

Επιρροή του στόχου σχεδιασμού στο συνολικό κόστος κτιρίων Ο/Σ – Εξέταση εναλλακτικών σεισμικών σεναρίων

Γρηγόριος Μανούκας

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, grman7@otenet.gr

Εισαγωγή

Σύμφωνα με τη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την επίδοση ή την επιτελεσματικότητα (Performance Based Design), ο ιδιοκτήτης, σε συνεργασία με το μελετητή ενός υπό κατασκευή κτιρίου, θα πρέπει να καθορίσει το στόχο (ή τους στόχους) σχεδιασμού, δηλαδή ένα προκαθορισμένο επίπεδο σεισμικής επίδοσης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο σφοδρότητας σεισμικής διέγερσης. Η υιοθέτηση ενός χαμηλού στόχου σχεδιασμού, που οδηγεί και σε αντιστοίχως χαμηλή αντοχή σχεδιασμού, μειώνει το κόστος κατασκευής και περιορίζει τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων συμβάλλοντας στην καλύτερη αισθητική και λειτουργικότητα των κτιρίων. Την ίδια ώρα όμως, τα καθιστά εύαλτα αν κατά τη διάρκεια ζωής τους πληγούν από ένα σφοδρό σεισμό ανάλογο του σεισμού σχεδιασμού. Στην περίπτωση αυτή αναμένονται σοβαρές βλάβες τόσο στα φέροντα, όσο και στα μη φέροντα δομικά στοιχεία, πράγμα που συνεπάγεται και την ανάλογη οικονομική επιβάρυνση (κόστος επισκευών, διατάραξη ομαλής λειτουργίας κλπ.). Μικρότερης έκτασης βλάβες είναι πιθανό να εμφανιστούν ακόμα και σε πιο ασθενείς σεισμούς που μπορεί να πλήξουν ένα κτίριο αρκετές φορές κατά τη διάρκεια ζωής του. Επιπλέον, σε πολύ ισχυρούς σεισμούς που υπερβαίνουν το σεισμό σχεδιασμού, υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν μη επιδιορθώσιμες βλάβες, χωρίς να μπορεί να αποκλειστεί ακόμα και το ενδεχόμενο κατάρρευσης. Έτσι, πέρα από τις βαριές οικονομικές επιπτώσεις, τίθεται εν αμφιβόλω και η στοιχειώδης κοινωνική απαίτηση για προστασία της ανθρώπινης ζωής. Από την άλλη, η υιοθέτηση ενός υψηλότερου στόχου σχεδιασμού αυξάνει το κόστος κατασκευής, ελαχιστοποιεί όμως τις πιθανές οικονομικές απώλειες εξαιτίας μελλοντικών σεισμών. Κατά συνέπεια, δεν είναι σαφές ποιος στόχος σχεδιασμού είναι πιο οικονομικός σε μακροπρόθεσμη βάση. Δεδομένου ότι ο υπολογισμός του κόστους κατασκευής ενός κτιρίου είναι κατά το μάλλον ή ήττον εύκολος και ακριβής, η δυσκολία στην απάντηση του παραπάνω ερωτήματος έγκειται στην αξιόπιστη εκτίμηση των οικονομικών απωλειών που μπορεί να υποστεί ένα κτίριο σε συγκεκριμένα σεισμικά γεγονότα – σεσνάρια ή και στο σύνολο των σεισμικών διεγέρσεων που ενδεχομένως θα υποστεί κατά τη διάρκεια ζωής του.

Το ζήτημα αυτό έχει απασχολήσει εκτενώς τη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν προταθεί πολλές σχετικές μεθοδολογίες, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες (Aslani and Miranda 2005). Η πρώτη κατηγορία ("regional procedures") περιλαμβάνει μεθοδολογίες που στοχεύουν στον προσδιορισμό των οικονομικών απωλειών σε σύνολα κτιρίων εντός μιας λιγότερο ή περισσότερο ευρείας περιοχής (π.χ. Rossetto and Elnashai 2003, Dolce et al. 2006, Δημητρακόπουλος και Κάππος 2008). Η δεύτερη κατηγορία ("building-specific procedures") περιλαμβάνει μεθοδολογίες που επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα κτίρια και συσχετίζουν τις οικονομικές απώλειες με παραμέτρους της απόκρισης (γωνιακές παραμορφώσεις και επιταχύνσεις ορόφων, διάφορους δείκτες βλάβης κ.α.) που προσδιορίζονται συνήθως με μη γραμμική στατική ή δυναμική ανάλυση (π.χ. Lagaros et al. 2006, Ramirez et al. 2012, Liu et al. 2004). Οι μεθοδολογίες της πρώτης κατηγορίας είναι χρήσιμες κυρίως

