

Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης του κτιριακού αποθέματος της πόλης των Γρεβενών

Seismic risk scenarios for the building stock in Grevena

Ανδρέας Κάππος¹, Κοσμάς Στυλιανίδης², Αναστάσιος Σέξτος³, Λεωνίδας
Κουρή⁴, Γεώργιος Παναγόπουλος⁵, Βασίλειος Παπανικολάου⁶, Χρήστος
Παναγιωτόπουλος⁷, Ελευθερία Γκουτζίκα⁸

*Λέξεις κλειδιά: Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης, αποτίμηση, κτιριακό απόθεμα,
καμπύλες τρωτότητας, GIS*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μελέτη σεισμικής διακινδύνευσης του κτιριακού αποθέματος της πόλης των Γρεβενών. Χρησιμοποιούνται οι καμπύλες τρωτότητας που έχουν υπολογιστεί βάσει της υβριδικής μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ για την κατάστρωση μιας σειράς σεισμικών σεναρίων βασισμένων στη μικροζωνική μελέτη της ευρύτερης περιοχής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε περιβάλλον GIS και περιλαμβάνουν τις αναμενόμενες απώλειες για κάθε σεισμικό σενάριο καθώς και εκτιμήσεις για τον προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης.

ABSTRACT : A comprehensive seismic risk study for the building stock in the city of Grevena is presented. Fragility curves derived using the hybrid approach developed at AUTH are utilized for developing a series of seismic scenarios based on the microzonation study of the greater area of Grevena. Results are presented in GIS environment, and include loss estimates as well as required restoration times for each scenario.

¹ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: ajkap@civil.auth.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: kestyl@civil.auth.gr

³ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: asextos@civil.auth.gr

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, Υποψ. Διδ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: lakouris@civil.auth.gr

⁵ Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, Υποψ. Διδ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: panagop@civil.auth.gr

⁶ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc DIC, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: billy@civil.auth.gr

⁷ Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: pchr@civil.auth.gr

⁸ Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: elia2@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία βασίζεται στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του διεθνούς ερευνητικού προγράμματος Seismic Risk Management in Düzce – Grevena – Catania (SRM-DGC) που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος INTERREG IIB ARCHIMED, και επικεντρώνεται στα αποτελέσματα που προέκυψαν για την πόλη των Γρεβενών (αντίστοιχες μελέτες πραγματοποιήθηκαν και για τις πόλεις Düzce (Τουρκία) (Κάππος και συν. 2009) και Catania (Ιταλία).

Τα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης, μέσω των οποίων υπολογίζονται οι αναμενόμενες οικονομικές απώλειες, ο πιθανός χαρακτηρισμός των κτιρίων μετά από έναν σεισμό, ο εκτιμώμενος χρόνος αποκατάστασης κτλ, αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στη διάθεση της Πολιτείας και μπορούν να αξιοποιηθούν για διάφορους σκοπούς όπως ο καθορισμός κριτηρίων ιεράρχησης και καθορισμού προτεραιοτήτων στο πλαίσιο προγραμμάτων για την ενίσχυση υφισταμένων κατασκευών. Οι αποφάσεις σχετικά με την αναγκαιότητα ενίσχυσης πρέπει να βασίζονται τόσο σε τεχνικά δεδομένα όσο και σε οικονομικά, ενώ δεν πρέπει να παραβλέπονται και οι κοινωνικές παράμετροι (π.χ. η τυχόν ανάγκη μετεγκατάστασης των οικογενειών που μένουν στα κτίρια που πρόκειται να ενισχυθούν). Ενώ η ανάγκη αντιμετώπισης του προβλήματος είναι αυτονόητη μετά από έναν ισχυρό σεισμό, δε συμβαίνει το ίδιο στην περίπτωση της προσεισμικής ενίσχυσης των κατασκευών, που αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα και πλέον αμφιλεγόμενα θέματα κοινωνικής πολιτικής.

Η ανάπτυξη αξιόπιστων σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης για το κτιριακό απόθεμα μιας περιοχής βασίζεται σε μια σειρά παραγόντων όπως η λεπτομερής καταγραφή του κτιριακού αποθέματος και όλων εκείνων των στοιχείων που επηρεάζουν την τρωτότητά του, η διαθεσιμότητα των κατάλληλων εργαλείων (π.χ. καμπυλών τρωτότητας) για την εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης, καθώς και η ύπαρξη αξιόπιστων σεισμικών σεναρίων που να περιγράφουν την ισχυρή εδαφική κίνηση λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής.

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΩΝ ΓΡΕΒΕΝΩΝ

Διαδικασία συγκέντρωσης των δεδομένων του κτιριακού αποθέματος

Το πρώτο, και συχνά το πιο χρονοβόρο, στάδιο για την ανάπτυξη των σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης σχετίζεται με την αξιόπιστη συγκέντρωση των απαιτούμενων στοιχείων του κτιριακού αποθέματος που επηρεάζουν τη σεισμική τρωτότητα των κατασκευών. Για την πόλη των Γρεβενών υπήρχαν διαθέσιμα μόνο περιορισμένα στοιχεία από την ΕΣΥΕ οπότε κρίθηκε απαραίτητο να επιχειρηθεί μία νέα συλλογή στοιχείων σχετικά με τα δομικά χαρακτηριστικά των

κτιρίων, όπως το υλικό κατασκευής, το στατικό σύστημα, το ύψος, το εμβαδόν της δομημένης επιφάνειας κ.α.

