



The REDACT project Educational Hub

Γεωτεχνικές αστοχίες λόγω σεισμού

Deliverable No: D.T3.5.1f (EN)

GA T3 Implementation of REDA system (pilot studies)

Created by:
Democritus University of Thrace (DUTH)

CONTRIBUTING PARTNERS:

- The International Hellenic University (TEICM/IHU)
- Institute of Engineering Seismology & Earthquake Engineering - Research Unit of Earthquake Planning & Protection Organization (ITSAK-EPPO)
 - Gebze Technical University (GTU)
 - Ovidius University of Constanta (OUC)
- Institute of Geology and Seismology Moldova (IGS/MSU)

PROJECT DETAILS:

Programme	Black Sea Joint Operational Programme 2014-20
Priority and Measure	2. Promote coordination of environmental protection and joint reduction of marine litter in the Black Sea Basin
Objective	2.1 Improve joint environmental Monitoring
Project Title	Rapid Earthquake Damage Assessment Consortium
Project Acronym	REDACt
Contract No	BSB-966
Lead Partner	The Legal Successor in rights and Duties of TEICM_SARF, IHU SARF, GREECE
Total Budget	974.860,00 Euro (€)
Time Frame: Start Date - End Date	01/07/2020 - 30/06/2023
Project Coordinator	Papatheodorou K. (IHU-TEICM)

DELIVERABLE CONTRIBUTORS:

Klimis N. (DUTH), Papathanassiou G. (DUTH), Giougkis I. (DUTH), Papatheodorou Konstantinos, Papatheodorou K. (TEICM), Theodoulidis N. (ITSAK-EPPO), Margaritis B. (ITSAK-EPPO), Zulfikar C. (GTU), Tekin S. (GTU), Toma-Danila D. (OUC), Vintila D. (OUC), Cardanet V. (IGS/MSU)

Stakeholders: BSB JOP 2014-20 eligible area

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	2 of 17

RECORD OF REVISIONS

Issue/Rev	Date	Page(s)	Description of Change	Release
1	30.06.2023	15	First version	I.01
2	31.07.2023	17	Final Version	I.02

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	3 of 17

DOCUMENT RELEASE SHEET








Responsible Partner: Democritus University of Thrace (DUTH)		
Approval	Emmanouil Kirtas	 Signature 31.07.2023
Approval	Nikolaos Theodoulidis	 Signature 31.07.2023
Approval	Nikolaos Klimis	 Signature 31.07.2023
Approval	Can Zulfikar	 Signature 31.07.2023
Approval	Dragos Vintila	 Signature 31.07.2023
Approval	Vladlen Cardanet	 Signature 31.07.2023
Approved by the Project Coordinator:	Konstantinos Papatheodorou	 Signature 31.07.2023
Distribution: ALL PARTNERS		

Table of contents

1. Background of the document	6
1.1 Scope and Objectives	6
1.2 Related Documents.....	6
1.2.1 Input.....	6
1.2.2 Output	6
2. Σεισμική κίνηση και εδαφικές αστοχίες	7
3. Χάρτες επικινδυνότητας κατολίσθησης.....	7
4. Κατανόηση και εκτίμηση επικινδυνότητας σε κατολισθήσεις - Τρόποι επικοινωνίας με το μη-εξειδικευμένο κοινό.....	12
5. Χάρτες επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση	14
Βιβλιογραφικές αναφορές	16

List of figures

Σχήμα 1: Ο σεισμός της Λευκάδας ($M_w 6.4$, 17-11-2015) χρησιμοποιήθηκε ως παράγοντας ενεργοποίησης (triggering effect) για τον έλεγχο της αξιοπιστίας (validation) του στατιστικού μοντέλου εκτίμησης της επικινδυνότητας σε κατολίσθηση (Jessee et al., 2018) και ενσωματώθηκε στο REDAS (Rapid Earthquake Damage Assessment System)

Σχήμα 2: Αποτέλεσμα κατολίσθησης από το στατιστικό μοντέλο (Jessee et al., 2018) και έλεγχος αξιοπιστίας (validation) με παρατηρημένες συν-σεισμικές κατολισθήσεις ως μαύρες κουκίδες (Parathanassiou et al. 2017;2021); (α) σε σχέση με (β): πιθανότητα εκδήλωσης κατολίσθησης έναντι παρατηρούμενων συν-σεισμικών κατολισθήσεων και (γ) σε σχέση με (δ): συχνότητα εμφάνισης κατολίσθησης έναντι χαρτογραφημένων συν-σεισμικών κατολισθήσεων.

Σχήμα 3: Αποτέλεσμα μοντέλου απειρομήκους πρηνούς για υγρές συνθήκες και πάχος ολισθαίνουσας μάζας 1m (αριστερό τμήμα) στο οποίο πραγματοποιήθηκε έλεγχος αξιοπιστίας με το αποτέλεσμα του στατιστικού μοντέλου και τις χαρτογραφημένες κατολισθήσεις (δεξί τμήμα).

Σχήμα 4: “Κύματα” ρευστοποιημένου εδάφους (αριστερά) και σημαντικά ρευστοποιημένη περιοχή (δεξιά). Φωτογραφίες από τον σεισμό του Christchurch στη Νέα Ζηλανδία ($M 6.3$, 21-2-2011), 1πηγή: <http://www.nzherald.co.nz>.

Σχήμα 5: (Αριστερά) Κατάρρευση κτιρίων λόγω ρευστοποίησης εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού στη Niigata της Ιαπωνίας του 1964 Niigata (φωτογραφία: Joseph Penzien), (δεξιά) κατακόρυφη μετατόπιση με σημαντική κλίση του κτιρίου στο Adapazari της Τουρκίας, 17-8-1999

Σχήμα 6: (α) Χάρτης πρόγνωσης επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση για την περιοχή του ποταμού Πηνειού που απεικονίζει την πιθανότητα ρευστοποίησης βάσει του μοντέλου παλινδρόμησης των Zhu et al. (2017), (β) έλεγχος αξιοπιστίας της πρόγνωσης επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση έναντι παρατηρημένων θέσεων ρευστοποίησης που οριοθετούνται από τις κίτρινες ελλειπτικές καμπύλες (Parathanassiou et al., 2022). Ο έλεγχος αξιοπιστίας βασίστηκε στο σεισμό της Θεσσαλίας ($M_w 6.3$, 3-3-2021).