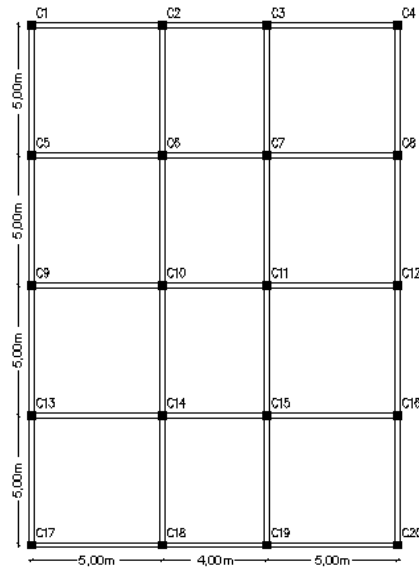
σε φορείς της πολιτείας που εκπονούν σχέδια αντιμετώπισης των σεισμών, ενώ της δεύτερης μπορούν να βοηθήσουν ιδιοκτήτες και μελετητές στην επιλογή του στόχου σχεδιασμού ενός κτιρίου.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής του επιπέδου της αντοχής σχεδιασμού στο συνολικό κόστος (κόστος κατασκευής + σεισμικές απώλειες) κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε εναλλακτικά σεισμικά σενάρια, με εφαρμογή μιας απλής μεθοδολογίας που ανήκει στη δεύτερη από τις παραπάνω κατηγορίες. Για το σκοπό αυτό γίνεται καταρχάς ανάλυση και διαστασιολόγηση μιας σειράς πλαισιακού τύπου κτιρίων σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, για δύο επίπεδα σεισμικής διέγερσης που αντιστοιχούν στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας I και II της ελληνικής επικράτειας. Κάθε κτίριο διαστασιολογείται για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q , ουσιαστικά δηλαδή για τρία διαφορετικά επίπεδα αντοχής σχεδιασμού. Συνολικά, μελετώνται 6 κτιριακά προσομοιώματα (3 τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς \times 2 ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας). Με βάση τις απαιτούμενες ποσότητες των υλικών και στατιστικά στοιχεία κόστους που συλλέχθηκαν από κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν στη Θεσσαλονίκη τα τελευταία χρόνια, υπολογίζεται καταρχάς το κόστος κατασκευής μόνο του φέροντα οργανισμού κάθε κτιρίου και στη συνέχεια γίνεται αναγωγή στο ολικό κόστος κατασκευής. Επιπλέον, τα 6 κτίρια αναλύονται με μη γραμμική δυναμική ανάλυση για 4 τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που κλιμακώνονται με τη βοήθεια κατάλληλων τροποποιητικών συντελεστών έτσι, ώστε η μέγιστη εδαφική επιτάχυνσή τους να ανταποκρίνεται σε τρία εναλλακτικά σεισμικά σενάρια (Α, Β και Γ) που αντιστοιχούν σε πιθανότητες υπέρβασης 50%, 10% και 2% σε 50 έτη. Τα μεγέθη απόκρισης των κτιρίων - και συγκεκριμένα οι γωνιακές παραμορφώσεις των ορόφων - συσχετίζονται με τα αναμενόμενα επίπεδα βλάβης και τις αντίστοιχες οικονομικές απώλειες μέσω σχέσεων που είναι διαθέσιμες στη διεθνή βιβλιογραφία. Τελικά, για κάθε κτίριο και για κάθε σενάριο υπολογίζονται οι οικονομικές απώλειες (εκπεφρασμένες ως ποσοστό του ολικού κόστους κατασκευής) λαμβάνοντας υπόψη το κόστος επισκευής των ζημιών, τις απώλειες περιεχομένων, το κόστος μετεγκατάστασης και το κόστος ενοικίων για το διάστημα που αναμένεται να παραμείνει κάθε κτίριο εκτός λειτουργίας. Τέλος, το συνολικό κόστος κάθε κτιρίου για κάθε σεισμικό σενάριο υπολογίζεται ως άθροισμα του ολικού κόστους κατασκευής και των οικονομικών απωλειών και κανονικοποιείται ως προς το συνολικό κόστος του κτιρίου που σχεδιάστηκε με $q = q_{\max}$.

Ανάλυση και διαστασιολόγηση κτιρίων

Στην παρούσα εργασία αναλύονται και διαστασιολογούνται σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 2 και 8 μια σειρά από συνήθη τριώροφα πλαισιακού τύπου κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με την κάτοψη που δίνεται στο Σχήμα 1. Όλα τα κτίρια είναι κανονικά καθ' ύψος και έχουν ύψος ορόφου σταθερό και ίσο με 3m. Για την ανάλυση και διαστασιολόγησή τους εφαρμόζεται η Δυναμική Φασματική Μέθοδος του Ευρωκώδικα 8 (Modal Response Spectrum Analysis method) λαμβάνοντας υπόψη τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q , ουσιαστικά δηλαδή καθορίζονται τρία διαφορετικά επίπεδα αντοχής σχεδιασμού ή ισοδύναμα τρεις εναλλακτικοί στόχοι σχεδιασμού. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται οι τιμές q_{\max} , $q_{\max}/2$ και 1, όπου q_{\max} η μέγιστη τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς που προδιαγράφεται στον Ευρωκώδικα 8 (Πίνακας 1). Επισημαίνεται ότι ανεξαρτήτως της τιμής του q , η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση τις απαιτήσεις για υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας, ενώ εφαρμόζονται και οι αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού. Η ανάλυση γίνεται για δύο επίπεδα σεισμικής διέγερσης που αντιστοιχούν στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας I και II της

ελληνικής επικράτειας Συνολικά, μελετώνται 6 κτιριακά προσομοιώματα (3 τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς x 2 ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας).