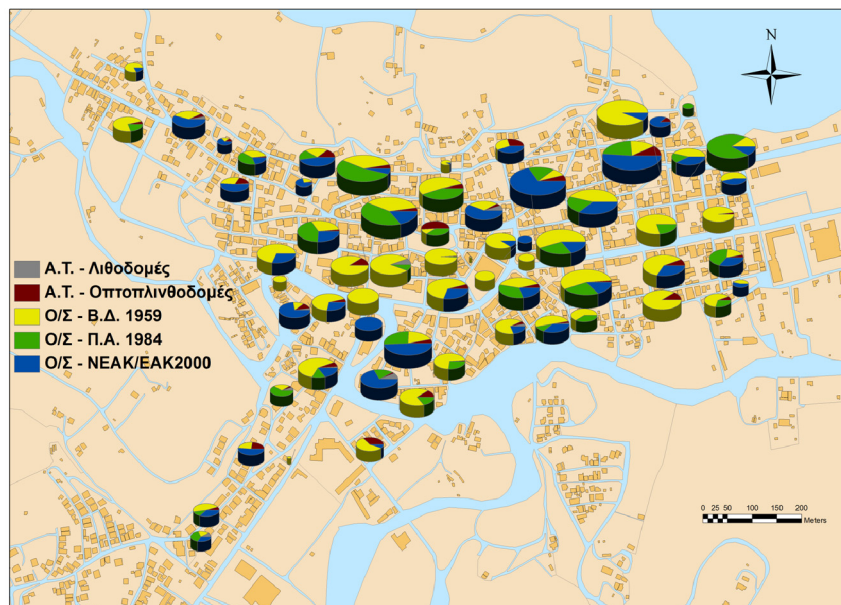
Συγκροτήθηκαν δύο διμελείς ομάδες καταγραφής, η πρώτη από μέλη του ΕΚΟΣΦΤ του ΑΠΘ και η δεύτερη από μηχανικούς της Αν. Γρε. με στόχο τη λεπτομερή καταγραφή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος, με πυκνότητα καταγραφής 1:2 (ένα στα δύο οικοδομικά τετράγωνα), μιας περιοχής που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του Δήμου Γρεβενών, κοντά στο κέντρο της πόλης. Αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τους φακέλους του αρχείου της Πολεοδομίας Γρεβενών τα οποία, όπου κρίθηκε απαραίτητο, επιβεβαιώθηκαν ή συμπληρώθηκαν έπειτα από επιτόπου αυτοψία των ομάδων καταγραφής. Στο πρώτο στάδιο της καταγραφής συγκεντρώθηκαν στοιχεία για 600 περίπου κτίρια σε 70 οικοδομικά τετράγωνα του Δήμου.

Ανάπτυξη ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων σε περιβάλλον GIS

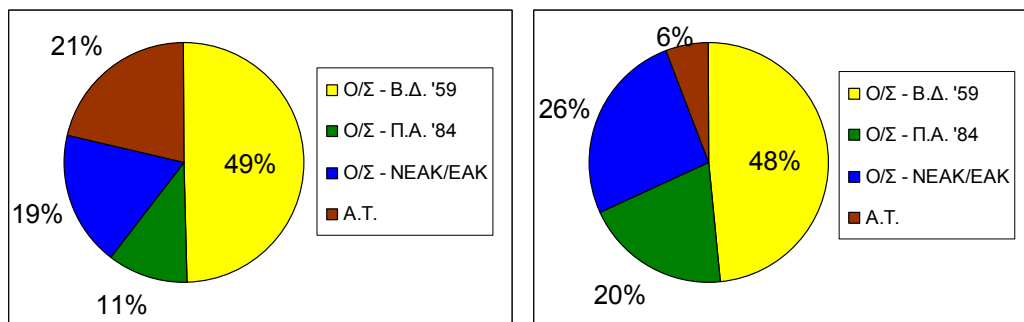
Τα αποτελέσματα της καταγραφής του κτιριακού αποθέματος εισήχθησαν σε ηλεκτρονική μορφή στην πλατφόρμα ArcGIS, χρησιμοποιώντας τον υφιστάμενο χάρτη της ΕΣΥΕ που αντιστοιχούσε στην απογραφή του 2001. Έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις για την επικαιροποίηση του χάρτη, που περιλάμβαναν την εισαγωγή των νέων κτιρίων, τη διαγραφή των κτιρίων που κατεδαφίστηκαν και ορισμένες φορές την τροποποίηση των ορίων των Ο.Τ. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν όλα τα στοιχεία του πρώτου σταδίου της καταγραφής, έπειτα από έναν συστηματικό επανέλεγχο όλων των δεδομένων και την απόρριψη αυτών που δε θα συμπεριληφθούν στα τελικά σενάρια. Ως τέτοια θεωρήθηκαν ορισμένα εγκαταλελειμμένα ή ετοιμόρροπα κτίρια και κάποια κτίρια δευτερεύουσας σημασίας (π.χ. μικρές, συχνά ξύλινες ή μεταλλικές, αποθήκες) που δεν μπορούσαν να αντιστοιχηθούν στις τυπικές κατηγορίες κτιρίων που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Έπειτα και από αυτές τις επεμβάσεις το τελικό δείγμα αποτελείται από 555 κτίρια σε 65 Ο.Τ. (**Σχήμα 1**).

Σύνθεση του κτιριακού αποθέματος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της καταγραφής, το μεγαλύτερο ποσοστό των κτιρίων της πόλης των Γρεβενών, όπως και της πλειοψηφίας των ελληνικών πόλεων, αποτελείται από κτίρια μεγάλης ηλικίας, είτε από άοπλη φέρουσα τοιχοποιία (Α.Τ.) , είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) σχεδιασμένα με το Β.Δ. του 1959. Ωστόσο, η βαρύτητα των κτιρίων αυτών, ιδιαίτερα αυτών από Α.Τ., περιορίζεται καθώς ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν των νεότερων κτιρίων από Ο/Σ (**Σχήμα 2**). Τα κτίρια του δείγματος αντιστοιχήθηκαν, βάσει των χαρακτηριστικών τους, στις τυπικές κατηγορίες που χρησιμοποιούνται από την ομάδα του ΑΠΘ στα σενάρια τρωτότητας (βλ. επόμενη ενότητα). Παρατηρήθηκε ότι 30 από τις 58 συνολικά (54 Ο/Σ και 4 Α.Τ.) τυπολογίες εμφανίζονται στην πόλη των Γρεβενών, ωστόσο ο αριθμός των κτιρίων σε πολλές από αυτές είναι αρκετά περιορισμένος (με διψήφιο αριθμό κτιρίων), για το δείγμα που εξετάστηκε, να εμφανίζεται σε 12 τυπολογίες (π.χ. ο αριθμός των υψηλών κτιρίων είναι της τάξης του 1%).



Σχήμα 1. Σύνθεση του κτιριακού αποθέματος της πόλης των Γρεβενών. Εμβαδόν δομημένης επιφάνειας ανά ηλικία και υλικό κατασκευής του φέροντος οργανισμού.



