

«Διερεύνηση Αντισεισμικής Επάρκειας και Προτάσεις Ενίσχυσης Υφιστάμενης Κατασκευής από Οπλισμένο Σκυρόδεμα»

Ψυκαράκη Μαρία

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Παν. Πατρών και
Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

mar.psikaraki@gmail.com, std168412@ac.eap.gr

Δρ. Κωνσταντίνος Κατάκαλος

Αναπλ. Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ
Ε.Α.Π

kkatakal@civil.auth.gr

katakalos.konstantinos@ac.eap.gr

Περίληψη – Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται την αποτίμηση και την ενίσχυση υφιστάμενης τετραώροφης κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία ανεγέρθηκε το 1967 στην περιοχή της Ανάληψης Ηρακλείου Κρήτης και έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959. Η κατασκευή παρουσιάζει πρόσθετες ιδιαιτερότητες λόγω αυθαίρετης προσθήκης ορόφου κατά τη φάση κατασκευής και γεωμετρικών αποκλίσεων από τα αρχικά σχέδια. Η αποτίμηση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του Ευρωκώδικα 8 μέσω ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover), με τη χρήση του λογισμικού FESPA. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψαν σημαντικές ανεπάρκειες σε δοκούς και υποστυλώματα, καθώς και αδυναμία ικανοποίησης της στάθμης επιτελεστικότητας SD. Στο πλαίσιο της αντισεισμικής αναβάθμισης εξετάστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι ενίσχυσης, η εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και η εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών (Ι.Ο.Π./FRP). Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων έδειξε ότι οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος οδηγούν σε σημαντικότερη αύξηση της δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας του φορέα και περιορισμό των μετακινήσεων, ενώ τα Ινοπλισμένα Πολυμερή αποτελούν ιδιαίτερα αποτελεσματική και λιγότερο επεμβατική μέθοδο τοπικής ενίσχυσης, βελτιώνοντας σημαντικά τη διατμητική αντοχή, την περισφιγξή και τη διαθέσιμη πλαστιμότητα των κρίσιμων δομικών στοιχείων, χωρίς ουσιαστική μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών.

Λέξεις-Κλειδιά: Αποτίμηση, Ανελαστική Στατική Ανάλυση, Pushover, Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Ενίσχυση, ΕΚ8, ΚΑΝ.ΕΠΕ., Μανδύες Ο.Σ., Ι.Ο.Π./FRPs

Ι. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτίμηση και η αντισεισμική αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό αντικείμενο της σύγχρονης αντισεισμικής μηχανικής, ιδιαίτερα σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα, όπως η Ελλάδα. Μεγάλο μέρος του υφιστάμενου δομικού αποθέματος έχει κατασκευαστεί πριν την εφαρμογή των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών και συχνά παρουσιάζει αυξημένη σεισμική τρωτότητα και περιορισμένη ικανότητα ανάπτυξης ανελαστικών παραμορφώσεων.

Οι κατασκευές της περιόδου αυτής χαρακτηρίζονται συχνά από ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης, περιορισμένη περισφιγξή των υποστυλωμάτων, ανεπαρκή διατμητική αντοχή και απουσία σύγχρονων αρχών ικανοτικού σχεδιασμού, χαρακτηριστικά που μπορούν να οδηγήσουν σε δυσμενείς μηχανισμούς αστοχίας υπό ισχυρή σεισμική δράση.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντική ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με την αποτίμηση και τις μεθόδους ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών, με βάση τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και του Ευρωκώδικα 8. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τεχνικών ενίσχυσης, ως προς τη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας των κατασκευών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται υφιστάμενη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος στην περιοχή της Ανάληψης Ηρακλείου Κρήτης, η οποία ανεγέρθηκε το 1967 σύμφωνα με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959. Για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στο λογισμικό FESPA και εφαρμόστηκε ανελαστική στατική ανάλυση (pushover), τόσο χωρίς όσο και με συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του υφιστάμενου φορέα, ο εντοπισμός κρίσιμων περιοχών και μηχανισμών αστοχίας, καθώς και η αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων αντισεισμικής ενίσχυσης. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζονται δύο διαφορετικές μέθοδοι επεμβάσεων, η εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και η εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών (Ι.Ο.Π./FRP), με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους ως προς τη βελτίωση της συνολικής σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

