

Επιρροή του προσανατολισμού της σεισμικής δράσης στη βλάβη πολύροφων κτιρίων Ο/Σ

Κωνσταντίνος Κωστινάκης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: kkostina@civil.auth.gr

Κωνσταντίνος Μορφίδης

Εντεταλμένος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, email: konmorf@gmail.com

Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών παρατηρείται παγκοσμίως μια προσπάθεια εκτίμησης της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων, καθώς και του επιπέδου των βλαβών που θα εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος, ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις σχετικά με την αποκατάσταση ή την ενίσχυσή τους. Για την αποτίμηση της σεισμικής βλάβης των υφιστάμενων κτιρίων, καθώς και για τον σχεδιασμό των μέτρων ενίσχυσής τους όπως επίσης και για τον σχεδιασμό νέων, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί (EN1998-1, 2003; FEMA-356, 2000; ASCE/SEI 41-06, 2008) εισάγουν μεθοδολογίες που βασίζονται στη χρήση μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης, η ακριβέστερη από τις οποίες είναι η ανελαστική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση.

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου ανάλυσης επηρεάζεται σημαντικά από μια σειρά από παραμέτρους, όπως είναι τα ιδιαίτερα δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τα χαρακτηριστικά των σεισμικών καταγραφών που θα χρησιμοποιηθούν και η διεύθυνση εφαρμογής της σεισμικής δράσης. Η τελευταία παράμετρος είναι ιδιαίτερος κρίσιμη και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία εκτίμησης της σεισμικής βλάβης. Παρόλ' αυτά οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί δεν περιέχουν διατάξεις που να θίγουν το συγκεκριμένο ζήτημα με σαφήνεια και επάρκεια. Πιο συγκεκριμένα, η FEMA 356 και ο ASCE 41-06 ορίζουν ότι η διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης πρέπει να ταυτίζεται με τους κύριους άξονες της κατασκευής, χωρίς ωστόσο να δίνουν οδηγίες σχετικά με τον ακριβή ορισμό των εν λόγω αξόνων. Σύμφωνα με τον EN1998-1, "η σεισμική δράση σχεδιασμού θα εφαρμόζεται σε όλες τις κατάλληλες οριζόντιες διευθύνσεις και στις ορθογώνιες προς αυτές." Ωστόσο, δεν δίνεται ο ορισμός των "κατάλληλων οριζόντιων διευθύνσεων", με εξαίρεση τα κτίρια με φέροντα στοιχεία σε δύο ορθογώνιες διευθύνσεις, όπου, σύμφωνα με τον EN1998-1, αυτές οι δύο διευθύνσεις θα θεωρούνται ως οι κατάλληλες διευθύνσεις. Ο νεοζηλανδικός κανονισμός NZS (2004) απαιτεί την εφαρμογή της σεισμικής διέγερσης κατά τη διεύθυνση που οδηγεί στα δυσμενέστερα αποτελέσματα, χωρίς ωστόσο να δίνει οδηγίες σχετικά με τον προσδιορισμό της.

Η ασάφεια των κανονιστικών κειμένων σχετικά με το ζήτημα της ορθής επιλογής του προσανατολισμού της σεισμικής διέγερσης οδηγεί στις περισσότερες περιπτώσεις στην εφαρμογή των επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος των κατασκευαστικών αξόνων του κτιρίου, κάτι όμως που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής απόκρισης και βλάβης, όπως έχει αποδειχτεί από παλιότερες έρευνες (Rigato and Medina, 2007; Kostinakis et al., 2013; Nguyen and Kim, 2013; Fontara et al., 2015; Kostinakis et al., 2015). Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι συγκεκριμένες προσπάθειες που έχουν γίνει με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση της διεύθυνσης της σεισμικής δράσης στο επίπεδο βλαβών κτιρίων Ο/Σ δεν εξέτασαν την επιρροή των δομικών χαρακτηριστικών των κτιρίων που καθορίζουν τη σεισμική τους συμπεριφορά (δομική εκκεντρότητα, ύπαρξη τοιχωμάτων, αριθμός ορόφων κ.τ.λ.), καθώς και τις μεθόδους ποσοτικοποίησης της βλάβης.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση του προσανατολισμού της σεισμικής δράσης στη βλάβη πολύροφων κτιρίων Ο/Σ με διάφορα δομικά συστήματα. Για τις ανάγκες της έρευνας

επιλέχθηκαν πέντε ασύμμετρα κτίρια Ο/Σ μέσου ύψους. Τα κτίρια υποβλήθηκαν σε ανελαστικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας 100 σεισμικές διεγέρσεις, οι οποίες περιγράφονται από ζεύγη επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος δύο ορθογωνίων, οριζοντίων αξόνων. Επιπλέον, οι άξονες καταγραφής των σεισμικών διεγέρσεων στράφηκαν ως προς τους κατασκευαστικούς άξονες αναφοράς των κτιρίων από 0° έως 360° με βήμα 5°. Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς έναντι σεισμού των πέντε κτιρίων που μελετήθηκαν υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη απόκρισης: Μέγιστη Σχετική Μετακίνηση Ορόφου (ΜΣΜΟ), Μέση Σχετική Μετακίνηση (ΜΣΜ) και Ολικός Δείκτης Βλάβης κατά Park & Ang (1985) (ΟΔΒ). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία εκτίμησης της σεισμικής βλάβης, καθώς, η επίδρασή της στην ανελαστική απόκριση των κτιρίων μπορεί να είναι πολύ σημαντική και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δομικού συστήματος. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η κοινή πρακτική εφαρμογής των επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος των κατασκευαστικών αξόνων των κτιρίων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης.

Επιλογή, διαστασιολόγηση και προσομοίωση ανελαστικών ιδιοτήτων των κτιρίων

Για τις ανάγκες της έρευνας επιλέχθηκαν πέντε ασύμμετρα κτίρια Ο/Σ μέσου ύψους, τα οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν με τη βοήθεια του EN1992-1-1 και του EN1998-1. Τα κτίρια αποτελούν τυπικούς 5ώροφους φορείς με ύψος ορόφου 3.2m. Οι κατόψεις των τυπικών ορόφων των κτιρίων απεικονίζονται στο σχήμα 1. Η επιλογή των κτιρίων έγινε με στόχο από τη μια να αποτελούν τυπικούς φορείς του ελλαδικού χώρου και από την άλλη να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δομικών συστημάτων. Ο βαθμός της ασυμμετρίας ελέγχεται με το λόγο e_0/r , όπου e_0 είναι η απόσταση μεταξύ του ίχνους του πλασματικού ελαστικού άξονα και του κέντρου μάζας και r είναι η ακτίνα δυστροπείας. Οι δομικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η ύπαρξη ή όχι τοιχωμάτων, το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που παραλαμβάνεται από τα τοιχώματα, η δομική εκκεντρότητα, καθώς και η ύπαρξη ή όχι στρεπτικής ευαισθησίας. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα εξής κτίρια:

- Ασύμμετρο Σύστημα Πλαισίων κατά τους άξονες x και y (ΑΣΠxy). Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελείται από πλαίσια κατά τις 2 οριζόντιες διευθύνσεις x και y και κατατάσσεται στα αμιγώς πλαίσιακα συστήματα σύμφωνα με την κατάταξη που χρησιμοποιείται στον EN1998-1. Η τιμή του λόγου e_0/r κατά τη διεύθυνση x είναι $0.31 > 0.3$. Οπότε, το κτίριο είναι μη κανονικό σε κάτοψη, αλλά κανονικό καθ' ύψος σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1.
- Ασύμμετρο Διπλό Σύστημα ισοδύναμο προς Πλαισιακό κατά τους άξονες x και y (ΑΔΣΠxy). Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελείται από πλαίσια και τοιχώματα κατά τις 2 διευθύνσεις x και y . Το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που παραλαμβάνουν τα τοιχώματα είναι περίπου 43% και στις 2 οριζόντιες διευθύνσεις, συνεπώς ο φορέας κατατάσσεται στα διπλά συστήματα ισοδύναμο προς πλαίσιακα σύμφωνα με την κατάταξη που χρησιμοποιείται στον EN1998-1. Η τιμή του λόγου e_0/r κατά τις διευθύνσεις x και y είναι $0.38 > 0.3$ και $0.31 > 0.3$ αντιστοίχως. Οπότε, το κτίριο είναι μη κανονικό σε κάτοψη, αλλά κανονικό καθ' ύψος σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1.
- Ασύμμετρο Σύστημα Τοιχωμάτων κατά τους άξονες x και y (ΑΣΤxy). Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελείται από πλαίσια και τοιχώματα κατά τις 2 διευθύνσεις x και y . Το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που παραλαμβάνουν τα τοιχώματα είναι περίπου 69% και στις 2 οριζόντιες διευθύνσεις, συνεπώς ο φορέας κατατάσσεται στα συστήματα τοιχωμάτων σύμφωνα με την κατάταξη που χρησιμοποιείται στον EN1998-1. Η τιμή του λόγου e_0/r κατά τις διευθύνσεις x και y είναι $0.4 > 0.3$ και $0.58 > 0.3$ αντιστοίχως. Οπότε, το κτίριο είναι μη κανονικό σε κάτοψη, αλλά κανονικό καθ' ύψος σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1.

