

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Αθανάσιος Παπαγεωργίου

Πολιτικός Μηχανικός

KANTIA ATE

Ηράκλειο Κρήτης, Ελλάδα

e-mail: apapag@central.ntua.gr

Μιχάλης Φραγκιαδάκης

Λέκτορας, Πολιτικός Μηχανικός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail : mfrag@mail.ntua.gr

Δημήτριος Βαμβάτσικος

Λέκτορας, Πολιτικός Μηχανικός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail : divamva@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη του κατασκευαστικού τομέα τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε στην εκπόνηση κανονισμών που διέπουν τη μελέτη των κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού με τρόπο που διασφαλίζει την ασφάλεια των χρηστών. Παρά τις εξελίξεις αυτές, ζητήματα που άπτονται του πραγματικού κόστους των κατασκευών λαμβάνοντας υπόψιν και το ενδεχόμενο κόστος αποκατάστασης ζημιών λόγω μελλοντικών σεισμών δεν προσμετρώνται στο σχεδιασμό. Επιπλέον, και με δεδομένη την απαίτηση της ελαχιστοποίησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών, είναι αναγκαία η μελέτη του κόστους των κατασκευών σε επίπεδο κύκλου ζωής, συμπεριλαμβάνοντας το κόστος ανέγερσης, το εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης ζημιών λόγω μελλοντικών σεισμών, το κόστος λόγω κατανάλωσης ενέργειας κατά την λειτουργία του κτιρίου και εν τέλει το κόστος κατεδάφισης αφού το κτίριο ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του. Η παρούσα εργασία αφορά την διερεύνηση του κόστους κύκλου ζωής για πολυώροφες μεταλλικές κατασκευές, αξιοποιώντας αποτελέσματα από μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις ώστε να γίνει εκτίμηση του κόστους επισκευής σεισμικών βλαβών κατά FEMA P-58, και να συνδυαστεί με το ενεργειακό κόστος κατά ANSI/ASHRAE 140.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιωσιμότητα ως χαρακτηριστικό της ανάπτυξης αναφέρεται σε περιπτώσεις που η ανθρώπινη δραστηριότητα δεν επικεντρώνεται μόνο στην κάλυψη των τρεχουσών αναγκών αλλά επεκτείνεται και στην πρόβλεψη των αναγκών των επερχόμενων γενιών και στην επίδραση που θα έχει σε αυτές μία κατασκευή. Για τον κατασκευαστικό τομέα, ως έννοια είναι αρκετά πρόσφατη και ένας τρόπος για να οριστεί και να ποσοτικοποιηθεί είναι η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής των κατασκευών. Ως τέτοια ορίζεται η ανάλυση του πλήρους κόστους μιας κατασκευής συμπεριλαμβάνοντας όχι μόνο την ανέγερση αλλά και τη χρήση της, την επισκευή των ενδεχόμενων ζημιών και εν τέλει την κατεδάφισή της, λαμβάνοντας υπόψη τα άμεσα και έμμεσα κόστη που προκύπτουν σε κάθε φάση. Οι κύριες κατηγορίες στις οποίες μπορεί να αναλυθεί το κόστος μιας κατασκευής είναι οι εξής:

- Κόστος ανέγερσης
- Κόστος συντήρησης και χρήσης
- Κόστος επισκευής έκτακτων ζημιών
- Κόστος κατεδάφισης
- Περιβαλλοντικό κόστος (φόρος άνθρακα)

