

Αξιολόγηση επένδυσης στην επιλογή της πιθανότητας υπέρβασης σεισμικών επιταχύνσεων εδάφους σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος Investment appraisal with respect to probability of exceeding peak ground acceleration in reinforced concrete buildings

Α.Γ. Παπαχρηστίδης¹, Γ.Ν. Βαδαλούκας², Κ.Ε. Όλγα³, Β.Ι. Σόγιακας⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι τιμές των σεισμικών επιταχύνσεων εδάφους που προβλέπονται από τον ΕΑΚ2000[3], σύμφωνα με τα σεισμολογικά δεδομένα, έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής της PGA και συνεπώς της πιθανότητας υπέρβασης για 50 χρόνια ζωής των κατασκευών από οικονομική σκοπιά. Επιλύθηκαν και σχεδιάστηκαν κτίρια με διαφορετικό αριθμό ορόφων και διαφορετικούς καννάβους. Τα μισά από αυτά είχαν επάρκεια τοιχωμάτων. Έχει ήδη γίνει συσχέτιση της δομικής βλάβης και της οικονομικής απώλειας (δαπάνης κατασκευής). Η σχέση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της αναμενόμενης απώλειας με βάση πραγματικά στοιχεία βλαβών και επισκευών από προηγούμενους σεισμούς στον ελληνικό χώρο. Με βάση την σχέση δομικής βλάβης και οικονομικής απώλειας προσδιορίζεται η συνάρτηση μελλοντικών δαπανών για την κατασκευή σε σχέση με την PGA. Στηριζόμενοι στην κατανομή πιθανότητας την μέγιστης επιτάχυνσης εδάφους και την συνάρτηση κόστους κατασκευής προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή της πιθανότητας υπέρβασης από οικονομική άποψη.

ABSTRACT: Peak ground acceleration (PGA) values defined in EAK2000 are having probability of excess 10% in 50 years. In the present study the optimum value of PGA is estimated in economic terms. Several types of buildings, regarding number of storeys, span lengths, and presence of shear walls, calculated according to EAK and EKOS. Damage factor is related to economic loss. This relationship helps to estimate the expected loss based on observed damage and repairing data of previous earthquakes in the Greek region. PGA is then related to the construction cost and possible repairing cost. Optimum value of PGA is finally calculated taking into account the probability distribution of PGA and construction - repairing cost.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, 4Μ-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού aris@4m.gr

² Πολιτικός Μηχανικός, 4Μ-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού georgev@4m.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός 4Μ

⁴ Οικονομολόγος, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ(2003) η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις ζώνες σεισμικότητας (I, II, III). Η τιμή της PGA αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης ίση με 10% θεωρώντας σταθερό τον χρόνο ζωής των κατασκευών και ίσο με 50 χρόνια. Μεγαλύτερες τιμές της PGA αντιστοιχούν σε μειωμένη πιθανότητα υπέρβασης και κατά συνέπεια μικρότερη πιθανότητα να πάθει βλάβες ένα κτίριο ή να καταρρεύσει σε περίοδο 50 ετών. Έχει διαπιστωθεί ότι οι σεισμοί μέτριας έντασης προκαλούν ζημιές με αρκετά μεγάλο κόστος επισκευής.

Ο μέσος ετήσιος αριθμός κατασκευών που υφίστανται σοβαρές ζημιές (ή και κατάρρευση) στην Ελλάδα είναι 156 για ένταση σεισμού κατά Mercalli (Mercalli Intense MI) MI=VIII, 714 για MI=IX και 340 για MI=X. Τέλος, ο μέσος ετήσιος αριθμός θανάτων είναι 0.66 για MI=VIII, 1.45 για MI=IX και 3.4 για MI=X (Παπαζάχος, 1999).

Σύμφωνα με το ΙΤΣΑΚ, ο σεισμός της Αθήνας 1999, με MI=IX είχε ως αποτέλεσμα 4435 κατασκευές να υποστούν σοβαρές ζημιές (ή ακόμη και κατάρρευση) και 145 θανάτους.

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Ο αναμενόμενος βαθμός απωλειών (ζημιές, θάνατοι, κλπ) μετά από σεισμική διέγερση, ονομάζεται σεισμική επικινδυνότητα (R) και είναι ανάλογη της τρωτότητας (V) και του σεισμικού κινδύνου (H):

$$R = H \cdot V \quad (1)$$

Ο μόνος τρόπος μείωσης της σεισμικής επικινδυνότητας R είναι μειώνοντας την τρωτότητα V, το οποίο συνήθως οδηγεί σε αυξημένο κόστος κατασκευής.