- Ασύμμετρο Σύστημα Πλαισίων κατά τον άξονα x και Σύστημα Τοιχωμάτων κατά τον άξονα y (ΑΣΠxΣTy). Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελείται από πλαίσια κατά τη διεύθυνση x και συνδυασμό πλαισίων και τοιχωμάτων κατά τη διεύθυνση y. Το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που παραλαμβάνουν τα τοιχώματα κατά τον άξονα y είναι 70%, συνεπώς ο φορέας κατατάσσεται στα συστήματα τοιχωμάτων σύμφωνα με την κατάταξη που χρησιμοποιείται στον EN1998-1. Η τιμή του λόγου e_0/t κατά τις διεύθυνση x είναι $0.41 > 0.3$. Οπότε, το κτίριο είναι μη κανονικό σε κάτοψη, αλλά κανονικό καθ' ύψος σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1.
- Ασύμμετρο Στρεπτικώς Ευαίσθητο κτίριο (ΑΣΕ). Το συγκεκριμένο κτίριο αποτελείται από πλαίσια κατά τη διεύθυνση x και συνδυασμό πλαισίων και τοιχωμάτων κατά τη διεύθυνση y. Το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που παραλαμβάνουν τα τοιχώματα κατά τον άξονα y είναι 57%. Το κτίριο αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία των στρεπτικώς ευαίσθητων κτιρίων, καθώς η ακτίνα δυστρεψίας του $r_x=5.27$ είναι μικρότερη της ακτίνας αδράνειας $I_s=5.5$ των πλακών των ορόφων του σύμφωνα με το σχετικό κριτήριο του EN1998-1.

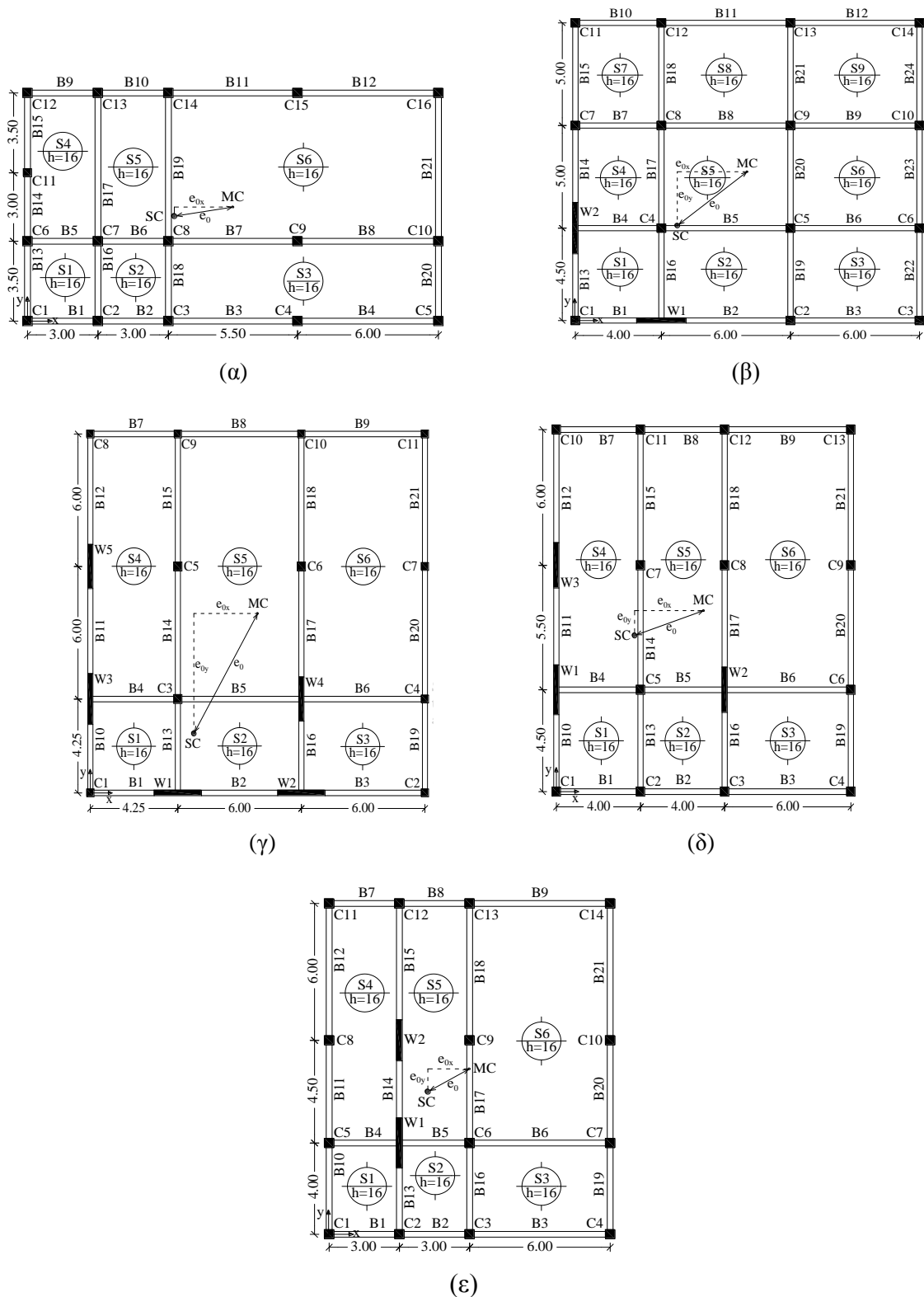
Όλα τα κτίρια που μελετώνται στην παρούσα έρευνα διαστασιολογήθηκαν με την παραδοχή ότι ανήκουν στην Μέση Κατηγορία Πλαστιμότητας (ΚΠΜ). Η προσομοίωση των ελαστικών χαρακτηριστικών και η διαστασιολόγηση των κτιρίων έγινε σύμφωνα με τις διατάξεις και τους συντελεστές ασφάλειας του EN1998-1, ενώ λήφθηκαν υπόψη και τα κατακόρυφα φορτία των φορέων. Οι δυσκαμψίες και δυστημσίες των δομικών στοιχείων θεωρήθηκαν ίσες με αυτές του σταδίου II (ρηγματωμένες διατομές), ενώ στις στάθμες των ορόφων θεωρήθηκε πλήρης διαφραγματική λειτουργία. Τα υποστυλώματα και τα τοιχώματα θεωρήθηκαν πλήρως πακτωμένα στο έδαφος. Τα πέντε κτίρια προσομοιώθηκαν και στη συνέχεια διαστασιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας την Δυναμική Φασματική Ανάλυση, όπως ορίζεται στον EN1998-1. Οι ιδιότητες των υλικών και τα φορτία που λήφθηκαν υπόψη κατά την προσομοίωση και τη διαστασιολόγηση των φορέων, καθώς και τα στοιχεία του φάσματος σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου οπλισμού των διατομών των δομικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των διατάξεων του EN1998-1 (2003) και EN1992-1-1 (2004). Η ανάλυση και η διαστασιολόγηση των φορέων έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης και διαστασιολόγησης κτιρίων Ο/Σ RA.F. (2012).

Για την προσομοίωση των ανελαστικών ιδιοτήτων των κρίσιμων διατομών του φορέα, οι θέσεις των οποίων ταυτίζονται με τα άκρα όλων των δοκών και στύλων, καθώς και με τις βάσεις των τοιχωμάτων, χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων (M-φ) Takeda (Otani, 1974). Επισημαίνεται ότι λήφθηκαν υπόψη μόνο καμπυλικού τύπου πλαστικές αρθρώσεις, δηλαδή θεωρήθηκε ότι καμιά διατομή δεν αστοχεί σε διάτμηση, κάτι που μπορεί να εξασφαλιστεί με τη διενέργεια ικανοτικού σχεδιασμού και με την τοποθέτηση κατάλληλου εγκάρσιου οπλισμού (πρόβλεψη που γενικώς ισχύει μόνο στα νεότερα κτίρια).

