

Σκοπιμότητα προσεισμικής ενίσχυσης κτιρίων: Μεθοδολογία και πιλοτική εφαρμογή

Α.Ι. Κάππος
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Η.Γ. Δημητρακόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός-ΜΔΕ, Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Χρ. Α. Παπαϊωάννου
Δρ Σεισμολόγος Α.Π.Θ., Κύριος Ερευνητής Ι.Τ.Σ.Α.Κ.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση ωφέλειας κόστους, προσεισμική ενίσχυση, κτίρια από σκυρόδεμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας σχετικά με την λήψη απόφασης για την σκοπιμότητα προσεισμικής ενίσχυσης των κτιρίων. Εκκινώντας από τη μοναδική υπάρχουσα ολοκληρωμένη μεθοδολογία ανάλυσης κόστους – ωφέλειας, αυτή της FEMA (1992), οι γράφοντες την προσαρμόσαν στα ελληνικά δεδομένα, με τις εξής βασικές παρεμβάσεις: (1) Χρήση μητρώων πιθανότητας βλάβης που παρήχθησαν βάσει καμπυλών τρωτότητας κατάλληλων για τα ελληνικά κτίρια, (2) Εκτίμηση οικονομοτεχνικών δεδομένων αντιπροσωπευτικών της ελληνικής πραγματικότητας, όσο αυτό ήταν εφικτό, (3) Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για τον υπολογισμό του λόγου ωφέλειας προς κόστος (Ω/K). Η προσαρμοσμένη στα ελληνικά δεδομένα μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μια σειρά αναλύσεων για τα κτίρια της Θεσσαλονίκης, ενώ μελετήθηκε, μεταξύ άλλων, η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις τιμές των σημαντικών παραμέτρων και σχέσεων του προβλήματος.

1 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ – ΩΦΕΛΕΙΑΣ

Η ανάλυση κόστους ωφέλειας είναι μία μεθοδολογία λήψης απόφασης για την προσεισμική ενίσχυση των κτιρίων. Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται τα επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας αυτής. Διακρίνονται δύο βήματα (στο Σχ. 1 αντιστοιχούν στις ελλείψεις), στα οποία εκτιμώνται τα δεδομένα της ανάλυσης, συνήθως πρόκειται για ένα πιθανοτικό προσομοίωμα της σεισμικής διέγερσης και κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας των κτιρίων που εξετάζονται. Δύο ακόμη βήματα (δηλώνονται με παραλληλόγραμμα) κατά τα οποία λαμβάνονται επιμέρους αποφάσεις, όπως ποιές είναι οι εφικτές εναλλακτικές μέθοδοι ενίσχυσης, ποιό το κόστος τους και άλλα οικονομικά δεδομένα, ακολουθεί ένα συνθετικό στάδιο στο οποίο υπολογίζονται οι συνέπειες κάθε σεναρίου με βάση ένα οικονομικό μοντέλο ωφέλειας κόστους και τέλος το στάδιο της αξιολόγησης σχετικά με την αναγκαιότητα της ενίσχυσης και την επιλογή της καλύτερης λύσης.

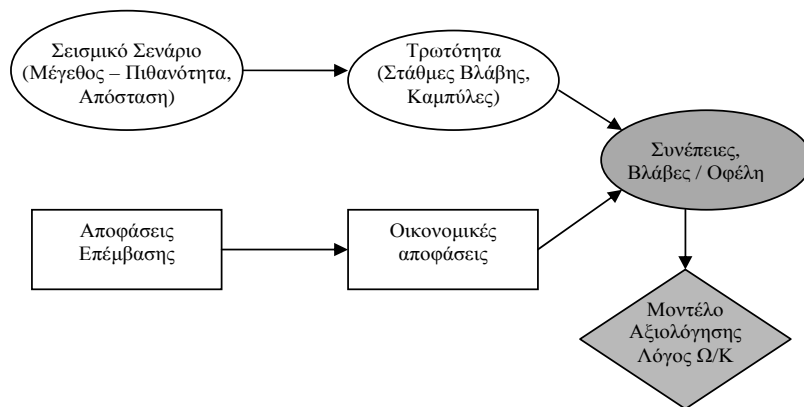
1.1 Απαιτούμενα δεδομένα – Σεισμικό σενάριο

Στο Σχήμα 1, η χρήση των ελλείψεων δηλώνει παραμέτρους η αβεβαιότητα των οποίων δεν εξαρτάται από τον υπεύθυνο για τη λήψη της απόφασης. Οι υπεισερχόμενες αβεβαιότητες, διακρίνονται (Ellingwood&Wen2005) στις τυχαματικές (random) και στις ‘επιστημονικές’ (epistemic).

Το σεισμικό σενάριο (μέγεθος, συχνότητα εμφάνισης, επίκεντρο κ.ά.) ανήκει στις πρώτες και δηλώνεται ως εκ τούτου με έλλειψη. Στις αναλύσεις ωφέλειας – κόστους μεγάλης κλίμακας όπως η παρούσα χρησιμοποιούνται συνήθως σχέσεις σεισμικής επικινδυνότητας οι οποίες δίνουν την κατά μέγεθος κατανομή των μακροσεισμικών εντάσεων και οι οποίες σχετίζονται με τη συχνότητα παρατήρησης μίας δοσμένης τιμής της μακροσεισμικής έντασης ή μεγαλύτερης και συνήθως οι

σχέσεις ανάγονται σε μονάδα χρόνου. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, η οποία αφορά στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, χρησιμοποιήθηκε κυρίως η σχέση (Παπαϊωάννου, 2004)

$$\log N = 2.55 - 0.61 \cdot IMM \quad (1)$$



Σχήμα 1. Η δομή της μεθοδολογίας ανάλυσης ωφέλειας –κόστους.

η οποία έχει προκύψει από την κατανομή των τιμών της μακροσεισμικής έντασης οι οποίες παρατηρήθηκαν στη Θεσσαλονίκη (Parazachos et al., 1999) ενώ στην ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκαν και οι παρακάτω σχέσεις κατανομής της μακροσεισμικής έντασης.

$$\log N = 4.79 - 0.92 \cdot IMM \quad (2)$$

$$\log N = 5.02 - 1.01 \cdot IMM \quad (3)$$

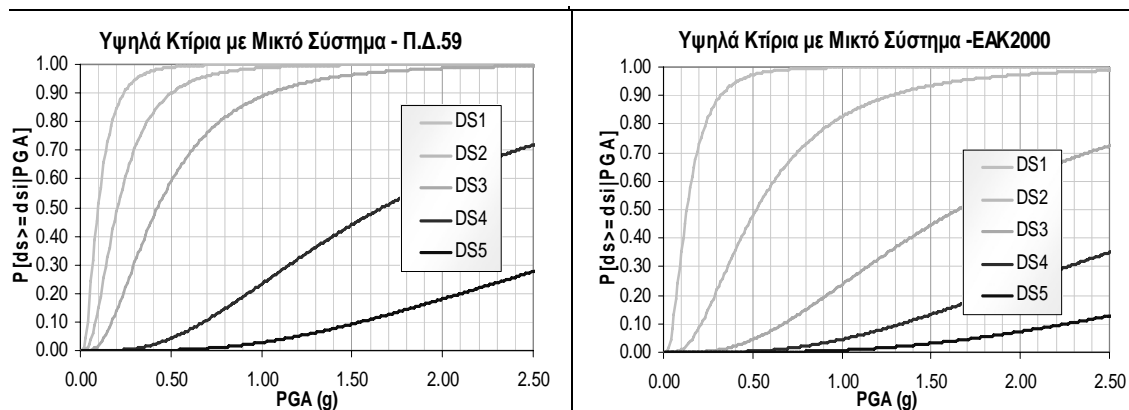
Η σχέση (2) έχει προκύψει με βάση τα αποτελέσματα πιθανολογικής εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με εφαρμογή του αλγορίθμου Frisk88M από πρόσφατη έρευνα στο ΙΤΣΑΚ (Παπαϊωάννου, 2004). Η τρίτη εξετασθείσα σχέση (3) έχει χρησιμοποιηθεί από τους Karpos et al. (1995) στην πρώτη ανάλυση κόστους – ωφέλειας που έχει γίνει για τον ελληνικό χώρο, και προέρχεται από τις μελέτες βαθμονόμησης του τότε Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΝΕΑΚ). Και οι τρεις σχέσεις είναι ανηγμένες σε ένα έτος. Οι τρεις αυτές σχέσεις διαφοροποιούνται για μεγάλες μακροσεισμικές εντάσεις ($IMM > VIII$). Ωστόσο η διαφοροποίηση αυτή είναι της τάξης του σφάλματος εκτίμησης της μακροσεισμικής έντασης. Θα πρέπει να ανφερθεί ότι η μεγαλύτερη μακροσεισμική ένταση η οποία παρατηρήθηκε στη Θεσσαλονίκη ήταν $IMM=IX$ από τον σεισμό του 1759 (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2003). Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερες πιθανότητες εμφάνισης τέτοιων σεισμών δίνει η σχέση (1), τις μικρότερες η (3) που είχε προκύψει βάσει διαθέσιμων στοιχείων στις αρχές της δεκαετίας του '90, ενώ η σχέση (2) δίνει ενδιάμεσα αποτελέσματα. Πρέπει να τονιστεί, εξάλλου, η σημαντική αβεβαιότητα που εμπεριέχουν, εν γένει, αυτές οι σχέσεις για εντάσεις μεγαλύτερες από VIII.