Η πιθανότητα P υπέρβασης της τιμής Y ενός επαναλαμβανόμενου γεγονότος σε t-έτη είναι:

$$P = 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (2)$$

, όπου T_0 είναι η περίοδος επαναφοράς του γεγονότος που έχει τιμή Y.

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ(2003), η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού είναι 0.16g για ζώνη I, 0.24g για ζώνη II και 0.36g για ζώνη III, έχοντας πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια και περίοδο επαναφοράς T_0 ίση με 475 χρόνια.

Η σχέση που δίνει την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) σε σχέση με την ένταση MI για τον Ελλαδικό χώρο (Παπαζάχος, 1999) είναι:

$$\log(PGA) = 0.27 \cdot MI + 0.25 \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) για MI=VII δίνει $PGA=138\text{cm/sec}^2$ ή 0.138g και για MI=VIII δίνει $PGA=257\text{cm/sec}^2$ ή 0.257g.

Οι σεισμοί στην Ελλάδα προκαλούν ζημιές (Παπαζάχος, 1999) όταν:

$$PGA > 0.08g \quad (4)$$

και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA, για έναν σεισμό που έχει περίοδο επαναφοράς T_0 , στη ζώνη I είναι:

$$\text{Log (PGA)} = 0.33 \cdot I_0 + 0.07 \quad (5)$$

Η εξίσωση (5) για $T_0 = 50$ χρόνια δίνει $PGA=112\text{cm/sec}^2$ ή $0.112g$ με πιθανότητα υπέρβασης 63% όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (2).

Η μέση περίοδος επαναφοράς T_0 για έναν σεισμό έντασης MI είναι:

$$T_0 = \frac{10^{0.67 \cdot MI}}{10^{5.52}} \quad (6)$$

Για διάφορες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης από $0.16g$ έως $0.24g$ υπολογίζεται η περίοδος επαναφοράς (T_0). Θεωρώντας σταθερό τον χρόνο ζωής των κτιρίων, όσο αυξάνεται η τιμή της PGA μεγαλώνει η περίοδος επαναφοράς (T_0) και μικραίνει η πιθανότητα υπέρβασης P σύμφωνα με την εξίσωση (2). Αν δεχτούμε ότι αλλάζει ο χρόνος ζωής (t) από 50 σε 100 χρόνια και ότι η PGA δεν αλλάξει, η πιθανότητα υπέρβασης και πάλι αυξάνεται.

Αν είναι γνωστή η μέση περίοδος επαναφοράς T_0 , για συγκεκριμένη τιμή της έντασης σεισμού (I_0) μπορεί να υπολογισθεί η αντίστοιχη τιμή της PGA από τους παρακάτω τύπους (Παπαζάχος, 1999).

$$\text{Log (PGA)} = 0.277 \log (T_0) + 1.579 \quad , \text{ ΖΩΝΗ I} \quad (7)$$

$$\text{Log (PGA)} = 0.264 \log (T_0) + 1.739 \quad , \text{ ΖΩΝΗ II} \quad (8)$$

$$\text{Log (PGA)} = 0.240 \log (T_0) + 2.015 \quad , \text{ ΖΩΝΗ III} \quad (9)$$

Για Ζώνη I και περίοδο επαναφοράς $T_0 = 50$ χρόνια ο παραπάνω τύπος δίνει $PGA=0.112g$ με πιθανότητα υπέρβασης 63%. Για διάφορες τιμές της μακροσκοπικής έντασης σεισμού MI υπολογίζεται η μέση περίοδος επαναφοράς T_0 (Εξίσωση 6). Για κάθε τιμή του T_0 υπολογίζεται και η τιμή της PGA (Εξίσωση 7) και η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης P (Εξίσωση 2). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (1).

Πίνακας 1

T_0	a	ρ
50	0,112	0,63
60	0,118	0,57
70	0,123	0,51

80	0,128	0,46
90	0,132	0,43
100	0,136	0,39
200	0,165	0,22
300	0,184	0,15
400	0,199	0,12
450	0,206	0,11
676	0,240	0,07

Παρατηρείται ότι η πιθανότητα υπέρβασης του 10% δεν αντιστοιχεί σε PGA ίση με 160cm/sec² για τη Ζώνη I (EAK). Σύμφωνα με τη εξίσωση (7) για περίοδο επαναληψιμότητας 475 χρόνια η PGA είναι 200 cm/sec². Η τιμή αυτή είναι 20% μεγαλύτερη από την τιμή που προτείνεται από τον κανονισμό.