Πίνακας 1. Ιδιότητες υλικών και φορτία, καθώς και στοιχεία του φάσματος σχεδιασμού

Σκυρόδεμα	Χάλυβας	Φορτία πλακών	Φορτία τοιχοποιιών	Φάσμα Σχεδιασμού (EN1998-1)
C20/25 $E_c=3 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$	S500B $E_s=2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$	Μόνιμο: $G=1.0 \text{ kN/m}^2$	Περιμετρικές: 3.6 kN/m^2	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς PGA: $a_{gR}=0.24g$
$v=0.2$	$v=0.3$	Κινητό: $Q=2.0 \text{ kN/m}^2$	Εσωτερικές: 2.1 kN/m^2	Συντελεστής σπουδαιότητας: $\Pi \rightarrow \gamma_I=1$
$w=25 \text{ kN/m}^3$	$w=78.5 \text{ kN/m}^3$			Κατηγορία εδάφους: C



Σχ. 1: Κατόψεις τυπικών ορόφων των πέντε πολυώροφων κτιρίων Ο/Σ (MC: κέντρο μάζας, SC: ίχνος πλασματικού ελαστικού άξονα)

(α) ΑΣΠχγ, (β) ΑΔΣΠχγ, (γ) ΑΣΤχγ, (δ) ΑΣΠχΣΤγ, (ε) ΑΣΕ

Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι για την προσομοίωση των ανελαστικών χαρακτηριστικών των διατομών των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση διαξονικής

κάμψης-αξονικού φορτίου. Το εν λόγω φαινόμενο παίζει πρωτεύοντα ρόλο κατά τη μελέτη της ανελαστικής απόκρισης των διατομών των κατακόρυφων δομικών στοιχείων, καθώς τα χαρακτηριστικά της ανελαστικής τους συμπεριφοράς εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του αξονικού φορτίου. Συνεπώς, η ορθή προσομοίωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης είναι απαραίτητη για την εξαγωγή ρεαλιστικών συμπερασμάτων. Για τις ανάγκες των αναλύσεων της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη αλληλεπίδρασης που δίνεται στο πρόγραμμα Ruaukoko (Carr, 2004), με το οποίο διενεργήθηκαν οι ανελαστικές αναλύσεις.

Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων

Τα κτίρια που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω παράγραφο υποβλήθηκαν σε ανελαστικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας 100 σεισμικές διεγέρσεις τόσο μακρινού (far-fault) όσο και κοντινού (near-fault) πεδίου, οι οποίες περιγράφονται από ζεύγη επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος δύο ορθογωνίων, οριζοντίων αξόνων. Η επιλογή των σεισμικών καταγραφών έγινε με στόχο να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα σεισμικών χαρακτηριστικών, όπως είναι το γεωτεκτονικό περιβάλλον, ο μηχανισμός γένεσης των σεισμών, το μέγεθος Mercalli του σεισμού και η απόσταση του σημείου καταγραφής από το ρήγμα. Επισημαίνεται ότι οι σεισμικές καταγραφές που επιλέχτηκαν προέρχονται από ισχυρά σεισμικά γεγονότα που σημειώθηκαν σε διάφορες περιοχές του κόσμου, καταγραφές των οποίων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από πολλούς ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχτηκαν 100 σεισμικές διεγέρσεις που καταγράφηκαν σε έδαφος κατηγορίας C σύμφωνα με τη κατάταξη εδαφών του EN1998-1 (2003). Η επιλογή των διεγέρσεων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της ευρωπαϊκής βάσης σεισμικών καταγραφών (The European Strong - Motion Database, 2003), καθώς και της βάσης καταγραφών PEER (2003). Οι καταγραφές που επιλέχτηκαν προήλθαν από σεισμούς με ένταση (μέγεθος M_s) μεταξύ 5.5 και 7.8. Για τα χαρακτηριστικά των καταγραφών που επιλέχτηκαν ο αναγνώστης μπορεί να καταφύγει στην εργασία των Kostinakis et al. (2015). Ακολούθησε αναγωγή (scaling) των διεγέρσεων σε κοινό επίπεδο σεισμικής έντασης με τη χρήση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους, όπως ορίζει ο EN1998-1.

Διεξαγωγή αναλύσεων και μεγέθη απόκρισης

Τα κτίρια υποβλήθηκαν σε ανελαστικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας τις σεισμικές διεγέρσεις που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω παράγραφο. Επιπλέον, οι άξονες καταγραφής των σεισμικών διεγέρσεων στράφηκαν ως προς τους κατασκευαστικούς άξονες αναφοράς των κτιρίων από 0° έως 360° με βήμα 5° . Συνεπώς, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν συνολικά 36.000 (5 κτίρια x 100 σεισμικές καταγραφές x 72 γωνίες σεισμικής διέγερσης) ανελαστικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση. Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς έναντι σεισμού των πέντε κτιρίων που μελετήθηκαν υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη απόκρισης: Μέγιστη Σχετική Μετακίνηση Ορόφου (ΜΣΜΟ), Μέση Σχετική Μετακίνηση (ΜΣΜ) και Ολικός Δείκτης Βλάβης κατά Park & Ang (1985) (ΟΔΒ). Σημειώνεται ότι η επιλογή των συγκεκριμένων μεγεθών, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από πολλούς ερευνητές, έγινε γιατί αποτελούν παραμέτρους που εκφράζουν το σύνολο των βλαβών που εμφανίζονται στο κτίριο με μία μόνο τιμή.

Πιο συγκεκριμένα, για τη ΜΣΜΟ, η οποία θεωρείται κατάλληλο μέγεθος ποσοτικοποίησης της βλάβης που εμφανίζεται τόσο στα φέροντα όσο και στα μη φέροντα δομικά στοιχεία, υπολογίστηκε σε κάθε όροφο ο λόγος της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης οριζόντιας μετακίνησης της οροφής και της βάσης προς το ύψος του ορόφου. Στη συνέχεια, για κάθε κτίριο, λήφθηκε η μέγιστη από τις τιμές των ΜΣΜΟ που υπολογίστηκαν για τους πέντε ορόφους των τεσσάρων περιμετρικών πλαισίων.

Επισημαίνεται ότι για το χαρακτηρισμό της σοβαρότητας της συνολικής βλάβης του κτιρίου χρησιμοποιείται η κατηγοριοποίηση της ΜΣΜΟ που δίνεται στον πίνακα 2 (ESC, 1998). Για τον υπολογισμό της ΜΣΜ προσδιορίστηκε για κάθε περιμετρικό πλαίσιο ο λόγος της μέγιστης μετακίνησης οροφής προς το συνολικό ύψος του κτιρίου. Κατόπιν, για κάθε κτίριο, λήφθηκε η μέγιστη τιμή από τις τιμές των ΜΣΟ που υπολογίστηκαν για τα τέσσερα περιμετρικά πλαίσια.

Πίνακας 2. Τιμές της ΜΣΜΟ για την περιγραφή της σοβαρότητας της βλάβης

ΜΣΜΟ (%)	<0.25	0.25-0.50	0.50-1.00	>1.00
Περιγραφή βλάβης	Μηδενική	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη

Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, υπολογίστηκε ο δείκτης βλάβης κατά Park και Ang (1985), ο οποίος θεωρείται ως ένας από τους πλέον αξιόπιστους δείκτες και έχει ήδη χρησιμοποιηθεί με διάφορες μορφές σε πολλές εργασίες. Ο συγκεκριμένος δείκτης βλάβης υπολογίζεται σε κάθε κρίσιμη διατομή (άκρα γραμμικών δομικών στοιχείων και βάσεις τοιχωμάτων) και δίνεται από τη σχέση 1, η οποία είναι ενσωματωμένη στον κώδικα του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις ανελαστικές αναλύσεις (Ruaumoko).

$$T_{\Delta B} = \frac{\varphi_m - \varphi_y}{\varphi_u - \varphi_y} + \frac{\beta}{M_y \cdot \varphi_u} E_T \quad (1)$$

όπου: $T_{\Delta B}$ είναι ο τοπικός δείκτης βλάβης της διατομής, φ_m είναι η μέγιστη απαιτούμενη καμπυλότητα της διατομής, φ_y είναι η καμπυλότητα διαρροής της διατομής, φ_u είναι η μέγιστη διαθέσιμη καμπυλότητα της διατομής, M_y είναι η ροπή διαρροής, β είναι αδιάστατος συντελεστής, ο οποίος μπορεί να πάρει θετικές τιμές, E_T είναι η απορροφούμενη υστερητική ενέργεια της διατομής.

