

Μελέτη Υβριδικών Κατασκευών υπό Συνθήκες Διαδοχικής Κατάρρευσης κατά τη Δράση Πολλαπλών Σεισμών

Δημήτρης Σαραντίτης

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών
Μεταπτ. Φοιτητής ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
Email: std153538@ac.eap.gr

Παναγιώτα Κατσιμπίνη

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Μεταδιδάκτωρ Ερευνήτρια – Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια
Email: katsimpini.panagiota@ac.eap.gr

Περίληψη – Η παρούσα εργασία διερευνά τη σεισμική συμπεριφορά και την πιθανή προοδευτική κατάρρευση υβριδικών κατασκευών που αποτελούνται από υφιστάμενο φορέα οπλισμένου σκυροδέματος και καθ' ύψος μεταλλική προσθήκη. Αναπτύχθηκαν τέσσερα τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα στο SAP2000, με διώροφη ή τριώροφη μεταλλική προσθήκη και, για κάθε περίπτωση, ειδικό σενάριο τοπικής υποβάθμισης ενός ακραίου υποστυλώματος Ο/Σ. Η αποτίμηση πραγματοποιήθηκε με μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας υπό μεμονωμένα σεισμικά γεγονότα και πλήρεις ακολουθίες κύριου σεισμού–μετασεισμού, με διαδοχική κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία της παραμένουσας παραμόρφωσης, της εξέλιξης των πλαστικών αρθρώσεων και του διαθέσιμου περιθωρίου μέχρι την υπέρβαση Collapse Prevention για την αξιολόγηση της μετασεισμικής κατάστασης.

Λέξεις-Κλειδιά: Υβριδικές κατασκευές, προοδευτική κατάρρευση, σεισμικές ακολουθίες, SAP2000, μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για καθ' ύψος προσθήκες σε υφιστάμενες κατασκευές. Οι μεταλλικές προσθήκες επί φορέων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) αποτελούν ελκυστική λύση λόγω του μικρότερου ίδιου βάρους, της ταχύτητας κατασκευής και της αυξημένης πλαστιμότητας του χάλυβα. Ωστόσο, η συνύπαρξη παλαιού φορέα Ο/Σ και νέας μεταλλικής υπερκατασκευής δημιουργεί υβριδικό σύστημα με διαφοροποιημένη κατανομή μάζας, δυσκαμψίας και υστερητικής συμπεριφοράς.

Η μεταλλική προσθήκη μεταβάλλει το συνολικό ύψος και τις ιδιοδυναμικές ιδιότητες, ενώ το υφιστάμενο τμήμα μπορεί να χαρακτηρίζεται από ρηγματώσεις, μειωμένη δυσκαμψία ή περιορισμένη περίσφιξη. Η αλληλεπίδραση των δύο συστημάτων επηρεάζει τις σχετικές μετακινήσεις ορόφων, τη μεταφορά σεισμικών απαιτήσεων και τη χωρική κατανομή της βλάβης.

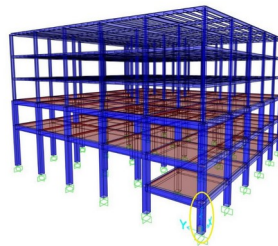
Ιδιαίτερη σημασία έχει η απόκριση υπό διαδοχικές σεισμικές δράσεις. Ένας μετασεισμός επιβάλλεται σε φορέα που ενδέχεται να έχει ήδη αναπτύξει πλαστικές αρθρώσεις, παραμένουσες μετακινήσεις και μειωμένη δυσκαμψία, επομένως η πλήρης ακολουθία μπορεί να οδηγήσει σε σωρευτική βλάβη και δυσμενέστερη μετασεισμική κατάσταση από την ανεξάρτητη θεώρηση των επιμέρους γεγονότων (Hatzigeorgiou & Liolios, 2010; Chorafta et al., 2024). Στο πλαίσιο της προοδευτικής κατάρρευσης, τοπική απώλεια ικανότητας μπορεί να μεταβάλει τις διαδρομές μεταφοράς φορτίων και να οδηγήσει σε δυσανάλογη βλάβη (Adam et al., 2018).

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής τρωτότητας υβριδικών φορέων με καθ' ύψος προσθήκες, υπό μεμονωμένα γεγονότα και σεισμικές ακολουθίες, με έμφαση στη συσσώρευση βλάβης, στην παραμένουσα παραμόρφωση και στην επίδραση ενός σεναρίου τοπικής υποβάθμισης κρίσιμου υποστυλώματος.

