

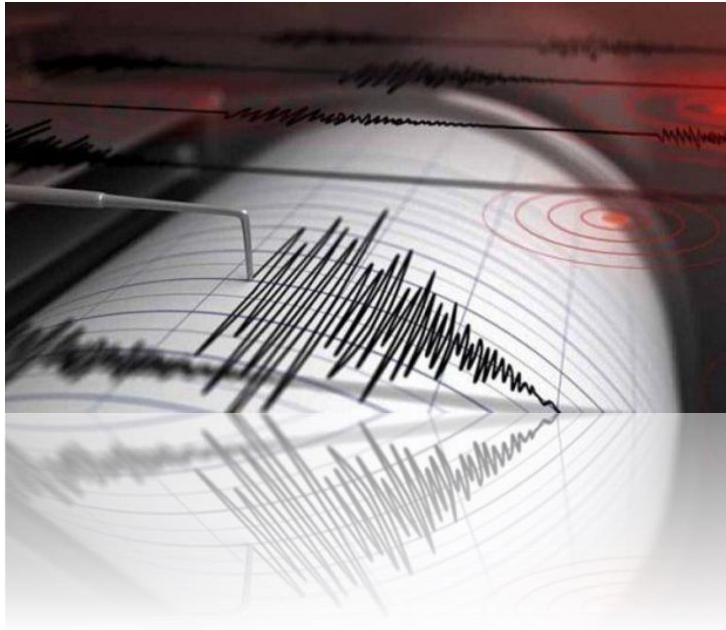
ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Αλέξανδρος Α. Ζυμπίδης

Καθηγητής Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αναλογιστής

Εμμανουήλ Λουλούδης,

Υποψήφιος Διδάκτωρ Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών



Μάιος 2023

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	3
Προσομοίωση με ρήγματα.....	3
Στατιστική Ανάλυση Ιστορικών Καταλόγων	5
Κατανομή Ζημιών Χαρτοφυλακίου	6
Αποτελέσματα – Επίλογος	8

Εισαγωγή

Παρατηρείται παγκοσμίως, κατά την περίοδο από το 2000 μέχρι και σήμερα, αύξηση των οικονομικών απωλειών, που προέρχονται από τις φυσικές καταστροφές. Μάλιστα, έχει αποδειχτεί ότι αυξάνονται σε ταχύτερο ρυθμό από το ΑΕΠ στις χώρες του ΟΟΣΑ (Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης). Οι φυσικές καταστροφές ορίζονται ως οποιαδήποτε γεγονότα συμβαίνουν απρόσμενα και επιφέρουν ακραίες οικονομικές ζημιές. Αυτές περιλαμβάνουν γεγονότα από πλημμύρες, δασικές πυρκαγιές, σεισμούς, τσουνάμι, αλλά και πανδημίες. Η οικονομική τους διαχείριση είναι πρόκληση για τις κυβερνήσεις, τις (αντ)ασφαλιστικές εταιρείες και τους χρηματοπιστωτικούς οργανισμούς, ιδιαίτερα σε κράτη που χαρακτηρίζονται από υψηλή έκθεση σε τέτοιους κινδύνους. Η πρόκληση γίνεται ακόμη πιο έντονη, όταν η πιστοληπτική ικανότητα των οργανισμών αυτών είναι πιθανά ανεπαρκής έναντι τέτοιων υψηλά καταστροφικών γεγονότων. Ευτυχώς, η αναγκαιότητα εκτίμησης των εν λόγω κινδύνων έχει γίνει ευρέως αντιληπτή από διεθνείς οργανισμούς. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Κεντρική Τράπεζα δημοσίευσε μια αναφορά τον Δεκέμβριο, στην οποία τονίζει τη σημασία συνυπολογισμού της επίδρασης των περιβαλλοντικών κινδύνων στο τραπεζικό σύστημα. Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ΟΟΣΑ, ο οποίος έχει δημοσιεύσει σχετικές αναφορές για τους κινδύνους από πλημμύρες και σεισμούς. Είναι ευρέως γνωστό, αλλά παρατηρείται και στους ιστορικούς καταλόγους, αλλά και στον Ευρωπαϊκό χάρτη του EFHR (European Facilities for Earthquake Hazard and Risk), ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα πολύ υψηλά εκτεθειμένη στον σεισμικό κίνδυνο. Μετά από τα γεγονότα της 6^{ης} Φεβρουαρίου στο νότιο μέρος της γειτονικής μας Τουρκίας και τη βορειοδυτική Συρία, αποδείχτηκε ότι τα κτίρια που βρίσκονται σε περιοχές υψηλού σεισμικού κινδύνου πρέπει να είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με τους πρόσφατους αντισεισμικούς κανονισμούς. Επιπρόσθετα, είναι επιτακτική η ανάγκη της ασφάλισής τους με κατάλληλα συμβόλαια. Επομένως, γίνεται ξεκάθαρο ότι μία αυστηρά αποδεδειγμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό ασφαλιστρών και των κεφαλαιακών απαιτήσεων, που σχετίζονται με τις φυσικές καταστροφές, είναι αναγκαία επί του παρόντος περισσότερο από ποτέ.