Έχοντας υπολογίσει τους τοπικούς δείκτες βλάβης των διατομών, προσδιορίστηκε ο Ολικός Δείκτης Βλάβης (ΟΔΒ) του κτιρίου με τη βοήθεια της σχέσης 2. Ο ολικός δείκτης βλάβης εκφράζει τη σοβαρότητα του συνόλου των βλαβών του κτιρίου, ενώ για το χαρακτηρισμό της σοβαρότητας της συνολικής βλάβης του κτιρίου χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των ερευνητών η κατηγοριοποίηση του πίνακα 3.

$$O_{\Delta B} = \sum_{i=1}^n T_{\Delta B_i} \cdot \left(E_{T_i} / \sum_{i=1}^n E_{T_i} \right) \quad (2)$$

όπου: ΟΔΒ είναι ο ολικός δείκτης βλάβης του κτιρίου, $T_{\Delta B_i}$ είναι ο δείκτης βλάβης της διατομής I , E_{T_i} είναι η απορροφούμενη υστερητική ενέργεια της διατομής I και n είναι ο συνολικός αριθμός των κρίσιμων διατομών του κτιρίου.

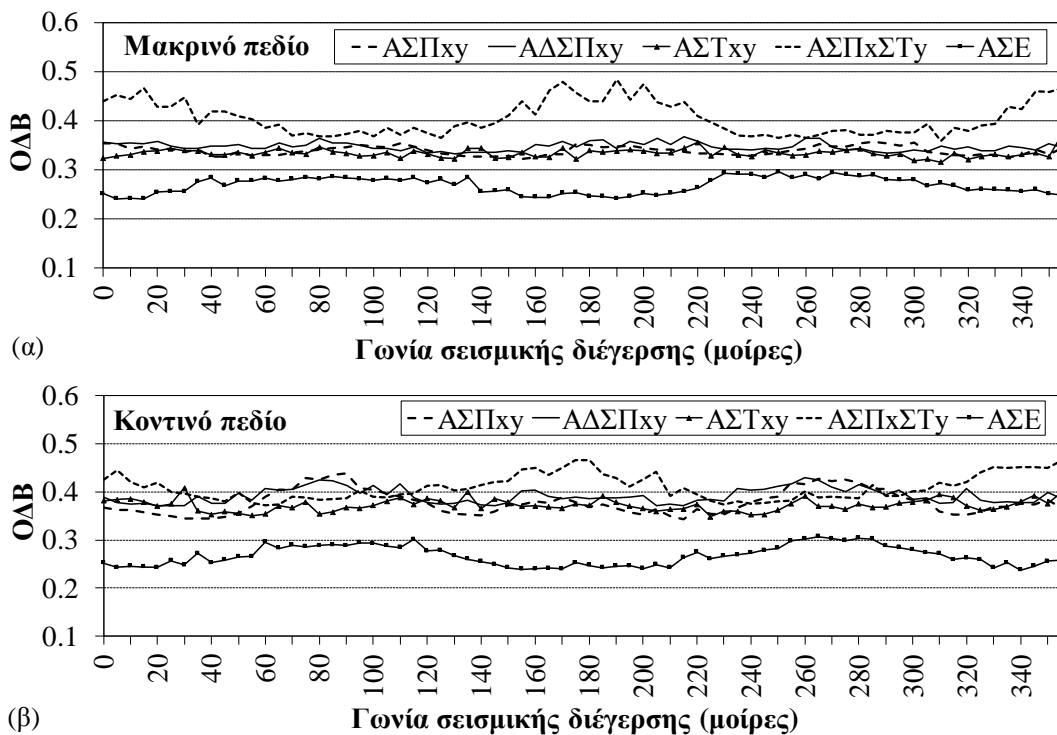
Πίνακας 3. Τιμές του Ολικού Δείκτη Βλάβης (ΟΔΒ) για την περιγραφή της σοβαρότητας της βλάβης

Τιμές του ΤΔΒ	Περιγραφή βλάβης
ΟΔΒ=0	Μηδενική βλάβη - ελαστική συμπεριφορά
0<ΟΔΒ≤0.1	Πολύ μικρή βλάβη – πιθανή εμφάνιση πολύ μικρών ρηγματώσεων
0.1<ΟΔΒ≤0.25	Μικρή βλάβη – εμφάνιση μικρών ρηγματώσεων
0.25<ΟΔΒ≤0.4	Μέτρια βλάβη – εμφάνιση μεγάλων ρηγματώσεων, τοπική αποφλοιώση σκυροδέματος
0.4<ΟΔΒ≤1	Μεγάλη βλάβη – αστοχία σκυροδέματος, αποκάλυψη οπλισμών
ΟΔΒ>1	Αστοχία διατομών - κατάρρευση

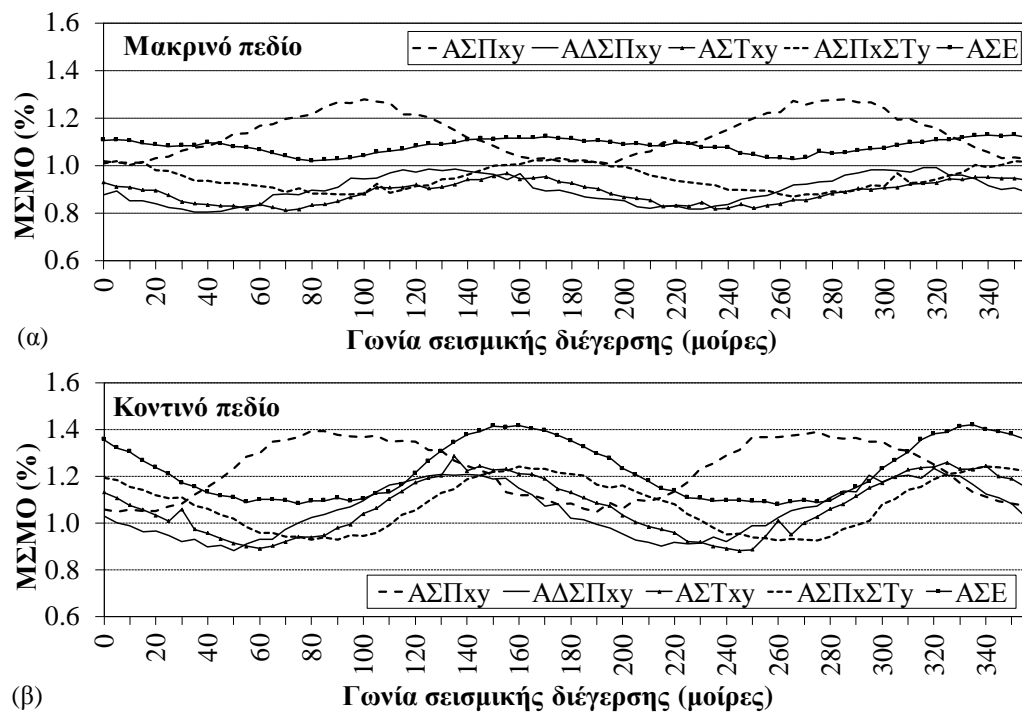
Αποτελέσματα

Για τις ανάγκες παρουσίασης των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των μεγεθών ΜΣΜΟ, ΜΣΜ και ΟΔΒ για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Η μεταβολή των παραπάνω μέσων όρων σε σχέση με τη γωνία διέγερσης απεικονίζεται στα σχήματα 2-4. Επισημαίνεται ότι παρουσιάζονται διαφορετικά σχήματα για τις διεγέρσεις κοντινού και μακρινού πεδίου.