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	5 of 17

1. Background of the document

1.1 Scope and Objectives

Whenever a strong earthquake occurs, part of damages is related to ground failures. There is a significant variety of ground failures triggered by an earthquake. Even though the number of earthquake-induced ground failures is rather extensive (rotational and translational landslides, rock slides, rock falls, toppling, lateral spread, debris flows, lahars, debris avalanches, earthflows, slow earthflows or creep, liquefaction, etc), herein we focus on landslide and liquefaction hazard assessment at a regional scale.

Citizens living next to areas prone to slide or liquefy, should know to what extent they might be exposed to such a hazard in order to act accordingly. Moreover, Civil Protection authorities would like to have an estimation of the geospatial distribution of possible damage and losses especially in urban or non-urban environment to appropriately respond towards mitigation of seismic risk within the first hours after the earthquake. Scope of the deliverable is to provide information to the public about two basic geotechnical hazards, such as landslides and liquefaction, and also to the Civil Protection stakeholders in order to focus on areas where people and infrastructure might be seriously affected.

The document is a part of the REDACT Educational Hub (Edu-Hub). It capitalizes on respective material published by competent Authorities at National and Regional Levels and is based on research carried out during the project and on internationally recognized and widely acceptable principles. Democritus University of Thrace has led this effort and partners contributed with data, information and translations.

1.2 Related Documents

1.2.1 Input

Table 1. List of former deliverables acting as inputs to this document

Document ID	Descriptor
D.T.3.5.1	The REDACT project Educational Hub

1.2.2 Output

Table 2. List of other deliverables for which this document is an input.

Document ID	Descriptor
D.T3.2.1	Earthquake triggered geotechnical hazard assessment (pilot study)

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	6 of 17

2. Σεισμική κίνηση και εδαφικές αστοχίες

Οι μηχανικοί, οι γεωλόγοι και άλλοι επαγγελματίες συχνά βασίζονται σε ελαφρώς διαφορετικούς ορισμούς των κατολισθήσεων. Αυτή η ποικιλομορφία οφείλεται στην πολυπλοκότητα του φαινομένου. Ωστόσο, εδώ, η κατολίσηση αντιμετωπίζεται ως ένας γενικός όρος που χρησιμοποιούμε προκειμένου να περιγράψουμε την προς τα κατάντη κίνηση του εδάφους ή του βράχου υπό την επίδραση της βαρύτητας που ενεργοποιείται από σεισμικές δυνάμεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμικού γεγονότος. Στόχος είναι η κατάρτιση χαρτών εκτίμησης επικινδυνότητας κατολισθήσεων σε περιφερειακή κλίμακα, με βάση ποικίλα σεισμικά σενάρια. Αυτοί οι χάρτες δεν σκοπεύουν στην αντικατάσταση εξειδικευμένων μελετών, απολύτως απαραίτητων για λόγους σχεδιασμού τεχνικών έργων ή έργων υποδομής, αλλά προορίζονται να βοηθήσουν την Πολιτική Προστασία για σκοπούς πρόληψης και ετοιμότητας καθώς επίσης και στον στρατηγικό σχεδιασμό (ενέργειες πριν από κάποιο καταστροφικό συμβάν). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο απόκρισης κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά από ένα σεισμικό συμβάν, προκειμένου να εστιάσουμε σε εκείνες τις περιοχές όπου είναι πιθανότερο να συμβούν κατολισθήσεις και να υπάρξει έκθεση σε κίνδυνο.

3. Χάρτες επικινδυνότητας κατολίσησης

Οι χάρτες επικινδυνότητας σε κατολίσηση δείχνουν την έκταση των διεργασιών που προκάλεσαν κατολισθητικά φαινόμενα στο παρελθόν (εάν υπάρχουν χάρτες απογραφής ή κατάλογοι κατολισθήσεων για την εξεταζόμενη περιοχή), τα πρόσφατα περιστατικά και τέλος, την πιθανότητα να συμβεί κατολίσηση στο μέλλον σε διάφορες περιοχές. Ένας πλήρης χάρτης επικινδυνότητας κατολίσησης για μια δεδομένη περιοχή, θα πρέπει να περιέχει λεπτομερείς πληροφορίες για τους τύπους κατολισθήσεων, την έκταση του πρηνούς που αστοχεί και την πιθανή μέγιστη έκταση της εδαφικής κίνησης.

Οι χάρτες επικινδυνότητας σε κατολίσηση μπορούν να παραχθούν με διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα με την κλίμακα που χρησιμοποιείται (εθνική, περιφερειακή, τοπική, σε συγκεκριμένη τοποθεσία) καθώς κινούμαστε από χαμηλές σε υψηλές κλίμακες. Δεδομένου ότι μας ενδιαφέρουν οι χάρτες επικινδυνότητας σε περιφερειακή κλίμακα, υιοθετήσαμε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- μέθοδοι στατιστικής βάσης, και
- μέθοδοι φυσικής βάσης

Οι «στατιστικές μέθοδοι» παρέχουν χάρτες επικινδυνότητας με όρους πιθανότητας εμφάνισης της κατολίσησης και συχνότητας εμφάνισης κατολίσησης. Προκειμένου να εκτιμηθεί ένας ποσοτικός χάρτης επικινδυνότητας κατολίσησης σε περιφερειακή κλίμακα, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη χωρική πιθανότητα (P_s), την πιθανότητα μεγέθους κατολίσησης (P_M) και τη χρονική πιθανότητα δηλ. την πιθανότητα εκδήλωσης της κατολίσησης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (P_T)

