



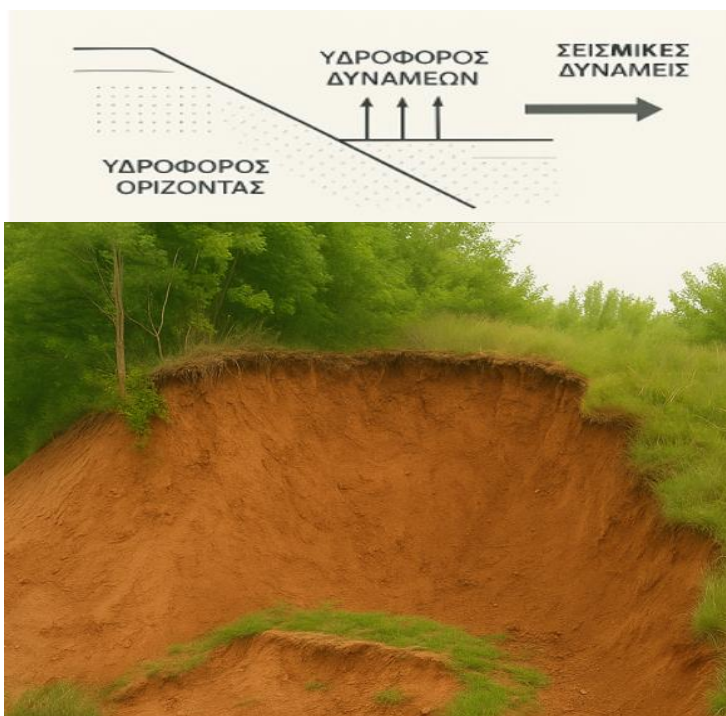
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΡΑΝΩΝ



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Δαλακούρα Σοφία
ΑΜ: M061924010

Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Αλαμανής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE STUDIES PROGRAMME
“Advanced Technologies for Environmental Risk Management”

POSTGRADUATE MASTER’S THESIS

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE TABLE WATER
ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF SLOPES**



Graduate Student: Dalakoura Sofia
PN: M061924010

Supervisor:
Nikolaos Alamanis, PhD, Civil Engineer, Associate Professor, University of Thessaly

Volos, September 2025

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΣΤΗ
ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΡΑΝΩΝ » (GR)

“INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE TABLE WATER ON THE SEISMIC
BEHAVIOR OF SLOPES” (EN)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Σεπτέμβριο του 2025

Επιβλέπων: Νικόλαος Αλαμανής

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός,
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας - Αγροτεχνολογίας

Χρυσανίδης Θεόδωρος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Μέλος

Παπαγεωργίου Γρηγόριος

Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Μέλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 2025

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα: Δαλακούρα Σοφία

Πτυχιούχος Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε.

Copyright © Δαλακούρα Σοφία, (2025)

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας εκφράζει τις απόψεις της συγγραφέα και ουδεμία ευθύνη για το περιεχόμενο φέρουν ο επιβλέπων, και η εξεταστική επιτροπή για αυτό.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή.

Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στη Διπλωματική μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Μεταπτυχιακού Τίτλου των Μεταπτυχιακών Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων.

Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Μ.Δ.Ε. προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από μένα προσωπικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα: Δαλακούρα Σοφία

Υπογραφή:



Ημερομηνία: 20/9/2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με ιδιαίτερη συγκίνηση θα ήθελα να εκφράσω τις βαθιές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών και στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία οφείλω στον επιβλέπων της εργασίας, κο. Νικόλαο Αλαμανή, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, Καθηγητή του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων» και Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την καθοριστική του συμβολή. Η αδιάκοπη στήριξη, η ουσιαστική καθοδήγηση και η εμπιστοσύνη που έδειξε στην προσπάθειά μου αποτέλεσαν θεμέλιο για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Μεταπτυχιακού Προγράμματος, των οποίων οι γνώσεις, η διάθεση συνεργασίας και η συνεχής διαθεσιμότητα έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην πορεία της φοίτησής μου. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη νιώθω επίσης για τους συμφοιτητές μου, με τους οποίους μοιράστηκα γόνιμες συζητήσεις, υποστήριξη και συναδελφικότητα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, οφείλω να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, που με στήριξε με αγάπη, κατανόηση και υπομονή σε όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας. Η αμέριστη συμπαράστασή τους υπήρξε ανεκτίμητη, ιδιαίτερα σε στιγμές έντονης προσπάθειας και κόπωσης, δίνοντάς μου τη δύναμη να συνεχίσω. Χάρη στη συνεχή παρουσία και ενθάρρυνσή τους κατάφερα να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις και στις δυσκολίες, να ολοκληρώσω με επιτυχία αυτή τη μακρά και κοπιαστική προσπάθεια και να φέρω εις πέρας την παρούσα εργασία, ολοκληρώνοντας έτσι ένα σημαντικό ακαδημαϊκό ταξίδι.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στη σεισμική συμπεριφορά πρανών μέσω ανάλυσης της διεθνούς βιβλιογραφίας και τριών χαρακτηριστικών μελετών περίπτωσης. Το θεωρητικό πλαίσιο εξέτασε τους βασικούς μηχανισμούς αστοχίας πρανών κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων, με έμφαση στην ανάπτυξη πίεσης των πόρων, την απώλεια συνοχής και τη ρευστοποίηση κορεσμένων εδαφών. Οι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών υπό σεισμική φόρτιση, συμπεριλαμβανομένων της ψευδοστατικής μεθόδου, της μεθόδου Newmark και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, αξιολογούνται ως προς την ικανότητά τους να ενσωματώσουν την επίδραση των υδρογεωλογικών συνθηκών. Οι τρεις μελέτες περίπτωσης - η κατολίσθηση Donghekou από τον σεισμό Wenchuan 2008, η λεκάνη Chenyulan από τον σεισμό Chi-Chi 1999, και ο σεισμός L'Aquila 2009 - αποκαλύπτουν διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικών δυνάμεων και υδροφόρου ορίζοντα. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η παρουσία υπόγειων υδάτων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές κατολισθήσεις μεγάλης κινητικότητας, μακροπρόθεσμη αλλαγή των κατωφλίων ευαισθησίας σε βροχοπτώσεις, και τοπικά φαινόμενα ρευστοποίησης. Συμπερασματικά, τονίζεται η ανάγκη για ανάπτυξη προηγμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης κινδύνου που ενσωματώνουν δυναμικά την επίδραση των υδρογεωλογικών συνθηκών στη σεισμική σχεδίαση και διαχείριση κινδύνου.

Λέξεις – κλειδιά: σεισμική ευστάθεια πρανών, υδροφόρος ορίζοντας, ρευστοποίηση εδαφών, υπερπίεση πόρων, κατολισθήσεις, γεωτεχνική μηχανική

ABSTRACT

This paper investigates the effect of the water table on the seismic behavior of slopes through an analysis of the international literature and three representative case studies. The theoretical framework examined the basic mechanisms of slope failure during seismic vibrations, with an emphasis on pore pressure development, cohesion loss, and liquefaction of saturated soils. Methods for analyzing slope stability under seismic loading, including the pseudo-static method, the Newmark method, and the finite element method, are evaluated in terms of their ability to incorporate the effect of hydrogeological conditions. The three case studies—the Donghekou landslide from the 2008 Wenchuan earthquake, the Chenyulan basin from the 1999 Chi-Chi earthquake, and the 2009 L'Aquila earthquake—reveal different mechanisms of interaction between seismic forces and the water table. The results demonstrate that the presence of groundwater can lead to catastrophic landslides with high mobility, long-term changes in rainfall sensitivity thresholds, and local liquefaction phenomena. In conclusion, the need for the development of advanced risk assessment methodologies that dynamically incorporate the effect of hydrogeological conditions in seismic design and risk management is emphasized.