Σχ. 1 Κάτοψη κτιρίου

Πίνακας 1 Τιμές συντελεστή συμπεριφοράς q

$q=1$	$q=q_{\max}/2$	$q=q_{\max}$
1	2.93	5.85

Η ανάλυση και διαστασιολόγηση των κτιρίων διεξάγεται με τη βοήθεια επαγγελματικού προγράμματος που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη. Το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας C20/25 και ο χάλυβας B500C σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές. Οι πλάκες έχουν πάχος 15 cm και πέραν του ίδιου βάρους τους θεωρείται ότι φέρουν μόνιμο και κινητό φορτίο ίσο με 1.5 kN/m^2 και 2 kN/m^2 αντίστοιχα. Οι αρχικά επιλεγείσες διατομές των δοκών είναι $20 \times 50 \text{ cm}$ και φέρουν μόνιμο φορτίο μπατικής (οι περιμετρικές) ή δρομικής (οι εσωτερικές) τοιχοποιίας ίσο με 9 kN/m ή 5.25 kN/m αντίστοιχα. Τα υποστυλώματα είναι τετραγωνικής διατομής με αρχική διάσταση πλευράς 30 cm. Κάθε φορά που καταγράφεται ανεπάρκεια μιας διατομής μία ή και οι δύο διαστάσεις της αυξάνονται διαδοχικά με βήμα 5 cm.

Οι επιλεγείσες αρχικές διαστάσεις αντιστοιχούν στις ελάχιστες διαστάσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πράξη. Είναι προφανές ότι ορισμένα δομικά στοιχεία θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των κανονισμών και με μικρότερες διαστάσεις, πράγμα που σημαίνει ότι τα κτίρια, ιδιαίτερα όσα σχεδιάζονται για το χαμηλότερο στόχο σχεδιασμού ($q=q_{\max}$), διαθέτουν κάποια υπεραντοχή. Κατά συνέπεια, το κόστος κατασκευής αυτών των κτιρίων υπερεκτιμάται σε σχέση με ένα ιδεατό κτίριο με διαστάσεις διατομών όσο το δυνατόν μικρότερες. Ωστόσο, δεδομένου ότι στόχος της εργασίας είναι να συγκρίνει το κόστος κτιρίων που σχεδιάζονται με υψηλούς στόχους σχεδιασμού με το κόστος συνήθων κτιρίων που σχεδόν πάντα σχεδιάζονται για $q=q_{\max}$ και προφανώς διαθέτουν σημαντική υπεραντοχή, θεωρήθηκε ότι η υιοθέτηση μικρότερων αρχικών διαστάσεων των δομικών στοιχείων δεν θα ήταν αντιπροσωπευτική της τρέχουσας κατασκευαστικής πρακτικής και ως εκ τούτου δεν θα επέτρεπε την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

Όλα τα κτίρια αναλύονται με μη γραμμική δυναμική ανάλυση για τέσσερα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που αναπτύχθηκαν από το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και θεωρούνται αντιπροσωπευτικά της σεισμικής επικινδυνότητας του ελληνικού χώρου, καθώς το φάσμα απόκρισής τους ταυτίζεται σχεδόν με το φάσμα σχεδιασμού του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού για κατηγορία εδάφους Β. Κάθε επιταχυνσιογράφημα κλιμακώνεται με έξι διαφορετικούς τροποποιητικούς συντελεστές, έτσι ώστε να προκύψουν οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που δίνονται στον Πίνακα 2. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται από γνωστές σχέσεις της βιβλιογραφίας (Theodoulidis and Papazachos 1992, Koliopoulos et al. 1998) και αντιστοιχούν σε πιθανότητες υπέρβασης 50%, 10% και 2% σε 50 έτη για τις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας Ι και ΙΙ. Κατ' αυτό τον τρόπο διαμορφώνονται τρία σεισμικά σενάρια (Α, Β, Γ) για καθένα από τα οποία γίνεται ξεχωριστή ανάλυση και υπολογισμός των οικονομικών απωλειών κάθε κτιρίου.