1.2 Τρωτότητα

Η δεύτερη ομάδα δεδομένων, που απεικονίζεται στο Σχήμα 1 επίσης με έλλειψη καθώς πρόκειται για την δεύτερη πηγή αβεβαιότητας (επιστημονικές), αναφέρεται στην τρωτότητα των κατασκευών. Αρχικά, στη μεθοδολογία ανάλυσης κόστους – ωφέλειας (FEMA 1992), χρησιμοποιούνταν μητρώα πιθανότητας βλάβης βασισμένα στην «έμπειρη κρίση», και μάλιστα τέτοια μητρώα χρησιμοποιούνται ακόμη σε παρόμοιες μελέτες εκτίμησης σεισμικών απωλειών. Η σύγχρονη τάση ωστόσο (Grossi 2000) είναι η τρωτότητα να εκφράζεται με καμπύλες (ή αντίστοιχα μητρώα πιθανότητας βλάβης) όχι βασισμένες στην «έμπειρη κρίση» αλλά σε αναλυτικά αποτελέσματα ή

στατιστικά στοιχεία, τόσο για τα φέροντα όσο και για τα μη φέροντα στοιχεία (Shinozuka et al. 2000, Ferrito 1997).

Για την Ελλάδα, ωστόσο, και μάλιστα με έμφαση στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας (Θεσσαλονίκη) προέκυψαν τέτοια στοιχεία από τις εργασίες των Penelis et al. (1989) και Karros et al. (2004). Η πρώτη εργασία αφορά στη βάση δεδομένων που συντάχθηκε για τη Θεσσαλονίκη, με βάση τα στατιστικά στοιχεία που συλλέχθηκαν μετά το σεισμό του 1978, ενώ στα πλαίσια της δεύτερης παρήχθησαν καμπύλες τρωτότητας με χρήση της υβριδικής μεθόδου που προτάθηκε από τους Karros et al. (1998, 2004), για όλους τους συνήθεις τύπους κτιρίων της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 2. Καμπύλες τρωτότητας για τις κατηγορίες κτιρίων: 9Pildu59 – 9ώροφο κτίριο με μικτό σύστημα επί πιλοτής (αριστερά) σχεδιασμένο σύμφωνα με το προεδρικό διάταγμα του '59 και σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 - 9PilduEAK (δεξιά). Η τρωτότητα ορίζεται αναφορικά με 5 στάθμες βλάβης (Karros et al. 2004) από DS1 (ελαφρά βλάβη) έως DS5 (κατάρρευση).

Από άποψη φέροντος οργανισμού, οι τρεις διαφορετικοί τύποι «παλιών» κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίοι εξετάζονται είναι τα κτίρια με μικτό σύστημα με και χωρίς πιλοτή και τα αμιγώς πλαισιακά τοιχοπληρωμένα κτίρια χωρίς πιλοτή. Σημειώνεται ότι η πλειοψηφία των κτιρίων έχει μικτό σύστημα (Penelis et al. 1989) και είναι μέσου και μεγάλου ύψους, ενώ αντίθετα δεν υπάρχουν παλιά (προ του 1984) κτίρια στη Θεσσαλονίκη, μέσου ή μεγάλου ύψους, με αμιγώς πλαισιακό σύστημα και επί πιλοτής. Για κάθε μία κατηγορία κτιρίων, παρήχθησαν από την εργασία των Karros et al. (2004) μητρώα πιθανότητας βλάβης, τα οποία έχουν τα εξής δύο πλεονεκτήματα σε σχέση με τα βασισμένα στην «έμπειρη κρίση» αντίστοιχα μητρώα: καταρχήν βασίζονται και σε στατιστικά στοιχεία από το σεισμό του 1978 που έπληξε την περιοχή της Θεσσαλονίκης και δεύτερον τα μητρώα πιθανότητας βλάβης προκύπτουν από συνεχείς καμπύλες τρωτότητας, οπότε μπορούν να καταστρωθούν για όλες τις σεισμικές εντάσεις.

1.3 Αποφάσεις επέμβασης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξετάζεται η σκοπιμότητα της σεισμικής ενίσχυσης των σχεδιασμένων σύμφωνα με το Βασιλικό Διάταγμα του 1959 κτιρίων Ο/Σ της Θεσσαλονίκης. Τα κτίρια αυτά εξάλλου αποτελούν και σήμερα την πλειοψηφία του οικοδομικού αποθέματος στη Θεσσαλονίκη (ΕΣΥΕ 2000) και επιπλέον έχουν μεγαλύτερη τρωτότητα συγκριτικά με τα αντίστοιχα (ανά κατηγορία) νεότερα κτίρια (Karros et al.2004).

Οι διαθέσιμες τεχνικές και μέθοδοι σεισμικής ενίσχυσης είναι βεβαίως πάρα πολλές και η αντίστοιχη βιβλιογραφία ιδιαίτερα πλούσια. Εν προκειμένω ωστόσο, εξετάζεται ένα πολυποίκιλο οικιστικό σύνολο και εκ των πραγμάτων δεν είναι δυνατόν να γίνει λεπτομερής διάκριση μεταξύ

κάθε μίας μεθόδου (π.χ. μανδύες Ο/Σ, ενίσχυση με ΙΟΠ (FRP) ή παθητικά συστήματα), για αυτό και διερευνώνται δύο σενάρια σεισμικής ενίσχυσης.

Κατά το πρώτο θεωρείται ότι τα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία είναι κατασκευασμένα προ του 1985 ενισχύονται κυρίως σε αντοχή και όχι σε πλαστιμότητα, ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας που αντιστοιχούν στα Πρόσθετα Άρθρα του 1984. Γι' αυτή τη στάθμη ενίσχυσης, το άμεσο κόστος των επεμβάσεων ανά m^2 της επιφάνειας του κτιρίου λαμβάνεται ίσο με 10% της αξίας αντικατάστασης του κτιρίου ανά m^2 (ήτοι $75\text{€}m^2$). Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει τις δαπάνες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην επέμβαση, αλλά και τα αντίστοιχα εργατικά, και εξαρτάται προφανώς από τη «φιλοσοφία» της (προσεισμικής) ενίσχυσης.

Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση ενίσχυσης όχι μόνο από άποψη αντοχής αλλά και πλαστιμότητας, έτσι ώστε το ενισχυμένο κτίριο να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου αντισεισμικού κανονισμού (NEAK/EAK). Αντίστοιχα, γι' αυτή τη στάθμη ενίσχυσης το άμεσο κόστος ενίσχυσης ανά m^2 της επιφάνειας του κτιρίου λαμβάνεται ίσο με 12% της αξίας αντικατάστασης του κτιρίου ανά m^2 (ήτοι $90\text{€}m^2$).

Τέλος στο συνολικό κόστος της ενίσχυσης εκτός από το άμεσο κόστος, συνεκτιμάται και το έμμεσο, το οποίο καλύπτει τα έξοδα για τη μελέτη και την έκδοση της άδειας για την ενίσχυση και το οποίο θεωρήθηκε ως το 20% του άμεσου κόστους (FEMA 1992).