Keywords: seismic slope stability, water table, soil liquefaction, pore pressure, landslides, geotechnical engineering

Περιεχόμενα	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	12
1.1 Ορισμοί και Βασικές Έννοιες.....	12
1.2 Μηχανισμοί Αστοχίας Πρανών κατά τη Διάρκεια Σεισμικών Δονήσεων	15
1.3 Κατολισθήσεις σε πρανή μετά από σεισμική δραστηριότητα	22
1.3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά πρανών και ευπάθεια στις κατολισθήσεις	25
1.4 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών υπό σεισμική φόρτιση	27
1.4.1 Μέθοδος Newmark.....	27
1.4.2 Ψευδοστατική μέθοδος.....	29
1.4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	36
2.1 Η Κατολίσθηση Donghekou κατά τον Σεισμό Wenchuan του 2008	36
2.1.1 Γενικά Στοιχεία.....	36
2.1.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες και Επίδραση στη Σεισμική Συμπεριφορά	37
2.1.3 Περιγραφή και Χαρακτηριστικά Κατολίσθησης	38
2.1.4 Ο Ρόλος των Υδρογεωλογικών Συνθηκών στο Μηχανισμό Αστοχίας	40
2.1.5 Επιπτώσεις στη Σεισμική Ευστάθεια Πρανών	42
2.2 Ο Σεισμός Chi-Chi της Ταϊβάν 1999 και η Επίδρασή του στη Λεκάνη Chenyulan	44
2.2.1 Γενικές Πληροφορίες	44
2.2.2 Αντίκτυπος Σεισμού στις Κατολισθήσεις και Σχέση με τις Υδρογεωλογικές Συνθήκες	46
2.2.3 Προεκτάσεις της Μελέτης Περίπτωσης για τη Σεισμική Μηχανική Πρανών	49
2.3 Ο Σεισμός L'Aquila 2009 στην Κεντρική Ιταλία.....	51
2.3.1 Γενικές πληροφορίες	51
2.3.2 Γεωλογικό Περιβάλλον και Υδροφόρος Ορίζοντας.....	52
2.3.3 Κατολισθήσεις και Αστάθεια Πρανών	54
2.3.4 Προεκτάσεις της Μελέτης Περίπτωσης για τη Σεισμική Μηχανική Πρανών	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58