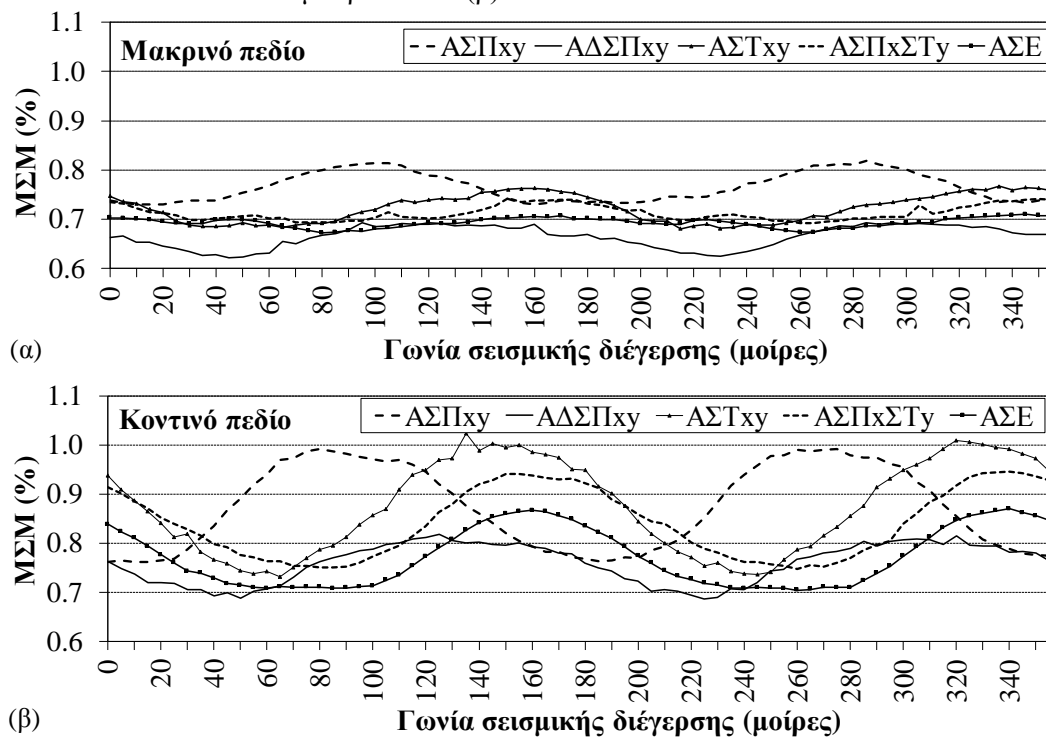
Από το σχήμα 2 φαίνεται καθαρά ότι, αναφορικά με τα κτίρια ΑΣΠxy, ΑΔΣΠxy και ΑΣΤxy, στην πλειοψηφία των γωνιών διέγερσης οι τιμές του ΟΔΒ είναι μεγαλύτερες όταν χρησιμοποιούνται σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνουμε ότι η χρήση διεγέρσεων μακρινού πεδίου οδήγησε σε μέτρια βλάβη ($0.25 < \text{ΟΔΒ} < 0.4$, πίνακας 3) για όλες τις γωνίες διέγερσης (σχήμα 2α), ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται διεγέρσεις κοντινού πεδίου υπάρχουν συγκεκριμένες γωνίες διέγερσης για τις οποίες προέκυψε μεγάλη βλάβη ($\text{ΟΔΒ} > 0.4$) για κάποια από τα κτίρια που μελετώνται. Επίσης, από το σχήμα 2 φαίνεται ότι τα κτίρια ΑΣΠxΣΤy και ΑΣΕ υπέστησαν τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη βλάβη αντιστοίχως (στην περίπτωση των διεγέρσεων μακρινού πεδίου η μέση τιμή του ΟΔΒ κυμαίνεται μεταξύ 0.36 και 0.48 για το ΑΣΠxΣΤy και μεταξύ 0.24 και 0.30 για το ΑΣΕ, ενώ στην περίπτωση των διεγέρσεων κοντινού πεδίου η μέση τιμή του ΟΔΒ κυμαίνεται μεταξύ 0.37 και 0.47 για το ΑΣΠxΣΤy και μεταξύ 0.24 και 0.31 για το ΑΣΕ). Επισημαίνεται ότι το γεγονός ότι το στρεπτικώς ευαίσθητο κτίριο υπέστη την μικρότερη βλάβη οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς που επιβάλλεται από τον EN1998-1 για το συγκεκριμένο κτίριο είναι μικρότερη συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές για τα υπόλοιπα τέσσερα κτίρια.



Σχ. 2: Μέσες τιμές του ΟΔΒ σε συνάρτηση με τη γωνία διέγερσης για τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.



Σχ. 3: Μέσες τιμές του ΜΣΜΟ σε συνάρτηση με τη γωνία διέγερσης για τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.



Σχ. 4: Μέσες τιμές του ΜΣΜ σε συνάρτηση με τη γωνία διέγερσης για τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.

Στην περίπτωση που για την εκτίμηση της βλάβης υιοθετείται η ΜΣΜΟ, διαπιστώνουμε ότι, για την πλειοψηφία των γωνιών διέγερσης, τα κτίρια ΑΔΣΠxy ΑΣΤxy και ΑΣΠxΣΤy υφίστανται μέτρια βλάβη ($0.5\% < \text{ΜΣΜΟ} < 1.0\%$, πίνακας 2) όταν χρησιμοποιούνται διεγέρσεις μακρινού πεδίου (σχήμα 3α). Η βλάβη είναι πιο σημαντική στην περίπτωση χρήσης διεγέρσεων κοντινού πεδίου. Αντιθέτως,

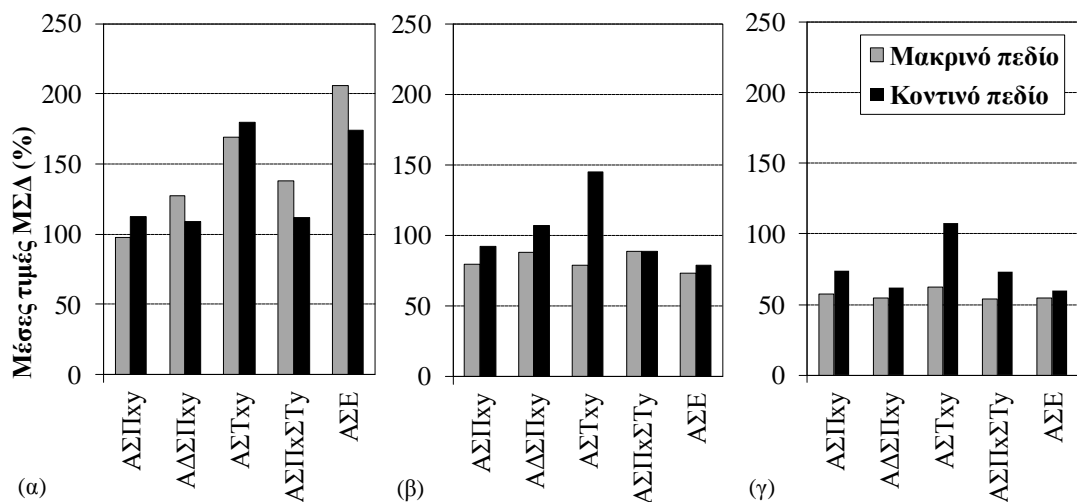
αναφορικά με τα κτίρια ΑΣΠχγ και ΑΣΕ, η βλάβη που προέκυψε ήταν σημαντική ($MΣΜΟ > 1.0\%$) για όλες τις γωνίες διέγερσης ανεξάρτητα από την απόσταση του ρήγματος από το σημείο καταγραφής της διέγερσης. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα αποτελέσματα της αποτίμησης των κτιρίων έναντι σεισμού εξαρτώνται από την επιλογή του μεγέθους που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της βλάβης. Οι διαφορές που προκύπτουν από τη χρήση του ΟΔΒ και της ΜΣΜΟ οφείλονται στο γεγονός ότι τα εν λόγω μεγέθη προσπαθούν να ποσοτικοποιήσουν ένα πολύ σύνθετο φαινόμενο με διαφορετικό τρόπο: ο ΟΔΒ στηρίζεται στις τοπικές βλάβες των διατομών των δομικών στοιχείων, ενώ η ΜΣΜΟ στηρίζεται στις μετακινήσεις ορόφων. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι το διάστημα μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές της ΜΣΜΟ είναι μεγαλύτερο για της διεγέρσεις κοντινού πεδίου, κάτι που φανερώνει ότι στην περίπτωση αυτή η επίδραση της γωνίας διέγερσης είναι μεγαλύτερη.