Σχήμα 2. Συγκεντρωτική παρουσίαση της σύνθεσης του κτιριακού αποθέματος της πόλης των Γρεβενών. Αριθμός κτιρίων (αριστερά) και εμβαδόν δομημένης επιφάνειας (δεξιά) ανά ηλικία και υλικό κατασκευής του φέροντος οργανισμού.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Τυπικές κατηγορίες κτιρίων

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας εκτίμησης των σεισμικών απωλειών βασίζεται στο συνδυασμό των αποτελεσμάτων ανελαστικών αναλύσεων προσομοιωμάτων φορέων αντιπροσωπευτικών για διάφορες τυπικές κατηγορίες κτιρίων με τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία από προγενέστερες σεισμικές διεγέρσεις. Με βάση

την προηγούμενη εμπειρία στο ΑΠΘ (Kappos et al. 2006), αλλά και τη διεθνή πρακτική, τα κτίρια από Ο/Σ διακρίνονται σε 54 συνολικά κατηγορίες με βάση τα παρακάτω κύρια χαρακτηριστικά:

- Στατικό σύστημα: πλαισιακό ή μικτό (πλαισίων – τοιχωμάτων)
- Ύψος κτιρίου: χαμηλά (1-3 όροφοι), μέσου ύψους (4-7 όροφοι), ψηλά (8 ή παραπάνω όροφοι)
- Διάταξη τοιχοπληρώσεων: χωρίς τοιχοπληρώσεις, ομοιόμορφη διάταξη, πιλοτή
- Αντισεισμικός κανονισμός: ΒΔ'59, Πρόσθετα Άρθρα '84, (Ν)ΕΑΚ

Αντίστοιχα, για τα κτίρια από Α.Τ. ορίζονται 4 κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό κατασκευής (λιθοδομή ή οπτοπλινθοδομή) και το ύψος του κτιρίου (χαμηλά: 1 ή 2 όροφοι και υψηλά: 3+ όροφοι).

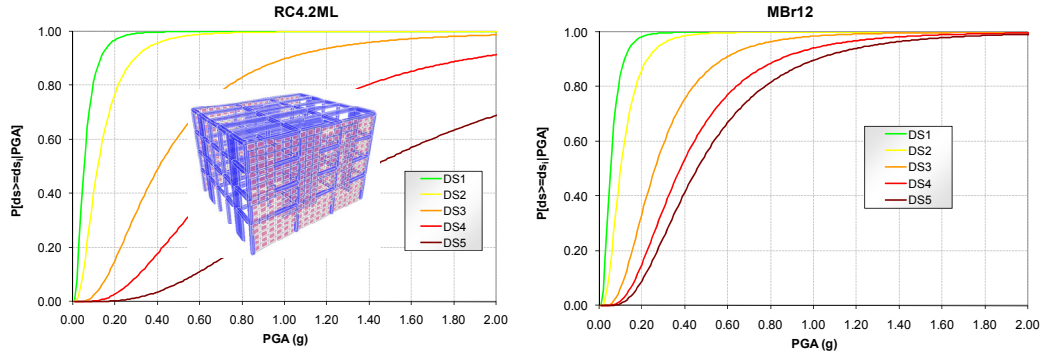
Καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της PGA

Στην πρώτη μορφή καμπυλών τρωτότητας που χρησιμοποιήθηκε στα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης ο άξονας των τετμημένων αντιστοιχεί στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (*PGA*) που μπορεί να θεωρηθεί ότι πρακτικά ισοδυναμεί με τη μακροσεισμική ένταση (*I*), ενώ ο άξονας των τεταγμένων στην πιθανότητα ένα κτίριο να βρίσκεται ή να υπερβαίνει τη στάθμη βλάβης ds_i (**Σχήμα 3**).

Οι καμπύλες τρωτότητας για τα κτίρια από Ο/Σ βασίζονται στην υβριδική μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στο Α.Π.Θ. (Kappos, 2001, Kappos et al., 2006), Παναγόπουλος & Κάππος, 2006, Kappos & Panagopoulos, 2009) η οποία συνδυάζει τα αποτελέσματα ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων προσομοιωμάτων των τυπικών φορέων για κατάλληλα επιλεγμένες σεισμικές διεγέρσεις με διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία βλαβών από παλαιότερους σεισμούς χρησιμοποιώντας κατάλληλα μοντέλα συσχέτισης της απόκρισης των φορέων με οικονομικούς δείκτες βλάβης (Kappos et al., 1998). Βάσει της υβριδικής μεθοδολογίας έχει αναπτυχθεί μια πλήρης σειρά καμπυλών τρωτότητας και για τις 54 κατηγορίες που περιγράφηκαν παραπάνω, καλύπτοντας ουσιαστικά όλες τις πιθανές τυπολογίες κτιρίων Ο/Σ που εμφανίζονται στην ελληνική επικράτεια.

Για τα κτίρια από Α.Τ. η υβριδική προσέγγιση περιλαμβάνει την ανελαστική στατική ανάλυση κατάλληλων προσομοιωμάτων (Penelis, 2006) και στη συνέχεια, μέσω της συσχέτισης των αποτελεσμάτων με στατιστικά στοιχεία βλαβών, την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας (Kappos et al., 2006). Η διαδικασία που ακολουθείται στα κτίρια από Α.Τ. δεν είναι απόλυτα συμβατή με αυτή που χρησιμοποιείται στα κτίρια από Ο/Σ και για το λόγο αυτόν έγινε η εξής παραδοχή. Αν η τιμή της διαμέσου (median) για κάποια στάθμη βλάβης PGA, ds_i μιας τυπικής κατηγορίας κτιρίων Α.Τ. προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της πλησιέστερης κατηγορίας Ο/Σ (κατά κανόνα της RC3.1LL, δηλαδή χαμηλά τοιχοπληρωμένα κτίρια με πλαισιακό σύστημα, σχεδιασμένα με τους παλιούς κανονισμούς), τότε να χρησιμοποιείται η τιμή της διαμέσου αυτής της κατηγορίας κτιρίων Ο/Σ. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται, έστω και έμμεσα, το φαινόμενο

για ορισμένες τιμές της σεισμικής δράσης τα κτίρια από Α.Τ. να εμφανίζονται λιγότερο τρωτά από κάποια αντίστοιχα κτίρια Ο/Σ.