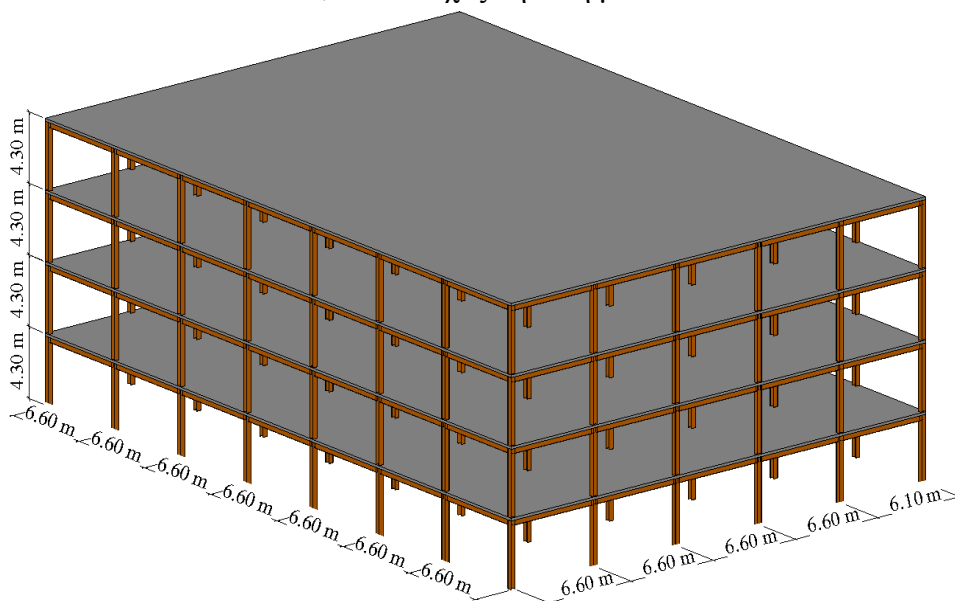
Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στο κόστος χρήσης και στο κόστος επισκευής πολυώροφων μεταλλικών κατασκευών. Το αρχικό κόστος ανέγερσης και το κόστος κατεδάφισης είναι συστατικά του συνολικού κόστους που μπορούν να προκύψουν σχετικά εύκολα ως τιμές ανηγμένες στο μέγεθος της κατασκευής. Στην Ελλάδα το περιβαλλοντικό κόστος καταβάλλεται έμμεσα μέσω του κόστους της ενέργειας.

Ως προς το κόστος επισκευής ζημιών, σε μια χώρα με έντονη σεισμικότητα όπως η Ελλάδα αυτό ορίζεται κυρίως από την ανάγκη να επισκευαστούν οι ζημιές που έχουν προκύψει από σεισμικά γεγονότα. Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί σε ζητήματα που άπτονται της ανάλυσης και του σχεδιασμού των κατασκευών, ζητήματα σχετικά δηλαδή με την ασφάλεια έναντι σεισμών, και η οποία πρόοδος αποτυπώνεται στους σύγχρονους κανονισμούς, δεν έχει δοθεί αντίστοιχη βαρύτητα στη διερεύνηση των οικονομικών επιπτώσεων των σεισμών. Αυτό έγινε αντιληπτό ιδίως μετά από πρόσφατους σεισμούς στους οποίους οι οικονομικές απώλειες ήταν τεράστιες ([1], [2]). Για το λόγο αυτό έχει καταβληθεί ιδιαίτερη προσπάθεια στο να αποτιμηθούν οι ενδεχόμενες βλάβες. Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε με τον προσδιορισμό της ευπάθειας των κατασκευών, τόσο σε επίπεδο δομικών και μη μελών ([3], [4]) όσο και σε επίπεδο κτιρίων ([5], [6], [7]) προσδιορίζοντας τις σχετικές καμπύλες τρωτότητας.

Ακολούθως, και με την ανάπτυξη της μη γραμμικής ανάλυσης δυναμικής ικανότητας (IDA) ([8], [9]), η FEMA (US Federal Emergency Management Agency), προχώρησε στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που επιτρέπει την εκτίμηση του κόστους των σεισμικών απωλειών. Η μεθοδολογία αυτή αποτυπώνεται στο κείμενο FEMA P-58 [10] όπου γίνεται η περιγραφή του τρόπου υπολογισμού του σχετικού κόστους και σε ένα συνοδευτικό λογισμικό (Performance Assessment Calculation Tool, PACT). Στο πλαίσιο αυτής τη μεθοδολογίας, ο μηχανικός καλείται να ομαδοποιήσει τα μέλη της κατασκευής ανάλογα με τις συναρτήσεις τρωτότητας και τη συμπεριφορά τους και αφού εκτελέσει ένα πλήθος από αναλύσεις IDA να αξιοποιήσει τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε μια προσομοίωση Μόντε Κάρλο προκειμένου να προκύψει το στατιστικά εκτιμώμενο ετήσιο κόστος για αποκατάσταση βλαβών από σεισμό.