Από το σχήμα 4 προκύπτει ότι τα γενικά συμπεράσματα που παρουσιάστηκαν για την περίπτωση που η ΜΣΜΟ χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των βλαβών ισχύουν και στην περίπτωση υιοθέτησης της ΜΣΜ. Ωστόσο, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει σαφές συμπέρασμα σχετικά με το κτίριο που υπέστη τη μεγαλύτερη βλάβη, εφόσον τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τη γωνία της διέγερσης.

Η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της γωνίας διέγερσης στη σεισμική απόκριση των κτιρίων που μελετώνται πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μεγέθους ΜΣΔ (Μέγιστη Σχετική Διακύμανση) που υπολογίστηκε ως εξής:

$$MΣΔ_{MA} = \frac{\max MA - \min MA}{\min MA} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

όπου $\max MA$ και $\min MA$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του εκάστοτε Μεγέθους Απόκρισης (MA) για όλες τις γωνίες διέγερσης.



Σχ. 5: Μέσες τιμές της ΜΣΔ (%) για όλες τις σεισμικές καταγραφές. (α) ΟΔΒ, (β) ΜΣΜΟ, (γ) ΜΣΜ

Στο σχήμα 5 απεικονίζονται οι μέσες τιμές της ΜΣΔ (%) για όλες τις σεισμικές καταγραφές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για τις διεγέρσεις κοντινού και μακρινού πεδίου και για τα τρία μεγέθη απόκρισης που χρησιμοποιήθηκαν.

Από το σχήμα 5α προκύπτει ότι η μέση τιμή της $MΣΔ_{ΟΔΒ}$ λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 109% (κτίρια ΑΔΣΠχγ και ΑΣΠχΣΤγ) και 180% (κτίριο ΑΣΤχγ) όταν χρησιμοποιήθηκαν διεγέρσεις

κοντινού πεδίου. Στην περίπτωση των διεγέρσεων μακρινού πεδίου, οι τιμές της $M\Delta_{O\Delta B}$ κυμαίνονται μεταξύ 98% (κτίριο ΑΣΠχγ) και 206% (κτίριο ΑΣΕ). Παρατηρώντας αυτές τις τιμές της $M\Delta_{O\Delta B}$ συμπεραίνουμε ότι η σεισμική απόκριση και βλάβη των κτιρίων εξαρτάται σημαντικά από τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης. Ο βαθμός στον οποίο η γωνία της διέγερσης επηρεάζει τα αποτελέσματα εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κτιρίου και από την απόσταση του ρήγματος από το σημείο καταγραφής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των κτιρίων ΑΔΣΠχγ, ΑΣΠχΣΤγ και ΑΣΕ, οι τιμές της $M\Delta_{O\Delta B}$ είναι μεγαλύτερες για τις διεγέρσεις μακρινού πεδίου. Το αντίθετο συμπέρασμα προκύπτει για τα κτίρια ΑΣΠχγ και ΑΣΤχγ. Μια σύγκριση μεταξύ των πέντε διαφορετικών κτιρίων που μελετώνται οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη επίδραση της γωνίας διέγερσης προκύπτει για τα κτίρια ΑΣΤχγ και ΑΣΕ τόσο για της καταγραφές μακρινού όσο και κοντινού πεδίου.

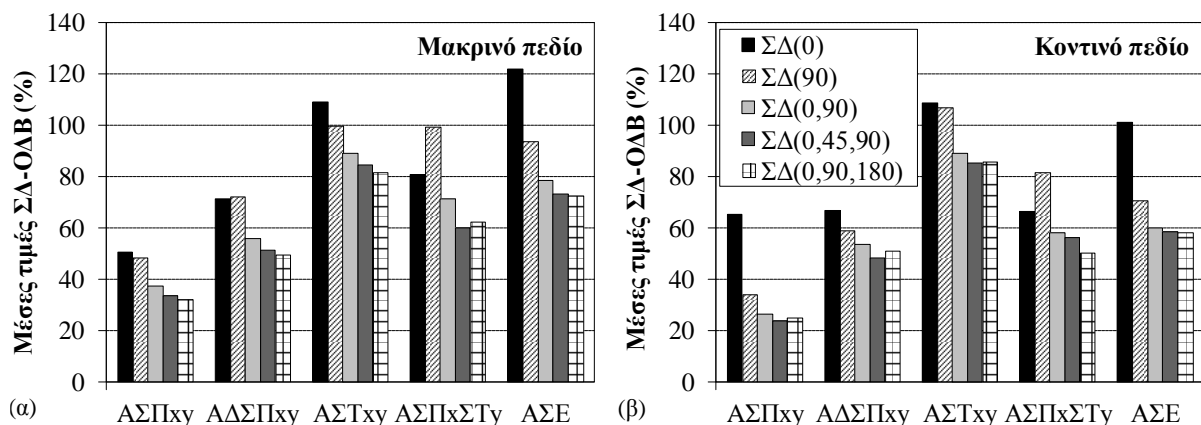
Αναφορικά με την $M\Delta_{M\Delta M\Delta O}$, από το σχήμα 5β γίνεται φανερό ότι λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 79% (κτίριο ΑΣΕ) και 145% (κτίριο ΑΣΤχγ) για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 73% (κτίριο ΑΣΕ) και 89% (κτίριο ΑΣΠχΣΤγ) για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της $M\Delta_{M\Delta M\Delta O}$ είναι μεγαλύτερες για τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου, κάτι που συμφωνεί με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σχήμα 3, όπως προαναφέρθηκε. Συγκρίνοντας τα πέντε διαφορετικά κτίρια, διαπιστώνουμε ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν διεγέρσεις κοντινού πεδίου η επίδραση της γωνίας διέγερσης ήταν ισχυρότερη για το κτίριο ΑΣΤχγ. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση χρήσης διεγέρσεων μακρινού πεδίου, δεν προέκυψε κάποιο γενικό συμπέρασμα. Από τη σύγκριση των σχημάτων 5β και 5γ προκύπτει ότι οι τιμές της $M\Delta_{M\Delta M\Delta O}$ ακολουθούν τις ίδιες τάσεις με αυτές των τιμών $M\Delta_{M\Delta M\Delta O}$. Η $M\Delta_{M\Delta M\Delta O}$ λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 60% (κτίριο ΑΣΕ) και 108% (κτίριο ΑΣΤχγ) για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 54% (κτίριο ΑΣΠχΣΤγ) και 62% (κτίριο ΑΣΤχγ) για τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων είναι ότι η επίδραση της γωνίας διέγερσης είναι ισχυρότερη όταν χρησιμοποιείται ως μέγεθος απόκρισης ο $O\Delta B$, ενώ η μικρότερη επίδραση προκύπτει στην περίπτωση της $M\Delta M$. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι, όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα της αποτίμησης των κτιρίων έναντι σεισμού εξαρτώνται από την επιλογή του μεγέθους που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της βλάβης. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της βλάβης είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Παρά το γεγονός ότι η σεισμική απόκριση και βλάβη των κτιρίων O/Σ επηρεάζεται σημαντικά από τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης, δεν υπάρχει σαφής συγκεκριμένη διάταξη αναφορικά με αυτό το θέμα στα σύγχρονα κείμενα των αντισεισμικών κανονισμών. Ως αποτέλεσμα, η κοινή πρακτική που εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η εφαρμογή των οριζόντιων επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος των κατασκευαστικών αξόνων του κτιρίου (γωνία διέγερσης 0° ή 90°). Η εν λόγω πρακτική μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση του επιπέδου των βλαβών. Στη συνέχεια, ορίζεται το μέγεθος της Σχετικής Διακύμανσης ($\Sigma\Delta$) με στόχο την ποσοτικοποίηση της αναμενόμενης υποεκτίμησης στη σεισμική βλάβη. Το συγκεκριμένο μέγεθος ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \Sigma\Delta_0 &= \frac{\max MA - MA_0}{MA_0} \cdot 100 (\%), & \Sigma\Delta_{90} &= \frac{\max MA - MA_{90}}{MA_{90}} \cdot 100 (\%) \\ \Sigma\Delta_{0,90} &= \frac{\max MA - MA_{0,90}}{MA_{0,90}} \cdot 100 (\%) \\ \Sigma\Delta_{0,45,90} &= \frac{\max MA - MA_{0,45,90}}{MA_{0,45,90}} \cdot 100 (\%), & \Sigma\Delta_{0,90,180} &= \frac{\max MA - MA_{0,90,180}}{MA_{0,90,180}} \cdot 100 (\%) \end{aligned} \quad (4)$$

όπου $\max MA$: η μέγιστη τιμή του εκάστοτε μεγέθους απόκρισης (ΟΔΒ, ΜΣΜΟ, ΜΣΜ) για όλες τις γωνίες διέγερσης, MA_0 : η τιμή του μεγέθους απόκρισης για γωνία διέγερσης $\theta=0^\circ$, MA_{90} : η τιμή του μεγέθους απόκρισης για γωνία διέγερσης $\theta=90^\circ$, $MA_{0,90}$: η μέγιστη τιμή του μεγέθους απόκρισης για γωνίες διέγερσης $\theta=0^\circ$ και $\theta=90^\circ$, $MA_{0,45,90}$: η μέγιστη τιμή του μεγέθους απόκρισης για γωνίες διέγερσης $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$ και $\theta=90^\circ$, $MA_{0,90,180}$: η μέγιστη τιμή του μεγέθους απόκρισης για γωνίες διέγερσης $\theta=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ και $\theta=180^\circ$.