Πίνακας 2 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση για κάθε σεισμικό σενάριο

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Σεισμικό σενάριο (πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη)		
	Α (50%)	Β (10%)	Γ (2%)
I	0.10g	0.16g	0.25g
II	0.15g	0.24g	0.37g

Η μη γραμμική δυναμική ανάλυση διεξάγεται με το πρόγραμμα SAP2000. Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Η διατμητική αστοχία αποκλείεται.
- Η ανελαστική συμπεριφορά περιορίζεται στις κρίσιμες περιοχές των δομικών στοιχείων, δηλαδή στα άκρα δοκών και υποστρωμάτων (πλαστικές αρθρώσεις).
- Η προσομοίωση των πλαστικών αρθρώσεων γίνεται με τη βοήθεια ελαστοπλαστικών διαγραμμάτων ροπών - στροφών σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8.
- Η αλληλεπίδραση ροπών - αξονικών δυνάμεων λαμβάνεται υπόψη μέσω καμπυλών αλληλεπίδρασης που διαθέτει το πρόγραμμα SAP2000.
- Η απόσβεση (τύπου Rayleigh) λαμβάνεται υπόψη θεωρώντας ποσοστό απόσβεσης 5% για την 1^η και την 4^η ιδιομορφή κάθε κτιρίου.
- Είναι αυτονόητο ότι και τα κτίρια που σχεδιάστηκαν για $q=1$ μπορούν να αναπτύξουν ανελαστική συμπεριφορά.

Η ανάλυση γίνεται με εφαρμογή του αλγορίθμου Newmark, ενώ για τη χωρική επαλληλία χρησιμοποιείται ο κανόνας των ποσοστιαίων συνδυασμών. Ειδικότερα, κάθε επιταχυνσιογράφημα επιβάλλεται στα κτίρια ταυτόχρονα σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις X και Y σύμφωνα με τους εξής 8 συνδυασμούς: $X+0.3Y$, $X-0.3Y$, $-X+0.3Y$, $-X-0.3Y$, $0.3X+Y$, $0.3X-Y$, $-0.3X+Y$ και $-0.3X-Y$. Σαν αποτέλεσμα, ο συνολικός αριθμός των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων που διεξάγονται είναι 576 (6 κτίρια x 3 σεισμικά σενάρια x 4 επιταχυνσιογραφήματα x 8 συνδυασμούς).

Χάριν απλοποίησης, οι οικονομικές απώλειες συσχετίζονται αποκλειστικά και μόνο με τη γωνιακή παραμόρφωση των ορόφων, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική των βλαβών τουλάχιστον των

φερόντων δομικών στοιχείων και των τοιχοποιιών πλήρωσης. Άλλες παράμετροι, για παράδειγμα η μέγιστη επιτάχυνση των ορόφων που θεωρείται κρίσιμη για τις απώλειες περιεχομένων (οικοσκευής, εξοπλισμού κλπ.) και τις βλάβες ορισμένων μη φερόντων στοιχείων (π.χ. ψευδοροφών), δεν ελήφθησαν υπόψη. Η επιλογή αυτή είναι όχι σπάνια στη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Lagaros et al. 2006) και εδράζεται στο γεγονός ότι για τη μεγάλη πλειοψηφία των κτιρίων (συνήθεις κατοικίες, γραφεία κλπ.) οι απώλειες περιεχομένου και οι βλάβες ευαίσθητων στην επιτάχυνση δομικών στοιχείων αποτελούν μικρό ποσοστό των συνολικών οικονομικών απωλειών.

Ειδικότερα, για κάθε κτίριο και για κάθε σεισμικό σενάριο υπολογίζεται μια αντιπροσωπευτική μέση τιμή της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης των ορόφων, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Από τα αποτελέσματα της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης αντλούνται για κάθε περίπτωση οι μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις D_{ix} και D_{iy} για κάθε πλαίσιο i σε όλους τους ορόφους για τις διευθύνσεις X και Y αντίστοιχα.
- Για κάθε όροφο j και για κάθε διεύθυνση (X ή Y) υπολογίζονται οι μέσες τιμές των γωνιακών παραμορφώσεων των πλαισίων D_{jx} και D_{jy} . Όταν το D_{jx} ή το D_{jy} ενός έστω ορόφου σε μία έστω περίπτωση ανάλυσης υπερβαίνει το όριο που δίνεται στην επόμενη παράγραφο (30‰), θεωρείται ότι το κτίριο καταρρέει στο συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο. Έτσι, τα παρακάτω βήματα παραλείπονται.
- Για κάθε κτίριο k και για κάθε διεύθυνση (X ή Y) υπολογίζονται οι μέσες τιμές των γωνιακών παραμορφώσεων όλων των ορόφων D_{kx} και D_{ky} αντίστοιχα. Έτσι, λαμβάνονται 16 τιμές για κάθε επιταχυνσιογράφημα (2 διευθύνσεις \times 8 συνδυασμοί) από τις οποίες λαμβάνεται η μέγιστη τιμή D_{kmax} .
- Τέλος, υπολογίζεται η μέση τιμή των D_{kmax} για τα τέσσερα επιταχυνσιογραφήματα που λαμβάνονται υπόψη.