Το κόστος χρήσης των κτιρίων αποτυπώνεται κυρίως μέσω του ενεργειακού κόστους. Αυτό ποικίλει ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου καθώς και με την κατασκευή και με τα υλικά και τον εξοπλισμό που έχει χρησιμοποιηθεί. Προκειμένου να αποτιμηθεί η ενεργειακή κατανάλωση για διάφορους τύπους κτιρίων η ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers) ανέπτυξε το πρότυπο ANSI-ASHRAE 140 [11]. Με βάση το πρότυπο αυτό συλλέγονται πληροφορίες που αφορούν τη χρήση του κτιρίου, τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για το κέλυφος, τα ανοίγματα, τα κουφώματα και τον Η/Μ εξοπλισμό αλλά και τη γεωγραφική θέση του κτιρίου η οποία συσχετίζεται με δεδομένα από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς, και υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση σε kWh και σε lt πετρελαίου θέρμανσης. Ακολούθως και με δεδομένες τις χρεώσεις που ισχύουν κατά τόπους υπολογίζεται το ετήσιο ενεργειακό κόστος.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να συλλέξει στοιχεία για το κόστος επισκευής βλαβών από σεισμό και για το ενεργειακό κόστος μεταλλικών κατασκευών ώστε να συγκεντρωθούν δεδομένα για δύο κρίσιμα συστατικά του κόστους κύκλου ζωής μιας μεταλλικής κατασκευής. Επιλέχθηκε το τετραώροφο μεταλλικό κτίριο που φαίνεται στο Σχ. 1, το οποίο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό AISC, με διατομές που συνοψίζονται στον Πιν. 1. Το κτίριο είναι σχεδιασμένο με βάση ένα σύγχρονο κανονισμό για ζώνη υψηλής σεισμικότητας, αντίστοιχης με τη ΖIII του ΕΑΚ2000, όπως περιγράφεται και στο σχετικό κείμενο του NIST (National Institute of Standards and Technology) [12], ενώ το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας αντοχής 50ksi κατά ASTM A992, αντίστοιχος δηλαδή με το S355 κατά τον EC3.



Σχ. 1: 3D απεικόνιση του τετραώροφου μεταλλικού κτιρίου

Όροφος	Ύψος (m)	Δοκοί	Περιμ. Υποστ.	Εσωτ. Υποστ.
1	4,30	W24x103	W24x103	W24x131
2	4,30	W24x103	W24x103	W24x131
3	4,30	W24x76	W24x76	W24x84
4	4,30	W24x76	W24x76	W24x84