1.4 Οικονομικά δεδομένα

Αναφορικά με τα απαιτούμενα οικονομικά δεδομένα, πρέπει καταρχήν να σημειωθεί ότι είναι αφενός δυσεύρετα (στην μορφή που απαιτείται για την παρούσα ανάλυση) και αφετέρου θεμελιώδους σημασίας για την ποιότητα των αποτελεσμάτων οποιασδήποτε μεθοδολογίας Ω/Κ.

Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα οικονομικά δεδομένα αντλήθηκαν από μια σειρά πηγών. Μεταξύ αυτών, είναι η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε μετά το σεισμό του 1978 στη Θεσσαλονίκη (Penelis et al. 1989, Karpos et al. 1995), και το υλικό που προέκυψε από το ερευνητικό πρόγραμμα (ΕΠΑΝ) 'ΑΡΙΣΤΙΩΝ' και αφορά βασικά οικονομικά δεδομένα, όπως το κόστος αντικατάστασης (ανακατασκευής) και το κόστος ενίσχυσης των κτιρίων, τα οποία πρέπει πάντοτε να προσαρμόζονται στις συνθήκες που επικρατούν στην εξεταζόμενη περιοχή. Αντλήθηκαν επίσης οικονομικά στοιχεία γενικής φύσεως από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος (ΕΣΥΕ), όπως ποσοστό ιδιοκατοίκησης, τζίρος επιχειρήσεων κ.ά. Τέλος, όπου δεν υπήρχε άλλη δυνατότητα, χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα στοιχεία του Εγχειριδίου της FEMA (1992), με σχετική προσαρμογή στις βασικές οικονομικές παραμέτρους της Ελλάδας.

Στα εν λόγω δεδομένα περιλαμβάνονται η χρήση των κτιρίων και μια σειρά οικονομικών μεγεθών τα οποία είτε αφορούν τα κτίρια (FEMA, 1992, Kanda & Shah, 1997, βλ. και πίνακα 1), είτε είναι γενικότερης φύσης. Από αυτά τα οποία αφορούν στα κτίρια το σημαντικότερο είναι η αξία αντικατάστασης (R_V) η οποία λήφθηκε ίση προς $750\text{€} m^2$ (εκτιμώμενη μέση τιμή για το σύνολο της περιοχής). Με τον όρο «αντικατάσταση» δηλώνεται η αντικατάσταση της λειτουργίας που προσέφερε ένα κτίριο, το οποίο πρέπει να κατεδαφιστεί, από ένα νέο κτίριο. Με τη βοήθεια αυτής της παραμέτρου, οι απώλειες από τις βλάβες των κτιρίων υπολογίζονται ως το γινόμενο της αξίας αντικατάστασης επί την επιφάνεια των κτιρίων, επί τον κεντρικό δείκτη βλάβης της καμπύλης που περιγράφει την τρωτότητα του κτιρίου.

Οι οικονομικές απώλειες, ο τρόπος υπολογισμού κάθε μίας και η βασική τιμή που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση συνοψίζονται στον πίνακα 1. Ο δείκτης "j" ο οποίος υπάρχει σε όλους τους όρους του πίνακα 1 δείχνει ότι οι απώλειες λόγω σεισμού υπολογίζονται για όλους τους αναμενόμενους σεισμούς έντασης από $j = VI$ έως $j = XI$, ενώ από αυτές, οι εντάσεις VI έως και VIII είναι που καθορίζουν πρακτικά τα αποτελέσματα λόγω της σημαντικής πιθανότητας εμφάνισης που παρουσιάζουν. Οι συχνότερες εμφάνισης πολύ μεγάλων εντάσεων ($>IX$) είναι πάρα πολύ μικρές για τη Θεσσαλονίκη (και τις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας).

Το σπουδαιότερο από τα οικονομικά δεδομένα γενικής φύσεως, είναι η στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής, γύρω από την οποία υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα. Από τις διαθέσιμες μεθόδους εκτίμησής της (FEMA 1992), υιοθετήθηκε αυτή η οποία βασίζεται στα ποσά αποζημίωσης που δίνονται σε περιπτώσεις θανάτων από τις ασφαλιστικές εταιρείες ή και από την πολιτεία (“courts awards approach”) ως η πλέον αξιόπιστη και αντικειμενική. Πρόβλημα, ωστόσο, αποτέλεσε η μεγάλη απόκλιση στα ποσά που καταβάλλονται στους συγγενείς των θυμάτων στην Ελλάδα. Από έρευνα που έγινε στα ηλεκτρονικά και έντυπα μέσα ενημέρωσης, εντοπίστηκαν περιπτώσεις αποζημιώσεων που κυμαίνονταν από €50,000 (σεισμός Αιγίου), ως €1,450,000 (εργατικό ατύχημα το 2005), αλλά τα πολύ μεγάλα ποσά επιδικάζονταν πάντα πρωτοδικώς, για να μειωθούν σημαντικά στη δεύτερη δίκη (π.χ. για τους νεκρούς του Εξπρές Σαμίνα, πρωτοδικώς είχαν επιδικασθεί €300,000/οικογένεια νεκρού που μειώθηκαν από το Εφετείο σε €60,000). Σε κάθε περίπτωση, οι αποζημιώσεις αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές που καταβάλλονται σε χώρες του εξωτερικού όπως οι ΗΠΑ, όπου κυμαίνονται από 1 έως 5 εκατομμύρια δολάρια του έτους 2000 (Zerbe&Falit-Baiamonte 2001). Για να αντιμετωπιστεί αυτή η διακύμανση, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με δύο τιμές, αρχικά €50,000 ως κάτω όριο και έπειτα €500,000 ως άνω όριο της στατιστικής αξίας της ανθρώπινης ζωής (για τα ελληνικά δεδομένα).

Πίνακας 1: Βασικά οικονομικά δεδομένα για την ανάλυση Ω/Κ

Σύμβολο	Απώλεια	Υπολογισμός	Βασική Τιμή
$C_j^{\beta\lambda}$	Βλάβες Κτιρίων	Αξία Αντικατάστασης (R_V) × Επιφ.Κτιρίου× MDF	$R_V = 750\text{€m}^2$ (Ελλάδα 2005)
$C_j^{\epsilon\nu}$	Απώλειες Ενοικίων	Ενοίκιο × Ενοικ. Επιφ × Απώλεια Λειτουργίας	$4.0\text{€m}^2/\mu\eta\gamma\alpha$ (0.5% R_V)
$C_j^{\mu\epsilon\tau}$	Έξοδα Μετεγκατάστασης	Κόστος. Μετεγκατάστασης.× Ενοικ. Επιφ × Απώλεια Λειτουργίας	$15.0\text{€}/\text{m}^2/\mu\eta\gamma\alpha$ (2.0% R_V)
$C_j^{\pi\pi}$	Απώλειες Προσωπικής Περιουσίας	Αξία Προσωπικής Περιουσίας × Επιφ.Κτιρίου× ΚΔΒ	225€ m^2 (20.0% R_V)
$C_j^{\gamma.\epsilon.}$	Γενικά Εισοδήματα	Τζίρος× Ενοικ. Επιφ × Απώλεια Λειτουργίας	$11.0\text{€m}^2/\eta\mu\epsilon\tau\alpha$ (1.4% R_V)
$C_j^{A.\alpha\pi}$	Απώλεια ζωής	Στατιστική Αξία Ανθρώπινης Ζωής × Αναμενόμενο Αριθμό Θανάτων	$50,000\text{€}$ (κάτω όριο) $500,000\text{€}$ (άνω όριο)
C_j	Συνολικές απώλειες	$C_j = C_j^{\beta\lambda} + C_j^{\epsilon\nu} + C_j^{\mu\epsilon\tau} + C_j^{\pi\pi} + C_j^{\gamma.\epsilon.} + C_j^{A.\alpha\pi}$	