Σύμφωνα με την εξίσωση (5) η επιτάχυνση $a=0,20g$ αντιστοιχεί σε μακροσκοπική ένταση σεισμού $I_0=6,76$. Για τη Ζώνη II, σύμφωνα με τη εξίσωση (8), για περίοδο επαναφοράς $T = 475$ χρόνια η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με $a=0,28g$. Αυτή η επιτάχυνση ισοδυναμεί με μακροσκοπική ένταση σεισμού $I_0= 7,20$. Η Ζώνη I διαφέρει από την Ζώνη II μόλις 0,44 μονάδες της μακροσκοπικής έντασης σεισμού MI.

Αν θεωρηθεί $PGA=160$ cm/sec², σύμφωνα με την εξίσωση (5), η περίοδος επαναφοράς υπολογίζεται ίση με $T_0 = 180$ χρόνια και η πιθανότητα υπέρβασης είναι ίση με 25%. Αρκετά πιο μεγάλη από την πιθανότητα του 10%.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τη Ζώνη I ο EAK δέχεται μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ίση με το 80% της τιμής που προκύπτει από τη εξίσωση (7). Αναλογικά στη Ζώνη II, για περίοδο επαναφοράς $T_0=475$ χρόνια η εξίσωση (8) θα δώσει $PGA = 240/0,8 = 300$ cm/sec².

Εξετάζεται τι επίπτωση έχει η τιμή της PGA αν μεταφερθούμε «μια ζώνη πίσω». Η εξίσωση (7) για $PGA= 300$ cm/sec² δίνει μέση περίοδο επαναφοράς (T_0) ίση με 1738 χρόνια. Η πιθανότητα υπέρβασης P σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με 3%.

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ – ΚΟΣΤΟΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν 8 κτίρια. Τέσσερα από αυτά είχαν πέντε ορόφους και τέσσερα είχαν τρεις ορόφους. Η απόσταση (κάνναβος) μεταξύ των υποστυλωμάτων ήταν 3.00m ή 7.00m και τα μισά κτίρια είχαν επάρκεια τοιχωμάτων. Η ανάλυση και η διαστασιολόγηση για το οπλισμένο σκυρόδεμα έγινε σύμφωνα με τον EAK(2003) και τον ΕΚΟΣ(2000). Η σπουδαιότητα των κτιρίων ήταν II, δηλαδή για συνήθη κτίρια και η θεμελίωση δεν λήφθηκε υπόψη καθώς όλα τα κτίρια θεωρήθηκαν πακτωμένα στο έδαφος. Το ίδιο βάρος του σκυροδέματος θεωρήθηκε ίσο με 25 KN/m³ και το κινητό φορτίο ίσο με 2 KN/m². Αυτό που άλλαζε σε κάθε επίλυση ήταν η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού, η οποία πήρε τιμές μεταξύ 0.16g και 0.24g. Το φορτίο τοιχοποιίας για τις εξωτερικές δοκούς θεωρήθηκε ίσο με 9.00 KN/m και για τις εσωτερικές δοκούς ίσο με 4.5 KN/m. Για τις μεταβλητές δράσεις ο συντελεστής ψ^2 ήταν ίσος με 0,3. Για την δυναμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ελαστικό φάσμα που αντιστοιχεί στο έδαφος A. Η κατακόρυφη συνιστώσα

δεν λήφθηκε υπόψη. Η ανάλυση και η διαστασιολόγηση των κατασκευών έγινε με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος STRAD.

Ο στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν να βρεθεί ποια είναι η επιπλέον οικονομική επιβάρυνση (κατασκευαστικό κόστος) για κάθε κτίριο αν η PGA πάρει τιμές μεγαλύτερες από 0.16g. Οι τιμές της PGA που εξετάστηκαν ήταν 0,18g, 0,20g, 0,22g, 0,24g. Το κατασκευαστικό κόστος κάθε κτιρίου βρέθηκε με προμέτρηση του χάλυβα ενώ η ποσότητα του σκυροδέματος για κάθε κτίριο θεωρήθηκε ότι δεν μεταβάλλεται. Το κόστος του χάλυβα λαμβάνεται ίσο με 0.8€/Kg (προμήθεια) και του σκυροδέματος ίσο με 73,36 €/κ.μ. (προμήθεια).