Πίνακας Συντομογραφιών

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
c	Συνοχή εδάφους (Cohesion)
c'	Ενεργός συνοχή εδάφους (Effective cohesion)
CSIS	China Seismic Intensity Scale (Κινεζική Κλίμακα Σεισμικής Έντασης)
EMS	European Macroseismic Scale (Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα)
FA	Παράγοντας ενίσχυσης επιτάχυνσης (Acceleration amplification factor)
FS	Συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety)
FV	Παράγοντας ενίσχυσης ταχύτητας (Velocity amplification factor)
GMPEs	Ground Motion Prediction Equations (Εξισώσεις Πρόβλεψης Εδαφικής Κίνησης)
HVSR	Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Λόγος Οριζόντιου προς Κάθετο Φάσμα)
ICMS	Italian Classification of Microzonation Studies (Ιταλικό Σύστημα Μικροζωνίωσης)
kh	Οριζόντιος σεισμικός συντελεστής (Horizontal seismic coefficient)
kv	Κάθετος σεισμικός συντελεστής (Vertical seismic coefficient)
LP	Δυναμικό ρευστοποίησης (Liquefaction Potential)
ML	Τοπικό μέγεθος σεισμού (Local magnitude)
Ms	Μέγεθος επιφανειακών κυμάτων (Surface wave magnitude)
Mw	Μέγεθος ροπής (Moment magnitude)
PGA	Μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (Peak Ground Acceleration)
Q	Δείκτης ποιότητας βραχώμαζας (Rock mass quality index)
u	Πίεση πόρων (Pore water pressure)
W	Βάρος (Weight)
α	Γωνία κλίσης (Slope angle)
β	Γωνία πρανούς (Slope inclination angle)
γ	Ειδικό βάρος (Unit weight)
ϕ	Γωνία εσωτερικής τριβής (Internal friction angle)
ϕ'	Ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής (Effective internal friction angle)
σ	Ολική τάση (Total stress)
σ'	Ενεργός τάση (Effective stress)
τ	Διατμητική τάση (Shear stress)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική συμπεριφορά των πρανών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της γεωτεχνικής μηχανικής, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου η παρουσία υδροφόρων οριζόντων επιδρά καταλυτικά στη συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας. Τα οδικά πρανά που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή στάθμη υπογείων υδάτων ή κοντά σε υδάτινα σώματα παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς που τα διαφοροποιούν από τα συμβατικά πρανά τα οποία δεν επηρεάζονται από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η παρουσία υδροφόρου ορίζοντα σε τέτοια πρανά οδηγεί σε υψηλότερη εσωτερική στάθμη υπόγειων υδάτων, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών και την ευστάθεια του πρανούς συνολικά (Ng & Pang, 2000, Read & Beale, 2013).

Η παρουσία υψηλού υδροφόρου ορίζοντα συνδέεται άμεσα με την παραγωγή υπερπίεσης πόρων κατά τη σεισμική διέγερση, καθώς οι σεισμικές δονήσεις προκαλούν συμπίεση των κορεσμένων εδαφικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού που περιέχεται στους πόρους του εδάφους. Αυτός ο μηχανισμός αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα ολίσθησης και κατάρρευσης των πρανών (Wang and Sassa, 2009; Huang et al., 2018). Στους βραχύδεις σχηματισμούς, οι ρωγμές μπορεί να είναι γεμισμένες με νερό ή να αποτελούν την έδρα υδραυλικής ροής. Το νερό στις ασυνέχειες μπορεί να προέρχεται από την παρουσία ασυνεχειών κάτω από τη στάθμη των υπόγειων υδάτων ή από τη ροή νερού κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων ή διαρροών διαφόρων προελεύσεων. Η σεισμική φόρτιση κατακερματισμένων βράχων οι οποίοι περιέχουν νερό, προκαλεί μεταβολή τόσο στην πίεση όσο και στη ροή του νερού. Αυτή η μεταβολή σχετίζεται με το μέγεθος και το περιεχόμενο συχνότητας του φορτίου (Johansson, 2014).

Η επίδραση των υπερπίεσεων πόρων στα πρανά κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αποσταθεροποίησής τους. Στα πρανά τα οποία βρίσκονται κοντά σε υδάτινα σώματα, η εκδήλωση υπερπίεσης στους πόρους του εδάφους, μειώνει σημαντικά την ενεργό τάση, οδηγώντας σε απώλεια συνοχής και ενίσχυση της πιθανότητας ολίσθησης (Huang et al., 2021). Η διερεύνηση της

επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα είναι κρίσιμη όχι μόνο σε φυσικά πρηνή αλλά και σε τεχνητές επιχωματώσεις, οδικά έργα και άλλες υποδομές που βρίσκονται σε επαφή με υδάτινα σώματα. Η παρουσία νερού στις ασυνέχειες βραχωδών σχηματισμών ή στο εσωτερικό κορεσμένων εδαφών μπορεί να επιδεινώσει την απόκριση τους σε σεισμικά φορτία, καθώς το νερό δεν συμπιέζεται εύκολα και μεταφέρει τις σεισμικές πιέσεις με τρόπο που ενισχύει την αστάθεια (Johansson, 2014). Η κατανόηση των παραπάνω μηχανισμών έχει μεγάλη πρακτική σημασία για τον σχεδιασμό μέτρων πρόληψης και προστασίας. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τη σημασία της εκτίμησης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της δυναμικής συμπεριφοράς των πρηνών υπό σεισμική φόρτιση ως βασικό εργαλείο για τον περιορισμό των επιπτώσεων κατολισθήσεων και για την προστασία κρίσιμων συγκοινωνιακών δικτύων (Huang & Peng, 2018, Sassa et al., 2005, Read & Beale, 2013).