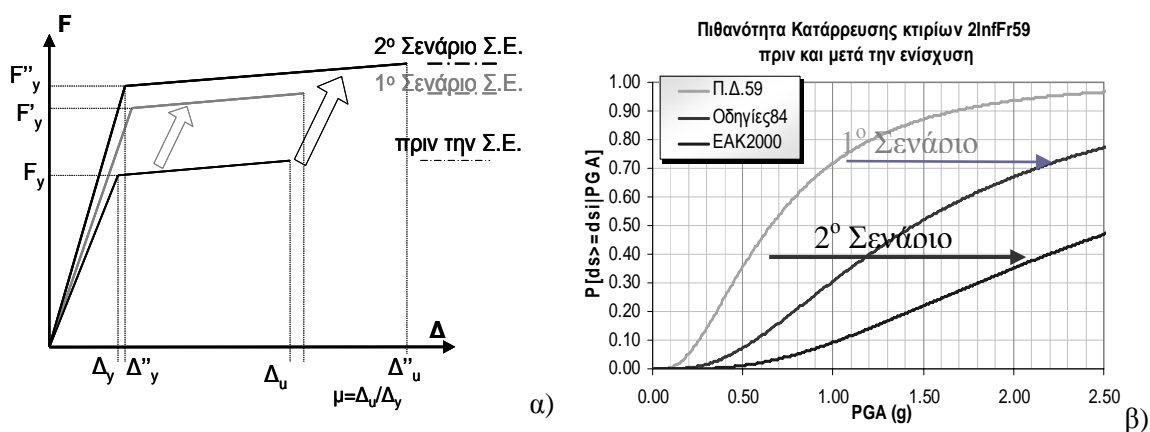
Τα υπόλοιπα απαιτούμενα οικονομικά δεδομένα είναι: (α) Το προεξοφλητικό επιτόκιο με το οποίο υπολογίζεται η παρούσα αξία των ωφελειών που αναμένεται να προκύψουν στο μέλλον από την προσεισμική ενίσχυση των κτιρίων. Όταν μειώνεται το επιτόκιο αυξάνουν τα μελλοντικά οφέλη και αυξάνει ο δείκτης ωφέλειας κόστους. Ως βασική τιμή στην εφαρμογή επιλέγεται το 4%, ενώ εύλογες τιμές για το επιτόκιο σύμφωνα με τη FEMA (1992) είναι από 3% έως 6% και θεωρούνται κατάλληλες και για την Ελλάδα των τελευταίων ετών. (β) Ο χρονικός ορίζοντας σχεδιασμού του προγράμματος προσεισμικής ενίσχυσης ή «περίοδος σχεδιασμού», εκείνη δηλαδή η χρονική περίοδος εντός της οποίας θεωρούνται τα οικονομικά οφέλη της ενίσχυσης των κτιρίων. Τυπικές περίοδοι σχεδιασμού κτιρίων, μη ειδικής χρήσης, είναι τα 20 με 40 χρόνια, στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας εξετάζονται και οι δύο τιμές. Υπενθυμίζεται ότι ο χρόνος ζωής ενός νεόδμητου κτιρίου είναι γύρω στα 60 χρόνια οπότε οι υφιστάμενες κατασκευές που μελετώνται έχουν χρόνο ζωής λιγότερο από το χρόνο αυτόν. (γ) Η «Σωζόμενη αξία» ήτοι η αλλαγή (αύξηση) που επιφέρει η σεισμική ενίσχυση στην αξία των κτιρίων, θεωρούμενη στα πλαίσια της ανάλυσης ωφέλειας - κόστους ως καθαρή παρούσα αξία, ένα όφελος με άλλα λόγια που μειώνει το καθαρό κόστος ενίσχυσης, λήφθηκε ως το 10% του κόστους ενίσχυσης (FEMA 1992).

1.5 Εκτίμηση των συνεπειών της (ενδεχόμενης) σεισμικής ενίσχυσης

Μία ενδεχόμενη προσεισμική ενίσχυση μειώνει ασφαλώς την τρωτότητα της κατασκευής. Η εύστοχη ωστόσο εκτίμηση αυτής της μείωσης ή με άλλα λόγια η σωστή θεώρηση της αποδοτικότητας της προσεισμικής ενίσχυσης δεν είναι εύκολος στόχος. Δύο είναι οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζεται το θέμα στη βιβλιογραφία:

Ο πρώτος είναι αυτός που υιοθετούσε το αρχικό μοντέλο της FEMA 1992 όπου χρησιμοποιούνταν οι πίνακες «αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης» οι οποίοι προτεινόταν από το ATC και βασίζονταν στην «έμπειρη κρίση». Η λύση αυτή ακολουθείται ακόμα σε πολλές περιπτώσεις λόγω έλλειψης άλλων στοιχείων, αλλά πρόκειται μάλλον για μια λύση ανάγκης, αφού η διασπορά των τιμών που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ μεγάλη (Grossi 2000). Από την άλλη μεριά όμως, είναι περιορισμένα τα δημοσιευμένα στατιστικά στοιχεία για τα αποτελέσματα της σεισμικής ενίσχυσης στη μείωση των βλαβών και την τρωτότητα των κατασκευών.

Ο δεύτερος τρόπος είναι η εκτίμηση με βάση στατικές ή δυναμικές αναλύσεις (ανελαστικές ως επί το πλείστον), ο οποίος ωστόσο, βρίσκει εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται ένα κτίριο ή μία συγκεκριμένη κατηγορία κτιρίων, (βλ. π.χ. Wen&Kang 2001), και όχι ένα πολυπόικλο οικιστικό σύνολο, που ενδιαφέρει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3. α) Τα δύο Σενάρια Σεισμικής Ενίσχυσης που εξετάστηκαν (ενδεικτικό σχήμα) και β) η αναμενόμενη αποδοτικότητα της ενίσχυσης σε όρους καμπυλών τρωτότητας για στάθμη βλάβης DS5 (κατάρρευση). Οι συγκεκριμένες καμπύλες αφορούν στα χαμηλά τοιχοπληρωμένα με πλαισιακό σύστημα κτίρια, σχεδιασμένα με το ΠΔ59 (2InfFr59 πριν την ενίσχυση)- με τις αντισεισμικές οδηγίες του 84 (2InfFr84 μετά την ενίσχυση σύμφωνα με το πρώτο σενάριο) και τον σύγχρονο αντισεισμικό κανονισμό NEAK/EAK (2InfFrEAK με το δεύτερο σενάριο).

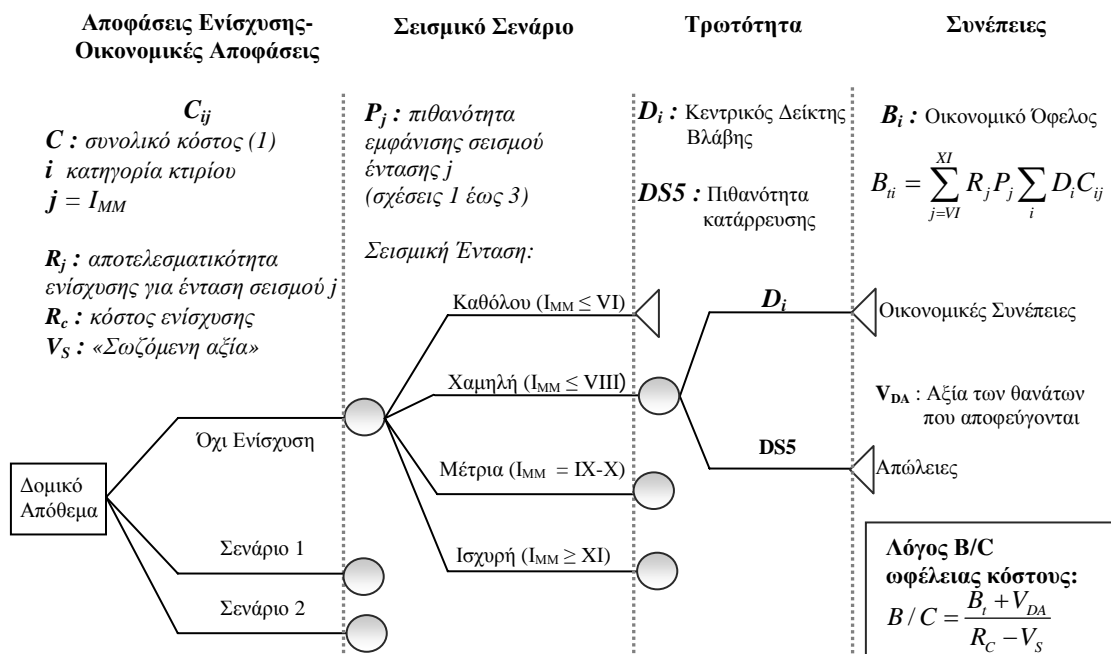
Η παρούσα μελέτη είναι μεγάλης κλίμακας αφού αφορά όλους τους συνήθεις τύπους κτιρίων Ο/Σ, με ιδιαίτερη έμφαση στα παλιά (σχεδιασμένα από το 1954 έως το 1984) κτίρια, οπότε και αναβαθμίστηκαν αισθητά οι αντισεισμικές διατάξεις στην Ελλάδα. Από τους Kappos et al. (2004) προέκυψαν καμπύλες τρωτότητας για αυτά ακριβώς τα κτίρια, οπότε εδώ προτείνεται ένας τρίτος τρόπος εκτίμησης της αποδοτικότητας της σεισμικής ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι η τρωτότητα των «παλαιών» κτιρίων αναβαθμίζεται με ενίσχυση της αντοχής τους (1ο σενάριο σεισμικής ενίσχυσης – σχ. 3) σε αυτή των σχεδιασμένων με τον αμέσως επόμενο χρονολογικά αντισεισμικό κανονισμό κτιρίων, ήτοι τα Πρόσθετα Άρθρα του 1984, ενώ με ενίσχυση και της αντοχής αλλά και της πλαστιμότητας (2ο σενάριο σεισμικής ενίσχυσης – σχ. 3) αναβαθμίζεται στο επίπεδο του σύγχρονου αντισεισμικού κανονισμού NEAK/EAK 2000. Οπότε η τρωτότητά τους μετά την ενίσχυση εκφράζεται από τις αντίστοιχες καμπύλες τρωτότητας και η