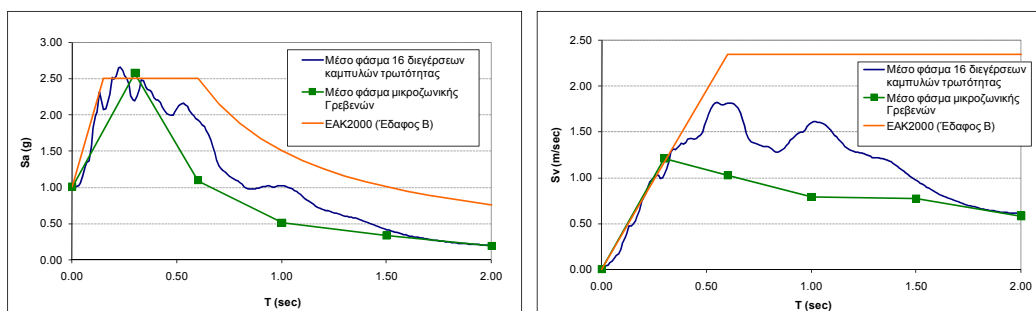
Σχήμα 3. Καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της PGA για κτίρια Ο/Σ μέσου ύψους, κανονικά τοιχοπληρωμένα, με δίδυμο σύστημα και σχεδιασμένα με το Β.Δ. '59 (αριστερά) και χαμηλά κτίρια από οπτοπλινθοδομή (δεξιά)

Αναγωγή των καμπυλών τρωτότητας

Για την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας των κτιρίων από Ο/Σ με την υβριδική μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκαν 16 επιλεγμένες σεισμικές διεγέρσεις (8 πραγματικές και 8 συνθετικές), οι οποίες στη συνέχεια ανάγονταν στις διάφορες τιμές της μακροσεισμικής έντασης (Kappos & Panagopoulos, 2009). Το μέσο φάσμα των διεγέρσεων αυτών σε σύγκριση με το μέσο φάσμα της μικροζωνικής μελέτης των Γρεβενών (Πιτιλάκης & συν., 2007) αλλά και το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ2000 για ζώνη Β, που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής που μελετάται, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4**. Είναι φανερό ότι οι τιμές της επιτάχυνσης είναι πολύ χαμηλότερες στο φάσμα της μικροζωνικής, γεγονός που καθιστά τις καμπύλες τρωτότητας συντηρητικές για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κτιρίων των Γρεβενών. Για την αναγωγή των καμπυλών σε αντιπροσωπευτική για την εξεταζόμενη περιοχή σεισμική δράση χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος διορθωτικός συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται μέσω του φάσματος ψευδοταχυτήτων, ως εξής:

$$c = E_{hfc} / E_{micr} \quad (1)$$

όπου E_{hfc} και E_{micr} το εμβαδό του μέσου φάσματος των προαναφερθεισών 16 διεγέρσεων και της μικροζωνικής, αντίστοιχα, για ένα εύρος περιόδων από 0.1 έως 2.0sec. Από την εξίσωση 1 υπολογίστηκε μια τιμή του συντελεστή c ίση με 1.38 και η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε καθολικά, για όλες τις κατηγορίες κτιρίων. Η προσέγγιση αυτή είναι αποδεκτή για σενάρια τρωτότητας ενός μεγάλου πληθυσμού κτιρίων, σε διαφορετική περίπτωση όμως θα ήταν περισσότερο κατάλληλος ο ορισμός διαφορετικών τιμών του συντελεστή c για κάθε τυπολογία κτιρίων, υπολογισμένος σε ένα εύρος περιόδων κοντά στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της τυπολογίας αυτής (π.χ. $0.8T_0 - 1.2T_0$).



Σχήμα 4. Σύγκριση του μέσου φάσματος των 16 διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας με το μέσο φάσμα της μικροζωνικής μελέτης των Γρεβενών και του ΕΑΚ2000 σε όρους επιταχύνσεων (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά)

Για τα κτίρια από Α.Τ., οι καμπύλες τρωτότητας υπολογίστηκαν αρχικά με διαφορετική προσέγγιση (ανελαστικές στατικές αντί δυναμικές αναλύσεις που είναι δύσκολες σε φορείς από Α.Τ.), η διόρθωση αυτή πάντως επέρχεται έμμεσα με την παραδοχή ότι οι τιμές των διαμέσων των καμπυλών για τα κτίρια αυτά θα είναι πάντα μικρότερες από τις αντίστοιχες των κτιρίων Ο/Σ.

Καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της S_d

Σύμφωνα με τη δεύτερη μορφή καμπυλών τρωτότητας που χρησιμοποιήθηκε στα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης ο άξονας των τετμημένων αντιστοιχεί στη φασματική μετακίνηση (S_d). Χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες αντίστασης που υπολογίστηκαν μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων για όλες τις τυπολογίες κτιρίων και εφαρμόστηκαν δύο προσεγγίσεις για την εξαγωγή αυτών των καμπυλών τρωτότητας:

- Μετατροπή των διαμέσων (medians) των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της PGA σε όρους S_d , χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του φάσματος απαίτησης – αντίστασης (Capacity Demand-Diagram Method) με τη βοήθεια του μέσου φάσματος της μικροζωνικής των Γρεβενών
- Απευθείας εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας από τις καμπύλες αντίστασης, ορίζοντας τις στάθμες βλάβης βάσει του σημείου διαρροής και του σημείου θεωρητικής αστοχίας σύμφωνα με τον Πίνακα 1.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου του φάσματος απαίτησης – αντίστασης για τα τοιχοπληρωμένα κτίρια. Καθώς τα μειωμένα (ανελαστικά) φάσματα βασίζονται σε διγραμμικές μορφές καμπυλών, δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν πολυγραμμικές (φασματικές) καμπύλες αντίστασης που περιλαμβάνουν τον κλάδο μετά την πτώση αντοχής λόγω της αστοχίας των τοιχοπληρώσεων. Συνεπώς προτείνεται, στην περίπτωση που η τιμή της S_d προκύψει μεγαλύτερη από την S_{du} για τη συγκεκριμένη τυπολογία τοιχοπληρωμένων κτιρίων, να επαναλαμβάνεται η διαδικασία χρησιμοποιώντας τη (φασματική) καμπύλη αντίστασης του αντίστοιχου ‘γυμνού’ φορέα $S_{du,bare}$.