Η συμβολή της παρούσας εργασίας έγκειται στη διερεύνηση της συμπεριφοράς υφιστάμενης κατασκευής σχεδιασμένης με παλαιότερο αντισεισμικό κανονισμό, καθώς και στη συγκριτική αξιολόγηση δύο διαφορετικών μεθόδων αντισεισμικής ενίσχυσης μέσω ανελαστικών αναλύσεων και καμπυλών ικανότητας, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την

αποτελεσματικότητα και τη φιλοσοφία εφαρμογής κάθε επέμβασης.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

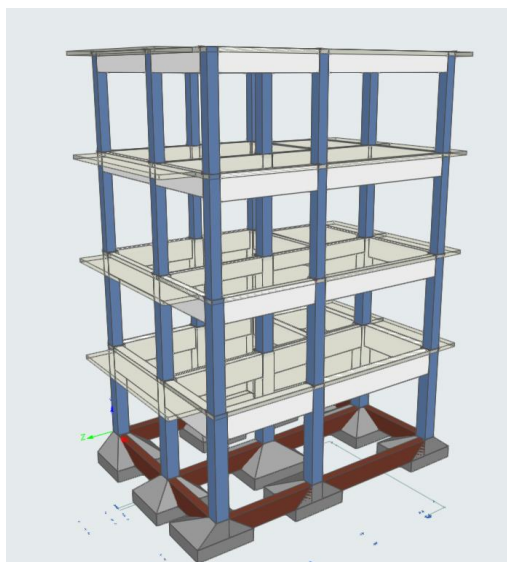
A. Αποτύπωση και Χαρακτηριστικά Φέροντος Οργανισμού

Το εξεταζόμενο κτίριο αποτελεί υφιστάμενη τετραώροφη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος που βρίσκεται στην περιοχή της Ανάληψης Ηρακλείου Κρήτης και ανεγέρθηκε το 1967. Ο φέρων οργανισμός είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και αντιστοιχεί σε τυπική πλαίσιακή κατασκευή της εποχής. Για την αποτύπωση και τεκμηρίωση του φέροντος οργανισμού αξιοποιήθηκαν τα διαθέσιμα στοιχεία της οικοδομικής άδειας, όπως αρχιτεκτονικά σχέδια, ξυλότυποι, σχέδια οπλισμών και το τεύχος στατικών.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της αρχικής μελέτης το κτίριο έχει κατασκευαστεί με σκυρόδεμα ποιότητας B160 σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος του 1954 και χάλυβα οπλισμού τύπου St37, ενώ ο αρχικός αντισεισμικός σχεδιασμός του φορέα πραγματοποιήθηκε με σεισμικό συντελεστή $\varepsilon=0,08$ σύμφωνα με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959. Τα στοιχεία αυτά αποτέλεσαν τη βάση για την προσομοίωση και την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα.

B. Προσομοίωση Φέροντος Οργανισμού

Για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου φορέα πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη προσομοίωση της κατασκευής στο λογισμικό FESPA. Το κτίριο προσομοιώθηκε ως χωρικό πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος με γραμμικά στοιχεία δοκών και υποστοιχείων, ενώ τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και των δομικών στοιχείων λήφθηκαν σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία της στατικής μελέτης και τις παραδοχές του ΚΑΝ.ΕΠΕ.



Εικόνα 1. Τρισδιάστατο προσομοίωμα φορέα

C. Μέθοδος Ανάλυσης Φέροντος Οργανισμού

Η αποτίμηση του φορέα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και τον

Ευρωκώδικα 8 μέσω ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover), με σταδιακά αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση μέχρι την ανάπτυξη σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων. Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις δύο κύριες διευθύνσεις του φορέα X και Z λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο φορές εφαρμογής της σεισμικής δράσης, ώστε να λαμβάνονται υπόψη πιθανές ασυμμετρίες γεωμετρίας, μάζας και δυσκαμψίας. Για να περιοριστεί η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από ένα μοναδικό σχήμα πλευρικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν δύο κατανομές, η ομοιόμορφη κατανομή φορτίων, η οποία συνδέεται με την κατανομή της μάζας καθ' ύψος, και η ιδιομορφική κατανομή φορτίων που βασίζεται στο σχήμα της θεμελιώδους ιδιομορφής του φορέα.