Οι αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές των μέγιστων γωνιακών παραμορφώσεων ορόφων δίνονται στον Πίνακα 3, όπου κάθε κτίριο συμβολίζεται με έναν αλφαριθμητικό χαρακτήρα, το πρώτο μέρος του οποίου αντιστοιχεί στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και το δεύτερο στην τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κτίρια που σχεδιάστηκαν για $q=q_{max}$ ή $q=q_{max}/2$ στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II προκύπτει ότι καταρρέουν υπό το σεισμικό σενάριο Γ.

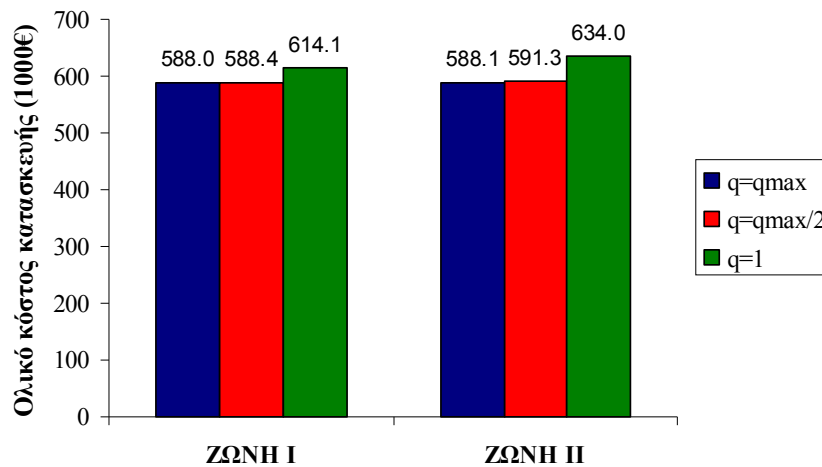
Πίνακας 3 Μέσες τιμές της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου (‰)

Κτίριο	Σεισμικό σενάριο		
	A	B	Γ
I- q_{max}	2.21	2.88	7.88
I- $q_{max}/2$	2.13	2.85	5.76
I-1	1.25	2.00	3.10
II- q_{max}	2.71	6.96	Κατάρρευση
II- $q_{max}/2$	2.70	5.24	Κατάρρευση
II-1	1.22	1.96	3.02

Υπολογισμός συνολικού κόστους

Το κόστος κατασκευής των κτιρίων υπολογίστηκε ήδη σε προηγούμενη εργασία (Manoukas and Athanatoroulou 2014) χρησιμοποιώντας στατιστικά στοιχεία από κτίρια που κατασκευάστηκαν τα

τελευταία χρόνια στη Θεσσαλονίκη. Ως πρώτο βήμα, υπολογίστηκε το κόστος κατασκευής μόνο του φέροντα οργανισμού κάθε κτιρίου με βάση τις απαιτούμενες ποσότητες των υλικών, θεωρώντας ότι το κόστος του σκυροδέματος ανέρχεται σε 150.3 €/m^3 και του χάλυβα σε 875.25 €/t . Οι τιμές αυτές συμπεριλαμβάνουν το κόστος προμήθειας των υλικών, καθώς και τις αμοιβές και τις ασφαλιστικές εισφορές των εργαζομένων. Στη συνέχεια, με την παραδοχή ότι το κόστος κατασκευής για $q = q_{\max}$ στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I ανέρχεται στα 700 €/m^2 , υπολογίζεται και το ολικό κόστος κατασκευής (Σχ. 2). Όπως φαίνεται, η επιβάρυνση που προκύπτει από την υιοθέτηση της τιμής $q = q_{\max}/2$ έναντι της συνήθους στην πράξη $q = q_{\max}$ είναι αμελητέα, ενώ για $q = 1$ η επιβάρυνση δεν ξεπερνά το 8% στη δυσμενέστερη περίπτωση.



Σχ. 2 Ολικό κόστος κατασκευής κτιρίων

Οι οικονομικές απώλειες λόγω σεισμού συμπεριλαμβάνουν το κόστος επισκευής των βλαβών στα φέροντα και μη δομικά στοιχεία, απώλειες περιεχομένων, κόστος ενοικίων και μετεγκατάστασης γενικές απώλειες εισοδήματος, τραυματισμούς και απώλειες ανθρωπίνων ζωών. Οι γενικές απώλειες εισοδήματος είναι σημαντικές κυρίως για ειδικά κτίρια (εμπορικά, βιομηχανικά κλπ.) και δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία. Επιπροσθέτως, αγνοείται και το κόστος από τραυματισμούς και απώλειες ανθρωπίνων ζωών, καθώς - πέραν του ηθικού ζητήματος που ανακύπτει - οι υφιστάμενες μεθοδολογίες για την ποσοτικοποίησή του σε χρηματικούς όρους είναι τουλάχιστον αμφιλεγόμενες.