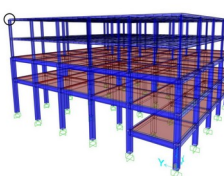
II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αριθμητική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στο SAP2000 (Computers and Structures, Inc., 2025). Αναπτύχθηκαν τέσσερα τρισδιάστατα προσομοιώματα: 2FS και 3FS, με διώροφη και τριώροφη μεταλλική προσθήκη αντίστοιχα, και οι παραλλαγές 2FSR και 3FSR με υποβαθμισμένο ακραίο υποστύλωμα Ο/Σ ισογείου. Η μεταλλική προσθήκη σχεδιάστηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, ενώ η μη γραμμική συμπεριφορά δοκών και υποστυλωμάτων αποδόθηκε μέσω πλαστικών αρθρώσεων με στάθμες επιτελεστικότητας κατά ASCE 41-17 (ASCE/SEI, 2017).

(a)



(b)



(c)



Σχήμα 1. (a) Θέση του υποβαθμισμένου υποστυλώματος· (b) ακραίος κόμβος ελέγχου φορέα με διώροφη μεταλλική προσθήκη· (c) ακραίος κόμβος ελέγχου φορέα με τριώροφη μεταλλική προσθήκη.

Η διάταξη των τεσσάρων προσομοιωμάτων επιτρέπει παράλληλη σύγκριση του ύψους της μεταλλικής προσθήκης και της επίδρασης της τοπικής υποβάθμισης. Έτσι διαχωρίζεται η γεωμετρική μεταβολή από τη μειωμένη τοπική ικανότητα, ενώ οι ακραίοι κόμβοι ελέγχου συμπληρώνουν την αξιολόγηση της συνολικής οριζόντιας απόκρισης.

Το ειδικό σενάριο εφαρμόστηκε σε ακραίο υποστυλώμα Ο/Σ διατομής 60×60 cm. Στα δύο άκρα του ορίστηκαν αρθρώσεις Brittle, Force Controlled, με αλληλεπίδραση P–M2–M3. Η παραδοχή χρησιμοποιήθηκε ως παραμετρικό σενάριο μειωμένης τοπικής ικανότητας, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή της στο διαθέσιμο περιθώριο του συνολικού υβριδικού φορέα.

Οι σεισμικές διεγέρσεις προήλθαν από τη βάση PEER/NGA-West2 (Ancheta et al., 2014) και οργανώθηκαν σε πέντε οικογένειες: Chalfant Valley (1986), Coalinga (1983), Imperial Valley (1979), Mammoth Lakes (1980) και Whittier Narrows (1987). Για κάθε οικογένεια εξετάστηκαν τα επιμέρους γεγονότα και η πλήρης ακολουθία, ώστε να αποτιμηθεί η επίδραση της επαναλαμβανόμενης διέγερσης και της συσσώρευσης βλάβης (Goda & Taylor, 2012; Ruiz-García & Negrete-Manriquez, 2011).

Για κάθε φορέα πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας και εφαρμόστηκε κλιμάκωση της έντασης των επιταχυνσιογραφήματων κατά τη λογική της Incremental Dynamic Analysis (Vamvatsikos & Cornell, 2002), έως την εμφάνιση υπέρβασης της στάθμης Collapse Prevention (CP). Ο δείκτης SF_{CP} ορίστηκε ως ο αδιάστατος πολλαπλασιαστής του επιταχυνσιογραφήματος στο πρώτο επίπεδο κλιμάκωσης όπου εμφανίζεται υπέρβαση CP. Επομένως, εάν η πρώτη υπέρβαση καταγράφεται στην κλιμάκωση 2,5g, τότε $SF_{CP} = 2,5$. Ο δείκτης εκφράζει το διαθέσιμο περιθώριο ανελαστικής ικανότητας και όχι τη στιγμιαία απόκριση.