Πριν από την εφαρμογή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover) ελέγχθηκε η καταλληλότητα της μεθόδου σύμφωνα με τις σχετικές προϋποθέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ο φορέας δεν χαρακτηρίστηκε στρεπτικώς εύκαμπτος, ενώ από την πλήρη ιδιομορφική ανάλυση προέκυψε ενεργοποίηση άνω του 90% της συνολικής μάζας στις δύο κύριες διευθύνσεις. Παράλληλα, διερευνήθηκε η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών μέσω σύγκρισης των τεμνουσών ορόφων της πλήρους ιδιομορφικής ανάλυσης με τις αντίστοιχες τέμνουσες της δεσπίζουσας ιδιομορφής. Οι προκύπτοντες λόγοι παρέμειναν κοντά στη μονάδα και κάτω από το κανονιστικό όριο σε όλους τους ορόφους και στις δύο κύριες διευθύνσεις, καταδεικνύοντας ότι η συμβολή των ανώτερων ιδιομορφών είναι περιορισμένη. Επιπλέον, ικανοποιούνται οι απαιτούμενες Στάθμες Αξιοπιστίας Δεδομένων για την εφαρμογή της μεθόδου. Συνεπώς, κρίθηκε ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις εφαρμογής της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, η οποία εφαρμόστηκε αυτοτελώς για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου φορέα.

Παράλληλα, η σεισμική απόκριση του κτιρίου εξετάστηκε τόσο χωρίς όσο και με συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων, οι οποίες προσομοιώθηκαν με ισοδύναμους διαγώνιους θλιπτήρες, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους στη δυσκαμψία, τη φέρουσα ικανότητα και τη συνολική δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Η χωριστή εξέταση των δύο προσομοιωμάτων κρίθηκε αναγκαία, καθώς οι τοιχοπληρώσεις, παρότι δεν αποτελούν πρωτεύοντα φέροντα στοιχεία, μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά την πλευρική δυσκαμψία, την κατανομή των σεισμικών δράσεων και τη μετελαστική συμπεριφορά του φορέα.

D. Κριτήρια Αποτίμησης και Έλεγχος Επάρκειας

Για τον προσδιορισμό της σεισμικής δράσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής του Ηρακλείου Κρήτης σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8. Η σεισμική απαίτηση προέκυψε από το αντίστοιχο φάσμα σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τις γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής και τις παραδοχές του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τη στάθμη επιτελεσματικότητας και τον επιλεγμένο στόχο αποτίμησης.

Συγκεκριμένα, για το υπό εξέταση κτίριο λήφθηκε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, με σεισμική επιτάχυνση εδάφους $a_g=0,24g$ και κατηγορία σπουδαιότητας II, καθώς έχει κύρια χρήση κατοικίας.

Ως προς την αξιοπιστία των διαθέσιμων δεδομένων, υιοθετήθηκαν οι αντίστοιχες Στάθμες Αξιοπιστίας

Δεδομένων (ΣΑΔ) σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ανάλογα με την κατηγορία των διαθέσιμων πληροφοριών. Για τα γεωμετρικά στοιχεία του φέροντος οργανισμού, καθώς και για τα στοιχεία των τοιχοπληρώσεων, θεωρήθηκε Υψηλή ΣΑΔ, ενώ για τη διάταξη και τις λεπτομέρειες του οπλισμού θεωρήθηκε Ικανοποιητική ΣΑΔ. Παράλληλα, σύμφωνα με τον EC8-3, το επίπεδο γνώσης του φορέα αντιστοιχεί σε Κανονική Γνώση (ΕΓ2), με συντελεστή εμπιστοσύνης $CF = 1,20$. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν με καθολικό δείκτη συμπεριφοράς $q=1,70$, καθώς πρόκειται για φορέα σχεδιασμένο με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959, δηλαδή πριν το 1985, με ευνοϊκή παρουσία τοιχοπληρώσεων και χωρίς σημαντικές βλάβες στα πρωτεύοντα στοιχεία.

Ως στόχος αποτίμησης επιλέχθηκε ο B1, ο οποίος προτείνεται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. για αποτίμηση ή ανασχεδιασμό κατασκευών συνήθους σπουδαιότητας, και αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Σημαντικές Βλάβες» (SD) με πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης 10% σε 50 χρόνια.

Η αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα δεν βασίστηκε σε έναν μεμονωμένο δείκτη, αλλά στη συνδυαστική εξέταση των αποτελεσμάτων των ανελαστικών στατικών αναλύσεων και πραγματοποιήθηκε μέσω των καμπυλών ικανότητας (capacity curves), των στοχευόμενων μετακινήσεων (d_{SD}), των λόγων υπεραντοχής (au/a_l), της μέγιστης ανεκτής σεισμικής επιτάχυνσης ($\max a_g$), των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών και των λόγων επάρκειας των επιμέρους δομικών στοιχείων. Με βάση τα παραπάνω μεγέθη αξιολογήθηκε η ικανότητα του φορέα να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της επιλεγμένης στάθμης επιτελεστικότητας, καθώς και η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων επεμβάσεων ενίσχυσης.