Προσομοίωση με ρήγματα

Καθώς τα γεγονότα των σεισμών και των αντίστοιχων οικονομικών ζημιών που περιγράφονται από τους ιστορικούς καταλόγους (λίγες εκατοντάδες έτη) είναι ανεπαρκή σε σχέση με τους χρόνους επαναδραστηριοποίησης των ρηγμάτων (αρκετές χιλιάδες έτη), προτείνουμε τα αναλογιστικά μεγέθη του εν λόγω κινδύνου να βασίζονται σε στοχαστικές προσομοιώσεις συναρτήσεως της γεωμετρίας των ρηγμάτων.

Ενώ οι ιστορικοί κατάλογοι, που περιλαμβάνουν ισχυρούς σεισμούς μεγέθους από 6.5 ως 7.3 είναι πλήρεις μετά το 1845, τα γεωμετρικά στοιχεία των ρηγμάτων όπως το μήκος, το πλάτος, η βύθιση, οι ρυθμοί ολίσθησής τους κλπ. μας παρέχουν πληροφορία επαναδραστηριοποίησής τους ως και 15 χιλιάδες χρόνια στο παρελθόν συμπληρώνοντας τα κενά των ιστορικών καταλόγων. Βασιζόμενοι στο φαινόμενο αυτό, αναπτύξαμε ένα αντίστοιχο μοντέλο τιμολόγησης ασφαλίσεων και υπολογισμού του απαιτούμενου κεφαλαίου φερεγγυότητας. Οι ενδιάμεσοι χρόνοι επαναδραστηριοποίησης των ρηγμάτων ακολουθούν είτε εκθετική κατανομή $T \sim \exp(\lambda)$, της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας περιγράφεται ως

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

είτε δεσμευμένη λογαριθμοκανονική κατανομή για την περίπτωση κατά την οποία γνωρίζουμε το έτος των πιο πρόσφατων σεισμών των συγκεκριμένων ρηγμάτων. Στην περίπτωση της λογαριθμοκανονικής $T \sim LN(\mu, s^2)$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$f_T(t) = \frac{1}{ts\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2s^2}},$$

Οι παράμετροι της κατανομής υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\mu_t = -0.5 \left(\ln(\sigma(T_f)^2 + E(T_f)^2) - 4\ln(E(T_f)) \right)$$

και

$$s_t = \sqrt{2(\ln(E(T_f)) - \mu_t)},$$

όπου $E(T_f)$ οι μέσοι χρόνοι επαναδραστηριοποίησης των ρηγμάτων, υπολογισμένοι σε όρους ενέργειας από την εξίσωση:

$$E(T_f) = \frac{10^{9.1+1.5E(M_f)}}{\mu SR L_{str} W}$$

με το $E(M_f)$ να συμβολίζει το αναμενόμενο μέγεθος του ρήγματος, SR το ρυθμό ολίσθησης, L_{str} το μήκος του ρήγματος κατά την επιφανειακή του διάρρηξη και W το πλάτος του κατά τη βύθιση. Τέλος, το $\sigma(T_f)$ συμβολίζει την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, η οποία έχει υπολογιστεί από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων. Τα μεγέθη των σεισμών ακολουθούν δεσμευμένη άνω και κάτω κανονική κατανομή με παραμέτρους εξαρτημένες από τη γεωμετρία τους.