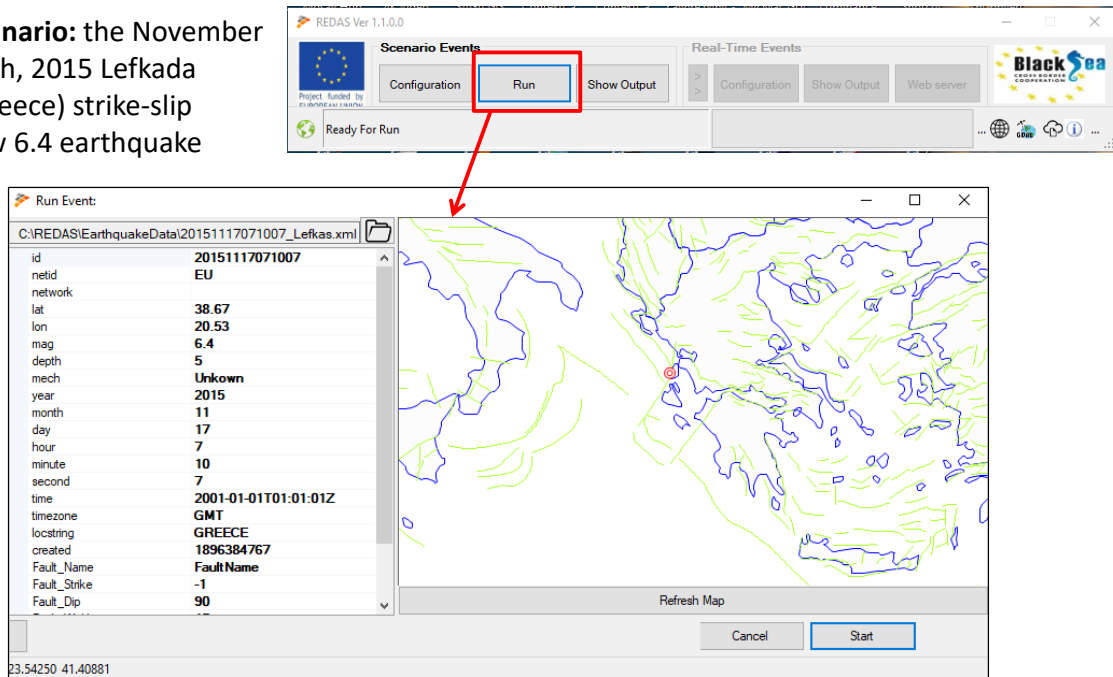
Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	7 of 17

Οι «μέθοδοι φυσικής βάσης», από την άλλη πλευρά, βασίζονται σε μοντέλα ευστάθειας πρανών. Τα περισσότερα από αυτά εφαρμόζονται σε τοπική κλίμακα και το μοντέλο του απειρομήκουσ πρανού (IFS) χρησιμοποιείται ευρέως. Το μοντέλο IFS είναι ένα απλό μοντέλο αρκετά επιτυχημένο στην περιγραφή επιφανειακών κατολισθήσεων. Οι χάρτες που προκύπτουν απεικονίζουν τον συντελεστή ασφαλείας ανά εικονοστοιχείο (pixel) για ένα δεδομένο σενάριο. Τα μοντέλα φυσικής βάσης είναι εφαρμόσιμα σε περιοχές με ελλιπή ή ακόμα και ανύπαρκτο κατάλογο κατολισθήσεων. Τα αποτελέσματα τέτοιων μοντέλων είναι πιο σαφή και πιο αξιόπιστα από τις ευρετικές (heuristic) και στατιστικές μεθόδους. Ωστόσο, κάθε φορά που χρησιμοποιούνται σε περιφερειακές κλίμακες ή χωρικά εκτεταμένες περιοχές, υποφέρουν από το κύριο μειονέκτημα το οποίο είναι είτε ο υψηλός βαθμός υπεραπλούστευσης, είτε η ανάγκη για μεγάλο αριθμό αξιόπιστων δεδομένων. Οι μέθοδοι φυσικής βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς όταν οι γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής είναι αρκετά ομοιογενείς και οι τύποι κατολισθήσεων σχετικά απλοί. Επομένως, δεν είναι όλες οι μέθοδοι εξίσου εφαρμόσιμες σε κάθε κλίμακα ανάλυσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η παράλληλη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων, της στατιστικής και της φυσικής βάσης, εγγυάται μια πληρέστερη και λιγότερο υποκειμενική αξιολόγηση της επικινδυνότητας κατολισθήσεων.