Το κόστος επισκευής φερόντων και μη δομικών στοιχείων εκφράζεται ως ποσοστό του ολικού κόστους κατασκευής. Το ποσοστό αυτό συνδέεται με τη μέση τιμή της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης κάθε κτιρίου σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 4 (για ενδιάμεσες τιμές διεξάγεται γραμμική παρεμβολή). Οι τιμές του πίνακα ελήφθησαν από τη διεθνή βιβλιογραφία (Lagaros et al. 2006, Ghobarah 2004, FEMA 1992).

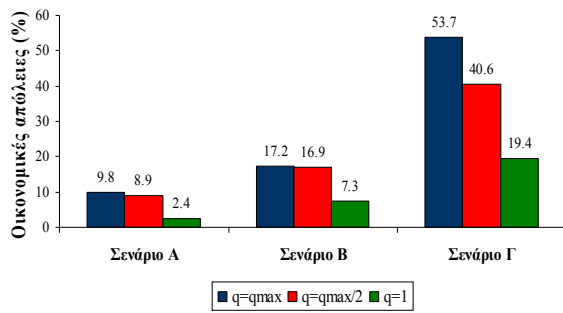
Σε ότι αφορά στις απώλειες περιεχομένου, θεωρείται καταρχάς ότι η συνολική αξία των περιεχομένων ανέρχεται σε 250 €/m^2 . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε κτίρια κατοικίας στην Ελλάδα και είναι παρόμοια με τις τιμές που υιοθετήθηκαν από άλλους ερευνητές (Lagaros et al. 2006, Δημητρακόπουλος και Κάππος 2008). Οι απώλειες περιεχομένου υπολογίζονται βάσει της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου, κάνοντας χρήση του ίδιου ποσοστού που λαμβάνεται από τον Πίνακα 4.

Τέλος, το κόστος ενοικίων εξαρτάται από το χρονικό διάστημα μετά το σεισμό κατά το οποίο το κτίριο παραμένει εκτός λειτουργίας. Γενικά, ο ακριβής προσδιορισμός του παραπάνω χρονικού διαστήματος είναι ιδιαίτερα δυσχερής, καθώς - όπως διαπιστώνεται από στατιστικά στοιχεία πρόσφατων σεισμών - εξαρτάται όχι μόνο από το επίπεδο βλάβης ενός κτιρίου, αλλά και από άλλους οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες (Comerio and Blecher 2010). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι το χρονικό διάστημα για την πλήρη ανακατασκευή ενός καταρρευσαντος κτιρίου είναι 18 μήνες. Το χρονικό διάστημα σε μήνες για το οποίο κάθε κτίριο παραμένει εκτός λειτουργίας προκύπτει πολλαπλασιάζοντας και πάλι το ποσοστό του Πίνακα 4 επί 18. Στη συνέχεια το κόστος ενοικίων υπολογίζεται στη βάση της εύλογης παραδοχής ότι το ενοίκιο ενός συνήθους κτιρίου κατοικίας ανέρχεται σε 4 €/m² το μήνα. Η τιμή αυτή προσαυξάνεται κατά 25% για να ληφθεί υπόψη και το κόστος μετεγκατάστασης.

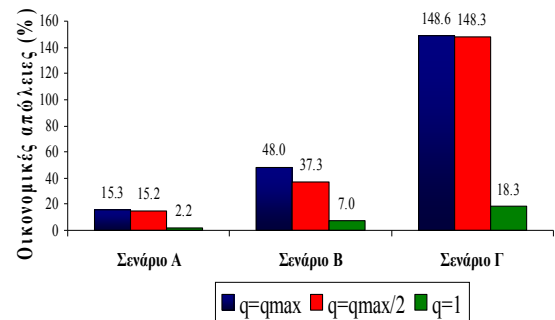
Πίνακας 4 Συσχέτιση της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου με το κόστος επισκευής

Κόστος επισκευής (% του κόστους κατασκευής)	Γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (%)
0	0
0.5	1
5	2
20	4
45	10
80	18
100	30