Στην παρούσα εργασία, ο βασικός σκοπός είναι η διερεύνηση της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα στη σεισμική συμπεριφορά των οδικών πρηνών μέσω της παρουσίας δύο σχετικών μελετών περίπτωσης από την πρόσφατη βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

1.1 Ορισμοί και Βασικές Έννοιες

Η σεισμική συμπεριφορά των πρηνών αναφέρεται στην απόκριση των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων, η οποία χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δυνάμεων που ασκούνται από τη σεισμική διέγερση και της γεωμηχανικές ιδιότητες των υλικών. Αυτή η συμπεριφορά περιλαμβάνει τη δυναμική απόκριση του εδάφους, την ανάπτυξη παραμορφώσεων, την πιθανότητα αστοχίας και τις μόνιμες μετακινήσεις που μπορεί να προκληθούν από τη σεισμική φόρτιση. Η κατανόηση αυτών των φαινομένων αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την αξιολόγηση της σεισμικής ευστάθειας των πρηνών και τον σχεδιασμό κατάλληλων μέτρων προστασίας κατά την περίοδο κατασκευής τους ή κατά τις διαδικασίες συντήρησης (Jibson, 2011). Η σχέση μεταξύ σεισμικών δονήσεων και ευστάθειας πρηνών έχει πολλές παραμέτρους και εξαρτάται

σε σημαντικό βαθμό από τη φύση της σεισμικής διέγερσης, τις γεωτεχνικές ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία του πρανού. Οι σεισμικές δονήσεις μπορεί να οριστούν ως δυνάμεις αδράνειας που ασκούνται στο σύστημα εδάφους-πρανούς οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε υπέρβαση της αντοχής των υλικών και σε αστοχία. Η συμπεριφορά ενός πρανού σε σχέση με την αστοχία λόγω σεισμικού γεγονότος καθορίζεται μέσω του συντελεστή κρίσιμης επιτάχυνσης, ο οποίος αντιπροσωπεύει την ελάχιστη επιτάχυνση που απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης. (Jibson, 2011).

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά των πρανών εντάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: γεωλογικούς, υδρογεωλογικούς και τοπογραφικούς παράγοντες. Οι γεωλογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη λιθολογία, τη γεωλογική δομή, την παρουσία ασυνεχειών και τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφών και βράχων (Xu et al., 2024). Η λιθολογία καθορίζει τις θεμελιώδεις ιδιότητες αντοχής και τις τάσεις παραμόρφωσης των υλικών, ενώ οι γεωλογικές ασυνέχειες όπως ρωγμές, στρωματώσεις και ρήγματα αποτελούν επιφάνειες όπου μπορεί να εμφανιστεί δυνητικά η αστοχία. Η αστοχία από πτώσεις βράχων οι οποίες προκαλούνται από σεισμικές δονήσεις διέπεται από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των ρωγμών και αρθρώσεων (Harp & Noble, 1993).

