

Κανονιστική Προσέγγιση Υπολογισμού της Μετακίνησης Σεισμικού Ρήγματος για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Υπόγειων Αγωγών

Μελισσιανός ΒΕ¹, Βαμβάτσικος Δ², Danciu L³, Basili R⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων είναι ευάλωτοι σε εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται σε διάρρηξη σεισμικού ρήγματος, το οποίο διασταυρώνουν. Οι αγωγοί αναπτύσσουν έντονη παραμόρφωση και σημαντική ένταση καθώς ακολουθούν την εδαφική κίνηση. Η διασφάλιση της δομικής και λειτουργικής ακεραιότητας των αγωγών ως κρίσιμων ενεργειακών υποδομών είναι ύψιστης σημασίας. Εν αντιθέσει με μια τυπική προσδιοριστική προσέγγιση σχεδιασμού όπου δε λαμβάνεται υπόψη η σεισμικότητα, η προσέγγιση με βάση την επιτελεστικότητα δύναται να προσφέρει την απαιτούμενη ισορροπία μεταξύ της ασφάλειας και της οικονομίας. Σε αυτήν την κατεύθυνση, αναπτύχθηκε μια προσεγγιστική μεθοδολογία υπολογισμού της μετακίνησης ρήγματος για δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Αυτή η μετακίνηση είναι κατάλληλη για το σχεδιασμό αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά σεισμικά ρήγματα. Χρησιμοποιώντας τον κατάλογο των ρηγμάτων στην Ευρώπη, πραγματοποιήθηκε πλήθος αναλύσεων πιθανοτικής επικινδυνότητας για τη μετακίνηση ρήγματος. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών οδήγησε στην ανάπτυξη του πακέτου απλοποιημένων αναλυτικών σχέσεων που επιτρέπουν τον υπολογισμό της μετακίνησης ρήγματος σχεδιασμού βάσει μόνο των δεδομένων που έχει στη διάθεσή του ο μηχανικός, χωρίς της απαίτηση εξειδικευμένων γεωλογικών και σεισμολογικών μελετών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει υιοθετηθεί ως ενημερωτικό παράρτημα στη νέα έκδοση του κανονισμού EN1998-4.

¹ Ερευνητικός Συνεργάτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, melissia@mail.ntua.gr

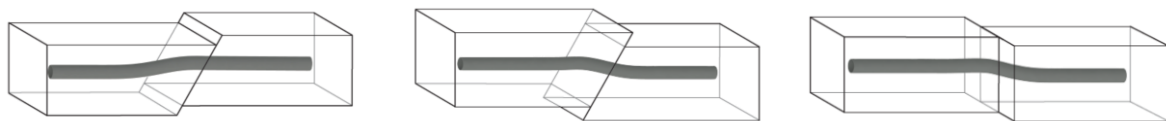
² Αναπληρωτής Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, divamva@mail.ntua.gr

³ Senior Researcher, Swiss Seismological Service, Switzerland, laurentiu.danciu@sed.ethz.ch

⁴ Senior Researcher, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy, roberto.basili@ingv.it

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δομική και λειτουργική ακεραιότητα των αγωγών μεταφοράς καυσίμων, νερού και αποβλήτων έπειτα από ένα σεισμικό γεγονός είναι καθοριστικής σημασίας για την αντιμετώπιση των συνεπειών της φυσικής καταστροφής. Οι υπηρεσίες πολιτικής προστασίας βασίζονται στην απρόσκοπτη λειτουργία αυτών των δικτύων προκειμένου να εφαρμόσουν τα σχέδια έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, η επανατακτικότητα των δικτύων μεταφοράς καυσίμων και νερού καθορίζει σημαντικά την ανθεκτικότητα της κοινωνίας στην περίπτωση ενός σεισμικού γεγονότος [1,2]. Η διάρρηξη ρήγματος στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού και οι συνεπακόλουθες επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις στον υπόγειο αγωγό έχουν συνήθως καταστροφικές συνέπειες [3–5] διότι ο αγωγός υπόκειται σε έντονη παραμόρφωση (Σχήμα 1).