Τελικά, για κάθε κτίριο και για κάθε σενάριο υπολογίζονται οι οικονομικές απώλειες (εκπεφρασμένες ως ποσοστό του ολικού κόστους κατασκευής) λαμβάνοντας υπόψη το κόστος επισκευής των ζημιών, τις απώλειες περιεχομένου, το κόστος μετεγκατάστασης και το κόστος ενοικίων για το διάστημα που αναμένεται να παραμείνει κάθε κτίριο εκτός λειτουργίας (Σχ. 3 - 4). Όπως φαίνεται, οι οικονομικές απώλειες ως ποσοστό του ολικού κόστους κατασκευής κυμαίνονται μεταξύ 2.2% και 15.3% για το σεισμικό σενάριο Α, μεταξύ 7.0% και 48.0% για το σεισμικό σενάριο Β και μεταξύ 18.3% και 148.6% για το σεισμικό σενάριο Γ. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν προκύπτει αξιόλογη διαφορά μεταξύ των κτιρίων που σχεδιάστηκαν για $q = q_{max}$ και εκείνων που σχεδιάστηκαν για $q = q_{max}/2$. Ωστόσο, ο σχεδιασμός για $q = 1$, δηλαδή για ελαστική συμπεριφορά υπό το σεισμό σχεδιασμού, οδηγεί σε δραστικό περιορισμό των απωλειών, οι οποίες μάλιστα για κάθε σεισμικό σενάριο είναι περίπου σταθερές ανεξαρτήτως της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας. Αντίθετα, τα κτίρια που σχεδιάστηκαν για χαμηλότερους στόχους σχεδιασμού εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες απώλειες στη ζώνη II έναντι της ζώνης I, πράγμα που σημαίνει ότι η υιοθέτηση του ίδιου συντελεστή συμπεριφοράς ανεξαρτήτως ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση του επιπέδου αντισεισμικής ασφάλειας από ζώνη σε ζώνη. Το συμπέρασμα αυτό είναι σύμφωνο με ευρήματα προηγούμενων ερευνών (π.χ. Thuat 2014) και καταδεικνύει ότι οι κανονιστικές διατάξεις για τον καθορισμό του συντελεστή συμπεριφοράς ενδεχομένως θα έπρεπε να αναθεωρηθούν.

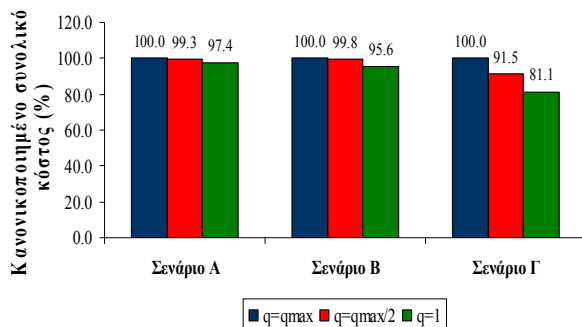


Σχ. 3 Οικονομικές απώλειες λόγω σεισμού (% του κόστους κατασκευής) για τη ζώνη Ι

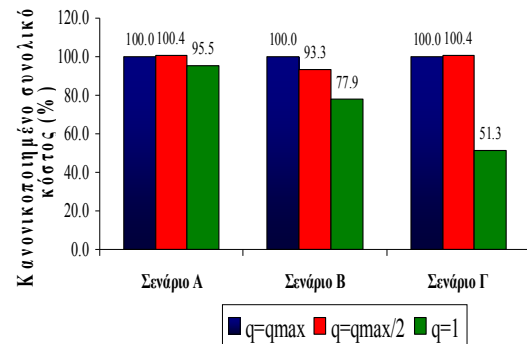


Σχ. 4 Οικονομικές απώλειες λόγω σεισμού (% του κόστους κατασκευής) για τη ζώνη ΙΙ

Το συνολικό κόστος κάθε κτιρίου υπολογίζεται ως άθροισμα του ολικού κόστους κατασκευής και των οικονομικών απωλειών και κανονικοποιείται ως προς το συνολικό κόστος του κτιρίου που σχεδιάστηκε με $q = q_{max}$ για κάθε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (Σχ. 5 - 6). Όπως φαίνεται, οι τρεις εναλλακτικοί σχεδιασμοί είναι περίπου ισοδύναμοι από οικονομική άποψη για το σεισμικό σενάριο Α, καθώς και για το σεισμικό σενάριο Β στη ζώνη Ι. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις όμως, είναι σαφής η υπεροχή του σχεδιασμού για $q = 1$, δηλαδή για ελαστική συμπεριφορά υπό το σεισμό σχεδιασμού, καθώς οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους που μπορεί να αγγίξει το 50%.



Σχ. 5 Κανονικοποιημένο συνολικό κόστος για τη ζώνη Ι



Σχ. 6 Κανονικοποιημένο συνολικό κόστος για τη ζώνη ΙΙ

Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της επιρροής του στόχου σχεδιασμού στο συνολικό κόστος κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε διάφορες σεισμικές διεγέρσεις. Για το σκοπό αυτό διαστασιολογήθηκαν μια σειρά από πλαισιακού τύπου τριώροφα κτίρια για τρεις εναλλακτικούς στόχους σχεδιασμού και για δύο επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας και υπολογίστηκε το κόστος κατασκευής τους. Στη συνέχεια τα κτίρια αναλύθηκαν με μη γραμμική δυναμική ανάλυση για τρία διαφορετικά σεισμικά σενάρια και υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες σεισμικές απώλειες, καθώς και το συνολικό τους κόστος (κόστος κατασκευής + σεισμικές απώλειες). Τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται από την όλη έρευνα είναι τα εξής:

- Η αύξηση του κόστους κατασκευής που προκύπτει από την υιοθέτηση της τιμής $q = q_{max}/2$ έναντι της $q = q_{max}$ είναι πρακτικά αμελητέα, λόγω της υπεραντοχής που κατά κανόνα

διαθέτουν τα συμβατικά κτίρια (δηλαδή τα κτίρια που σχεδιάζονται κατά τη συνήθη πρακτική για $q = q_{\max}$).