Η αύξηση του κόστους κατασκευής για διάφορες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης κυμαίνεται από 3,2% μέχρι 4,7% ,παίρνοντας ως δεδομένο ότι το κόστος του φέροντα οργανισμού είναι ίσο με το 30% του κόστους ολόκληρης της κατασκευής. Αναλυτικότερα στον πίνακα (2) παρουσιάζεται η μέση ποσοστιαία αύξηση του κόστους του φέροντα οργανισμού για τις διάφορες τιμές της PGA.

Το κατασκευαστικό κόστος θεωρείται ίσο με 1050€/τ.μ για κτίρια μεγαλουπόλεων, ενώ για κτίρια στην επαρχία υπολογίζεται ίσο με 800€/τ.μ. Τέλος σε απομακρυσμένα νησιά, όπου απαιτείται μεταφορά των δομικών υλικών, το κατασκευαστικό κόστος θεωρείται ίσο με 1300€/τ.μ. Στις μεγαλουπόλεις το επιπλέον κατασκευαστικό κόστος για PGA=0,24g είναι ίσο με 34,30€/τ.μ για κτίρια με μικρό καννάβου και 49 €/τ.μ για κτίρια με μεγαλύτερους καννάβους. Σε επαρχιακές πόλεις το επιπλέον κατασκευαστικό κόστος υπολογίζεται ίσο με 26,13 €/τ.μ για κτίρια μικρού καννάβου και 37,33 €/τ.μ για κτίρια μεγάλου καννάβου. Σε μικρά απομακρυσμένα νησιά η επιπλέον επιβάρυνση είναι για κτίρια μικρού καννάβου ίση με 42,46 €/τ.μ και για κτίρια μεγάλου καννάβου 60,66 €/τ.μ.

Πίνακας 2 : Ποσοστιαία αύξηση κόστους φέροντα οργανισμού

Επιτάχυνση <i>a</i>	0,18g	0,20g	0,22g	0,24g
κτίριο μικρού καννάβου	9,50%	9,70%	9,72%	9,80%
κτίριο μεγάλου καννάβου	13,20%	13,50%	13,90%	14,00%

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

Η κατά μέσο όρο οικονομική απώλεια, υπολογισμένη σε τιμές 2004 (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία), για σοβαρές βλάβες (ή κατάρρευση) είναι 50900 €, και η κατά μέσο όρο οικονομική απώλεια για μικρές ή μεσαίου μεγέθους βλάβες είναι 20400 € (Παπαζάχος,1999). Ακολουθεί η παρουσίαση των οικονομικών απωλειών των δύο σχετικά πρόσφατων σεισμών Αθήνας και Πάτρας.

Στο σεισμό της Αθήνας η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που μετρήθηκε (ΙΤΣΑΚ,1999) σε περιοχές με σοβαρές βλάβες ήταν μεγαλύτερες από την εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού του ΕΑΚ(2003) για ζώνη Ι, που είναι 0.16g. Το κόστος επισκευής για σοβαρές ζημιές (ή καταρρεύσεις) σύμφωνα με το ΥΠΕΧΩΔΕ(1999) ήταν 360 €/m². Η Επιστημονική Επιτροπή Αντισεισμικής Μηχανικής του ΤΕΕ εκτίμησε ότι το κόστος επισκευής είναι 540€/m² (2000) .

Ο συντελεστής ψ ορίζεται ως ο λόγος του κόστους επισκευής προς το κόστος ανακατασκευής και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Κάππος Α.-Λεκκίδης Β., 2003):

$$\psi = 0.9531 \cdot \varphi^2 + 0.0723 \cdot \varphi + 0.115 \quad (10)$$

, όπου φ είναι ο συντελεστής βλάβης ο οποίος παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και ορίζεται ως το ποσοστό της μείωσης της φέρουσας ικανότητας προς την επιθυμητή (αρχική) φέρουσα ικανότητα.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Η ελάχιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA_{\min}) που προκαλεί ζημιές σε κτίριο το οποίο σχεδιάστηκε με συντελεστή συμπεριφοράς q δίνεται από τη εξίσωση:

$$PGA_{\min} = \frac{a_g}{q} \quad (11)$$

, όπου a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση της αντίστοιχης σεισμικής ζώνης.