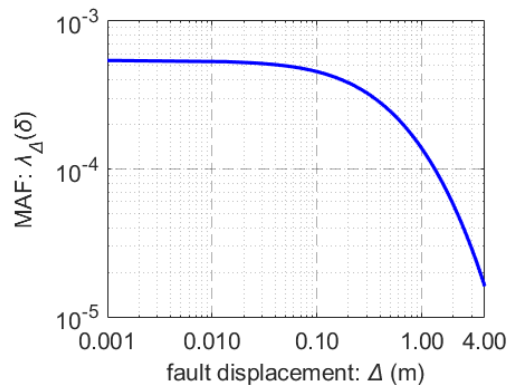
κανονικό ρήγμα

ανάστροφο ρήγμα

ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης

Σχήμα 1: Τύπος ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο και οριζόντιας ολίσθησης) και σχετική παραμόρφωση του υπόγειου αγωγού.

Η μετακίνηση ρήγματος που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό υπολογίζεται συνήθως μέσω εμπειρικών σχέσεων (π.χ. [6–10]) που συνδέουν τη γεωμετρία του ρήγματος με το μέγεθος του σεισμού και τη μετακίνηση του ρήγματος. Η προσέγγιση αυτή, όμως, χαρακτηρίζεται από ένα άγνωστο ή μη προσδιορισμένο επαρκώς επίπεδο ασφαλείας, καθώς αμελεί την πραγματική κατανομή των σεισμικών γεγονότων που μπορεί να δημιουργήσει το ρήγμα. Το πλαίσιο της Σεισμικής Μηχανικής βάσει Επιτελεστικότητας (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE [11]) συνιστά το κατάλληλο εργαλείο προκειμένου να εξασφαλισθεί η επανατακτικότητα στην περίπτωση σεισμού (seismic resilience) των αγωγών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του PBEE αποτελεί η αξιόπιστη ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας της διάρρηξης του ρήγματος. Η Πιθανοτική Ανάλυση Επικινδυνότητας Μετακίνησης Ρήγματος (Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis, PFDHA [12]) αποτελεί την κατάλληλη διαδικασία για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης (mean annual frequency of exceeding) τιμών μετακίνησης ρήγματος, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά και σεισμολογικά χαρακτηριστικά του ρήγματος καθώς και τη θέση που διασταυρώνει ο αγωγός το ρήγμα. Η απλοποιημένη προσέγγιση της PFDHA για χρήση από τους μηχανικούς σε διασταυρώσεις αγωγών–ρηγμάτων παρουσιάστηκε από τους Melissianos et al. [13,14] και πρόσφατα αναθεωρήθηκε από τους Melissianos et al. [15]. Μια ενδεικτική καμπύλη επικινδυνότητας μετακίνησης ρήγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Ενδεικτικό παράδειγμα καμπύλης επικινδυνότητας μετακίνησης ρήγματος στη θέση διασταύρωσης με υπόγειο αγωγό (ΜΑΦ: mean annual frequency – μέση ετήσια συχνότητα, fault displacement – μετακίνηση ρήγματος).

2 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η εκτέλεση της Πιθανοτικής Ανάλυσης Επικινδυνότητας Μετακίνησης Ρήγματος (PFDHA) απαιτεί εξαντλητικούς υπολογισμούς με χρήση ειδικών σεισμολογικών δεδομένων και κατά συνέπεια δεν είναι δυνατή η αυτούσια ενσωμάτωσή της στον Αντισεισμικό Κανονισμό (EN1998). Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μια απλοποιημένη και σχετικά συντηρητική διαδικασία υπολογισμού της μετακίνησης ρήγματος για δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόζεται με τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα στο μηχανικό και περιέχονται στον Κανονισμό και στις σχετικές βάσεις δεδομένων ρηγμάτων. Τέτοια δεδομένα είναι ο τύπος και το μήκος ρήγματος, ο ρυθμός εμφάνισης σεισμικού γεγονότος και η θέση διασταύρωσης αγωγού στο ρήγμα. Η διαδικασία είναι συνεπής με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (seismic hazard-consistent) και αναπτύχθηκε για εφαρμογές στην Ευρώπη.