- Το πρόσθετο κόστος κατασκευής που προκύπτει από το σχεδιασμό για ελαστική συμπεριφορά υπό το σεισμό σχεδιασμού ($q = 1$) δεν είναι απαγορευτικό.
- Οι σεισμικές απώλειες των συμβατικά σχεδιασμένων κτιρίων (δηλαδή για $q = q_{\max}$) είναι πολύ υψηλότερες στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II έναντι της ζώνης I. Προκειμένου να επιτευχθεί ένα ενιαίο επίπεδο ασφάλειας ανεξαρτήτως ζώνης, ίσως θα έπρεπε να εξεταστεί η αναθεώρηση των κανονιστικών διατάξεων που αφορούν στον καθορισμό της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς.
- Στην περίπτωση σεισμικών διεγέρσεων μέτριας έντασης (σενάριο Α) το συνολικό κόστος των κτιρίων ουσιαστικά δεν εξαρτάται από το στόχο σχεδιασμού. Ωστόσο για διεγέρσεις ανάλογες του σεισμού σχεδιασμού (σενάριο Β) και - πολύ περισσότερο - για διεγέρσεις που υπερβαίνουν το σεισμό σχεδιασμού (σενάριο Γ) ο σχεδιασμός για ελαστική συμπεριφορά ($q = 1$) μπορεί να οδηγήσει σε δραματική μείωση των σεισμικών απωλειών και σε αντίστοιχη μείωση του συνολικού κόστους των κτιρίων.

Συμπερασματικά, τα ευρήματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν ότι ο σχεδιασμός για ελαστική συμπεριφορά υπό το σεισμό σχεδιασμού, με ταυτόχρονη εξασφάλιση υψηλής πλαστιμότητας και τήρηση των αρχών του ικανοτικού σχεδιασμού, μπορεί να αποτελέσει την πιο ασφαλή και ταυτόχρονα την πιο οικονομική μακροπρόθεσμα επιλογή. Ωστόσο, η γενίκευση του συμπεράσματος αυτού απαιτεί τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας που θα περιλαμβάνει μεγαλύτερη ποικιλία κτιρίων και επιπροσθέτως συνεκτίμηση διάφορων τεχνικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων.

Βιβλιογραφία

- Aslani, H. and Miranda, E. (2005), "Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings", *Technical Report No. 157*, Stanford CA: John A. Blume Earthquake Engineering Center.
- CEN (2004), "Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1)", Brussels.
- CEN (2004), "Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1)", Brussels.
- Comerio, M. C. and Blecher H. E. (2010), "Estimating downtime from data on residential buildings after the Northridge and Loma Prieta earthquakes", *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 4, pp. 951-965.
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G. and Vona, M. (2006), "Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek Methodologies", *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 357-371.
- Δημητρακόπουλος, Η. και Κάππος, Α. (2008), "Προσδιορισμός Βέλτιστης Στάθμης Προσεισμικής Ενίσχυσης με Κριτήριο το Κόστος 'Συμβατικού' Κύκλου Ζωής", *Πρακτικά 3^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, Νοέμβριος 2008, Άρθρο 2014.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1992), "A Benefit–Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA 227, Federal Emergency Management Agency - Building Seismic Safety Council, Washington DC.

- Ghobarah, A. (2004) "On drift limits associated with different damage levels", *Proceedings of International Workshop on Performance-Based Seismic Design: Concepts and Implementation*, Bled, Slovenia, pp. 321-332.
- Koliopoulos, P. K., Margaris, B. N. and Klimis, N. S. (1998), "Duration and energy characteristics of Greek seismic motion records", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 2(3), pp. 391-417.
- Lagaros, N., Fotis, A. and Krikos, S. (2006), "Assessment of seismic design procedures based on the total cost", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 1381-1401.
- Liu, M., Wen, Y. K. and Burns, S. A. (2004), "Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1407–1421.
- Manoukas, G. and Athanatopoulou, A. (2014), "Full and Partial Seismic Protection: Influence of Design Objective on Construction Cost of Buildings", *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, August 2014, Paper No 983.
- Ramirez, C. M., Liel, A. B., Mitrani-Reiser, J., Haselton, C. B., Spear, A. D., Steiner, J., Deierlein, G. G. and Miranda, E. (2012), "Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41, pp. 1455-1475.
- Rossetto, T. and Elnashai, A. (2003), "Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data", *Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 1241-1263.
- Theodoulidis, N. P. and Papazachos, B. S. (1992), "Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11(7), pp. 387-402.
- Thuat, D. V. (2014), "Strength reduction factor demands for building structures under different seismic levels", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 23, pp. 42–53.