Αυξάνοντας σταδιακά την εδαφική επιτάχυνση a_g υπολογίσθηκαν τα ισοδύναμα σεισμικά φορτία σύμφωνα με την παράγραφο 3.5 του ΕΑΚ(2003) και εκτελώντας στατική μη γραμμική ανάλυση ελέγχθηκε εάν το κτίριο καταρρέει ή όχι. Ονομάζουμε PGA_{\max} την εδαφική επιτάχυνση για την οποία το κτίριο καταρρέει ($\varphi=1$). Η PGA_{\max} παίρνει τιμές από 0.208g για $q=3.5$ έως 0.248g για $q=1$. Θεωρήθηκε γραμμική σχέση μεταξύ του δείκτη βλάβης και της εδαφικής επιτάχυνσης PGA , μεταξύ των ακραίων σημείων ($\varphi=0$, PGA_{\min}) και ($\varphi=1$, PGA_{\max}).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σχέση μεταξύ του δείκτη βλάβης και της PGA , θεωρήθηκε γραμμική:

$$\phi = f(PGA, q) = \begin{cases} b_0 + b_1 \cdot PGA & , PGA > 0.16/q \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (12)$$

Συνεπώς, για σταθερή τιμή του 'q=1,5', υπολογίζεται μία γραμμική εξίσωση του δείκτη βλάβης. Από τις εξισώσεις (10) και (12) προκύπτει η σχέση συσχετισμού του κόστους επισκευής (Ψ) με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA :

$$\psi = (0,9531 \cdot \phi^2 + 0,0723 \cdot \phi + 0,115) \cdot Y$$

$$\Psi = \begin{cases} \left(\begin{array}{l} 0,9531 \cdot (b_0 + b_1 \cdot PGA)^2 + \\ 0,0723 \cdot (b_0 + b_1 \cdot PGA) + \\ 0,115 \end{array} \right) \cdot Y & , PGA > 0.16/q \\ 0.115 \cdot Y & , otherwise \end{cases} \quad (13)$$

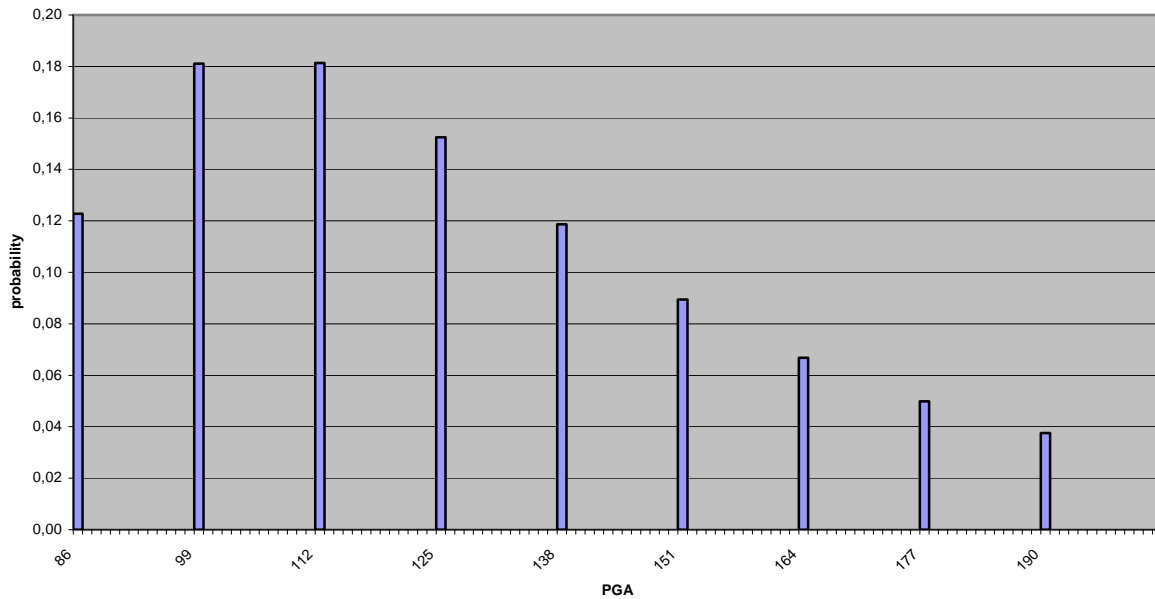
, όπου Y θεωρείται ίσο με $540 \text{ €} / \text{m}^2$.