Ένα μεγάλο πλήθος αναλύσεων τύπου PFDHA εκτελέσθηκε λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των ειδικών σεισμολογικών παραμέτρων μέσω λογικών δέντρων [16] χρησιμοποιώντας την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων για τα ρήγματα (EFSM20 [17]) που αναπτύχθηκε για την τελευταία έκδοση του Ευρωπαϊκού Σεισμικού Μοντέλου (ESHM20 [18]).



Σχήμα 3: Χάρτης σεισμικών ρηγμάτων στον Ευρωπαϊκό χώρο και κατηγοριοποίηση με βάση το τεκτονικό περιβάλλον (interplate ρήγματα με κόκκινο χρώμα και stable continental region ρήγματα με μπλε χρώμα).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται ως ακολούθως:

Βήμα 1^ο: Καθορίζονται για την υπό εξέταση διασταύρωση αγωγού–ρήγματος ο τύπος και το μήκος του ρήγματος και η θέση διασταύρωσης στο ίχνος του ρήγματος.

Βήμα 2^ο: Η σεισμικότητα του ρήγματος λαμβάνεται από ένα διαθέσιμο σεισμικό μοντέλο ή μια εξειδικευμένη σεισμολογική μελέτη. Εναλλακτικά εκτιμάται βάσει μιας προτεινόμενης προσεγγιστικής διαδικασίας βάσει του μήκους του ρήγματος και της επιτάχυνσης $S_{\beta,475}$.

Βήμα 3^ο: Η περίοδος επαναφοράς (T_R) για δεδομένη τιμή μετακίνησης ρήγματος (Δ_F), ή το αντίστροφο, υπολογίζεται ως:

$$T_R(\Delta_F) = \frac{1}{C_F v_F f_L(\Delta_F, L_F, X_L)} \quad (1)$$

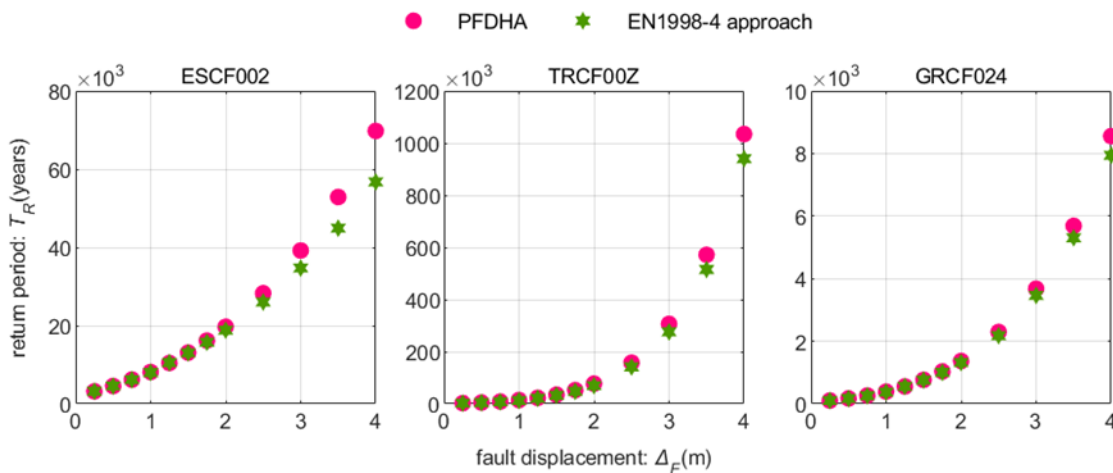
όπου C_F είναι ο συντελεστής εμπιστοσύνης που εξαρτάται από τη μέθοδο που επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της σεισμικότητας του ρήγματος, όπως αυτή εκφράζεται από το ρυθμό επαναφοράς v_F για σεισμικά γεγονότα με μέγεθος μεγαλύτερο από 5.5 και $f_L(\Delta_F, L_F, X_L)$ είναι η συνάρτηση (ανεξάρτητη από το ρυθμό επαναφοράς) που εξαρτάται από τον τύπο και το μήκος (L_F) του ρήγματος και τη θέση της διασταύρωσης (X_L).