Πίνακας 1. Ορισμός σταθμών βλάβης για την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της S_d απευθείας από τις καμπύλες αντίστασης

Στάθμη βλάβης	Ορισμός στάθμης	Κατώφλιο της S_d		
		A.T.	Ο/Σ (χωρίς τοιχοπληρώσεις)	Ο/Σ (με τοιχοπληρώσεις)
0	καμία βλάβη		0	
1	ελαφρά βλάβη		$0.7 \cdot S_{dy}$	
2	μέτρια βλάβη		$0.7 \cdot S_{dy} + 0.05 \cdot \Delta S_d$	
3	σημαντική ως βαρεία βλάβη	$0.7 \cdot S_{dy} + 0.2 \cdot \Delta S_d$	$0.7 \cdot S_{dy} + 0.3 \cdot \Delta S_d$	
4	πολύ βαρεία βλάβη	$0.7 \cdot S_{dy} + 0.5 \cdot \Delta S_d$		S_{du}
5	κατάρρευση	S_{du}	S_{du}	$S_{du,bare}$

όπου: $\Delta S_d = 0.9 \cdot S_{du} - 0.7 \cdot S_{dy}$

Οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της S_d παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι λαμβάνουν υπόψη το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο των κατασκευών, οι μέθοδοι όμως που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα. Η πρώτη προσέγγιση, της μετατροπής των PGA διαμέσων της υβριδικής μεθοδολογίας σε όρους S_d , ενδέχεται να οδηγήσει σε τιμές που είναι ασύμβατες με την καμπύλη αντίστασης του φορέα της αντίστοιχης τυπολογίας (π.χ. να προκύπτει $\bar{S}_d, ds_3 > S_{du}$ ή $\bar{S}_d, ds_2 < S_{dy}$). Η δεύτερη προσέγγιση, της απευθείας εξαγωγής από τις καμπύλες αντίστασης, βασίζεται αποκλειστικά στα αποτελέσματα αναλύσεων, μη αξιοποιώντας τις πολύτιμες πληροφορίες των στατιστικών στοιχείων βλαβών από προγενέστερους σεισμούς.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

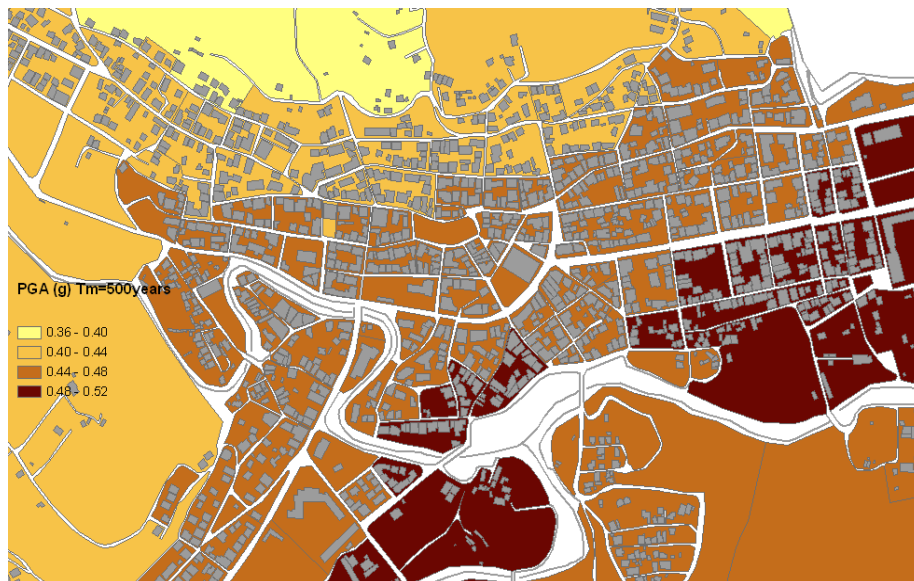
Περιγραφή των σεναρίων που καταστρώθηκαν

Καταστρώθηκαν τρία σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης, βασισμένα στις τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) ή της φασματικής μετακίνησης (S_d) που εκτιμήθηκαν από την μικροζωνική μελέτη των Γρεβενών, για σεισμό με πιθανότητα υπέρβασης: α) 50%/50 χρόνια ($T_R \approx 100$ chr.), β) 10%/50 χρόνια ($T_R \approx 500$ chr.) που αντιστοιχεί στο σεισμό σχεδιασμού του ΕΑΚ2000 και γ) 5%/50 χρόνια ($T_R \approx 1000$ chr.). Επιπλέον καταστρώθηκε και ένα πρόσθετο σενάριο χρησιμοποιώντας σταθερή σε όλη την πόλη τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, αυτή που ορίζει ο ΕΑΚ2000 (για το σενάριο αυτό υπολογίστηκε και πάλι ο συντελεστής c της εξίσωσης 1 και βρέθηκε ίσος με 0.55). Για τους λόγους που αναπτύχθηκαν παραπάνω δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη σειρά σεναρίων που

χρησιμοποιεί τις καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της PGA , θεωρώντας τα ως τα πιο αξιόπιστα καθώς συνδυάζουν και την αναλυτική προσέγγιση αλλά και τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία βλαβών και επιπλέον η υβριδική μεθοδολογία έχει δοκιμαστεί και στο παρελθόν δίνοντας αποτελέσματα που θεωρήθηκαν ρεαλιστικά (Κάππος et al., 2001, 2008). Συμπληρωματικά και για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και ορισμένα αποτελέσματα από τα σενάρια βάσει των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της S_d . Η πιθανοτική προσέγγιση που ακολουθείται στην αντιμετώπιση του φαινομένου οδηγεί στην απόφαση να χρησιμοποιείται ως μονάδα αναφοράς το Ο.Τ. αντί για το μεμονωμένο κτίριο (το Ο.Τ. είναι και η μικρότερη μονάδα που χρησιμοποιείται σε τέτοιου τύπου σενάρια).