Για κάθε μία από τις 13 κλάσεις της μεταβλητής PGA (πίνακας 3) υπολογίζεται το κόστος επισκευής (Ψ_i) το οποίο ανάγεται σε παρούσα αξία χρησιμοποιώντας την εξίσωση (14) (Brealey,):

$$PV_i = \frac{\Psi_i}{(1+r)^{50}}, \quad r: \text{προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate), } i=1, \dots, 9 \quad (14)$$

Πίνακας 3

<i>PGA 1000</i>	<i>Πιθανότητα υπέρβασης</i>	<i>Πιθανότητα εμφάνισης</i>	<i>Κατανομή πιθανότητας</i>
80-92	0,966-0,870	0,096	0,115
93-105	0,860-0,718	0,141	0,169
106-118	0,706-0,564	0,142	0,169
119-131	0,553-0,434	0,119	0,142
132-144	0,426-0,333	0,093	0,111
145-157	0,326-0,257	0,07	0,083
158-170	0,252-0,199	0,052	0,062
171-183	0,196-0,157	0,039	0,047
184-196	0,154-0,125	0,029	0,035
197-209	0,122-0,100	0,022	0,027
210-222	0,099-0,081	0,017	0,020
223-235	0,080-0,067	0,013	0,016
236-240	0,066-0,062	0,004	0,004



Σχήμα 1 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της PGA

Υπολογίζεται το αναμενόμενο κόστος επισκευής σε παρούσα αξία, χρησιμοποιώντας την πιθανότητα κατανομής f^{nt} της μεταβλητής 'PGA' και στη συνέχεια υπολογίζεται η μείωση του αναμενόμενου κόστους επισκευής, θεωρώντας σαν τιμή αναφοράς το αναμενόμενο κόστος επισκευής για $a=0,16g$.

$$E(PV) = \sum_{i=1}^9 \pi_i \cdot PV_i \quad (15)$$

Πίνακας 4 : Αναμενόμενο κόστος επισκευής σε παρούσα αξία

επιτάχυνση a	αναμενόμενο κόστος επισκευής €/τ.μ
$a=0,16g$	45,58
$a=0,18g$	23,94
$a=0,20g$	15,76
$a=0,22g$	15,76
$a=0,24g$	11,67

Τέλος, ένα κριτήριο επιλογής απόφασης (Brealey,) όπως 'Καθαρή Παρούσα Αξία' (Net Present Value NPV) για το βέλτιστο 'α'. Στους πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κτίρια μεγαλουπόλεων.

$$\begin{aligned} NPV &= E(\text{Παρόν κόστος επισκευής}) - \text{Κόστος κατασκευής} \\ &= E(PV (\text{κόστος επισκευής})) - W \end{aligned} \quad (16)$$

Πίνακας 5 : Καθαρή παρούσα αξία απόφασης (κτίρια με μικρούς καννάβους σε μεγαλούπολη)

επιτάχυνση	επιπλέον κόστος κατασκευής €/τ.μ	μείωση αναμενόμενου κόστους επισκευής €/τ.μ	καθαρή παρούσα αξία της απόφασης
a=0,18g	46,20	21,64	-24,56
a=0,20g	47,25	29,82	-17,43
a=0,22g	48,65	29,82	-18,83
a=0,24g	49,00	33,91	-15,09

Πίνακας 6 : Καθαρή παρούσα αξία απόφασης (κτίρια με μεγάλους καννάβους σε μεγαλούπολη)

επιτάχυνση	επιπλέον κόστος κατασκευής €/τ.μ	μείωση αναμενόμενου κόστους επισκευής €/τ.μ	καθαρή παρούσα αξία της απόφασης
a=0,18g	36,75	21,64	-15,11
a=0,20g	33,95	29,82	-4,13
a=0,22g	34,02	29,82	-4,2
a=0,24g	34,30	33,91	-0,39

Όπως έχει προαναφερθεί, το κατασκευαστικό κόστος διαφέρει για τις διάφορες περιοχές της χώρας. Στην επαρχία είναι 800 €/τ.μ. Στους πίνακες 7 και 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κτίρια επαρχιακών πόλεων μικρού καννάβου και μεγάλου καννάβου αντίστοιχα.