3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Τρία ενδεικτικά ρήγματα από τον Ευρωπαϊκό χώρο (Πίνακας 1) επιλέχθηκαν για να παρουσιασθεί η εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς σε ένα εύρος μετακίνησης σεισμικού ρήγματος χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία (εν συντομογραφία EN1998-4 approach) σε σύγκριση με την «ακριβέστερη» ανάλυση τύπου PFDHA. Η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων στο Σχήμα 4 υποδεικνύει μια πολύ καλή συμφωνία.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά ρηγμάτων υπό εξέταση.

Όνομα	Χώρα	Τεκτονικό περιβάλλον	Τύπος	Μήκος (km)	Ρυθμός επαναφοράς
ESCF002	Ισπανία	Interplate	Ανάστροφο	114.06	0.00778
TRCF00Z	Τουρκία	Interplate	Οριζόντιας ολίσθησης	25.28	0.00298
GRCF024	Ελλάδα	Interplate	Κανονικό	38.42	0.08486



Σχήμα 4: Σύγκριση της περιόδου επαναφοράς (return period - T_R) για ένα εύρος μετακίνησης ρήγματος (fault displacement - Δ_F) χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία (εν συντομογραφία EN1998-4 approach) σε σύγκριση με την «ακριβέστερη» ανάλυση τύπου PFDHA.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αγωγοί είναι ευάλωτοι σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται σε διάρρηξη σεισμικού ρήγματος, το οποίο διασταυρώνουν. Η Πιθανοτική Ανάλυση Επικινδυνότητας Μετακίνησης Ρήγματος (Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis – PFDHA) είναι το κατάλληλο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση της σχετικής επικινδυνότητας στο πλαίσιο της Σεισμικής Μηχανικής βάσει Επιτελεστικότητας. Οι σχετικοί υπολογισμοί σε αυτό το πλαίσιο είναι περίπλοκοι και μη κατάλληλοι για αυτούσια ενσωμάτωση στον Αντισεισμικό Κανονισμό. Προς τούτο, προτείνεται μια μεθοδολογία που είναι συμβατή με τον Κανονισμό και η οποία περιλαμβάνει απλές σχέσεις για τον υπολογισμό της μετακίνησης ρήγματος σχεδιασμού για δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας βασίστηκε στη στατιστική επεξεργασία πλήθους αποτελεσμάτων από αναλύσεις τύπου PFDHA, όπου ελήφθησαν υπόψη οι σχετικές αβεβαιότητες των σεισμολογικών παραμέτρων, αξιοποιώντας το Ευρωπαϊκό Μοντέλο Σεισμικής Επικινδυνότητας 2020. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει υιοθετηθεί ως ενημερωτικό προσάρτημα στην έκδοση 2020 του Κανονισμού EN1998-4 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την επιλογή της όδευσης του αγωγού σε σεισμογενείς περιοχές, τον προκαταρκτικό αντισεισμικό σχεδιασμό και για την εκτίμηση της απαίτησης για μια πιο εξειδικευμένη μελέτη.