Πιν. 1: Διατομές τετραώροφου μεταλλικού κτιρίου

2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

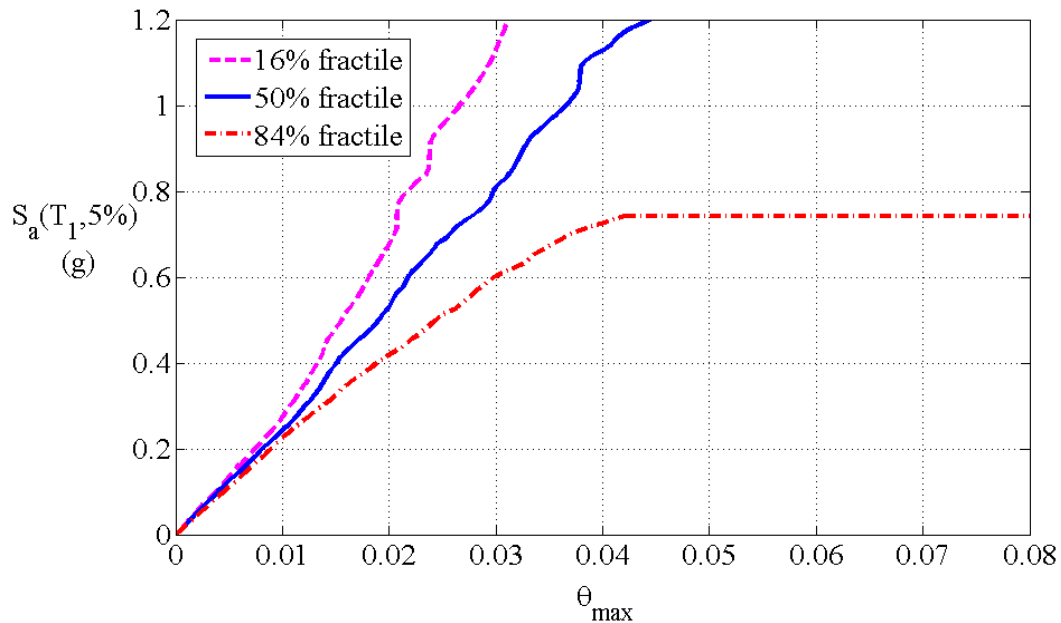
Προκειμένου να γίνει εκτίμηση του ετήσιου αναμενόμενου κόστους επισκευής ζημιών από σεισμό, ακολουθήθηκε η διαδικασία που προβλέπεται στο κείμενο της FEMA P-58 [10]. Συγκεκριμένα, συγκεντρώθηκαν όλα τα στοιχεία της κατασκευής που είναι πιθανόν να υποστούν βλάβες από σεισμό και καταγράφηκε το πλήθος τους όπως φαίνεται στον Πιν. 2.

Κωδικός FEMA P-58	Περιγραφή	Πλήθος
B1035.001	Κόμβοι δοκού/υποστυλώματος μονοί	8/όροφο
B1035.011	Κόμβοι δοκού/υποστυλώματος διπλοί	8/όροφο
B1031.011a	Εδράσεις υποστυλωμάτων	48/στάθμη έδρασης
B1031.021a	Αποκαταστάσεις συνέχειας	48/ β' όροφο
B1031.001	Συνδέσεις τέμνουσας	120/όροφο
C2011.001b	Μεταλλική κλίμακα	1/όροφο
B2022.001	Εξωτ. υαλοπίνακες (ανά 2.8m ²)	24/όροφο
C1011.001a	Εσωτ. χωρίσματα (τεμ. 4x13m)	3/όροφο
C3032.001a	Ψευδοροφές (ανά 22m ²)	56/όροφο
D1014.022	Ανελκυστήρας	1
E2022.023	H/Y	140/όροφο
E2022.106b	Βιβλιοθήκες	140/όροφο

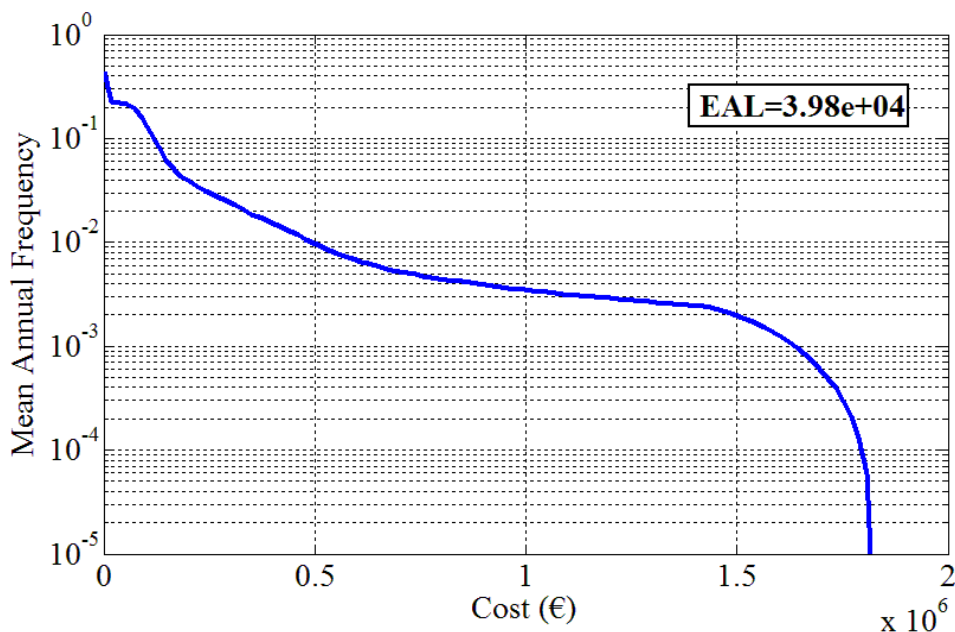
Πιν. 2: Συγκεντρωτικά στοιχεία ευπαθών στοιχείων