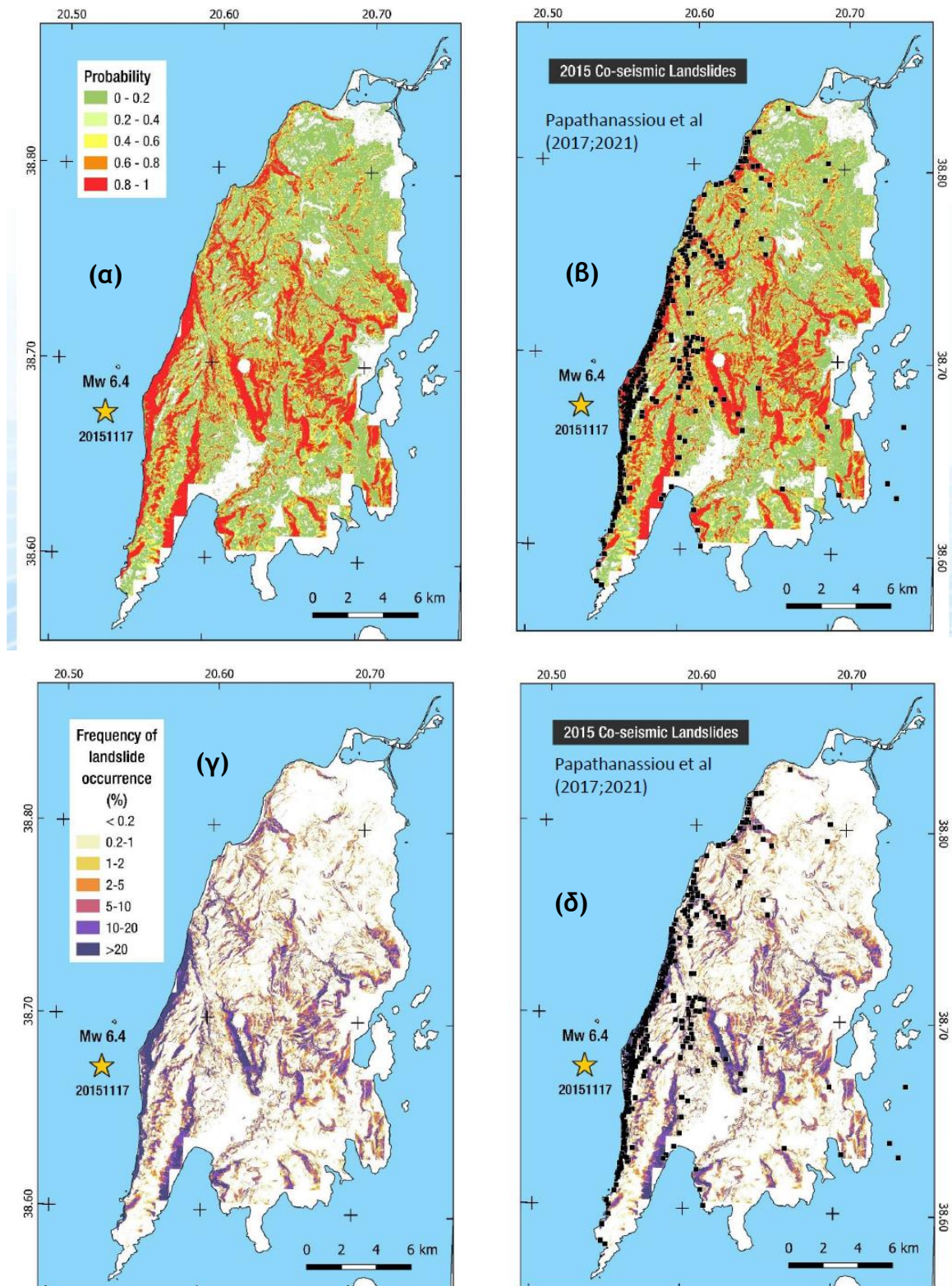
Προκειμένου να παρέχουμε μια ιδέα για τους χάρτες επικινδυνότητας κατολισθήσεων (που οφείλονται στο σεισμό) που παράγονται και χρησιμοποιούνται, παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα από το σεισμικό ρήγμα του σεισμού της Λευκάδας (Mw6.4, 17-11-2015). Οι χάρτες επικινδυνότητας των κατολισθήσεων που παράγονται λόγω της ενεργοποίησης του σεισμικού ρήγματος της Λευκάδας αντιμετωπίζονται τόσο με μια στατιστική μέθοδο (Nowicki et al., 2014; Jessee et al., 2018) όσο και με μια μέθοδο φυσικής βάσης που βασίζεται στο μοντέλο απειρομήκουσ πρανού (ISM). Στο Σχήμα 1 παρουσιάζουμε τα απαιτούμενα δεδομένα του σεισμικού ρήγματος του σεισμού της Λευκάδας (Mw6.4, 17-11-2015) ως δεδομένα εισόδου. Η στατιστική προσέγγιση παρέχει χάρτες με την πιθανότητα εμφάνισης και τη συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων (Σχήμα 2), ενώ το μοντέλο απειρομήκουσ πρανού, μοντέλο φυσικής βάσης, παρέχει τιμές του συντελεστή ασφάλειας (Σχήμα 3). Ο έλεγχος αξιοπιστίας των χαρτών επικινδυνότητας κατολισθήσεων περιφερειακής κλίμακας που παράγονται από τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις γίνεται με σύγκριση πραγματικών συμβάντων, δηλ. κατολισθήσεις οι οποίες έλαβαν χώρα στη Λευκάδα λόγω του σεισμού της 17-11-2015 (Parathanassiou et al., 2017; 2021).

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	8 of 17

Scenario: the November 17th, 2015 Lefkada (Greece) strike-slip Mw 6.4 earthquake



Σχήμα 1: Ο σεισμός της Λευκάδας (Μw6.4, 17-11-2015) χρησιμοποιήθηκε ως παράγοντας ενεργοποίησης (*triggering effect*) για τον έλεγχο της αξιοπιστίας (*validation*) του στατιστικού μοντέλου εκτίμησης της επικινδυνότητας σε κατολίσηση (Jessee et al., 2018) και ενσωματώθηκε στο REDAS (*Rapid Earthquake Damage Assessment System*)