Η αξιολόγηση βασίστηκε στον λόγο σχετικής μετακίνησης ορόφων (IDR), στον λόγο παραμένουσας σχετικής παραμόρφωσης ορόφων (RIDR), στις μετατοπίσεις χαρακτηριστικών ακραίων κόμβων και στην εξέλιξη των πλαστικών αρθρώσεων. Για τους 2FS/2FSR ελέγχθηκε ακραίος κόμβος του 4ου ορόφου και για τους 3FS/3FSR ακραίος κόμβος του 5ου ορόφου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η κοινή ανάλυση IDR, RIDR, SF_{CP} και πλαστικών αρθρώσεων επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ μέγιστης απόκρισης, παραμένουσας κατάστασης και διαθέσιμου περιθωρίου μέχρι την κρίσιμη τοπική βλάβη.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

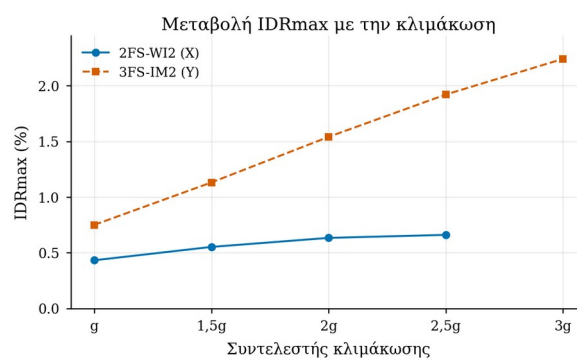
Η σύγκριση μεμονωμένων γεγονότων και πλήρων ακολουθιών έδειξε ότι η δυσμενέστερη μετασεισμική κατάσταση δεν ταυτίζεται πάντα με τη μεγαλύτερη στιγμιαία τιμή IDR. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι ακολουθίες οδήγησαν σε αυξημένο RIDR, παρότι η μέγιστη σχετική μετακίνηση παρέμεινε συγκρίσιμη με εκείνη ενός επιμέρους γεγονότος. Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι η αξιολόγηση της σεισμικής τρωτότητας δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη μέγιστη απόκριση.

Στους φορείς με δώροφη προσθήκη, οι μεγαλύτερες τιμές IDR εμφανίστηκαν συχνά στους ανώτερους ορόφους, ενώ οι μεγαλύτερες παραμένουσες παραμορφώσεις εντοπίστηκαν συχνά στο υφιστάμενο τμήμα Ο/Σ. Στους φορείς με τριώροφη προσθήκη, η αύξηση του ύψους ενίσχυσε την ευαισθησία των

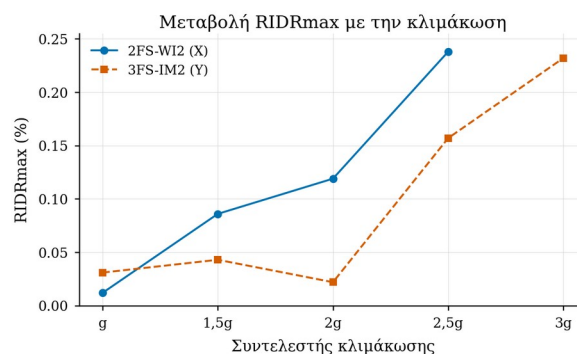
μετακινήσεων των άνω κόμβων, χωρίς αυτό να συνεπάγεται ότι η μόνιμη βλάβη συγκεντρώνεται στην ίδια περιοχή.

A. Εξέλιξη IDR και RIDR με την κλιμάκωση

Για σειρές με αρκετά διαθέσιμα επίπεδα κλιμάκωσης, το WI2 στον 2FS και το IM2 στον 3FS δείχνουν διαφορετική εξέλιξη της παροδικής απόκρισης και της παραμένουσας παραμόρφωσης. Στο 2FS–WI2, το IDRmax αυξάνεται από 0,433% στο g σε 0,661% στο 2,5g, ενώ το RIDRmax αυξάνεται από 0,012% σε 0,238%. Στο 3FS–IM2, το IDRmax αυξάνεται από 0,751% στο g σε 2,241% στο 3g, ενώ το RIDRmax παραμένει χαμηλό έως το 2g και κατόπιν αυξάνεται σε 0,232% στο 3g.



Σχήμα 2. Μεταβολή του IDRmax με την κλιμάκωση: 2FS–WI2 (X) και 3FS–IM2 (Y).

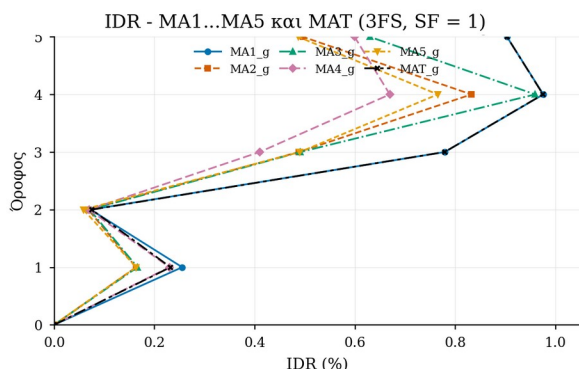


Σχήμα 3. Μεταβολή του RIDRmax με την κλιμάκωση: 2FS–WI2 (X) και 3FS–IM2 (Y).