αποδοτικότητα της σεισμικής ενίσχυσης (R_i) από τη διαφορά (μείωση) των αντίστοιχων πιθανοτήτων βλάβης μεταξύ των δύο καμπυλών τρωτότητας (σχ. 3).

Όσον αφορά στις ανθρώπινες απώλειες (θάνατοι και τραυματισμοί) που προκαλεί η κατάρρευση ενός κτιρίου λόγω σεισμού, χρησιμοποιήθηκε μία σύγχρονη μέθοδος υπολογισμού των απωλειών, αυτή των Coburn & Spence (2002), με την οποία συνδέεται άμεσα ο αριθμός των απωλειών λόγω καταρρεύσεων των κτιρίων με την τρωτότητα και τη χρήση τους. Η μεθοδολογία αυτή εντάχθηκε στην ανάλυση ωφέλειας/κόστους αντί της χρήσης πινάκων βασισμένων στην «έμπειρη κρίση», για τα αναμενόμενα ποσοστά θανάτων και απωλειών των ενισχυμένων και μη κτιρίων. Εξάλλου με τον τρόπο αυτόν, η μείωση των ανθρώπινων απωλειών εξαρτάται άμεσα από τη μείωση της τρωτότητας λόγω της ενίσχυσης και ως εκ τούτου πιστεύεται ότι αποτελεί βελτίωση της αρχικής μεθοδολογίας.

1.6 Μέθοδος αξιολόγησης : Ανάλυση Ωφέλειας - Κόστους

Το επόμενο στάδιο είναι η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων ενίσχυσης το οποίο συνίσταται συνήθως σε δύο διαδικασίες. Η πρώτη είναι να αναχθούν όλες οι συνέπειες (οφέλη, βλάβες) σε κοινές μονάδες μέτρησης (π.χ. οικονομικές/χρηματικές ή λειτουργικά οφέλη), ενώ η δεύτερη, να αθροιστούν οι επιμέρους συνέπειες. Οι διαθέσιμες μεθοδολογίες διαφοροποιούνται σε αυτό το σημείο ανάλογα με το αν οι ετήσιες πιθανότητες εμφάνισης μελλοντικών σεισμών διαφόρων εντάσεων είναι σταθερές και επίσης αν η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης είναι σταθερή στο χρόνο ή όχι. Εάν οι πιθανότητες αυτές είναι σταθερές τότε έπεται ότι και τα αναμενόμενα οφέλη είναι σταθερά κάθε χρόνο και αυτή είναι η παραδοχή της ανάλυσης κόστους – ωφέλειας κατά FEMA (1992) που υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με αυτήν, εκτιμώνται οι συνέπειες (οφέλη, βλάβες), εκφρασμένες σε ισοδύναμα οικονομικά μεγέθη για κάθε συνδυασμό σεισμικής έντασης, μέσου δείκτη βλάβης, και δυνατότητας ενίσχυσης. Σχηματικά η πορεία που ακολουθείται κατά την ανάλυση κόστους – ωφέλειας στα πλαίσια της παρούσας εργασίας απεικονίζεται στο δένδροδιάγραμμα του σχήματος 4.



Σχήμα 4. Δένδροδιάγραμμα ανάλυσης κόστους - ωφέλειας.

Η οικονομική ωφέλεια της προσεισμικής ενίσχυσης ενός συνόλου από υπάρχουσες κατασκευές μπορεί να προσδιοριστεί με τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας των επενδύσεων προσεισμικής ενίσχυσης. Όταν τα αναμενόμενα οφέλη (B_i στο σχ. 4) υπερβαίνουν το συνολικό κόστος, τότε η καθαρή παρούσα αξία είναι θετική (ο λόγος ωφέλειας προς κόστος είναι μεγαλύτερος της μονάδας) και η επένδυση είναι καταρχήν οικονομικά δικαιολογημένη. Ο λόγος αυτός ισούται με την παρούσα αξία του συνολικού κόστους που αναμένεται να αποφευχθεί στην διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού συν την παρούσα αξία του κόστους των θανάτων (V_{DA}) που αποφεύγονται (εφόσον συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση), προς την διαφορά του συνολικού κόστους ενίσχυσης (R_C) από την παρούσα αξία της «σωζόμενης αξίας» των κτιρίων (V_S). Επομένως ισχύει η σχέση

$$\frac{B}{C} = \frac{B_i + V_{DA}}{R_C + V_S} \quad (4)$$

2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ Ω/Κ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

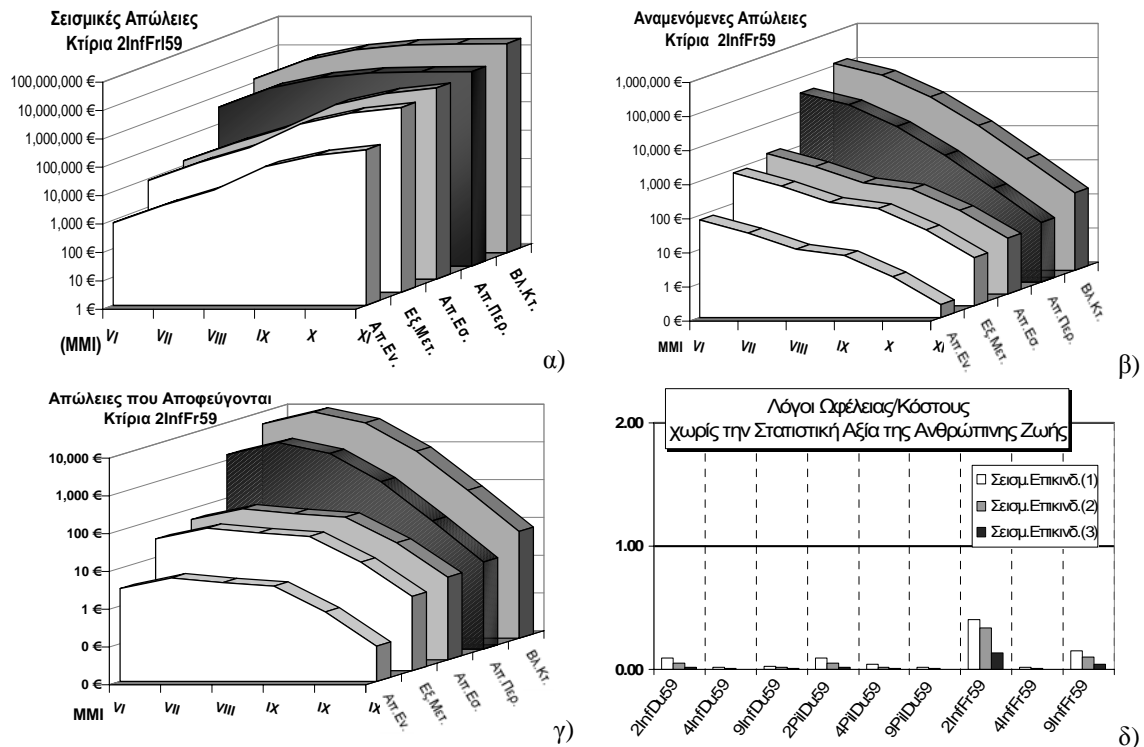
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ωφέλειας / κόστους σχετικά με τη σκοπιμότητα προσεισμικής ενίσχυσης, στα σχεδιασμένα σύμφωνα με το Βασιλικό Διάταγμα του 1959 κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος της Θεσσαλονίκης. Για τον υπολογισμό της αναμενόμενης καθαρής παρούσας αξίας και των λόγων ωφέλειας προς κόστος αναπτύχθηκε εφαρμογή λογισμικού σε κώδικα VBA.