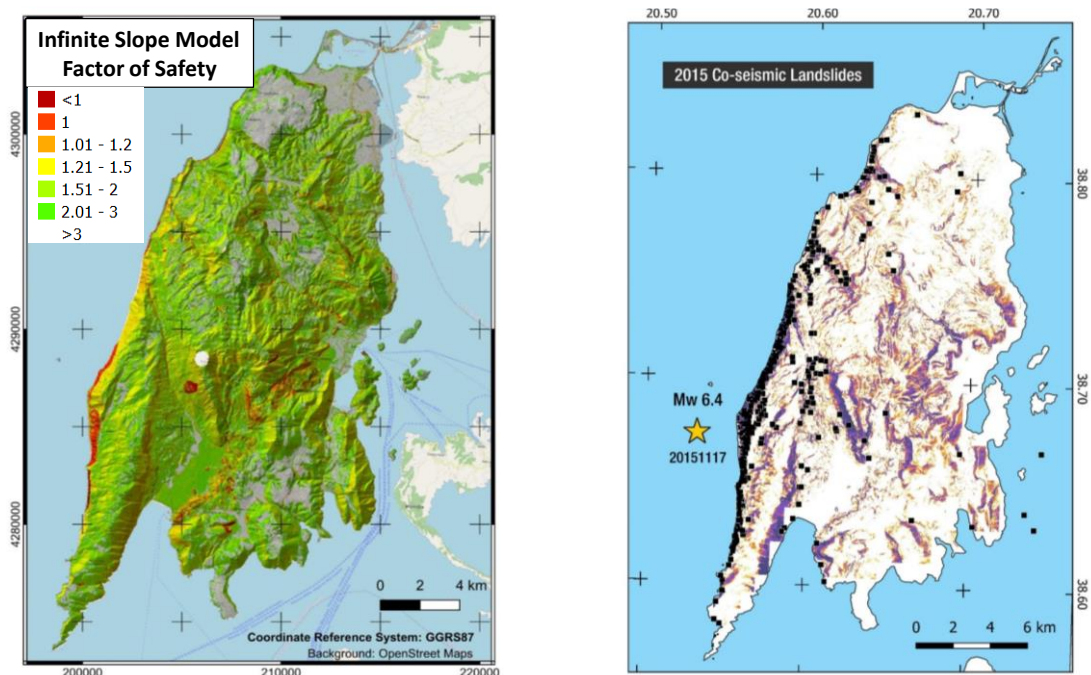


Σχήμα 2: Αποτέλεσμα κατολίθησης από το στατιστικό μοντέλο (Jessee et al., 2018) και έλεγχος αξιοπιστίας (validation) με παρατηρημένες συν-σεισμικές κατολιθήσεις ως μαύρες κουκίδες (Papathanassiou et al. 2017;2021); (a) σε σχέση με (B): πιθανότητα εκδήλωσης κατολίθησης έναντι

παρατηρούμενων συν-σεισμικών κατολισθήσεων και (γ) σε σχέση με (δ): συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων έναντι χαρτογραφημένων συν-σεισμικών κατολισθήσεων.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η συσχέτιση των υψηλών πιθανοτήτων κατολισθήσεων και επίσης της συχνότητας εμφάνισης κατολισθήσεων με χαρτογραφημένες κατολισθήσεις που υποδηλώνουν την καλή απόδοση του μοντέλου.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν επίσης από την εφαρμογή και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των προβλέψεων του μοντέλου απειρομήκους πρανούς σε όρους του παράγοντα ασφάλειας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Αποτέλεσμα μοντέλου απειρομήκους πρανούς για υγρές συνθήκες και πάχος ολισθαίνουσας μάζας 1m (αριστερό τμήμα) στο οποίο πραγματοποιήθηκε έλεγχος αξιοπιστίας με το αποτέλεσμα του στατιστικού μοντέλου και τις χαρτογραφημένες κατολισθήσεις (δεξί τμήμα).

Στο Σχήμα 3 φαίνεται επίσης ότι τόσο τα στατιστικά όσο και τα μοντέλα φυσικής βάσης παρέχουν ουσιαστικά συγκλίνοντα αποτελέσματα, και τα δύο συσχετίζονται καλά με χαρτογραφημένες κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό.

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	11 of 17

4. Κατανόηση και εκτίμηση επικινδυνότητας σε κατολισθήσεις - Τρόποι επικοινωνίας με το μη-εξειδικευμένο κοινό

Οι πληροφορίες σχετικά με τις κατολισθήσεις ποικίλλουν ως προς την ποσότητα και την πολυπλοκότητά τους και κυμαίνονται από λεπτομερείς καταλόγους (inventories) προηγούμενων κατολισθήσεων και προκύπτοντες χάρτες επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας έως καθόλου πληροφορίες. Υπάρχουν περιοχές όπου οι άνθρωποι έχουν βιώσει ιστορικά κατολισθήσεις σε σεισμογενείς περιοχές και έχουν αποκτήσει εμπειρική γνώση σχετικά με το που πρέπει να αποφεύγουν να χτίζουν και να ζουν. Ωστόσο, σε πολλές περιοχές δεν είναι εύκολα εμφανής η πιθανή επικινδυνότητα κατολίστεσης και η αστοχία του εδάφους δεν συμβαίνει σε κανενός είδους τακτική βάση.

Τα χαρακτηριστικά που μπορεί να υποδηλώνουν κίνηση κατολίστεσης, παρουσιάζονται στη συνέχεια, όπως αναφέρεται στους Highland and Bobrowsky (2008):

- Πηγές και υγρό ή κορεσμένο έδαφος σε περιοχές που προηγουμένως ήταν ξηρές σε ή κάτω από πρανή.
- Ρωγμές εδάφους—ρωγμές στο χιόνι, τον πάγο, το έδαφος ή τον βράχο πάνω ή στην κορυφή των πρανών.
- Πεζοδρόμια ή πλάκες που απομακρύνονται από κατασκευές εάν βρίσκονται κοντά σε πρανές. Έδαφος που απομακρύνεται από τα θεμέλια.
- Μετατοπισμένες γραμμές φράχτη, οι οποίες κάποτε ήταν ευθείες ή διαμορφώθηκαν διαφορετικά.
- Ασυνήθιστα εξογκώματα ή αλλαγές υψομέτρου στο έδαφος, τα οδοστρώματα, τα μονοπάτια ή τα πεζοδρόμια.
- Υπό κλίση τηλεφωνικοί στύλοι, δέντρα, τοίχοι αντιστήριξης, φράχτες.
- Υπερβολική κλίση ή ρηγματώσεις δαπέδων από σκυρόδεμα ή θεμελίων.
- Σπασμένες γραμμές ύδρευσης και άλλες υπόγειες δομές κοινής ωφέλειας.
- Ταχεία αύξηση ή μείωση της στάθμης των ρεμάτων.
- Πόρτες και παράθυρα που δεν ανοίγουν (κολλημένα) συνιστούν πιθανή ένδειξη ότι οι τοίχοι και τα πλαίσια μετατοπίζονται και παραμορφώνονται.
- Ήχοι τριξίματος, θραύσης ή έκρηξης από ένα σπίτι, ένα κτήριο ή ένα άλσος δέντρων.
- Δρόμοι ή μονοπάτια που βυθίζονται ή μετατοπίζονται.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες επικινδυνότητας για μια περιοχή επιρρεπή σε κατολίστεση μόλις εμφανιστεί ένας από τους παράγοντες ενεργοποίησης.

