτία που προκύπτουν από την καθ' ύψος επέκταση της κατασκευής. Για τη στάθμη SD, η στοχευόμενη μετακίνηση του ενισχυμένου φορέα προέκυψε $+4.0/-4.2$ cm στη διεύθυνση x και $+3.5/-3.4$ cm στη διεύθυνση y, με $\mu_d = 1.00$ (Πίνακας Ι).



Σχήμα 9. Διάγραμμα Απαίτησης – Ικανότητας NC με τις προτεινόμενες στατικές ενισχύσεις.

Τα μέλη με λόγους ανεπάρκειας μεγαλύτερους της μονάδας είναι αρκετά λιγότερα συγκριτικά με την ανάλυση του μοντέλου χωρίς τις στατικές ενισχύσεις (Σχήμα 9). Με τις συγκεκριμένες ενισχύσεις επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ελάχιστη σεισμική κλάση Β3+, η οποία αφορά τα κτίρια σπουδαιότητας ΙΙ προ του 1985, όπως το εξεταζόμενο.

Η ύπαρξη τοιχοπληρώσεων δρα θετικά στη συμπεριφορά του κτιρίου, όχι όμως τόσο δραστικά ώστε να μην υπάρχουν λόγοι ανεπάρκειας μελών άνω της μονάδας. Επίσης, η σεισμική κλάση παραμένει Β4+. Συνεπώς, και σε αυτή την περίπτωση θα απαιτούνταν ενισχύσεις όπως περιγράφηκαν ανωτέρω. Η συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων αύξησε σημαντικά τη δυσκαμψία του φορέα, με αποτέλεσμα η στοχευόμενη μετακίνηση να περιοριστεί σε 0.3–0.7 cm και η απαιτούμενη πλαστιμότητα σε $\mu_d = 1.00$ (Πίνακας Ι). Το εύρημα συμφωνεί με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία οι

κανονικά διατεταγμένες περιμετρικές τοιχοπληρώσεις αυξάνουν τη δυσκαμψία και την πλευρική αντοχή υφιστάμενων κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος, μειώνοντας όμως την πλαστιμότητά τους (Repapis & Zeris, 2019).

Η απουσία κοντών υποστυλωμάτων δεν συνεισφέρει σημαντικά στη σεισμική απόκριση του φορέα στην ανελαστική ανάλυση, συγκριτικά με την ύπαρξη τοιχοπληρώσεων. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν λόγοι ανεπάρκειας μελών άνω της μονάδας και η σεισμική κλάση παραμένει Β4+. Η απαιτούμενη πλαστιμότητα (μ_d = 3.63) παρέμεινε πρακτικά ίδια με εκείνη του υφιστάμενου φορέα (μ_d = 3.59), ενώ η στοχευόμενη μετακίνηση μειώθηκε σε +1.1/−2.5 cm στη διεύθυνση x (Πίνακας Ι).

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν ότι η ολοκληρωμένη διαδικασία αποτίμησης, η οποία συνδυάζει προσεισμικούς ελέγχους, μη καταστροφικούς ελέγχους, τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση και μη γραμμικές αναλύσεις, μπορεί να αποτελέσει ένα αξιόπιστο πλαίσιο αξιολόγησης υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η αξιόπιστη αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στα διαθέσιμα σχέδια ή στις παραδοχές του αρχικού σχεδιασμού, αλλά απαιτεί συνδυασμό επιτόπιας διερεύνησης, προσδιορισμού των πραγματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και ανάπτυξης κατάλληλου αριθμητικού προσομοιώματος. Η σταδιακή εφαρμογή του πρωτοβάθμιου και δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου, σε συνδυασμό με τη μη γραμμική αποτίμηση σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, επέτρεψε την ουσιαστική μείωση των αβεβαιοτήτων και οδήγησε σε περισσότερο αξιόπιστη εκτίμηση της πραγματικής σεισμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου κτιρίου.

Η κατάταξη του κτιρίου σε σεισμική κλάση σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Β4+) βρίσκεται σε συμφωνία με το αποτέλεσμα που προέκυψε από τον δευτεροβάθμιο έλεγχο, δηλαδή σεισμική κατηγορία Κ4, δείχνοντας και οι δύο μεθοδολογίες υψηλή τρωτότητα.