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν 22 σεισμικές καταγραφές με τις δύο οριζόντιες συνιστώσες τους, συνολικά 44 χρονοιστορίες. Για κάθε μια χρονοιστορία, το κτίριο υποβλήθηκε σε ένα πλήθος μη γραμμικών αναλύσεων IDA με μέτρο έντασης την φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής του κτιρίου, $S_a(T_1)$, και καταγράφηκαν τα μεγέθη απόκρισης. Συγκεκριμένα για κάθε καταγραφή και για κάθε στάθμη $S_a(T_1)$, συγκεντρώθηκαν οι σχετικές μετατοπίσεις κάθε ορόφου, η μέγιστη μετακίνηση της οροφής του κτιρίου και οι μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις των ορόφων (βλέπε Σχ. 2).

Στην συνέχεια, με βάση τις ήδη προσδιορισμένες συναρτήσεις τρωτότητας των στοιχείων, του Πιν. 2, για κάθε στάθμη των δυναμικών αναλύσεων προσδιορίστηκε η πιθανότητα του κάθε στοιχείου να έχει υποστεί βλάβη. Οι συναρτήσεις αυτές ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή και προσδιορίζουν πιθανοτικά τη στάθμη βλάβης κάθε στοιχείου ανάλογα με τη σχετική μετακίνηση ή την απόλυτη επιτάχυνση στην οποία το στοιχείο υποβάλλεται. Κάθε στάθμη βλάβης έχει συσχετιστεί με ένα κόστος αποκατάστασής της που επίσης ακολουθεί κατανομή (κανονική ή λογαριθμοκανονική). Τα παραπάνω για κάθε στοιχείο συνδυάστηκαν μέσω μιας προσομοίωσης Μόντε Κάρλο και προέκυψε η κατανομή του κόστους επισκευής για κάθε στάθμη σεισμικής έντασης. Επιπλέον, εκτιμήθηκε και το ενδεχόμενο κατάρρευσης του κτιρίου αλλά και η πιθανότητα εκτεταμένων βλαβών σε επίπεδο τέτοιο ώστε να κριθεί συμφέρουσα η κατεδάφιση του κτιρίου. Στις περιπτώσεις αυτές, το κόστος επισκευής θεωρήθηκε ίσο με το κόστος ανέγερσης ενός νέου κτιρίου. Τέλος, έχοντας ως βάση την καμπύλη επικινδυνότητας (seismic hazard curve) για την περιοχή του κτιρίου, υπολογίστηκε η πιθανότητα υπέρβασης της κάθε ενδεχόμενης τιμής κόστους αποκατάστασης και προέκυψε το μέσο ετήσιο κόστος αποκατάστασης βλαβών από σεισμό, στην προκειμένη περίπτωση ίσο με 39.807€ όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



Σχ. 2: Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις ορόφων από αναλύσεις IDA