Ε. Μέθοδοι Ενίσχυσης

Στο πλαίσιο της αντισεισμικής αναβάθμισης εξετάστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι ενίσχυσης. Οι δύο μέθοδοι επιλέχθηκαν ώστε να διερευνηθούν δύο διαφορετικές φιλοσοφίες επέμβασης: μία συνολική μέθοδος, με ουσιαστική μεταβολή της δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας του φορέα, και μία περισσότερο τοπική και στοχευμένη μέθοδος, με περιορισμένη επίδραση στη μάζα και στη γεωμετρία της κατασκευής.

Η πρώτη αφορούσε την εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος σε επιλεγμένα υποστυλώματα, δοκούς και στοιχεία θεμελίωσης, με στόχο την αύξηση της δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας του φορέα. Η δεύτερη αφορούσε την εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών (Ι.Ο.Π./FRP) σε κρίσιμα δομικά στοιχεία μέσω εξωτερικής επικόλλησης ανθρακοϋφασμάτων CFRP, με στόχο τη βελτίωση της διατμητικής αντοχής, της περισφιγξης και της διαθέσιμης πλαστιμότητας των στοιχείων.

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω συγκριτικής ανάλυσης των καμπυλών ικανότητας, των στοχευόμενων μετακινήσεων, των ιδιοπεριόδων, των λόγων υπεραντοχής και των λόγων επάρκειας των επιμέρους δομικών στοιχείων πριν και μετά την εφαρμογή των ενισχύσεων.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Α. Αποτελέσματα Αποτίμησης Υφιστάμενου Φορέα

Η αποτίμηση του υφιστάμενου φορέα πραγματοποιήθηκε με ανελαστική στατική ανάλυση σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τις δύο κύριες διευθύνσεις φόρτισης και για ομοιόμορφη και ιδιομορφική κατανομή φορτίων. Η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής διερευνήθηκε τόσο χωρίς όσο και με συνεκτίμηση της συνεισφοράς των τοιχοπληρώσεων, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στη δυσκαμψία, τη φέρουσα ικανότητα και τη συνολική απόκριση του φορέα. Το προσομοίωμα χωρίς τοιχοπληρώσεις εμφάνισε μικρότερη αρχική δυσκαμψία και μεγαλύτερη απαίτηση μετακίνησης, ενώ η συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων οδήγησε σε αύξηση της δυσκαμψίας και περιορισμό των μετακινήσεων. Από τα αποτελέσματα και των δύο προσομοιωμάτων διαπιστώθηκαν σημαντικές ανεπάρκειες σε δοκούς και υποστυλώματα, οι οποίες καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή επεμβάσεων αντισεισμικής ενίσχυσης.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι δυσμενέστερες τιμές που προέκυψαν από τις αναλύσεις αποτίμησης. Η συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων οδηγεί σε αύξηση της διαθέσιμης σεισμικής επιτάχυνσης και σε βελτίωση της συνολικής απόκρισης, χωρίς όμως να εξαλείφει πλήρως τις ανεπαρκείς περιοχές του φορέα.

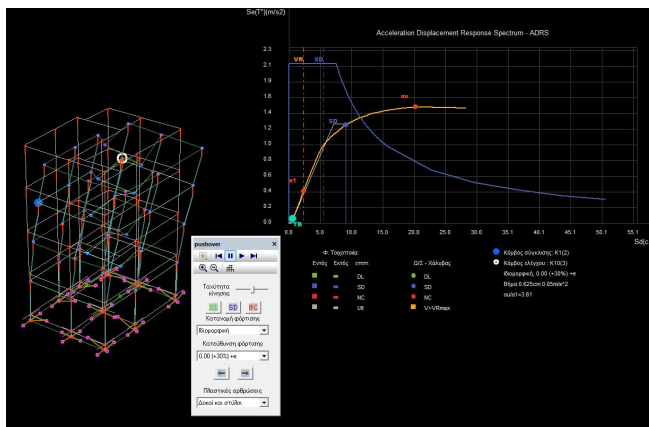
ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