Καταρχήν παρουσιάζονται στο σχήμα 5(α) οι οικονομικές απώλειες που θα προκύψουν από την ομάδα κτιρίων που μελετώνται (σημειώνεται ότι τα ποσά αναφέρονται στα κτίρια της βάσης δεδομένων και όχι στο σύνολο των κτιρίων της πόλης), με την προϋπόθεση ότι θα γίνει ένας σεισμός έντασης “j” (από VI έως XI σε I_{MM}). Δηλαδή τα αποτελέσματα αυτά, είναι ανεξάρτητα των ετησίων πιθανοτήτων εμφάνισης των σεισμών στην περιοχή μελέτης, και επομένως ανεξάρτητα από την σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής αυτής. Σημειώνεται ότι ο κατακόρυφος άξονας του σχήματος 5α, το οποίο αφορά στα χαμηλά τοιχοπληρωμένα παλιά κτίρια Ο/Σ με πλαισιακό σύστημα (2InfFr59), είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Η ιεράρχηση των απωλειών από τις σημαντικότερες προς τις λιγότερο σημαντικές (εξαιρουμένης της στατιστικής αξίας της ανθρώπινης ζωής) έχει ως εξής: 1. από βλάβες κτιρίων (σημειώνονται ως Βλ.Κτ.), 2. περιουσιακών στοιχείων των κατοικιών (Απ.Περ.), 3. εισοδημάτων (Απ.Εσ.), 4. από έξοδα μετεγκατάστασης (Εξ. Μετ.), και τέλος 5. ενοικίων (Απ.Εν.). Από την άλλη μεριά, όλες οι κατηγορίες απωλειών αυξάνονται για μεγαλύτερες εντάσεις, συμπεράσμα ορθολογικό αφενός, αναμενόμενο αφετέρου, καθότι (όλες) οι βλάβες υπολογίζονται ως γινόμενο του μέσου δείκτη βλάβης για κάθε σεισμική ένταση.

Στο σχήμα 5(β) παρουσιάζονται οι αναμενόμενες ετήσιες απώλειες λόγω σεισμών διαφόρων εντάσεων. Τα αποτελέσματα του πίνακα αυτού δεν αναφέρονται στην περίπτωση που τα κτίρια τα οποία μελετώνται επλήγησαν σίγουρα από κάποιον σεισμό με συγκεκριμένη ένταση, αλλά λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα που έχει να εμφανιστεί ένας σεισμός ορισμένης έντασης στην περιοχή μελέτης στην διάρκεια ενός έτους. Έτσι αυτά τα αποτελέσματα (σχ. 5β), σε αντίθεση με αυτά του σχ. 5α είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης.

Αξιοσημείωτο είναι πως ενώ η ιεράρχηση των απωλειών από άποψη σπουδαιότητας είναι όμοια με την περίπτωση κατά την οποία οι απώλειες υπολογίζονται για δεδομένη εμφάνιση σεισμού, η μεταβολή τους με την αύξηση της σεισμικής έντασης είναι τελείως διαφορετική. Είναι φανερό ότι οι μεγαλύτερες ετήσιες σεισμικές απώλειες αναμένονται για μικρούς και μεσαίους σεισμούς, με αντίστοιχες εντάσεις από VI έως IX. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πολύ μικρές πιθανότητες εμφάνισης μεγάλων σεισμών (έντασης μεγαλύτερης του IX) τις οποίες δίνουν οι σχέσεις κατανομής των μακροσεισμών εντάσεων για τη Θεσσαλονίκη (σχέσεις 1,2 και 3).

Από το σχήμα 5γ) στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή των απωλειών, οι οποίες αναμένεται να αποφευχθούν για σεισμούς εντάσεως από VI έως IX προκύπτει το εξής ενδιαφέρον συμπέρασμα: οι απώλειες οι οποίες αναμένεται να αποφευχθούν έχουν διαφορετική κατανομή με τη σεισμική ένταση από τις αναμενόμενες ετήσιες απώλειες. Πιο συγκεκριμένα, ενώ οι αναμενόμενες απώλειες είναι μεγαλύτερες για μικρότερες εντάσεις και μειώνονται μονότονα για μεγαλύτερες εντάσεις, οι απώλειες οι οποίες αναμένεται να αποφευχθούν, από την άλλη μεριά, δεν παρουσιάζουν μονότονη μεταβολή συναρτήσει της σεισμικής έντασης. Για τη συγκεκριμένη κατηγορία κτιρίων οι απώλειες που αναμένεται να αποφευχθούν παρουσιάζουν μέγιστο για μέσες εντάσεις (περίπου VII). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην θεώρηση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης η οποία υπολογίζεται από τη διαφορά της τρωτότητας του κτιρίου πριν και μετά την ενίσχυση (σχ. 3β) και η οποία, αναμένεται μεγαλύτερη για μέσες εντάσεις (VII και IX) και πολύ μικρή για μικρές εντάσεις (VI και VII), στις οποίες όμως αναμένονται οι περισσότερες απώλειες ετησίως.



Σχήμα 5. Κατανομή των σεισμικών απωλειών ανάλογα με το είδος και τη σεισμική ένταση για α) δεδομένη εμφάνιση σεισμού ($D_i C_j$), β) απώλειες οι οποίες αναμένονται ($P_j D_i C_j$) και γ) απώλειες οι οποίες αναμένεται να αποφεύγονται λόγω της σεισμικής ενίσχυσης ($R_j P_j D_i C_j$), ανάλογα με το είδος βλάβης και τη σεισμική ένταση με βάση τη σχέση σεισμικής επικινδυνότητας 2, δ) Λόγοι ωφέλειας κόστους χωρίς να ληφθεί υπόψη η στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής για το 1ο σενάριο ενίσχυσης και περίοδο σχεδιασμού 40 έτη.

Στο σχήμα 5δ παρουσιάζονται οι λόγοι ωφέλειας κόστους για το 1ο σενάριο ενίσχυσης, αν αγνοηθεί η στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής και η περίοδος σχεδιασμού (χρονικός ορίζοντας) της ενίσχυσης είναι 40 έτη. Είναι προφανές ότι για καμία κατηγορία κτιρίων δεν προκύπτει συμφέρουσα η προσεισμική ενίσχυση (λόγος Ω/K μεγαλύτερος του 1). Συγκριτικά δε, τα κτίρια με μικτό σύστημα (InfDu59 PilDu59) έχουν πολύ μικρότερη ανάγκη ενίσχυσης σε σχέση με τα πλαισιακά (InfFr59) και άρα μικρότερους λόγους Ω/K .