Πίνακας 7 : Καθαρή παρούσα αξία απόφασης (κτίρια με μικρούς καννάβους σε επαρχιακή πόλη)

επιτάχυνση	επιπλέον κόστος κατασκευής €/τ.μ	μείωση αναμενόμενου κόστους επισκευής €/τ.μ	καθαρή παρούσα αξία της απόφασης
a=0,18g	35,20	21,64	-13,56
a=0,20g	36,00	29,82	-6,18
a=0,22g	37,06	29,82	-7,24
a=0,24g	37,33	33,91	-3,42

Πίνακας 8 : Καθαρή παρούσα αξία απόφασης (κτίρια με μεγάλους καννάβους σε επαρχιακή πόλη)

επιτάχυνση	επιπλέον κόστος κατασκευής €/τ.μ	μείωση αναμενόμενου κόστους επισκευής €/τ.μ	καθαρή παρούσα αξία της απόφασης
a=0,18g	25,33	21,64	-3,69
a=0,20g	25,86	29,82	3,96
a=0,22g	25,92	29,82	3,90
a=0,24g	26,13	33,91	7,78

Σε επαρχιακές πόλεις η επιλογή της PGA ίση με 0,24g, που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 7%, δίνει καθαρή παρούσα αξία 7,78. Η μείωση του αναμενόμενου κόστους επισκευών είναι σημαντική σε σχέση με το επιπλέον κατασκευαστικό κόστος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σαν μία πρώτη εκτίμηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης πιθανότητας υπέρβασης σε οικονομικούς όρους, αξιολογήσαμε την “επένδυση” επιλογής διαφόρων τιμών της PGA, υπολογίζοντας την καθαρή παρούσα αξία κάθε περίπτωσης. Η πιθανότητα υπέρβασης του 10% που αποδέχεται ο κανονισμός κρίνεται ικανοποιητική στην παρούσα εργασία καθώς η μείωση της πιθανότητας υπέρβασης απαιτεί αύξηση του κατασκευαστικού κόστους μεγάλη σε σχέση με τα αναμενόμενα οικονομικά οφέλη αυτής της επιλογής. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση κτιρίων επαρχιακών πόλεων όπου το κατασκευαστικό κόστος είναι αρκετά πιο μικρό από αυτό των μεγαλουπόλεων. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη τιμή της πιθανότητας υπέρβασης είναι 7% και αντιστοιχεί σε PGA ίση με 0,24g για Ζώνη εδάφους I.

Για την περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος θα πρέπει να υπολογισθεί, από στατιστικά δεδομένα, το κόστος ανθρώπινης ζωής αλλά και η οικονομική απώλεια εξαιτίας των επιπτώσεων του σεισμού στις συνθήκες ζωής και την ψυχολογία των σεισμοπαθών. Επίσης θα μπορούσε να υπολογισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το αναμενόμενο κόστος επισκευής. Αυτό προϋποθέτει την εύρεση μιας ακριβέστερης σχέσης του δείκτη βλάβης (ϕ) και της PGA καθώς και τον υπολογισμό του μέσου κόστους επισκευής ανά τμ από μετρήσεις σε επαρχιακές πόλεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brealey R. A., Myers S.C., “Principles of Corporate Finance”, *Irwin McGraw-Hill*, 6th edition
Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, PrEN 1998-1, par. 3.2.2.5 (2)
Eurocode 2: Design of concrete structures, PrEN 1992-1-1
“GT.STRUDDL Structural Design and Analysis Software”, version 28, *Georgia Institute of Technology – CASE Center*
“STRAD Structural Analysis Workstation for RC Structures”, version 2005, *4M-VK Civil Engineering Software* (www.strad.gr)
Γενική Γραμματεία Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας Ελλάδος (www.statistics.gr)
Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ), 2003
Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΟΣ), 2000
Επιστημονική επιτροπή αντισεισμικής μηχανικής, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2000
Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ITSAK), (www.itsak.gr)
Κάππος Α., Λεκίδης Β., Σαλονικιός Θ., Αντωνιάδης Κ., Παρασκευόπουλος Η.,(2003),
“Συσχέτιση της δομικής βλάβης κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος με οικονομικές Απώλειες: Βαθμονόμηση βάσει δεδομένων από το σεισμό της Αθήνας (7-9-1999)”, 14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως, Ελλάδα
Παπαζάχος Β., Παπαζάχου Κ. ,(1999), “Οι σεισμοί της Ελλάδος”, *Εκδόσεις Ζήτη*, pp. 153-159
Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, (www.minenv.gr)