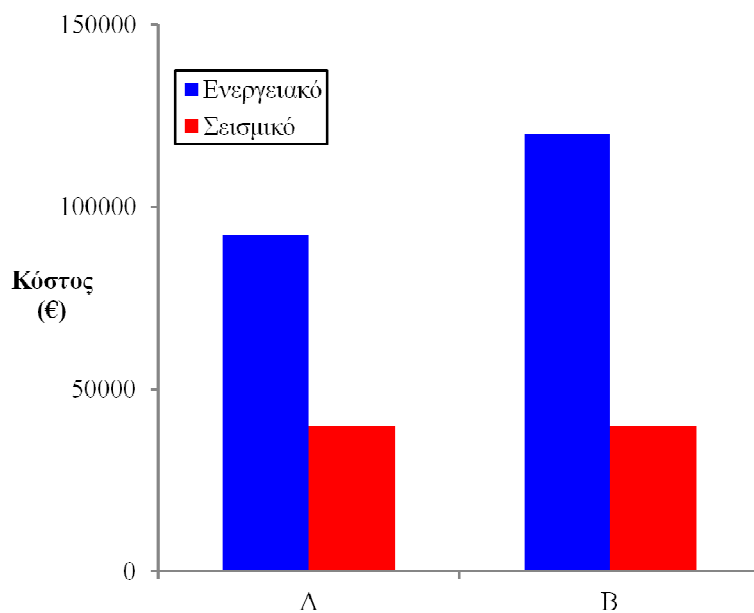


Σχ. 3: Κατανομή κόστους και πιθανότητας υπέρβασης και ετήσιο κόστος

3. ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Πέραν του μέσου ετήσιου κόστους αποκατάστασης ζημιών από σεισμό, κάθε κτίριο έχει ένα ετήσιο ενεργειακό κόστος λόγω της λειτουργίας του. Προκειμένου να προκύψει, μία ρεαλιστική εκτίμηση του πραγματικού κόστους της κατασκευής, πρέπει να γίνει σύγκριση αυτού του ετήσιου ενεργειακού κόστους με το εκτιμώμενο κόστος σεισμικών απωλειών. Για το σκοπό αυτό έγινε ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου σύμφωνα με τις διατάξεις του προτύπου ANSI-ASHRAE 140 [11]. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα του κτιρίου στο οποίο συμπεριλήφθηκαν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τις θερμικές του ιδιότητες. Για να προκύψει μια πληρέστερη σύγκριση,

δημιουργήθηκαν δύο εναλλακτικές. Στην πρώτη περίπτωση (Περίπτωση Α) το κτίριο θεωρήθηκε ότι έχει πολύ καλή ενεργειακή απόδοση με υψηλού επιπέδου μόνωση στην οροφή, και καλές θερμομονωτικές ιδιότητες πλευρικής κάλυψης και υαλοπινάκων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (Περίπτωση Β) για τα χαρακτηριστικά αυτά υιοθετήθηκαν δυσμενείς παραδοχές. Ακολούθως το κτίριο τοποθετήθηκε σε συγκεκριμένο στίγμα στην Ελληνική επικράτεια, και συγκεκριμένα στο κέντρο του Ηρακλείου Κρήτης και επιλέχθηκε ο καταλληλότερος από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς από τον οποίο αντλήθηκαν δεδομένα για τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Έγινε η παραδοχή ότι η χρήση του κτιρίου είναι για γραφεία, η οποία είναι μία απαιτητική ενεργειακά χρήση, και ακολούθησε η ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου, τα αποτελέσματα της οποίας σε σύγκριση με το μέσο εκτιμώμενο σεισμικό κόστος φαίνονται στο Σχ. 4.



Σχ. 4: Σύγκριση ενεργειακού και σεισμικού κόστους για τις δύο περιπτώσεις κτιρίων

4. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα του προσδιορισμού του πραγματικού κόστους των κατασκευών κατά την διάρκεια της ζωής τους ανακύπτει μετ' επιτάσεως τα τελευταία χρόνια. Για την περίπτωση των πολυώροφων μεταλλικών κατασκευών, στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε το στατιστικά εκτιμώμενο μέσο κόστος επισκευής ζημιών από σεισμό και το ενεργειακό κόστος που προκύπτει από την καθημερινή χρήση του κτιρίου.

Από τη σύγκριση των δύο, για το συγκεκριμένο κτίριο που έχει σχεδιαστεί με σύγχρονους κανονισμούς προέκυψε ότι το ενεργειακό κόστος είναι αισθητά μεγαλύτερο, και στις δύο περιπτώσεις. Το γεγονός ότι έχει δοθεί προσοχή στο σχεδιασμό του κτιρίου έναντι σεισμικών φορτίων και έχουν υιοθετηθεί σύγχρονες απαιτήσεις για τον σχεδιασμό των δομικών μελών, οδήγησε σε περιορισμό των σεισμικών βλαβών. Αντίθετα, η χρήση του κτιρίου ήταν τέτοια ώστε να συνεπάγεται μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο (υπερδιπλάσιο) ενεργειακό κόστος και στις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης δε θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο κατ' απόλυτη τιμή. Το μεν ενεργειακό κόστος είναι προβλέψιμο, τακτικό και με μικρή διασπορά από έτος σε έτος. Το δε σεισμικό κόστος όμως αφορά σπάνια γεγονότα με ενδεχομένως πολύ μεγάλες συνέπειες. Αν και επιμερισμένο κατ' έτος