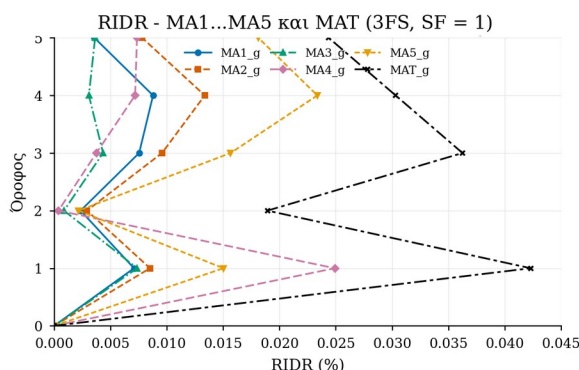
Η παράλληλη εξέταση των δύο καμπυλών είναι ουσιαστική, επειδή η αύξηση της μέγιστης σχετικής μετακίνησης δεν συνοδεύεται πάντοτε από αντίστοιχη αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Στο IM2, για παράδειγμα, το RIDR παραμένει μικρό μέχρι το 2g, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται απότομα, παρότι το IDR ακολουθεί ομαλότερη αύξηση. Αντίστοιχα, στο WI2 η παραμένουσα παραμόρφωση αυξάνεται σταδιακά με την κλιμάκωση. Συνεπώς, η διαδικασία κλιμάκωσης χρησιμοποιείται όχι μόνο για τον εντοπισμό υψηλότερων απαιτήσεων, αλλά και για την παρακολούθηση της μετάβασης από παροδική ανελαστική απόκριση σε κατάσταση με αυξημένη μόνιμη παραμόρφωση. Η ανάγνωση αυτή συμπληρώνεται από τον SF_{CP} και από την εξέλιξη των πλαστικών αρθρώσεων, ώστε η μέγιστη απόκριση να συσχετίζεται με το διαθέσιμο περιθώριο ικανότητας. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι η ίδια τάξη μεγέθους IDR μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετική παραμένουσα κατάσταση και, συνεπώς, σε διαφορετική ανάγκη ελέγχου μετά τη σεισμική δράση.

B. Μεμονωμένα γεγονότα και πλήρης ακολουθία MA

Στον 3FS και για SF = 1 (αρχικό επίπεδο g), οι καμπύλες MA1–MA5 παρουσιάζουν τη διασπορά της απόκρισης καθ' ύψος, ενώ η πλήρης ακολουθία MAT εμφανίζει μέγιστο IDR συγκρίσιμο με το δυσμενέστερο μεμονωμένο γεγονός. Αντίθετα, στο RIDR η MAT οδηγεί στη μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση, περίπου 0,042% στον 1ο όροφο. Η διαφοροποίηση αυτή αποτυπώνει άμεσα τη συσσωρευμένη βλάβη που μεταφέρεται από γεγονός σε γεγονός.



Σχήμα 4. IDR ανά όροφο για MA1–MA5 και MAT στον 3FS, SF = 1 (περιβάλλουσα X–Y).



Σχήμα 5. RIDR ανά όροφο για MA1–MA5 και MAT στον 3FS, SF = 1 (περιβάλλουσα X–Y).

Η σύγκριση των φορέων με και χωρίς υποβαθμισμένο υποστύλωμα έδειξε ότι παρόμοια καθολική απόκριση στο ίδιο επίπεδο έντασης δεν συνεπάγεται το ίδιο διαθέσιμο περιθώριο μέχρι την κρίσιμη τοπική βλάβη. Η τοπική μείωση της ικανότητας μεταβάλλει κυρίως το επίπεδο στο οποίο εμφανίζεται CP και την παραμένουσα κατάσταση, χωρίς να προκαλεί υποχρεωτικά μονοσήμαντη αύξηση του IDR σε κάθε κοινό SF.

Η εξέλιξη των πλαστικών αρθρώσεων έδειξε ότι η υπέρβαση CP πρέπει να ερμηνεύεται ως ένδειξη κρίσιμης τοπικής απώλειας ικανότητας και όχι ως αυτόματη απόδειξη γενικευμένης κατάρρευσης. Ωστόσο, όταν τέτοιες υπερβάσεις εμφανίζονται σε κρίσιμα στοιχεία του υφιστάμενου Ο/Σ, μπορούν να μεταβάλουν την κατανομή της ανελαστικής απαίτησης και να περιορίσουν τη διαθέσιμη ικανότητα του συνολικού συστήματος.