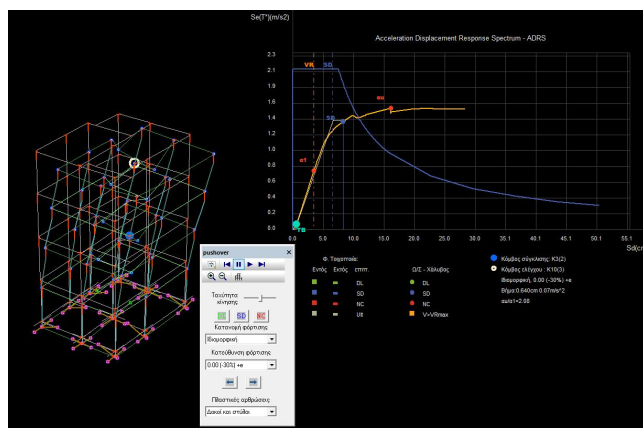
Παράμετρος	Ανάλυση χωρίς τοιχοπληρώσεις	Ανάλυση με τοιχοπληρώσεις
Ιδιοπερίοδος T_1	0,66s	0,66s
Στοχευμένη Μετακίνηση d_{SD}	12,51cm	11,56cm
Μέγιστη ανεκτή σεισμική επιτάχυνση $\max a_g$	0,086g	0,109g
Λόγος υπεραντοχής au/a_l	3,61	2,08
Επάρκεια SD	ΟΧΙ	Μερική Επάρκεια

Στα Σχήματα 1 & 2 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας του υφιστάμενου φορέα χωρίς και με συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων.

Από τη σύγκρισή τους αξιολογείται η επίδραση των τοιχοπληρώσεων στη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου. Η μεγαλύτερη αρχική κλίση της καμπύλης του προσομοιώματος με τοιχοπληρώσεις αποτυπώνει την αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας, ενώ η μεταβολή της μορφής της καμπύλης καταδεικνύει ότι η παρουσία τους επηρεάζει όχι μόνο την ελαστική αλλά και τη μετελαστική απόκριση του φορέα.

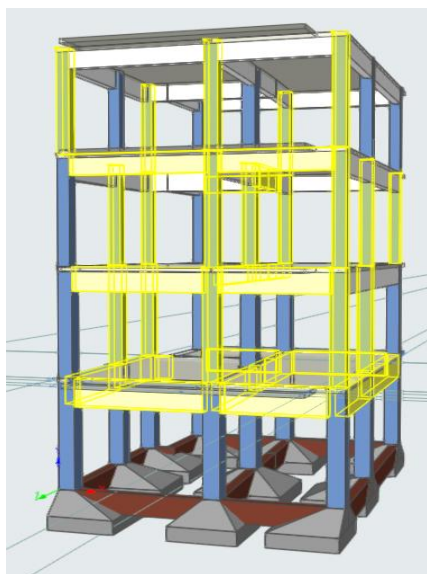


Σχήμα 1. Διάγραμμα Απαιτήσης-Ικανότητας υφιστάμενου κτιρίου χωρίς συνεκτίμηση τοιχοπληρώσεων



Σχήμα 2. Διάγραμμα Απαιτήσης-Ικανότητας υφιστάμενου κτιρίου με συνεκτίμηση τοιχοπληρώσεων

Η αξιολόγηση της επάρκειας του υφιστάμενου φορέα πραγματοποιήθηκε μέσω των λόγων επάρκειας των επιμέρους δομικών στοιχείων σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Η ανάλυση ανέδειξε κρίσιμες περιοχές με αυξημένες απαιτήσεις σε κάμψη και διάτμηση, κυρίως σε υποστulώματα και δοκούς των κατώτερων στάθμων, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τον σχεδιασμό των επεμβάσεων ενίσχυσης.



Εικόνα 2. Τρισδιάστατη απεικόνιση δομικών στοιχείων που αστοχούν - ανάλυση υφιστάμενου κτιρίου χωρίς την συνεκτίμηση τοιχοπληρώσεων

B. Αποτελέσματα Ενίσχυσης

Με βάση τα αποτελέσματα της αποτίμησης και τις ανεπάρκειες που εντοπίστηκαν στον υφιστάμενο φορέα, διερευνήθηκαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι αντισεισμικής ενίσχυσης: η εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και η εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών (Ι.Ο.Π./FRP). Οι επεμβάσεις σχεδιάστηκαν και αξιολογήθηκαν στο προσομοίωμα χωρίς συνεκτίμηση των τοιχοπληρώσεων, ώστε η αποτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους να βασίζεται αποκλειστικά στη βελτίωση του φέροντος οργανισμού και να εξετάζεται η δυσμενέστερη δυνατή περίπτωση σεισμικής απόκρισης. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για καθεμία από τις δύο μεθόδους ενίσχυσης.