Χωρική κατανομή της σεισμικής διέγερσης

Η μικροζωνική μελέτη χρησιμοποίησε 19 αντιπροσωπευτικά εδαφικά προσομοιώματα της ευρύτερης περιοχής των Γρεβενών βάσει των οποίων επετεύχθη ο διαχωρισμός της περιοχής σε ζώνες όμοιας σεισμικής απόκρισης και ο υπολογισμός των αναμενόμενων σεισμικών δράσεων (φάσμα απόκρισης) στην επιφάνειά τους για κάθε σεισμικό σενάριο. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία αυτά έγινε η αντιστοίχιση των τιμών της σεισμικής διέγερσης σε κάθε Ο.Τ. χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές χωρικής παρεμβολής – μέθοδος kriging (Emery, 2005) – που ήταν διαθέσιμες στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

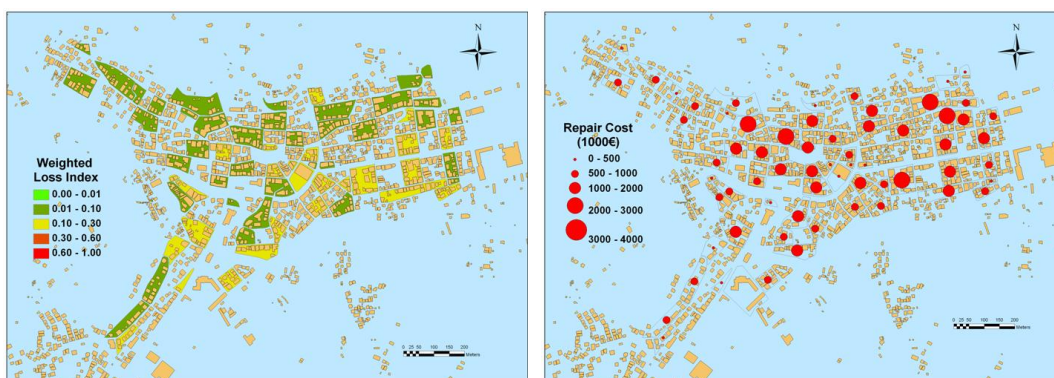


Σχήμα 5. Χωρική κατανομή της PGA σε κάθε Ο.Τ. για το σεισμικό σενάριο των 500χρ.

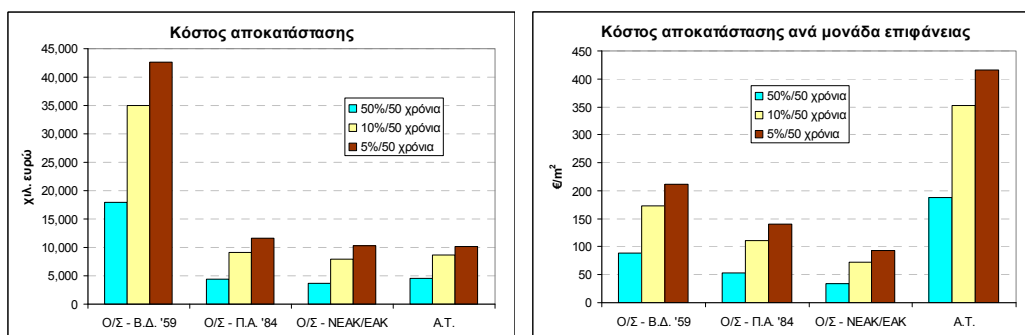
Οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που προβλέπει η μικροζωνική μελέτη (Πιτιλάκης και συν. 2008) για τα τρία σεισμικά σενάρια στην υπό μελέτη περιοχή κυμαίνονται στα εξής όρια: α) Σενάριο 100 χρόνων $PGA=0.21-0.30g$, β) Σενάριο 100 χρόνων $PGA=0.36-0.52g$, γ) Σενάριο 100 χρόνων $PGA=0.45-0.61g$.

Σενάρια βάσει των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της *PGA*

Στην πρώτη σειρά σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης έγινε χρήση των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης *PGA*. Εκτιμήθηκε, σε κάθε Ο.Τ., ο σταθμισμένος δείκτης απωλειών, το μέσο κόστος αποκατάστασης (λήφθηκε ίσο με €800/m²), καθώς και η κατάταξη των κτιρίων στις συνήθεις κατηγορίες που χρησιμοποιούνται στο μετασεισμικό έλεγχο (Πράσινα – Κίτρινα – Κόκκινα). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε περιβάλλον GIS στα **Σχήματα 6, 8**.



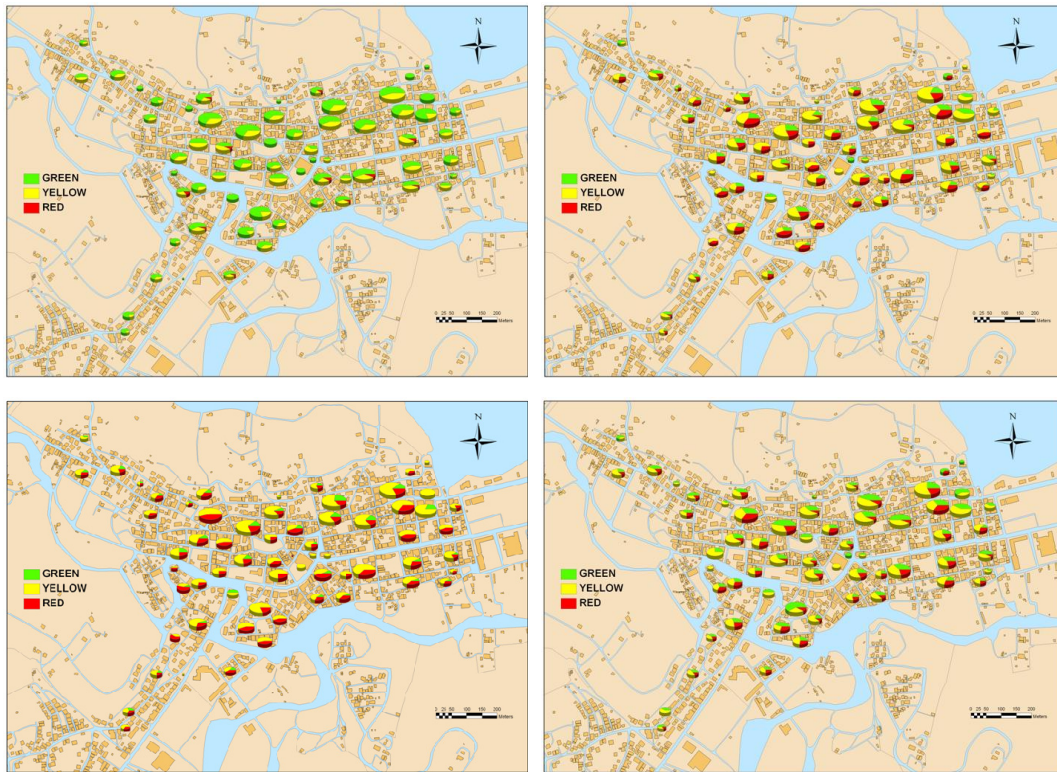
Σχήμα 6. Σταθμισμένος δείκτης απωλειών για το σενάριο των 100 ετών (αριστερά) και εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης για το σενάριο των 500 ετών (δεξιά)