Η εφαρμογή των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων κατέδειξε ότι η υφιστάμενη κατασκευή δεν διαθέτει την απαιτούμενη φέρουσα και σεισμική ικανότητα. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η σεισμική απόκριση επηρεάζεται ουσιαστικά από τη γεωμετρική διαμόρφωση του φορέα, την απουσία τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και την ακανόνιστη διάταξη των κατακόρυφων στοιχείων, παράγοντες που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με επαρκή ακρίβεια μέσω απλοποιημένων διαδικασιών.

Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι η συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων βελτιώνει τη σεισμική συμπεριφορά του φορέα, ενώ η απουσία κοντών υποστυλωμάτων έχει μικρή επίδραση. Σε καμία από τις δύο περιπτώσεις, ωστόσο, δεν μεταβάλλεται η σεισμική κλάση του κτιρίου (Β4+), γεγονός που επιβεβαιώνει την αναγκαιότητα των επεμβάσεων ενίσχυσης. Με το προτεινόμενο σύνολο επεμβάσεων επιτυγχάνεται η ελάχιστη απαιτούμενη σεισμική κλάση Β3+.

Η συνολική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε κατάλληλη για την αξιολόγηση και τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία. Η συνδυασμένη αξιοποίηση προσεισμικών ελέγχων, πειραματικής διερεύνησης, τρισδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης και μη γραμμικών αναλύσεων παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο τεχνικής αξιολόγησης, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί και σε αντίστοιχες περιπτώσεις του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης με ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, καθώς και στη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών τεχνικών ενίσχυσης ή εναλλακτικών προσομοιωμάτων τοιχοπληρώσεων στη σεισμική συμπεριφορά υφιστάμενων κατασκευών μικτού δομικού συστήματος. Επιπλέον, τα δελτία πρωτοβάθμιου και δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου του ΟΑΣΠ (2022, 2024) αφορούν κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα ή αποκλειστικά από φέρουσα τοιχοποιία, με αποτέλεσμα η φέρουσα τοιχοποιία του τελευταίου ορόφου να συνεκτιμηθεί μόνο κατά την αναλυτική αποτίμηση. Η σύνταξη αντίστοιχων δελτίων για κτίρια μικτού φέροντος οργανισμού θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake Spectra, 16*(3), 573–592. https://doi.org/10.1193/1.1586128

Fardis, M.N. (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings: based on EN-Eurocode 8*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9842-0

Krawinkler, H., Seneviratna, G.D.P.K. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures, 20*(4–6), 452–464. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8

Repapis, C., Zeris, C.A. (2019). Seismic assessment of non-conforming infilled RC buildings using IDA procedures. *Frontiers in Built Environment, 4*, 88. https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00088

LH Λογισμική. (2026). *FESPA 22* (Έκδοση 9.1.0.46) [Λογισμικό]. Αθήνα. https://www.lhlogismiki.gr

Δρίτσος, Σ.Η. (2005). *Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα*, γ΄ έκδοση, Πάτρα.

Ζώτου Α., Βαδαλούκας Κ., Παπαχρηστίδης Α., Δρίτσος Σ. (2022). *Αξιολόγηση της μεθοδολογίας του Δευτεροβάθμιου Προσεισμικού Ελέγχου,* 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα.

Κανονισμός για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας (ΚΑΔΕΤ) (2022). ΟΑΣΠ, Αθήνα.

Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) (2022). 2η Αναθεώρηση, ΟΑΣΠ, Αθήνα.

ΟΑΣΠ (2022). *Μεθοδολογία Δευτεροβάθμιου Προσεισμικού Ελέγχου σε κτίρια Δημόσιας και Κοινωφελούς χρήσης με φέροντα οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (1η Αναθεώρηση)*. ΟΑΣΠ, Αθήνα. ΦΕΚ Β΄ 3134/21.06.2022.

ΟΑΣΠ (2024). *Πρωτοβάθμιος Προσεισμικός Έλεγχος Κτιρίων* (6η έκδοση). ΟΑΣΠ, Αθήνα. ΚΥΑ ΥΠ342/3-5-2023, ΦΕΚ Β΄ 2943/2023.