1) Ενίσχυση με Μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος

Η πρώτη μέθοδος ενίσχυσης που εξετάστηκε αφορούσε την εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος σε επιλεγμένα δομικά στοιχεία του φορέα. Η επέμβαση εφαρμόστηκε κυρίως σε υποστulώματα και δοκούς που παρουσίασαν αυξημένες απαιτήσεις κατά την αποτίμηση, με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας, της δυσκαμψίας και της συνολικής σεισμικής αντοχής της κατασκευής.

Στα υποστulώματα εφαρμόστηκαν μανδύες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5 cm ανά πλευρά, με νέο διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, ενώ σε θέσεις όπου δεν ήταν δυνατή η περιμετρική εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν τρίπλευροι μανδύες. Στις δοκούς εφαρμόστηκαν τρίπλευροι μανδύες λόγω της παρουσίας της πλάκας στην άνω παρειά, με πρόσθετο διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό. Η επέμβαση επεκτάθηκε και στα αντίστοιχα στοιχεία θεμελίωσης, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της ενίσχυσης και η ασφαλής μεταφορά των αυξημένων εντατικών μεγεθών.

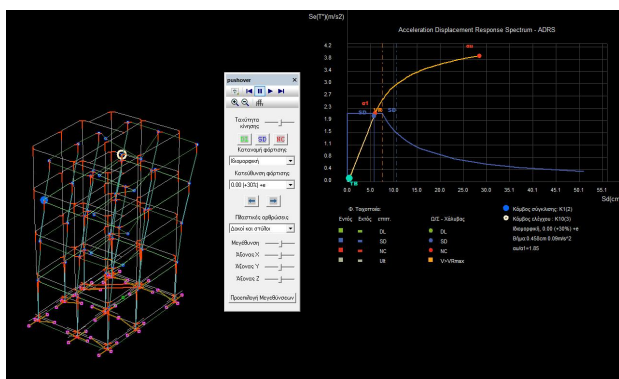
Ο σχεδιασμός της ενίσχυσης πραγματοποιήθηκε επαναληπτικά, καθώς μετά την αρχική ενίσχυση των ανεπαρκών μελών η ανακατανομή της δυσκαμψίας και των σεισμικών απαιτήσεων οδήγησε στην ανάγκη ενίσχυσης πρόσθετων στοιχείων. Μετά την εφαρμογή των μανδύων πραγματοποιήθηκε εκ νέου ανελαστική στατική ανάλυση προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της επέμβασης.

ΠΙΝΑΚΑΣ II

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Παράμετρος	Υφιστάμενος Φορέας	Ενισχυόμενος Φορέας με Μανδύες Ο.Σ.
Ιδιοπερίοδος T_1	0,6601 s	0,5244 s
Στοχευμένη Μετακίνηση d_{sd}	12,51 cm	8,09 cm
Μέγιστη ανεκτή σεισμική επιτάχυνση $\max a_g$	0,086g	0,22g
Λόγος υπεραντοχής a_u/a_l	3,61	1,86
Επάρκεια SD	ΟΧΙ	ΝΑΙ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του φορέα μετά την εφαρμογή μανδυνών οπλισμένου σκυροδέματος για την κρίσιμη περίπτωση φόρτισης, η οποία παρουσιάζει αυξημένη αρχική κλίση και μεγαλύτερη διαθέσιμη αντοχή σε σχέση με τον υφιστάμενο φορέα, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Παράλληλα, η μείωση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου και των στοχευόμενων μετακινήσεων επιβεβαιώνει τη βελτίωση της συνολικής δυναμικής απόκρισης του φορέα μετά την εφαρμογή της επέμβασης.



Σχήμα 3. Διάγραμμα Απαιτήσης-Ικανότητας ενισχυόμενου κτιρίου με μανδύες Ο.Σ.

Συνολικά, η ενίσχυση με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος οδήγησε σε ουσιαστική αναβάθμιση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα. Η αύξηση της δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας, η βελτίωση των λόγων επάρκειας και η πλήρης ικανοποίηση των απαιτήσεων της στάθμης επιτελεστικότητας SD καταδεικνύουν την υψηλή αποτελεσματικότητα της μεθόδου ως μέσου συνολικής αντισεισμικής ενίσχυσης.