Σχήμα 7. Εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης ανά ηλικία κτιρίων και υλικό κατασκευής σε απόλυτους αριθμούς (αριστερά) ή ανηγμένο στη δομημένη επιφάνεια (δεξιά)

Όπως ήταν αναμενόμενο (**Σχήμα 7**) οι μεγαλύτερες απώλειες αναμένονται στα κτίρια μεγάλης ηλικίας, ενώ υπάρχει ουσιαστική βελτίωση με την πρόοδο της επιστημονικής γνώσης και την εισαγωγή των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Σε απόλυτους αριθμούς εκτιμάται ότι τις σημαντικότερες απώλειες θα υποστούν τα κτίρια από Ο/Σ που έχουν σχεδιαστεί με τους παλιούς κανονισμούς (Β.Δ. '59), κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω του μεγάλου αριθμού αυτών

των κτιρίων, ενώ το ανηγμένο κόστος στο εμβαδόν της δομημένης επιφάνειας προβλέπεται να είναι σημαντικότερο στις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία.



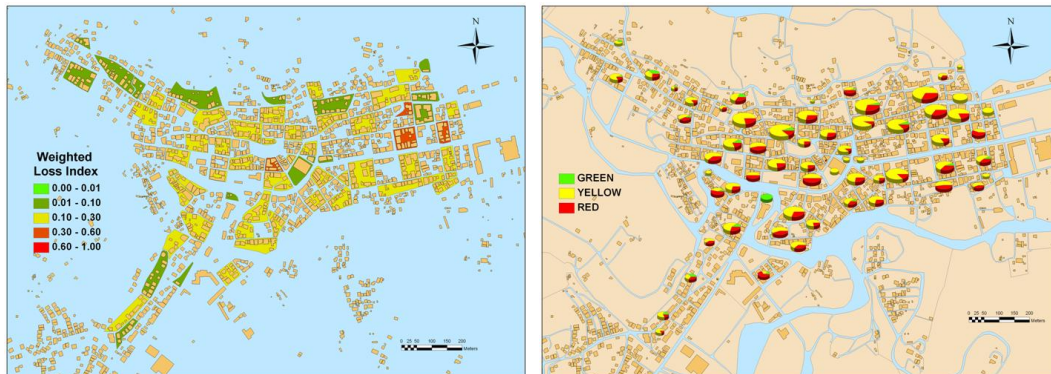
Σχήμα 8. Εκτιμώμενος χαρακτηρισμός των κτιρίων για το σενάριο των 100 ετών (πάνω αριστερά), των 500 ετών (πάνω δεξιά), των 1000 ετών (κάτω αριστερά) και την επιτάχυνση σχεδιασμού του ΕΑΚ2000 (κάτω δεξιά)

Σενάρια βάσει των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της S_d

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και στη δεύτερη σειρά σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης χρησιμοποιώντας τις καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της φασματικής μετακίνησης S_d . Παρουσιάζονται, ενδεικτικά, ορισμένα αποτελέσματα στο **Σχήμα 9**, ενώ περισσότερες πληροφορίες για τα σενάρια μπορούν να αναζητηθούν στο τελικό παραδοτέο του SRM-DGC (Karpos et al., 2009).

Στον πίνακα 2 συνοψίζεται το εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης για τις τρεις σειρές σεναρίων που αναπτύχθηκαν. Παρά τις επιμέρους διαφορές που υπάρχουν ανά τυπολογία κτιρίων τα σενάρια βάσει των PGA καμπυλών τρωτότητας έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά που βασίστηκαν στην 1^η προσέγγιση για την εξαγωγή των καμπυλών συναρτήσει της S_d (φαινόμενο αναμενόμενο καθώς

ουσιαστικά έγινε μετατροπή των PGA διαμέσων σε όρους S_d). Η δεύτερη προσέγγιση έδωσε περισσότερο συντηρητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα για ορισμένες τυπολογίες κτιρίων Ο/Σ μεγάλης ηλικίας ή από φέρουσα τοιχοποιία.



Σχήμα 9. Σταθμισμένος δείκτης απωλειών (1^η προσέγγιση S_d καμπυλών τρωτότητας - αριστερά) και εκτιμώμενος χαρακτηρισμός των κτιρίων (2^η προσέγγιση S_d καμπυλών τρωτότητας - δεξιά) για το σενάριο των 500 ετών

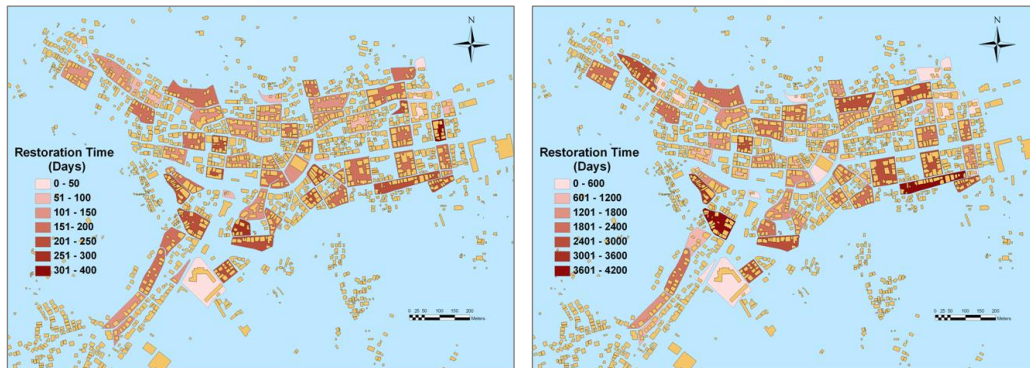
Πίνακας 2. Εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης (κ€)

Σεισμικό σενάριο	Σενάριο βάσει PGA καμπυλών	Σενάριο βάσει S_d καμπυλών – 1 ^η προσέγγιση	Σενάριο βάσει S_d καμπυλών – 2 ^η προσέγγιση
100 ετών	61,352	68,964	83,424
500 ετών	121,500	116,773	160,257
1000 ετών	149,424	142,371	197,717
EAK2000	104,216	-	-