Σχ. 6: Μέσες τιμές της ΣΔ (%) στην περίπτωση του ΟΔΒ για όλες τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.

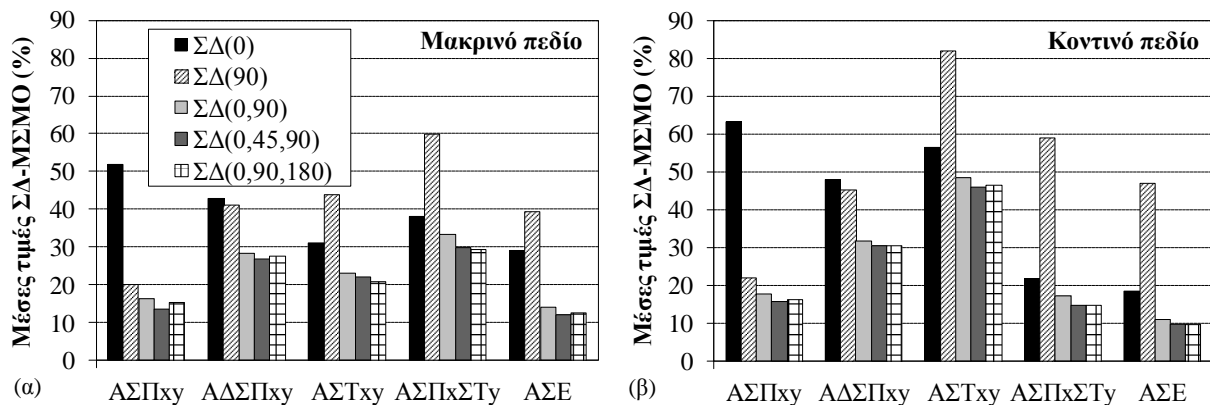
Τα σχήματα 6-8 απεικονίζουν τις μέσες τιμές της ΣΔ για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για τα τρία μεγέθη απόκρισης, καθώς και για τα πέντε κτίρια που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Από το σχήμα 6 προκύπτει ότι οι $\Sigma\Delta_0$ και $\Sigma\Delta_{90}$ μπορεί να λάβουν ιδιαίτως μεγάλες τιμές. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της $\Sigma\Delta_0$ κυμαίνονται μεταξύ 65% και 109% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 51% και 122% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Ομοίως, οι τιμές της $\Sigma\Delta_{90}$ κυμαίνονται μεταξύ 34% και 107% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 48% και 100% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Συνεπώς, η εφαρμογή των σεισμικών διεγέρσεων κατά μήκος των κατασκευαστικών αξόνων (άξονες x και y, σχήμα 1) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της γωνίας διέγερσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης. Ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από το σχήμα 6 είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η υποεκτίμηση είναι μικρότερη για τις καταγραφές κοντινού πεδίου. Συγκρίνοντας τα πέντε διαφορετικά κτίρια, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές της ΣΔ είναι μικρότερες για τα κτίρια ΑΣΠxy και ΑΔΣΠxy.

Επιπλέον, φαίνεται ότι τα μεγέθη $\Sigma\Delta_0$ και $\Sigma\Delta_{90}$ λαμβάνουν διαφορετικές τιμές, κάτι που σημαίνει ότι στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο μια γωνία διέγερσης, η επιλογή της εν λόγω γωνίας είναι πολύ σημαντική, καθώς η περιστροφή της διέγερσης κατά 90° μπορεί να διαφοροποιήσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί λαμβάνοντας υπόψη

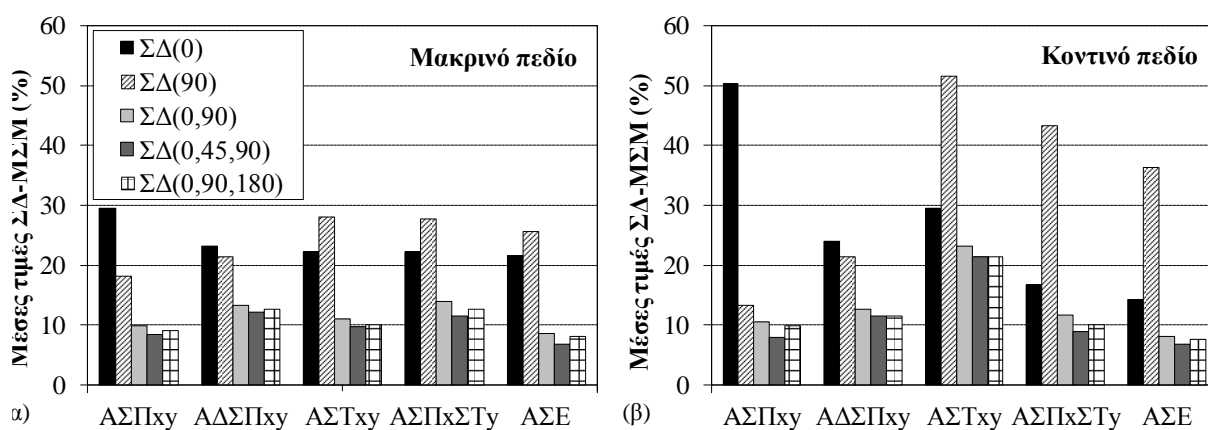
και τις δύο γωνίες 0° και 90° . Σ' αυτή την περίπτωση, η υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης περιορίζεται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, από το σχήμα 6 προκύπτει ότι οι τιμές της $\Sigma\Delta_{0,90}$ κυμαίνονται μεταξύ 26% και 89% για τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου και μεταξύ 37% και 89% για τις διεγέρσεις μακρινού πεδίου. Ο βαθμός μείωσης της τιμής της $\Sigma\Delta$ όταν λαμβάνονται υπόψη τόσο η γωνία 0° όσο και η γωνία 90° εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κτιρίου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το κτίριο ΑΣΠxy υποβάλλεται σε διεγέρσεις κοντινού πεδίου (σχήμα 6β), η μέση τιμή της $\Sigma\Delta$ μειώνεται από 65% (εφαρμογή των διεγέρσεων για γωνία 0°) σε 26% (εφαρμογή των διεγέρσεων για γωνίες 0° και 90°). Οι αντίστοιχες τιμές για το κτίριο ΑΔΣΠxy είναι 67% (εφαρμογή των διεγέρσεων για γωνία 0°) και 54% (εφαρμογή των διεγέρσεων για γωνίες 0° και 90°).

Η υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης μειώνεται περαιτέρω αν ληφθεί υπόψη, πέραν των γωνιών 0° και 90° , η γωνία των 45° . Για τα περισσότερα κτίρια οι μέσες τιμές της $\Sigma\Delta_{0,45,90}$ για τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου είναι μικρότερες (κυμαίνονται μεταξύ 24% και 85%) από τις αντίστοιχες τιμές για τις διεγέρσεις μακρινού πεδίου (κυμαίνονται μεταξύ 33% και 85%). Όσον αφορά στη $\Sigma\Delta_{0,90,180}$, από το σχήμα 6 προκύπτει ότι λαμβάνει τιμές πολύ παρόμοιες με αυτές που λαμβάνει η $\Sigma\Delta_{0,90}$. Συνεπώς, στην περίπτωση που θέλουμε να μειώσουμε περαιτέρω την υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης χρησιμοποιώντας μόνο μια γωνία διέγερσης επιπλέον των 0° και 90° , είναι αποτελεσματικότερο να επιλέξουμε τη γωνία των 45° παρά αυτή των 180° .