Επιπλέον, η σύγκριση των σεισμικών οικογενειών έδειξε ότι η δυσμενής απόκριση δεν εξαρτάται μόνο από τη μέγιστη ένταση, αλλά και από τη διάρκεια, το φασματικό περιεχόμενο και τη σειρά των γεγονότων. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση της μετασεισμικής λειτουργικότητας και της ανάγκης επέμβασης.

C. Διαθέσιμο περιθώριο ικανότητας

Η επίδραση της τοπικής υποβάθμισης αποτυπώνεται καθαρά στη συχνότητα εμφάνισης CP στο αρχικό επίπεδο g και στο μέγιστο διαθέσιμο εύρος κλιμάκωσης. Τα προσομοιώματα με τοπική υποβάθμιση εμφανίζουν CP στο g σε σαφώς περισσότερες περιπτώσεις, ενώ το μέγιστο SF_{CP} περιορίζεται σε 2, δηλαδή η πρώτη υπέρβαση CP εμφανίζεται το αργότερο στην κλιμάκωση 2g.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι
ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ CP ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΚΛΙΜΑΚΩΣΗΣ

Φορέας	Υπερβάσεις CP στο g	Μέγιστο SF _{CP}
2FS	11/18	2,5
2FSR	16/18	2
3FS	7/18	3
3FSR	15/18	2

Η εξέλιξη των πλαστικών αρθρώσεων επιβεβαίωσε ότι η υπέρβαση CP αποτελεί κρίσιμο τοπικό δείκτη, αλλά δεν ταυτίζεται αυτομάτως με πλήρη προοδευτική κατάρρευση. Η σημασία της έγκειται στο ότι αποκαλύπτει περιοχές όπου η διαθέσιμη ανελαστική ικανότητα έχει εξαντληθεί και όπου ενδέχεται να ενεργοποιηθεί δυσμενής ανακατανομή δυνάμεων.

Παράλληλα, η διαφοροποίηση της χωρικής κατανομής IDR και RIDR έδειξε ότι η μέγιστη παροδική απαίτηση μπορεί να συγκεντρώνεται στο ανώτερο μεταλλικό τμήμα, ενώ η παραμένουσα βλάβη παραμένει εντονότερη στους χαμηλότερους ορόφους του υφιστάμενου Ο/Σ. Η συνδυασμένη ανάγνωση των δύο δεικτών είναι συνεπώς κρίσιμη για την αποτίμηση της μετασεισμικής κατάστασης.

Η σύγκριση του Πίνακα Ι δείχνει ότι η τοπική υποβάθμιση επηρεάζει κυρίως το επίπεδο στο οποίο εξαντλείται το διαθέσιμο περιθώριο και όχι κατ' ανάγκη την καθολική απόκριση σε κάθε κοινή κλιμάκωση. Οι 2FSR και 3FSR εμφανίζουν υπέρβαση CP ήδη στο g σε 16/18 και 15/18 περιπτώσεις αντίστοιχα, ενώ στους αρχικούς φορείς οι αντίστοιχες συχνότητες είναι 11/18 και 7/18. Παράλληλα, η μέγιστη τιμή SF_{CP} περιορίζεται σε 2 στους υποβαθμισμένους φορείς, έναντι 2,5 για τον 2FS και 3 για τον 3FS. Έτσι, παρόμοιες τιμές IDR σε κοινό επίπεδο κλιμάκωσης μπορούν να συνυπάρχουν με διαφορετικό απόθεμα ανελαστικής ικανότητας.

Η πλήρης σεισμική ακολουθία διατηρεί για το επόμενο γεγονός τις παραμένουσες μετακινήσεις, τις ενεργοποιημένες πλαστικές αρθρώσεις και τη μεταβολή της δυσκαμψίας που έχει ήδη αναπτυχθεί. Γι' αυτό η σύγκριση μεμονωμένων γεγονότων με την αντίστοιχη ακολουθία αξιολογεί όχι μόνο το μέγιστο IDR, αλλά και την κατάσταση στην οποία παραμένει ο φορέας μετά το πέρας της διέγερσης, όπως αποτυπώνεται χαρακτηριστικά από την αύξηση του RIDR στη MAT.