Στατιστική Ανάλυση Ιστορικών Καταλόγων

Καθώς δεν υπάρχει αποδεδειγμένη μέθοδος μακροπρόθεσμης πρόβλεψης των σεισμών μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούμε τις μεθόδους απο-ομαδοποίησης των σεισμών (declustering), ώστε να ξεχωρίσουμε τα κύρια γεγονότα από τους μετασεισμούς και να δημιουργήσουμε ένα στοχαστικό γεννήτορα σεισμών για το μέλλον. Τα κύρια γεγονότα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και μπορούν να μοντελοποιηθούν από στάσιμες διαδικασίες Poisson προσφέροντας μακροπρόθεσμη συμπερασματολογία για κάθε περιοχή. Μεταξύ άλλων, σημαντικές μέθοδοι απο-ομαδοποίησης είναι αυτή των Gardner-Knoppoff (1974), αλλά και αυτή που βασίζεται στο επιδημικό μοντέλο ETAS (epidemic-type-aftershock-sequence) του Ogata (1988). Εν συνεχεία, χρειαζόμαστε τη χωρική κατανομή της κλασματικής παραμέτρου που χαρακτηρίζει το ποσοστό των ασθενέστερων σεισμών σε σχέση με τους ισχυρότερους. Η παράμετρος αυτή είναι το b-value (b) της κατανομής Gutenberg-Richter, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί εντός μια περιοχής r από την έκφραση:

$$\widehat{b}_r = \frac{N_r}{\sum_{i=1}^{N_r} m_i - N_r m_{min} \ln(10)},$$

για σεισμούς μεγαλύτερους από μέγεθος m_{min} με αριθμό παρατηρήσεων N_r στην περιοχή.

Για την εκτίμηση των b-values χωρίσαμε την περιοχή της Ελλάδας σε πολύγωνα Voronoi. Ένα πολύγωνο Voronoi, που σχετίζεται με ένα κεντρικό σημείο x_i ορίζεται ως:

$$D(x_i | \underline{x}) = \{v \in \mathbb{R}^2: \|v - x_i\|_2 = \min_j \|v - x_j\|_2\}.$$

Ο ιδανικός αριθμός πολυγώνων και το σχήμα τους καθορίζονται με βάση τη μέγιστη πιθανοφάνεια για το b-value εντός κάθε πολυγώνου και το Bayesian Information Criterion (BIC) για τη συνολική πιθανοφάνεια $l(\underline{b})$ όλου του διαγράμματος. Το BIC ορίζεται ως:

$$\text{BIC} = -2l(\underline{b}) + k \ln(n),$$

όπου k συμβολίζει τον αριθμό πολυγώνων του διαγράμματος Voronoi.

Κατανομή Ζημιών Χαρτοφυλακίου

Η τυχαία μεταβλητή, που περιγράφει τις οικονομικές απώλειες κάθε ασφαλισμένου κτιρίου ορίζεται ως η μέγιστη ετήσια ζημιά προερχόμενη από όλες τις γύρω σεισμικές πηγές, ενώ η συνολική απώλεια του χαρτοφυλακίου είναι το άθροισμα των επιμέρους ζημιών. Οι προσομοιώσεις που προτείνουμε είναι δομημένες με τρόπο τέτοιο, ώστε εξάγουμε εκτιμήσεις οικονομικών απωλειών κάθε κτιρίου μεμονωμένα, επιτρέποντας στην ασφαλιστική εταιρεία να γνωρίζει σε βάθος την κατανομή του συγκεκριμένου κινδύνου στο χαρτοφυλάκιό της.

Μοντελοποιήσαμε στη συγκεκριμένη μελέτη την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του εδάφους (PGA), που καταφθάνει από τους προσομοιωμένους σεισμούς χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη γεωλογική εξίσωση εξασθένησης. Στη συνέχεια μετατρέψαμε την επιτάχυνση αυτή σε ποσοστό οικονομικής ζημιάς για κάθε κτίριο χρησιμοποιώντας κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας. Συγκεκριμένα,

$$\ln(PGA|M, R) \sim Normal\left(E[\ln(PGA)], \sigma(\ln(PGA))\right),$$

όπου M το μέγεθος του σεισμού και R η απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από το επίκεντρο του σεισμού. Η εξίσωση εξασθένησης των Rinaldis et al. (1998) για την περιοχή της Ελλάδας είναι:

$$E[\ln(PGA)] = 0.82M - 1.59\ln(R + 15) + 5.25.$$

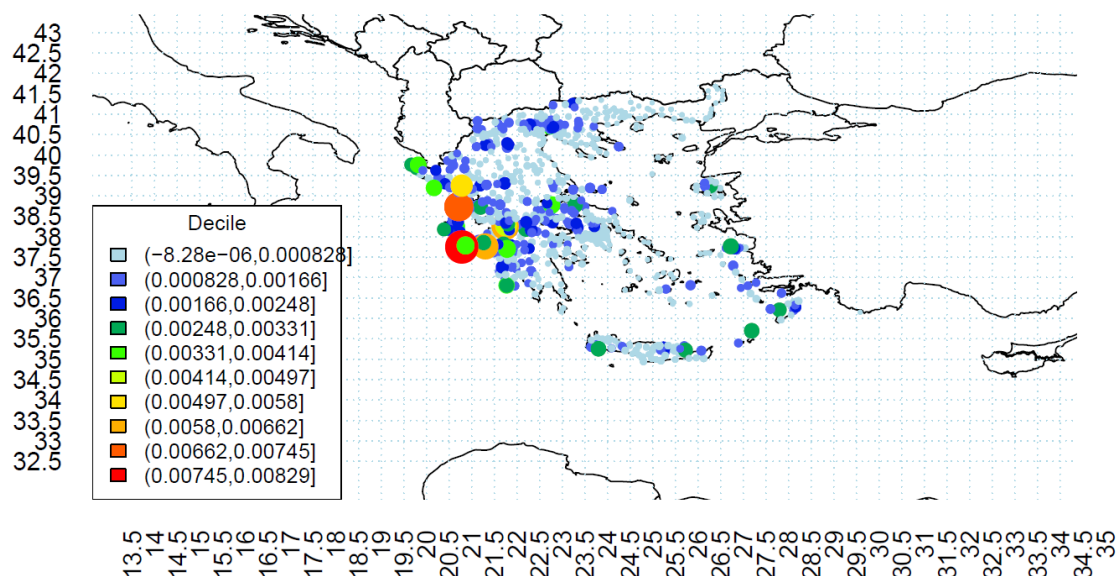
Οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν την πιθανότητα να ξεπεραστεί μία διακριτή κατάσταση ζημιάς ως συνάρτηση του PGA και περιγράφονται ως εξής:

$$P(DS \geq ds_i | PGA) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds_i}} \ln \left(\frac{PGA}{\overline{PGA}, ds_i} \right) \right].$$

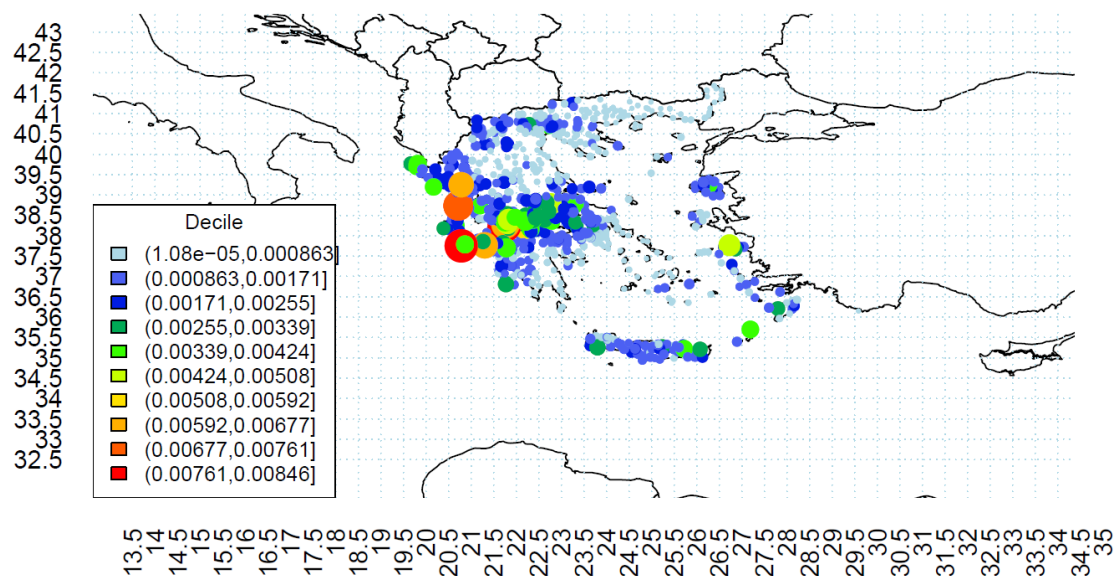
Κάθε κτίριο του χαρτοφυλακίου ανταποκρίνεται σε μοναδικά ζεύγη παραμέτρων ($\beta_{ds_i}, \overline{PGA}, ds_i$) με βάση τις ιδιότητές του (ύψος, παλαιότητα, υλικά κατασκευής).