Σενάρια σεισμικής αποκατάστασης

Στο τελικό στάδιο της μελέτης αναπτύχθηκαν δύο σειρές σεναρίων σεισμικής αποκατάστασης στα οποία εκτιμάται ο αναμενόμενος χρόνος αποκατάστασης των κτιρίων κάθε τυπολογίας αν αυτά έχουν υποστεί κάποια συγκεκριμένη στάθμη βλάβης. Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες αποκατάστασης που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος για όλες τις τυπολογίες κτιρίων χρησιμοποιώντας μια συνδυαστική μέθοδο κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη στατιστικά στοιχεία από πραγματικούς χρόνους αποκατάστασης χαρακτηριστικών τύπων κτιρίων παράλληλα με την κρίση ειδικών. Αναπτύχθηκε μια σειρά ‘αισιόδοξων’ σεναρίων, σύμφωνα με τα οποία θα υπάρχει ένα διαθέσιμο συνεργείο αποκατάστασης για κάθε κτίριο που παρουσίασε βλάβες και μία δεύτερη σειρά ‘απαισιόδοξων’ σεναρίων εκτιμώντας ότι θα υπάρχει ένα

συνεργείο για κάθε Ο.Τ. (η εκτίμηση των γραφόντων είναι ότι η πραγματικότητα βρίσκεται κάπου στη μέση). Περισσότερα σενάρια δίνονται στο τελικό παραδοτέο του SRM-DGC (Kappos et al., 2009).



Σχήμα 10. Εκτιμώμενος χρόνος για 100% αποκατάσταση της πληγείσας περιοχής βάσει μιας αισιόδοξης (αριστερά) και μιας απαισιόδοξης (δεξιά) προσέγγισης για το σεισμικό σενάριο των 500 ετών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκαν τα κυριότερα σημεία μιας ολοκληρωμένης μελέτης τρωτότητας και διακινδύνευσης για το κτιριακό απόθεμα της πόλης των Γρεβενών. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, σε συνδυασμό με το τμήμα που αφορούσε την εκτίμηση της σεισμικής διέγερσης αλλά και τα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης για τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, πιστεύεται ότι αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη μελέτη σεισμικής διακινδύνευσης που έχει εκπονηθεί μέχρι στιγμής στον ελληνικό χώρο. Στο γεγονός αυτό συνετέλεσε η αξιοποίηση της εμπειρίας που έχει αποκτηθεί από αντίστοιχες προγενέστερες εργασίες που αφορούσαν την πόλη του Βόλου (Κάππος και συν., 2001) και της Θεσ/νίκης (Kappos et al., 2008) καθώς και η ωρίμανση της μεθοδολογίας, μέσω και της όσμωσής της με τη διεθνή πρακτική.

Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια της πολιτείας, στη συγκεκριμένη περίπτωση της τοπικής αυτοδιοίκησης των Γρεβενών, ώστε να μπορεί να καθορίζει τις προτεραιότητές της για την ορθολογική διαχείριση του σεισμικού κινδύνου. Επιπλέον η καταχώριση σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων των στοιχείων του κτιριακού αποθέματος δίνει τη δυνατότητα, μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα μετά από ένα σεισμό (της τάξης των λίγων λεπτών από τη στιγμή που εκτιμηθεί η ισχυρή εδαφική κίνηση), να παράγονται αντίστοιχα σενάρια τα οποία θα αποτελούν έναν χρήσιμο οδηγό για τις αρμόδιες υπηρεσίες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Emery, X., "Simple and Ordinary Kriging Multigaussian Kriging for Estimating recoverable Reserves", *Mathematical Geology*, Vol. 37, No. 3 (2005) 295-319.

Kappos, A.J., Stylianidis, K.C. and Pitilakis, K.D., "Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment", *Natural Hazards*, Vol. 17, No. 2 (1998) 177-192.

Kappos, A.J., "Seismic vulnerability assessment of existing buildings in Southern Europe", Keynote lecture, *Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Potenza/Matera, Italy (2001) CD ROM Proceedings

Kappos, A.J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C. and Penelis, G., "A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 4 (2006) 391-413.

Kappos, A.J., Panagopoulos, G. and Penelis, G., "Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, No. 10-11 (2008) 836-850.

Kappos, A.J. and Panagopoulos, G., "Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece", *Structure and Infrastructure Engineering* (2009) In press, doi:10.1080/15732470802663771

Kappos, A.J., Stylianidis, K.C., Sextos, A., Papanikolaou, V., Panagopoulos, G., Kouris, L., Goutzika, E., "SRM-DGC. Development and Proposition for Implementation of an Efficient Methodology and Appropriate Local Instruments for the Management, Prevention and Reduction of Seismic Risk in Düzce-Turkey, Grevena-Greece and Catania-Italy. D14: Vulnerability Analysis and Loss Estimation in Grevena." Aristotle University of Thessaloniki, Greece (2009)

Penelis, G. "An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry (URM) structures", *Journal of earthquake engineering*, Vol. 10, No. 3 (2006) 359-379.

Κάππος, Α.Ι., Μορφίδης, Κ. και Χατζηνικολάου, Ν., "Μελέτη τρωτότητας και σεισμικής διακινδύνευσης της πόλης του Βόλου", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη (2001) τόμος Β, 163-172.

Κάππος, Α., Σέξτος, Α., Παπανικολάου, Β., Κουρής, Α., Παναγόπουλος, Γ., Στυλιανίδης, Κ. "Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης του κτιριακού αποθέματος της πόλης Düzce με τη χρήση ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού περιβάλλοντος", 16^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος (2009).

Παναγόπουλος, Γ. και Κάππος, Α.Ι., "Υπολογισμός καμπυλών τρωτότητας για ελληνικά κτίρια από Ο/Σ", 15^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη (2006) τόμος Β, 564-576

Πιτιλάκης, Κ., Αναστασιάδης, Α., Μανάκου, Μ., Αποστολίδης, Π., Μεσσίνη, Α., Σενετάκης, Κ. και Φωτοπούλου, Σ., "Θεωρητική και πειραματική μελέτη σεισμικής απόκρισης εδαφικών σχηματισμών στην πόλη των Γρεβενών", 3^ο ΠΣΑΜΤΣ, Αθήνα (2008)