Η συνδυασμένη ανάγνωση αποτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων από έναν μόνο μέγιστο δείκτη. Σε υβριδικούς φορείς, η χωρική συσχέτιση παροδικής απαίτησης και παραμένουσας βλάβης είναι απαραίτητη για αξιόπιστη αποτίμηση.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τρωτότητα δεν εξαρτάται μόνο από τη μέγιστη επιτάχυνση ή τον συντελεστή κλιμάκωσης, αλλά και από τη διάρκεια, το φασματικό περιεχόμενο και τη σειρά των επιμέρους γεγονότων. Η ανάπτυξη σημαντικού RIDR μπορεί να συνδέεται με απώλεια μετασεισμικής λειτουργικότητας ακόμη και χωρίς άμεση γενικευμένη κατάρρευση.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη έδειξε ότι η σεισμική συμπεριφορά υβριδικών φορέων με καθ' ύψος μεταλλική προσθήκη εξαρτάται από τη συνδυασμένη απόκριση του υφιστάμενου Ο/Σ και της νέας μεταλλικής κατασκευής. Η μέγιστη παροδική απαίτηση και η παραμένουσα βλάβη μπορούν να εντοπίζονται σε διαφορετικά τμήματα του φορέα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνδυασμένη αξιολόγηση IDR και RIDR.

Οι σεισμικές ακολουθίες επιβαρύνουν τη μετασεισμική κατάσταση κυρίως μέσω αύξησης των παραμενουσών παραμορφώσεων και εξέλιξης των πλαστικών αρθρώσεων. Η χρήση μόνο μεμονωμένων γεγονότων μπορεί, επομένως, να υποεκτιμήσει τη σωρευτική βλάβη. Τα ευρήματα συνηγορούν υπέρ της συστηματικότερης ένταξης σεναρίων mainshock-aftershock στις διαδικασίες αποτίμησης και, όπου ο σεισμικός κίνδυνος και η τρωτότητα το δικαιολογούν, στον επιτελεστικό αντισεισμικό σχεδιασμό.

Η τοπική υποβάθμιση κρίσιμου υποστυλώματος μειώνει το διαθέσιμο περιθώριο κλιμάκωσης πριν από την υπέρβαση CP, χωρίς να συνεπάγεται υποχρεωτικά μεγαλύτερο IDR σε κάθε κοινό επίπεδο έντασης. Πριν από τον σχεδιασμό μεταλλικής προσθήκης απαιτείται, συνεπώς, λεπτομερής αποτίμηση των κρίσιμων στοιχείων των χαμηλών ορόφων και της διεπιφάνειας παλαιού και νέου φορέα.

Μελλοντική έρευνα μπορεί να επεκτείνει τη διερεύνηση σε περισσότερες σεισμικές ακολουθίες, διαφορετικές γεωμετρίες και συνδέσεις, καθώς και σε καμπύλες τρωτότητας που θα συνδυάζουν τοπικούς και καθολικούς δείκτες βλάβης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας ευχαριστεί τα μέλη της Επιτροπής Αξιολόγησης, Δρ. Γεώργιο Παπαγιαννόπουλο και Δρ. Γεώργιο Χατζηγεωργίου, για την αξιολόγηση της εργασίας και τις παρατηρήσεις τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στην επιβλέπουσα, Δρ. Παναγιώτα Κατσιμπίνη, για την επιστημονική καθοδήγηση και υποστήριξη κατά την εκπόνηση της ΜΔΕ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Adam, J. M., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, 173, 122–149.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., Wooddell, K. E., Graves, R. W., Kottke, A. R., Boore, D. M., Kishida, T., & Donahue, J. L. (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989–1005.
- ASCE/SEI. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-17)*. American Society of Civil Engineers.
- Chorafa, E., Skrapalliou, E., & Katsimpini, P. (2024). On the nonlinear behavior of composite structures under multiple earthquakes considering soil-structure interaction. *CivilEng*, 5, 673–693.

- Computers and Structures, Inc. (2025). SAP2000: Integrated software for structural analysis and design. CSI, Berkeley, California.
- Goda, K., & Taylor, C. A. (2012). Effects of aftershocks on peak ductility demand due to strong ground motion records from shallow crustal earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(15), 2311–2330.
- Hatzigeorgiou, G. D., & Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1010–1025.
- Ruiz-García, J., & Negrete-Manriquez, J. C. (2011). Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock-aftershock seismic sequences. *Engineering Structures*, 33(2), 621–634.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514.