Σύμφωνα με τους Highland και Bobrowsky (2008) η επιτυχής αποκωδικοποίηση των παραπάνω πληροφοριών για την επικινδυνότητα κατολισθήσεων σε πρακτική και χρήσιμη πληροφορία για το μη-εξειδικευμένο κοινό, συνοψίζεται στις ακόλουθες πληροφορίες:

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: L02	Date: 31 July 2023	Page:	12 of 17

- Πιθανότητα εμφάνισης ενός συμβάντος που θα προκαλούσε θύματα, βλάβες ή αναστάτωση σε ένα υπάρχον επίπεδο ασφάλειας.
- Αναμενόμενη τοποθεσία και έκταση των επιπτώσεων του γεγονότος στο έδαφος, τις κατασκευές ή την κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα.
- Εκτιμώμενη ένταση των επιπτώσεων στο έδαφος, τις κατασκευές ή την κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα

Τα παραπάνω είναι απαραίτητα επειδή οι μηχανικοί και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων συνήθως θα αγνοήσουν έναν πιθανό κίνδυνο εάν η πιθανότητα εκδήλωσης είναι πολύ μικρή, η τοποθεσία του είναι άγνωστη ή η σοβαρότητα/ένταση του περιορισμένη. Προκειμένου μια πληροφορία να χαρακτηριστεί ως χρήσιμη για το κοινό, θα πρέπει το μη-εξειδικευμένο κοινό να είναι σε θέση να αντιληφθεί την πιθανότητα, τη θέση και τη σοβαρότητα της επικινδυνότητας έτσι ώστε να αντιληφθεί τον κίνδυνο, να μπορεί να επικοινωνήσει την πιθανή διακινδύνευση σε άλλους και να μπορεί να χρησιμοποιήσει τις αποκωδικοποιημένες πληροφορίες απευθείας για τη μείωση της απειλής.

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας κατολισθήσεων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Συνιστάται πάντα να συμβουλευτείτε έναν ειδικό, παρόλο που δεν είναι πάντα δυνατό. Ωστόσο, συζητούνται δύο τύποι αξιολόγησης της επικινδυνότητας κατολισθήσεων: άμεση παρατήρηση και χρήση τεχνολογικών εργαλείων, όπως: ανάλυση χάρτη, εναέρια αναγνώριση, αναγνώριση πεδίου, γεωτρήσεις, χρήση οργάνων, γεωφυσικές μετρήσεις, κ.λ.π.

Οι τοπικές αρχές μπορούν να προσεγγίσουν την επικινδυνότητα κατολισθήσεων και να αποτρέψουν το κοινό, με διάφορους τρόπους, όπως ο ακόλουθος που προτείνεται από τους Highland and Bobrowsky (2008) στο πλαίσιο της USGS:

- Δελτία τύπου σε εφημερίδες/διαφημίσεις.
- Ενημερωτικά Φυλλάδια, τα οποία να διανέμονται από πόρτα σε πόρτα ή να εκτίθενται σε δημόσιους χώρους.
- Αφίσες σε δημόσια κτήρια και (ή) αγορές με όσο το δυνατόν περισσότερες οπτικές πληροφορίες.
- Ανακοινώσεις στα Μέσα μέσω ραδιοφώνου, τηλεόρασης, διαδικτύου ή άλλων μέσων.
- Δημόσιες διαλέξεις από ειδικούς ή άλλους αξιωματούχους.
- Πινακίδες αναρτημένες σε περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας, που να ενημερώνουν τους ανθρώπους για το είδος της επικινδυνότητας (hazard) και να τους προειδοποιούν να είναι προσεκτικοί.
- Ένας τοπικός ιστότοπος στο διαδίκτυο είναι μια χρήσιμη πηγή πληροφοριών, καθώς και οι αριθμοί τηλεφώνου επικοινωνίας και διευθύνσεις ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (emails) για το προσωπικό έκτακτης ανάγκης.
- Διεξαγωγή προγραμμάτων δημόσιας εκπαίδευσης και ενημέρωσης μέσω κοινοτικών συνεδριάσεων, δημοτικών συμβουλίων ή άλλων συμβουλίων.
- Υιοθέτηση και επιβολή κατάλληλων πολιτικών χρήσης γης, όπως: συζήτηση με ιδιοκτήτες γης, κατασκευαστές, αγοραστές και πωλητές.
- Παρακολούθηση αλλαγών σε ασταθή πρανή και λήψη κατάλληλων ενεργειών.

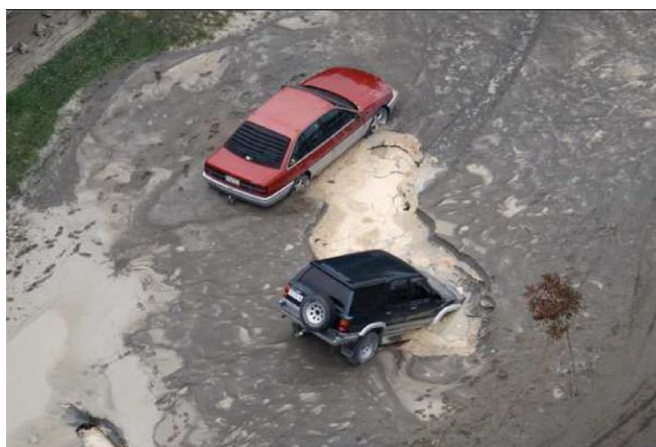
Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	13 of 17

- Κατασκευή οδικών και αποχετευτικών έργων που ανταποκρίνονται στις τοπικές ανάγκες ασφάλειας.
- Ενημέρωση για τα διαθέσιμα ασφαλιστικά προγράμματα και θέματα αστικής ευθύνης.
- Προετοιμασία ενός σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης για την κοινότητα.