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Πρόγραμμα HORIZON 2020 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέσω του έργου “HYPERION – Development of a Decision Support System for Improved Resilience & Sustainable Reconstruction of historic areas to cope with Climate Change & Extreme Events based on Novel Sensors and Modelling tools” under Grant Agreement No. 821054 και “SERA–Seismology and earthquake engineering research infrastructure alliance for Europe” under Grant Agreement No. 730900 και επίσης υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «2^η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών» (Αριθμός Έργου:

2515, “TwinCity - Climate-Aware Risk and Resilience Assessment of Urban Areas under Multiple Environmental Stressors via Multi-Tiered Digital City Twinning”).

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fragiadakis M, Vamvatsikos D, Karlaftis MG, Lagaros ND, Papadrakakis M. Seismic assessment of structures and lifelines. *Journal of Sound and Vibration* 2015; **334**: 29–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.12.031>.
2. Casari M, Wilkie SJ. Sequencing lifeline repairs after an earthquake: An economic approach. *Journal of Regulatory Economics* 2005; **27**(1): 47–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11149-004-4418-9>.
3. O’Rourke MJ, Liu JX. *Seismic design of buried and offshore pipelines. Monograph MCEER-12-MN04*. Buffalo, NY, USA: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research; 2012.
4. O’Rourke TD. Geohazards and large, geographically distributed systems. *Geotechnique* 2010; **60**(7): 505–543. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2010.60.7.505>.
5. Nair GS, Dash SR, Mondal G. Review of pipeline performance during earthquakes since 1906. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2018; **32**(6): 1–18. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001214).
6. Wells DL, Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacements. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1994; **84**(4): 974–1002. DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
7. Leonard M. Self-consistent earthquake fault-scaling relations: Update and extension to stable continental strike-slip faults. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2014; **104**(6): 2953–2965. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120140087>.
8. Anderson JG, Biasi GP, Angster S, Wesnousky SG. Improved scaling relationships for seismic moment and average slip of strike-slip earthquakes incorporating fault-slip rate, fault width, and stress drop. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2021; **111**(5): 2379–2392. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120210113>.
9. Thingbaijam KKS, Mai PM, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2017; **107**(5): 2225–2246. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120170017>.
10. Wang JH. A review on scaling of earthquake faults. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 2018; **29**(6): 589–610. DOI: <https://doi.org/10.3319/TAO.2018.08.19.01>.
11. Cornell CA, Krawinkler H. Progress and challenges in seismic performance assessment. *PEER Center News* 2000; **3**(2): 1–4.
12. Youngs RR, Arabasz WJ, Anderson RE, Ramelli AR, Ake JP, Slemmons DB, *et al.* A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra* 2003; **19**(1): 191–219. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1542891>.
13. Melissianos VE, Vamvatsikos D, Gantes CJ. Performance assessment of buried pipelines at fault crossings. *Earthquake Spectra* 2017; **33**(1): 201–218. DOI: <https://doi.org/10.1193/122015EQS187M>.
14. Melissianos VE, Vamvatsikos D, Gantes CJ. Performance-based assessment of protection measures for buried pipes at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2017; **101**: 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.004>.
15. Melissianos VE, Danciu L, Vamvatsikos D, Basili R. Fault displacement hazard estimation at lifeline-fault crossings: A baseline approach for engineering applications. *Bulleting of Earthquake Engineering* 2022: under review.
16. Bommer JJ, Scherbaum F. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. *Earthquake Spectra* 2008; **24**(4): 997–1009. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.2977755>.
17. Basili R, Danciu L, Matteo M, Carafa C, Kastelic V, Maesano E, *et al.* Insights on the European Fault-Source Model (EFSM20) as input to the 2020 update of the European Seismic Hazard Model (ESHM20). *EGU General Assembly 2020*, EGU; 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7008>.
18. Danciu L, Nandan S, Reyes C, Basili R, Weatherill G, Beauval C, *et al.* *The 2020 update of the European Seismic Hazard Model - ESHM20: Model Overview. EFEHR Technical Report 001 v1.0.0*. Zurich, Switzerland: 2021. DOI: <https://doi.org/10.12686/a15>.