Έχοντας εφαρμόσει το μοντέλο μας για όλη την Ελλάδα, ενδεικτικοί χάρτες σεισμικού κινδύνου ανά ΤΚ στην περίπτωση ισχύουσας απαλλαγής της τάξεως 2% παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Στους χάρτες αυτούς παρουσιάζεται το αναμενόμενο ποσοστό ζημιάς για πολυώροφα κτίρια κτισμένα την περίοδο μεταξύ 1984 και 1994.

Στην εικόνα 1 το μοντέλο χρησιμοποιεί αποκλειστικά τους ιστορικούς καταλόγους, ενώ στην εικόνα 2 έχουν συμπεριληφθεί τα ενεργά ρηγμάτα. Η συνεισφορά των ρηγμάτων είναι προφανής και αναμφίβολα σημαντικού μεγέθους, ειδικά σε περιοχές με σημαντική παρουσία ενεργών ρηγμάτων.



Εικόνα 1: Αναμενόμενο ποσοστό μέγιστης ετήσιας ζημιάς ανά κτίριο ανά TK συναρτήσει των ιστορικών καταλόγων



Εικόνα 2: Αναμενόμενο ποσοστό μέγιστης ετήσιας ζημιάς ανά κτίριο ανά TK συναρτήσει των ιστορικών καταλόγων και των ενεργών ρηγμάτων

Αποτελέσματα – Επίλογος

Σε αντίθεση με τις περισσότερες αναλογιστικές μελέτες, που τιμολογούν ανά περιοχές (π.χ. ζώνες CRESTA), το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις ακριβείς συντεταγμένες κάθε κτιρίου επάνω στην επιφάνεια της Γης. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα, το οποίο μπορεί να εκμεταλλευτεί μια ασφαλιστική εταιρεία προς όφελός της για να αντιμετωπίσει φαινόμενα αντιεπιλογής και να είναι ανταγωνιστική, αλλά κυρίως για να εξάγει ακριβείς υπολογισμούς στις κεφαλαιακές της απαιτήσεις υπό το καθεστώς της Φερεγγυότητας II. Η τυπική προσέγγιση (standard formula) της Φερεγγυότητας II για τον υπολογισμό του απαιτούμενου κεφαλαίου φερεγγυότητας για τον σεισμό δε λαμβάνει υπόψη καίριες παραμέτρους του χαρτοφυλακίου όπως τις αποστάσεις των κτιρίων από τα ρήγματα, τα υλικά, το έτος κατασκευής τους και τις ακριβείς συντεταγμένες τους στον χάρτη, οδηγώντας συχνά τις ασφαλιστικές εταιρείες στην υπερεκτίμηση των κεφαλαιακών τους απαιτήσεων. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει διαφάνεια στον τρόπο με τον οποίο έχει εξαχθεί η standard formula καθιστώντας την ένα “μαύρο κουτί”.

Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στην ελληνική ασφαλιστική Αγορά, καταδεικνύουν ένα πολύ μεγάλο βαθμό συντηρητικότητας στο ύψος της απαιτούμενης κεφαλαιοποίησης με βάση την τυπική προσέγγιση που επιβάλλεται από το πλαίσιο του SOLVENCY II. Με βάση τα παραπάνω, και με δεδομένη την πλήρη διαφάνεια και την επιστημονική πλέον αποδοχή του προαναφερθέντος μοντέλου, θεωρούμε ότι υπάρχει χώρος πλέον για (α) ουσιαστικό έλεγχο της πρακτικής εφαρμογής του στις ασφαλιστικές εταιρείες και (β) διερεύνηση της δυνατότητας ορθολογικότερου προσδιορισμού των αντίστοιχων κεφαλαίων που αφορούν στο περιθώριο φερεγγυότητας των ελληνικών ασφαλιστικών εταιρειών.

Η πλήρης περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου, που προτείνουμε υπάρχει δημοσιευμένη σε πρόσφατο άρθρο μας, που δημοσιεύτηκε τον περασμένο Ιούλιο (2022) στο European Actuarial Journal.