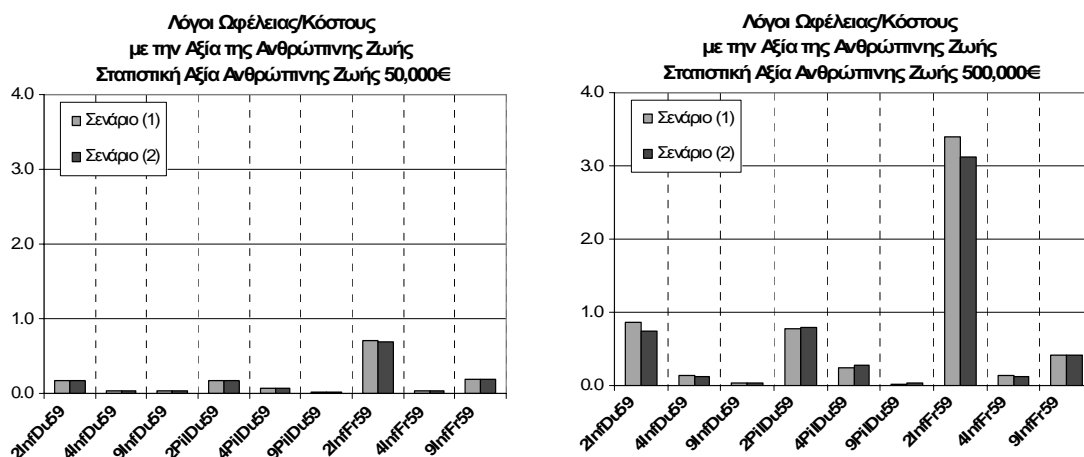
Όσον αφορά την τιμή του χρονικού ορίζοντα, σημειώνεται ότι η σκοπιμότητα της ενίσχυσης είναι προφανώς μεγαλύτερη για χρονικό ορίζοντα 40 έτη απ' ότι για 20. Η γενική εικόνα ωστόσο

είναι κοινή και για τις δύο περιόδους, απλώς τα οφέλη ενισχύονται και κατ' επέκταση και οι λόγοι ωφέλειας κόστους να είναι μεγαλύτεροι κατά περίπου 30% για την περίοδο των 40 ετών, σε σχέση με αυτή των 20 ετών. Εξάλλου ο χρονικός ορίζοντας των 40 ετών, είναι τιμή αφενός ρεαλιστική και αφετέρου αρκετά μεγάλη αν συγκριθεί με τα 60 έτη που θεωρείται πως είναι η περίοδος σχεδιασμού ενός καινούργιου κτιρίου (πάντως, τόσο στην Ελλάδα, όσο και αλλού, ο αριθμός των κτιρίων με ηλικία άνω των 60 ετών είναι κάθε άλλο παρά ασήμαντος).

Στη συνέχεια οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν, με τη διαφορά ότι λήφθηκε υπόψη η στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής. Αυτό συνεπάγεται ότι τα οφέλη της ενίσχυσης, άρα και οι λόγοι ωφέλειας προς κόστος, αυξάνονται λόγω της αξίας των θανάτων που αναμένεται να αποφευχθούν χάρη στην ενίσχυση. Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων που αποφεύγονται προκύπτει από τη διαφορά των θανάτων που αναμένονται πριν την ενίσχυση μείον τους θανάτους που αναμένονται μετά την ενίσχυση.

Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται οι λόγοι ωφέλειας κόστους, όπως υπολογίστηκαν για περίοδο σχεδιασμού 40 έτη (η μέγιστη που μπορεί να ληφθεί προκειμένου για ενίσχυση) και τη σχέση σεισμικής επικινδυνότητας (1). Είναι φανερό ότι με στατιστική αξία ανθρώπινης ζωής ίση με €50,000 σε καμία κατηγορία κτιρίων δεν προκύπτει συμφέρουσα η σεισμική ενίσχυση καθώς οι λόγοι ωφέλειας κόστους λίγο αυξάνονται σε σχέση με αυτούς του σχήματος 5δ. Αντίθετα αν η στατιστική αξία ανθρώπινης ζωής θεωρηθεί ίση με €500,000, τιμή πολύ υψηλή για την ελληνική πραγματικότητα (όχι όμως και για άλλες χώρες, βλ. §1.4), τότε στα χαμηλά κτίρια ενγένει, αλλά ιδιαίτερα στα χαμηλά τοιχοπληρωμένα κτίρια με πλαισιακό σύστημα, εμφανίζεται όφελος από την σεισμική τους ενίσχυση. Επιπρόσθετα δε, επειδή υπάρχουν αρκετά τέτοια κτίρια στο δομικό απόθεμα της Θεσσαλονίκης, εμφανίζεται και σημαντικό όφελος σε απόλυτες τιμές από την ενίσχυσή τους (θετικές τιμές στο σχ. 7). Σημειώνεται πως οι τιμές αυτές αναφέρονται πάντα στο σύνολο των κτιρίων της κάθε κατηγορίας για τη Θεσσαλονίκη.

Επομένως είναι σαφές ότι η μεθοδολογία παρουσιάζει ευαισθησία στην τιμή της θεωρούμενης στατιστικής αξίας της ανθρώπινης ζωής, αφού όπως φαίνεται καθαρά από τη σύγκριση των σχημάτων 7, η αύξησή της από 50,000 σε 500,000 προκάλεσε περίπου τον τετραπλασιασμό των λόγων Ω/Κ. Δεν μετέβαλλε όμως την ταξινόμηση των κατηγοριών ανάλογα με την ανάγκη ενίσχυσης (μεγαλύτερο λόγο Ω/Κ).

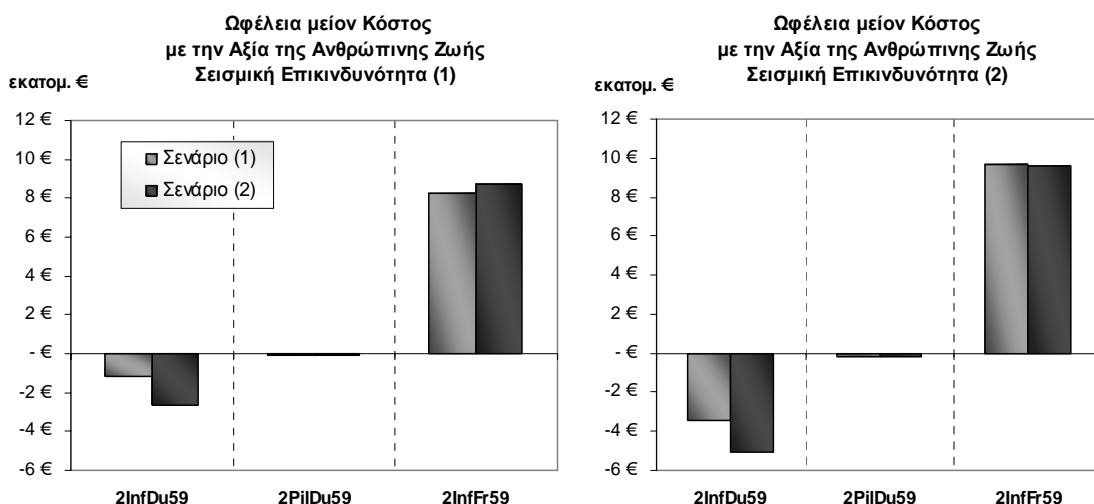


Σχήμα 6. Λόγοι ωφέλειας κόστους λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής για τη σχέση σεισμικότητας (1) και περίοδο σχεδιασμού 40 έτη.

Η επιρροή του χρονικού ορίζοντα του προγράμματος ενίσχυσης έγκειται, όπως και προηγουμένως, στην αύξηση των λόγων Ω/Κ όσο ο ορίζοντας διευρύνεται. Η γενική εικόνα δηλαδή είναι

κοινή και για τις δύο περιόδους σχεδιασμού, απλώς οι λόγοι Ω/Κ προκύπτουν περίπου 15% μεγαλύτεροι όταν ο ορίζοντας σχεδιασμού θεωρείται 40 έτη αντί για 20.