φαίνεται μικρό, καθότι εμφανίζεται πιθανόν μόνο μία με δύο φορές στη διάρκεια ζωής του κτιρίου, οι επιπτώσεις του είναι συχνά πολλαπλάσιες του απλού κόστους επισκευών που δείξαμε. Οι ανθρώπινες απώλειες όπως και το κόστος μη λειτουργίας του κτιρίου για τη διάρκεια των επισκευών σημαίνουν ότι οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις πρέπει να λαμβάνονται μόνο ως ενδεικτικές.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hall, J.F., 1995, "Northridge earthquake of January 17, 1994 reconnaissance report", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA
- [2] Benuska, K.L., 1990, "Loma Prieta earthquake reconnaissance report." Earthquake Spectra 6(Suppl), pp:1-448
- [3] Kennedy R.P., & Ravindra M.K., 1984, "Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies", Nuclear Engineering and Design 79(1), pp: 47–68
- [4] Porter K.A., Kennedy R.P., Bachman R.E., 2007, "Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering", Earthquake Spectra 23(2), pp: 471–489
- [5] Jeong S.H., Elnashai A.S., 2007, "Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities", Engineering Structures 29(6), pp: 1238–1251
- [6] Kazantzi A.K., Righiniotis T.D., Chryssanthopoulos M.K., 2008, "Fragility and hazard analysis of a welded steel moment resisting frame", Journal of Earthquake Engineering 12(4), pp: 596–615
- [7] Kazantzi A.K., Righiniotis T.D., Chryssanthopoulos M.K., 2011, "A simplified fragility methodology for regular steel MRFs", Journal of Earthquake Engineering 15(3), pp: 390–403
- [8] Vamvatsikos D., Cornell C.A., 2002, "Incremental Dynamic Analysis", Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31(3), pp: 491–514
- [9] Vamvatsikos D., Cornell C.A., 2005, "Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information", Earthquake Engineering and Structural Dynamics 34, pp: 1573–1600
- [10] FEMA P-58, 2012, "Seismic Performance Assessment of Buildings", Applied Technology Council, Redwood City, California
- [11] ANSI/ASHRAE 140-2011, 2011, "Standard Method for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs", American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta GA
- [12] NIST CGR 10-917-8, "Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors", National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, Maryland, 20899

LIFE CYCLE COST ESTIMATION FOR STEEL STRUCTURES

Athanasios Papageorgiou

Civil Engineer

KANTIA SA / National Technical University of Athens

Heraklion, Greece / Athens, Greece

e-mail: apapag@central.ntua.gr

Michalis Fragiadakis

Lecturer, Civil Engineer

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: mfrag@mail.ntua.gr

Dimitrios Vamvatsikos

Lecturer, Civil Engineer

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: divamva@central.ntua.gr

SUMMARY

The growth of the construction industry led to the publication of guidelines and codes that govern the analysis and the design of structures ensuring the safety of users against various types of actions. Nevertheless, issues concerning the actual cost of each structure, including the occasional cost for repairing seismically induced damage have not been fully integrated in the analysis and design procedure. Moreover, given the need to decrease the energy consumption and the carbon footprint of human activities, it is necessary to examine structural cost in life cycle terms. This implies that the cost estimation should include the initial construction cost, the expected repair cost due to earthquake damage, the energy consumption cost and also the decommissioning cost. The present work aims at investigating the life cycle cost for multi-storey steel structures. The results of non-linear time history analyses are utilized in order to calculate the earthquake damage repair cost as per FEMA P-58, and the estimated cost is combined with the annual energy consumption cost calculated according to the ANSI/ASHRAE 140 standard.