5. Χάρτες επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο η αντοχή και η δυσμησία (δυσκαμψία) ενός εδάφους μειώνονται από τη σεισμική κίνηση. Η ρευστοποίηση και τα σχετικά φαινόμενα ευθύνονται για σοβαρές βλάβες από ιστορικούς σεισμούς σε όλο τον κόσμο.

Η ρευστοποίηση συμβαίνει σε κορεσμένα, χαλαρά, μη-συνεκτικά, μη-πλαστικά ή χαμηλής πλαστικότητας εδάφη (άμμοι, ιλυώδεις άμμοι, ιλύες, αργιλώδεις ιλεις), δηλαδή εδάφη στα οποία ο χώρος μεταξύ των μεμονωμένων σωματιδίων είναι πλήρως γεμάτος με νερό. Αυτό το νερό ασκεί πίεση στα σωματίδια του εδάφους επηρεάζοντας το πόσο σφιχτά πιέζονται μεταξύ τους τα ίδια τα σωματίδια. Πριν από έναν σεισμό, η πίεση του νερού (πίεση πόρων) είναι σχετικά χαμηλή. Ωστόσο, η σεισμική κίνηση μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης του νερού σε τέτοιο βαθμό όπου τα σωματίδια του εδάφους να μην βρίσκονται σε επαφή, μηδενίζοντας την τριβή μεταξύ των κόκκων και ακυρώνοντας έτσι την αντοχή αυτών των εδαφών (Σχήμα 4). Η ρευστοποίηση μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες, ή ακόμα και πλήρη καταστροφή κτηρίων και υποδομών (Σχήμα 5).



Σχήμα 4: “Κύματα” ρευστοποιημένου εδάφους (αριστερά) και σημαντικά ρευστοποιημένη περιοχή (δεξιά). Φωτογραφίες από τον σεισμό του Christchurch στη Νέα Ζηλανδία (M6.3, 21-2-201), 1πηγή: <http://www.nzherald.co.nz>.

Συχνά, οι βλάβες στα κτήρια από τους σεισμούς οφείλονται σε αστοχίες του εδάφους ή της θεμελίωσης του κτηρίου (Σχήμα 5). Περιπτώσεις διαφορετικής καθίζησης της θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική βλάβη στην ανωδομή, ενώ πιο εκτεταμένα φαινόμενα, όπως η ρευστοποίηση του εδάφους, μπορεί να οδηγήσουν σε συνολική αστοχία της κατασκευής.

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	14 of 17



Σχήμα 5: (Αριστερά) Κατάρρευση κτιρίων λόγω ρευστοποίησης εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού στη Niigata της Ιαπωνίας του 1964 Niigata (φωτογραφία: Joseph Penzien), (δεξιά) κατακόρυφη μετατόπιση με σημαντική κλίση του κτιρίου στο Adarazari της Τουρκίας, 17-8-1999

Οι χάρτες επικινδυνότητας ρευστοποίησης παρουσιάζουν την πιθανότητα ρευστοποίησης και έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν στην πολιτική προστασία, το ευρύ κοινό, τους σχεδιαστές χρήσεων γης, τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τους ιδιοκτήτες, καθώς και στις δημόσιες υπηρεσίες αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, νέα και καλύτερα εργαλεία για την αξιολόγηση του κινδύνου πρόκλησης βλαβών από σεισμό. Η ρευστοποίηση του εδάφους που προκαλείται από ισχυρό σεισμό είναι ένας σημαντικός δευτερεύων κίνδυνος που εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια του σεισμού ή και ελάχιστα λεπτά αργότερα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βλάβες σε κτήρια και σε υποδομές. Η χαρτογράφηση της επικινδυνότητας έναντι ρευστοποίησης είναι σημαντική τόσο για τον κατάλληλο σχεδιασμό κτηρίων και υποδομών για την αντιμετώπισή της, όσο και για την καθοδήγηση των προσπαθειών ανακούφισης μέσω της τοποθέτησης πόρων στις κατάλληλες θέσεις για την περίπτωση που συμβεί κάτι τέτοιο.

Υπάρχουν δύο πτυχές αναφορικά με την χαρτογράφηση της επικινδυνότητας ρευστοποίησης σε περιφερειακή κλίμακα: 1) η προγνωστική χαρτογράφηση επικινδυνότητας και 2) η δημιουργία καταλόγων/ βάσεων δεδομένων μετά τη ρευστοποίηση.