Η σύγκριση των δύο σεναρίων ενίσχυσης, σχήματα 6 και 7, δείχνει ότι οι λόγοι ωφέλεια προς κόστος διατηρούν την ίδια κατανομή για όλες τις κατηγορίες κτιρίων, με τα δύο σεισμικά σενάρια να παρουσιάζουν μικρές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιηθεί η σχέση σεισμικής επικινδυνότητας (1) (Παπαϊωάννου, 2004), η οποία βασίζεται στις παρατηρημένες τιμές, σκοπιμότερη φαίνεται η σεισμική ενίσχυση του δεύτερου σεναρίου, ήτοι ενίσχυση έως τη στάθμη ασφαλείας των κτιρίων του ΕΑΚ2000, παρά το μεγαλύτερο κόστος της. Αντίθετα εάν χρησιμοποιηθεί η σχέση (2), η οποία προέκυψε από αναλυτικούς υπολογισμούς (Παπαϊωάννου, 2004), αναδεικνύεται ως ελαφρώς σκοπιμότερη η ενίσχυση σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, δηλαδή ενίσχυση μέχρι τη στάθμη τρωτότητας των κτιρίων μετά το 1984. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης για μεγαλύτερους σεισμούς (εντάσεως μεγαλύτερης από VIII) που δίνει η σχέση (1) συγκριτικά με την (2). Άρα είναι δικαιολογημένο για την σχέση σεισμικής επικινδυνότητας (1) να υπερέχει η ενίσχυση σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τη σχέση σεισμικής επικινδυνότητας (2) με την οποία μειώνονται οι πιθανότητες για σεισμούς μεγαλύτερων εντάσεων. Ένας άλλος τρόπος να διατυπωθεί το ίδιο συμπέρασμα είναι ότι για μεγαλύτερους σεισμούς αποδοτικότερη θα είναι η ισχυρότερη ενίσχυση σε όρους λόγου ωφέλειας προς κόστος.



Σχήμα 7. Ωφέλεια μείον κόστος, λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική αξία της ανθρώπινης ζωής για τα δύο σενάρια ενίσχυσης των παλαιών χαμηλών κτιρίων και τις δύο σχέσεις σεισμικής επικινδυνότητας (1) και (2) (περίοδος σχεδιασμού 40 έτη)

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε περιληπτικά μία πιλοτικού χαρακτήρα μελέτη σχετικά με την προσεισμική ενίσχυση των παλαιών κτιρίων Ο/Σ της Θεσσαλονίκης. Με βάση την ανάλυση ωφέλειας - κόστους, η οποία βελτιώθηκε όπου υπήρχε η δυνατότητα και κρίθηκε απαραίτητο, προσεγγίστηκε το ζήτημα της σκοπιμότητας μίας προσεισμικής ενίσχυσης ευρείας κλίμακας με οικονομικά κριτήρια.

Το κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι μία εκτεταμένη επέμβαση εμφανίζεται ως ασύμφορη για τα συνηθισμένα «μη ειδικής χρήσης» παλαιά κτίρια Ο/Σ της Θεσσαλονίκης. Με την εξαίρεση των χαμηλών κτιρίων με σύστημα αμιγώς πλαισιακό, η ενίσχυση είναι προσδιορισμικά ασύμφορη ακόμα και όταν χρησιμοποιηθούν δεδομένα τα οποία αποτελούν το άνω όριο όλων των ελλογων παραδοχών που μπορούν να γίνουν ώστε να ευνοήσουν την ενίσχυση. Εξάλλου, όπως προέκυψε

από την ανάλυση ωφέλειας / κόστους, την πλέον ευνοϊκή συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (κτίρια της Θεσσαλονίκης σχεδιασμένα με το Βασιλικό Διάταγμα του 1959) έχουν τα κτίρια Ο/Σ με μικτό σύστημα, τα οποία αποτελούν και την πλειοψηφία των κτιρίων στη Θεσσαλονίκη, και άρα είναι τα τελευταία (από τα εξεταζόμενα κτίρια) που χρήζουν σεισμικής ενίσχυσης.

4 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή βασίζεται κυρίως σε αναλύσεις που έγιναν για τους σκοπούς του ερευνητικού προγράμματος 'ΑΡΙΣΤΙΩΝ' που χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ στο πλαίσιο του ΕΠΑΝ (Δομημένο Περιβάλλον και Διαχείριση Σεισμικού Κινδύνου). Οι γράφοντες επιθυμούν να ευχαριστήσουν και τον Ε.Υ. της Εργασίας 2.4 κ. Ι. Βλάχο, που πέρα από την πρόθυμη παροχή στοιχείων από την εργασία αυτή, είχε την καλωσύνη να παράσχει πρόσθετα στοιχεία με βάση την εμπειρία του στον τομέα της ασφάλισης των κατασκευών.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ATC-13, (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council, Redwood City, CA.

Coburn, A.& Spence, R., (2002). *Earthquake Protection*. Second Edition, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, England

Ellingwood, B.R. & Wen, Y.K. (2005), Risk-benefit-based design decisions for low-probability/high consequence earthquake events in Mid-America, *Prog. Struct. Engng Mater.* 2005; 7:56-70

FEMA, (1992). *A Benefit Cost - Model for the Seismic Rehabilitation of Structures*, Volume 1,2

Ferrito J. (1997), Economic Analysis Procedure for Earthquake Hazard Mitigation, *Naval Facilities Engineering Service Center*, California 1997.

Grossi, P. (2000). Earthquake Damage Assessment: From Expert Opinion to Fragility Curves, *In 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*.

Kanda, J. & Shah, H., (1997). Engineering role in failure cost evaluation for buildings, *Structural Safety*, Vol. 19, pp. 79-90.

Kappos, A., Pitilakis, K., Stylianidis, K., Morfidis, K. and Asimakopoulos, D. (1995) Cost-benefit analysis for the seismic rehabilitation of buildings in Thessaloniki, based on a hybrid method of vulnerability assessment, *3rd Intern. Conf. on Seismic Zonation*, Nice, France, Vol. I, pp. 406-413.

Kappos, A.J., et al. (2004) "Vulnerability assessment of current buildings", Ch. 4 in Synthesis of the application to Thessaloniki city, RISK-UE Report (Contract: EVK4-CT-2000-00014).

Kappos, A.J., Panagiotopoulos, C., & Panagopoulos, G. (2004) Derivation of fragility curves using inelastic time-history analysis and damage statistics, CD ROM Proceedings ICCES'04 (Madeira, Portugal, July 2004), 665-672.

Papazachos, B.C, A.A. Savaidis, Ch. A. Papaioannou and C.B. Papazachos (1999): The S. Balkan dBank of Shallow and Intermediate Depth Earthquake Macroseismic Data. *XXII Gen. Ass. of the IUGG, Birmingham, UK July 1999 (abstracts volume)*.

Penelis, G.G., Sarigiannis, D., Stavrakakis, E. and Stylianidis, K.C. (1989) A statistical evaluation of damage to buildings in the Thessaloniki, Greece, earthquake of June, 20, 1978. *Proceedings of 9th World Conf. on Earthq. Engng.*, (Tokyo-Kyoto, Japan.), Tokyo:Maruzen, VII:187-192.

Shinozuka,M., Grigoriu,M., Ingraffea,A.R., Billington,S.L., Feenstra,P., Soong,T.T., Reinhorn,A.M. and Maragakis,E. (2000), *Development of Fragility Information for Structures and Nonstructural Components*, MCCER2000

Wen, Y. K. and Kang, Y. J. (2001), Minimum Building Life-Cycle Cost Design Criteria. II: Applications, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 3,

Zerbe, R.O. and Falit-Baiamonte, A. (2001), The Use of Benefit-Cost Analysis for Evaluation of Performance-Based Earthquake Engineering Decisions, PEER 2002/06 September 2001.

Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος - Γενική Γραμματεία του Υπουργείου Οικονομίας και Οικονομικών – Δικτυακός τόπος (www.statistics.gr)

Παπαϊωάννου, Χ.Α. ΙΤΣΑΚ (2004) Σενάρια σεισμικής επικινδυνότητας – Πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας. *Τεχν. Έκθεση για την Ενότητα Εργασίας 02 του Έργου SRM-LIFE (ΕΠΙΑΝ – ΔΠ19, Ανάδοχος ΑΠΘ, Ε.Υ. Κ. Πιτιλάκης)*, ΙΤΣΑΚ, Θεσσαλονίκη, Σεπ. 2004.

Παπαζάχος, Β.Κ. και Κ.Β. Παπαζάχου (2003): Σεισμοί της Ελλάδας, *Εκδόσεις Ζήτη*, Θεσσαλονίκη σελ. 286.

ΟΑΣΠ (1995) “Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (NEAK)”, Αθήνα, 1992 (ΦΕΚ 613B/12-10-92). Αναθεώρηση το 1995 (ΦΕΚ 534B/20-6-95).

ΟΑΣΠ (2000) “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Έκδοση 2000)”, Αθήνα, 1999 (ΦΕΚ Β'2184/20-12-99) <http://www.oasp.gr>