2) Ενίσχυση με Ινοπλισμένα Πολυμερή

Η δεύτερη μέθοδος ενίσχυσης που εξετάστηκε αφορούσε την εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών (Ι.Ο.Π./FRP) σε επιλεγμένα δομικά στοιχεία του φορέα. Η επέμβαση εφαρμόστηκε στα στοιχεία που παρουσίασαν αυξημένες απαιτήσεις κατά την αποτίμηση, καθώς και σε πρόσθετα μέλη που παρουσίασαν ανεπάρκειες κατά τις επαναληπτικές επιλύσεις της ενίσχυσης. Στόχος της επέμβασης ήταν η βελτίωση της διατμητικής αντοχής, της περισφιγξης και της διαθέσιμης πλαστιμότητας των κρίσιμων στοιχείων, χωρίς ουσιαστική μεταβολή της μάζας και της γεωμετρίας της κατασκευής.

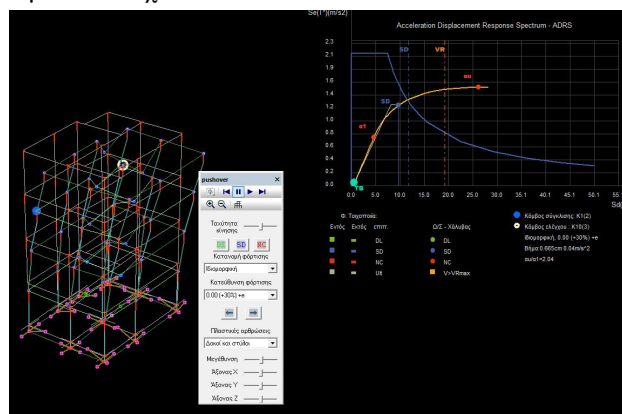
Για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά επικολλημένα συστήματα CFRP. Στα υποστυλώματα εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις υφάσματος SikaWrap-300C με στόχο κυρίως τη βελτίωση της περισφιγξης και της διαθέσιμης πλαστιμότητας, ενώ στις δοκούς εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις SikaWrap-600C σε διάταξη U-wrap, με κύριο στόχο την αύξηση της διατμητικής αντοχής.

Λόγω του μικρού πάχους και βάρους των σύνθετων υλικών, η επέμβαση δεν επιφέρει ουσιαστική μεταβολή της γεωμετρίας, της μάζας και της συνολικής δυσκαμψίας του φορέα.

ΠΙΝΑΚΑΣ III
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (Ι.Ο.Π.) ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Παράμετρος	Υφιστάμενος Φορέας	Ενισχυόμενος Φορέας με Ι.Ο.Π.
Ιδιοπερίοδος T_1	0,6601 s	0,6593 s
Στοχευμένη Μετακίνηση d_{SD}	12,51cm	13,58 cm
Μέγιστη ανεκτή σεισμική επιτάχυνση $\max a_g$	0,086g	0,159g
Λόγος υπεραντοχής a_u/a_l	3,61	2,09
Επάρκεια SD	ΟΧΙ	ΝΑΙ

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του φορέα μετά την εφαρμογή Ι.Ο.Π. για την κρίσιμη περίπτωση φόρτισης, η οποία παρουσιάζει βελτιωμένη μετελαστική συμπεριφορά και αυξημένη διαθέσιμη αντοχή σε σχέση με τον υφιστάμενο φορέα. Παράλληλα, η μικρή μεταβολή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου επιβεβαιώνει ότι η επέμβαση δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική δυσκαμψία της κατασκευής, αλλά βελτιώνει κυρίως την αντοχή και την πλαστιμότητα των κρίσιμων δομικών στοιχείων.



Σχήμα 4. Διάγραμμα Απαιτήσης-Ικανότητας ενισχυόμενου κτιρίου με Ινοπλισμένα Πολυμερή (Ι.Ο.Π.).

Συνολικά, η εφαρμογή των Ι.Ο.Π. οδήγησε σε πλήρη ικανοποίηση των απαιτήσεων της στάθμης επιτελεστικότητας SD και σε σημαντική βελτίωση της επάρκειας των κρίσιμων στοιχείων. Η μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική ως τοπική επέμβαση ενίσχυσης, βελτιώνοντας τη διατμητική αντοχή και την πλαστιμότητα του φορέα χωρίς σημαντική μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του.

C. Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Ενίσχυσης

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων ενίσχυσης έδειξε ότι αμφότερες οδηγούν σε σημαντική βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα και σε πλήρη ικανοποίηση των απαιτήσεων της στάθμης επιτελεστικότητας SD. Η εφαρμογή μανδυνών οπλισμένου σκυροδέματος παρουσίασε μεγαλύτερη αύξηση της δυσκαμψίας, της φέρουσας ικανότητας και της διαθέσιμης σεισμικής επιτάχυνσης, οδηγώντας παράλληλα σε σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων.

Αντίθετα, η ενίσχυση με Ινοπλισμένα Πολυμερή βελτίωσε αποτελεσματικά την επάρκεια και την πλαστιμότητα των κρίσιμων δομικών στοιχείων, χωρίς

ουσιαστική μεταβολή της μάζας και των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής.

Συνεπώς, οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν αποτελεσματικότερη λύση όταν επιδιώκεται συνολική αντισεισμική αναβάθμιση του φορέα, ενώ τα Ινοπλισμένα Πολυμερή συνιστούν μια ιδιαίτερα αποδοτική και λιγότερο επεμβατική μέθοδο τοπικής ενίσχυσης.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αφορούσε την αποτίμηση και αντισεισμική αναβάθμιση υφιστάμενου τετραώροφου κτιρίου οπλισμένου σκυροδέματος που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959. Η αποτίμηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του Ευρωκώδικα 8 μέσω ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover), τόσο χωρίς όσο και με συνεκτίμηση της συμβολής των τοιχοπληρώσεων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο υφιστάμενος φορέας δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της επιλεγμένης στάθμης επιτελεστικότητας SD, παρουσιάζοντας σημαντικές ανεπάρκειες σε δοκούς και υποστυλώματα. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι οι τοιχοπληρώσεις επηρεάζουν σημαντικά τη σεισμική απόκριση του κτιρίου, αυξάνοντας τη δυσκαμψία και τη φέρουσα ικανότητα του φορέα, χωρίς όμως να εξαλείφουν πλήρως τις εντοπισμένες ανεπάρκειες.

Για την αντισεισμική αναβάθμιση του κτιρίου εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι ενίσχυσης, η εφαρμογή μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και η εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών. Και οι δύο επεμβάσεις οδήγησαν σε πλήρη ικανοποίηση των απαιτήσεων της στάθμης επιτελεστικότητας SD και σε σημαντική βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα. Οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος παρουσίασαν μεγαλύτερη αύξηση της δυσκαμψίας, της φέρουσας ικανότητας και της διαθέσιμης σεισμικής επιτάχυνσης, ενώ τα Ινοπλισμένα Πολυμερή βελτίωσαν αποτελεσματικά την επάρκεια και την πλαστιμότητα των κρίσιμων στοιχείων χωρίς ουσιαστική μεταβολή της μάζας και της γεωμετρίας της κατασκευής.

Συμπερασματικά, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ενίσχυσης εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο στόχο της επέμβασης και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του έργου. Οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν καταλληλότερη λύση όταν απαιτείται συνολική αντισεισμική αναβάθμιση του φορέα, ενώ τα Ινοπλισμένα Πολυμερή αποτελούν μια ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση τοπικής ενίσχυσης με περιορισμένη κατασκευαστική επέμβαση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- EN 1992-1-1:2004 – Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings
- EN 1998-1:2003 – Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings
- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings
- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) (2022). Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.).
- Fardis, M. N. (2018). Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings. Springer.
- Δρίτσος Σ. (2015): Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Πάτρα 2005
- Επισκευές και Ενισχύσεις Κτιρίων Πανεπιστημίου Πατρών (http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/?page_id=2299)
- Βεργέτης Παναγιώτης-Χρήστος. Σεισμική αποτίμηση και ενίσχυση υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με βάση τις διατάξεις των κανονιστικών κειμένων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του EC8, Ε.Α.Π., Πάτρα 2018
- Εγχειρίδιο Θεωρητικής Τεκμηρίωσης FESPA (LH LOGISMIKI) (Οκτώβριος 2013): PushOver Analysis
- Εγχειρίδιο Θεωρητικής Τεκμηρίωσης FESPA (LH LOGISMIKI) (Δεκέμβριος 2022): Παράδειγμα Μελέτης Στατικής Επάρκειας και Ενίσχυσης κτιρίου σύμφωνα με την 3η Αναθεώρηση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2022
- Σύνθετα Υφάσματα της εταιρείας “Sika” <https://grc.sika.com/el/construction/domitikh-enisxysh/domhtikh-enisxysh-skyrodematos/yfasmata.html>