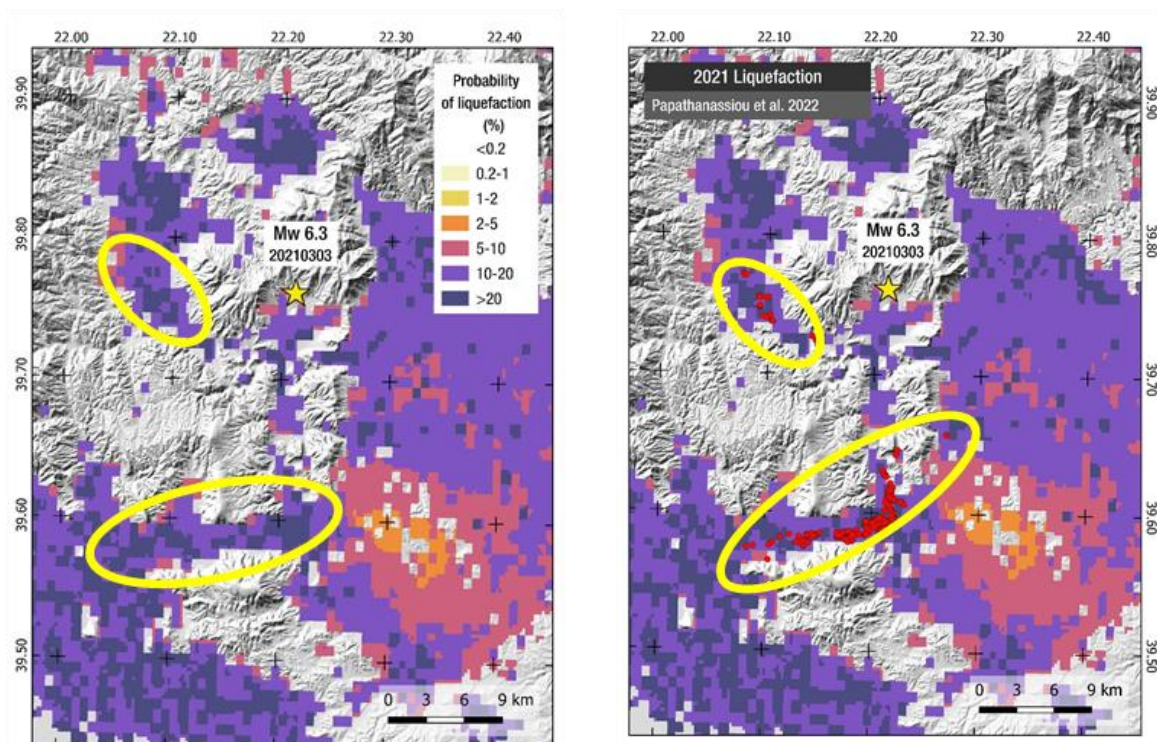
Η τρέχουσα προγνωστική χαρτογράφηση επικινδυνότητας ρευστοποίησης βασίζεται σε λεπτομερείς γεωλογικούς χάρτες και γεωτεχνικά δεδομένα, τα οποία δεν είναι πάντα διαθέσιμα σε περιοχές εκτεθειμένα σε κίνδυνο ρευστοποίησης.

Η προγνωστική χαρτογράφηση επικινδυνότητας ρευστοποίησης βασίζεται σε γεωχωρικά μοντέλα ρευστοποίησης που προβλέπουν την έκταση της ρευστοποίησης και είναι κατάλληλα για παγκόσμια εφαρμογή. Τα γεωχωρικά μοντέλα ρευστοποίησης χρησιμοποιούν τη λογιστική παλινδρόμηση από μια βάση δεδομένων ρευστοποίησης που αποτελείται από δεδομένα από 27 σεισμικά συμβάντα σε έξι διαφορετικές χώρες.

Το μοντέλο που αποδίδει καλύτερα σε ολόκληρο το σύνολο της βάσης δεδομένων (Zhu et al., 2017) περιλαμβάνει την κορυφαία εδαφική ταχύτητα (PGV), την μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στα επιφανειακά 30m, V_{s30} , την απόσταση από τον πλησιέστερο

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	15 of 17

ποταμό (d_r), την απόσταση από την πλησιέστερη ακτή (d_c) και την βροχόπτωση (μέση ετήσια). Το μοντέλο που αποδίδει καλύτερα στον μη-παράκτιο χώρο περιλαμβάνει την PGV, την V_{S30} , το βάθος υδάτινου ορίζοντα (w_{td}), την απόσταση από το υδάτικο σύστημα (d_w) και την βροχόπτωση (μέση ετήσια). Οι χάρτες επικινδυνότητας απεικονίζουν την πιθανότητα ρευστοποίησης και τη χωρική κάλυψη της ρευστοποίησης.



(α)

(β)

Σχήμα 6: (α) Χάρτης πρόγνωσης επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση για την περιοχή του ποταμού Πηνειού που απεικονίζει την πιθανότητα ρευστοποίησης βάσει του μοντέλου παλινδρόμησης των Zhu et al. (2017), (β) έλεγχος αξιοπιστίας της πρόγνωσης επικινδυνότητας σε ρευστοποίηση έναντι παρατηρημένων θέσεων ρευστοποίησης που οριοθετούνται από τις κίτρινες ελλειπτικές καμπύλες (Papathanassiou et al., 2022). Ο έλεγχος αξιοπιστίας βασίστηκε στο σεισμό της Θεσσαλίας (Mw6.3, 3-3-2021).

Βιβλιογραφικές αναφορές

Highland, L.M., and Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

Jessee, M. A., Hamburger M. W., Allstadt K., Wald D. J., Robeson S. M., Tanyas H., Hearne M., Thompson E. (2018). A global empirical model for near-real-time assessment of seismically induced landslides. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123, 1835-1859. <https://doi.org/10.1029/2017JF004494>.

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	16 of 17

Nowicki M.A., Wald D., Hamburger M., Hearne M., Thompson E. (2014). Development of a globally applicable model for near real-time prediction of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 173, pp. 54-65.

Papathanassiou G., Valkaniotis S., Ganas A., Grendas N., Kollia E. (2017). The November 17th, 2015 Lefkada (Greece) strike-slip earthquake: Field mapping of generated failures and assessment of macroseismic intensity ESI-07., *Engineering Geology*, 220, pp. 13-30.

Papathanassiou G., Valkaniotis S., Ganas A. (2021). Spatial patterns, controlling factors, and characteristics of landslides triggered by strike-slip faulting earthquakes: case study of Lefkada island, Greece., *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80:3747-3765 <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02181-x>.

Papathanassiou G., Valkaniotis S., Ganas A., Stampolidis A., Rapti D., Caputo R. (2022) Floodplain evolution and its influence on liquefaction clustering: The case study of March 2021 Thessaly, Greece, seismic sequence, *Engineering Geology*, Volume 298, 106542.

Zhu J., Baise L. G. and Thompson E. M. (2017). An updated geospatial liquefaction model for global application. *Bulletin of the Seismological Society of America* 107(3): 1365-1385.

Deliverable-No: D.T.3.5.1f_GR		Internal – Partners	
Issue: I.02	Date: 31 July 2023	Page:	17 of 17