Σχ. 7: Μέσες τιμές της $\Sigma\Delta$ (%) στην περίπτωση της ΜΣΜΟ για όλες τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.

Αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω αναφορικά με τη χρήση του ΟΔΒ ως μέγεθος απόκρισης, προκύπτουν και στην περίπτωση που για την ποσοτικοποίηση της σεισμικής βλάβης χρησιμοποιηθεί η ΜΣΜΟ ή η ΜΣΜ (σχήματα 7 και 8). Δηλαδή, διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μία μόνο γωνία της διέγερσης παρατηρείται υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης. Ωστόσο, η υποεκτίμηση αυτή είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει όταν χρησιμοποιείται ο ΟΔΒ. Συγκρίνοντας τις τιμές της $\Sigma\Delta$ για την ΜΣΜΟ και τη ΜΣΜ, προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της ΜΣΜΟ. Επίσης, διαπιστώνουμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, η υποεκτίμηση των μεγεθών ΜΣΜΟ και ΜΣΜ είναι μεγαλύτερη για τις καταγραφές κοντινού πεδίου.



Σχ. 8: Μέσες τιμές της ΣΔ (%) στην περίπτωση της ΜΣΜ για όλες τις καταγραφές (α) μακρινού και (β) κοντινού πεδίου.

Αναφορικά με τη ΜΣΜΟ, οι τιμές της $\Sigma\Delta_0$ κυμαίνονται μεταξύ 18% και 63% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 29% και 52% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Ομοίως, οι τιμές της $\Sigma\Delta_{90}$ κυμαίνονται μεταξύ 22% και 82% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 20% και 60% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Όσον αφορά στη ΜΣΜ, οι τιμές της $\Sigma\Delta_0$ κυμαίνονται μεταξύ 14% και 50% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 22% και 30% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου. Ομοίως, οι τιμές της $\Sigma\Delta_{90}$ κυμαίνονται μεταξύ 13% και 52% για τις καταγραφές κοντινού πεδίου και μεταξύ 18% και 28% για τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Επίσης, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις κτιρίων (π.χ. κτίριο ΑΣΠxy υπό διεγέρσεις μακρινού πεδίου και κτίρια ΑΣΠxy, ΑΣΤxy, ΑΣΠxΣΤy και ΑΣΕ υπό διεγέρσεις κοντινού πεδίου) για τις οποίες τα μεγέθη $\Sigma\Delta_0$ και $\Sigma\Delta_{90}$ λαμβάνουν εντελώς διαφορετικές τιμές. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη και τις δυο γωνίες 0° και 90° η υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης περιορίζεται σημαντικά. Στην περίπτωση της ΜΣΜΟ, οι τιμές της $\Sigma\Delta_{0,90}$ κυμαίνονται μεταξύ 18% και 49% για τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου και μεταξύ 14% και 33% για τις διεγέρσεις μακρινού πεδίου, ενώ στην περίπτωση της ΜΣΜ, οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 8% και 23% για τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου και μεταξύ 9% και 14% για τις διεγέρσεις μακρινού πεδίου. Επιπλέον, η υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης μειώνεται περαιτέρω αν ληφθεί υπόψη, πέραν των γωνιών 0° και 90° , η γωνία των 45° . Όσον αφορά στη $\Sigma\Delta_{0,90,180}$, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι λαμβάνει τιμές πολύ παρόμοιες με αυτές που λαμβάνει η $\Sigma\Delta_{0,90}$.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση του προσανατολισμού της σεισμικής δράσης στη βλάβη πολυώροφων κτιρίων Ο/Σ με διάφορα δομικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πέντε ασύμμετρα κτίρια Ο/Σ μέσου ύψους, τα οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν με τη βοήθεια του EN1992-1-1 και του EN1998-1. Τα κτίρια υποβλήθηκαν σε ανελαστικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας 100 σεισμικές διεγέρσεις τόσο μακρινού (far-fault) όσο και κοντινού (near-fault) πεδίου, οι οποίες περιγράφονται από ζεύγη επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος δύο ορθογωνίων, οριζοντίων αξόνων. Επιπλέον, οι άξονες καταγραφής των σεισμικών διεγέρσεων στράφηκαν ως προς τους κατασκευαστικούς άξονες αναφοράς των κτιρίων από 0° έως 360° με βήμα 5° . Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς έναντι σεισμού των πέντε κτιρίων που μελετήθηκαν υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη απόκρισης: Μέγιστη Σχετική Μετακίνηση Ορόφου (ΜΣΜΟ), Μέση Σχετική Μετακίνηση (ΜΣΜ) και Ολικός Δείκτης Βλάβης κατά Park & Ang (ΟΔΒ).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία εκτίμησης της σεισμικής βλάβης, καθώς, όπως έδειξαν οι αναλύσεις, η επίδρασή της στην ανελαστική απόκριση των κτιρίων μπορεί να είναι πολύ σημαντική και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δομικού συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της γωνίας διέγερσης στη σεισμική βλάβη είναι ισχυρότερη όταν χρησιμοποιούνται καταγραφές κοντινού πεδίου, καθώς και όταν η αποτίμηση της σεισμικής βλάβης πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ΟΔΒ.
- Η κοινή πρακτική εφαρμογής των επιταχυνσιογραφημάτων κατά μήκος των κατασκευαστικών αξόνων των κτιρίων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης. Πιο συγκεκριμένα, η μέση υποεκτίμηση της βλάβης για τους σεισμούς που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία μπορεί να φτάσει τις τιμές 122%, 82% και 52% όταν για την εκτίμησή της χρησιμοποιείται ο ΟΔΒ, η ΜΣΜΟ και η ΜΣΜ αντιστοίχως.
- Όταν για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης λαμβάνεται υπόψη μόνο μια διεύθυνση της διέγερσης, η επιλογή της συγκεκριμένης διεύθυνσης είναι ιδιαίτερος κρίσιμος, καθώς επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αποδείχτηκε ότι λαμβάνοντας υπόψη τρεις μόνο διευθύνσεις σεισμικής διέγερσης, τις γωνίες των 0°, 45° και 90°, η υποεκτίμηση της σεισμικής βλάβης μπορεί να περιοριστεί σημαντικά χωρίς ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος.

Βιβλιογραφία

- ASCE/SEI 41-06 (2008), "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings". American Society of Civil Engineers, ASCE.
- Carr, A. J. (2004), "Ruaumoko – A program for inelastic time-history analysis: Program manual", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- CEN (2003), "Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", (EN1998-1), European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004), "Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings", (EN1992-1-1), European Committee for Standardization, Brussels.
- ESC (1998), Working Group Macroseismic Scales, "European macroseismic scale of 1998", GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany.
- FEMA-356 (2000), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Fontara, I-KM, Kostinakis, K. G, Manoukas, G. E. and Athanatopoulou, A. M. (2015) "Parameters affecting the seismic response of buildings under bi-directional excitation", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 53, No. 5, pp. 957-979.
- Kostinakis, K., Athanatopoulou, A. and Avramidis, I. (2013), "Evaluation of inelastic response of 3D single-story R/C frames under bi-directional excitation using different orientation schemes", *Bull Earthq Eng.* Vol. 11, pp. 637-661.
- Kostinakis, K., Morfidis, K. and Xenidis, H. (2015), "Damage response of multistorey r/c buildings with different structural systems subjected to seismic motion of arbitrary orientation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 44, pp. 1919-1937.
- Nguyen, V. T. and Kim, D. (2013), "Influence of incident angles of earthquakes on inelastic responses of asymmetric-plan structures", *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 45, No. 3, pp. 373-389.
- NZS 1170.5 (2004), "Structural design actions, Part 5: Earthquake actions – New Zealand, Code and Supplement", Standards New Zealand, Wellington, New Zealand.
- Otani, A. (1974), "Inelastic Analysis of RC frame structures", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, No. 7, pp. 1433–1449.
- Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER). (2003), Strong Motion Database. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>

- Park, Y. J. and Ang, A. H. S. (1985), "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced-Concrete", *Journal of Structural Engineering-ASCE*, Vol. 111, No. 4, pp. 722–739.
- Rigato, A. and Medina, R. (2007), "Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions", *Engineering Structures*. Vol. 29, pp. 2593–2601.
- The European Strong-Motion Database. (2003), http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm
- TOL-Engineering Software House. (2012) "RAF Version 3.3: Structural Analysis and Design Software", Iraklion, Crete, Greece.