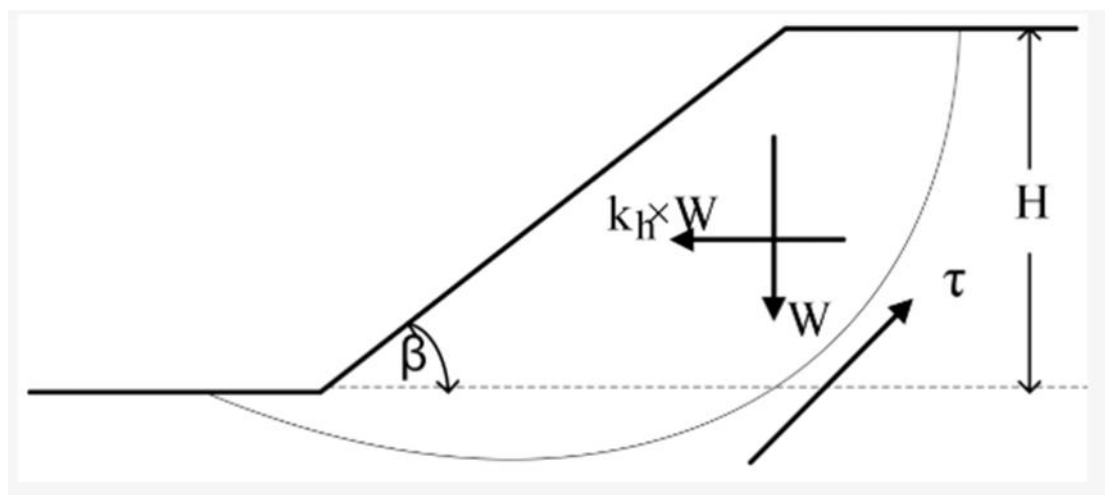
Οι υδρογεωλογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την παρουσία και κίνηση των υπόγειων υδάτων, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την κατανομή των ενεργών τάσεων στο εσωτερικό του πρανού. Η μεταβολή της στάθμης του νερού επηρεάζει άμεσα την κατανομή της πίεσης νερού πόρων και των ενεργών τάσεων στη βραχώδη και εδαφική μάζα των πρανών, επηρεάζοντας συνεπώς την ευστάθεια του πρανού. Σε αυτό το πλαίσιο, η διαρροή νερού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ευστάθεια των πρανών, με την διείσδυση νερού από βροχοπτώσεις και τις διακυμάνσεις της στάθμης νερού να έχουν ιδιαίτερη σημασία. Αυτός είναι και ο λόγος που η άνοδος της στάθμης νερού σε ένα πρανές μετά από έντονα επεισόδια βροχοπτώσεων μπορεί να προκαλέσει αστοχία του πρανού (Soddu et al., 2003).

Οι τοπογραφικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα του πρανού, περιλαμβάνουν τη γεωμετρία του πρανού, την κλίση, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και τις μορφολογικές ιδιαιτερότητες της περιοχής. Η κλίση, ο

προσανατολισμός, το υψόμετρο, η καμπυλότητα του εδάφους και η απόσταση από υδατορεύματα αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα των κατολισθήσεων. Παράγοντες όπως η γωνία κλίσης, ο προσανατολισμός, το υψόμετρο, η τραχύτητα του εδάφους, η καμπυλότητα και το πόσο επίπεδο είναι το πρηνές, καθορίζουν επίσης το πόσο πιθανό είναι να εμφανιστούν οι κατολισθήσεις (Reichenback et al., 2018).

Η κατηγοριοποίηση πρηνών ως προς τη σεισμική ευαισθησία αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση του κινδύνου και τον προγραμματισμό μέτρων προστασίας. Τα συστήματα ταξινόμησης βασίζονται συχνά σε τροποποιημένες εκδόσεις μηχανικών ταξινομήσεων, όπως η δείκτη ποιότητας βραχώμαζας (Q), για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας βραχωδών πρηνών σε σεισμικά προκαλούμενες αστοχίες (Asteris et al., 2022). Οι κατηγορίες των πρηνών ως προς της σεισμική ευαισθησία καθορίζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, με τη γεωλογία, τον προσανατολισμό και την κλίση να αποτελούν τους σημαντικότερους από αυτούς. Η βασική ταξινόμηση είναι η διάκριση των πρηνών σε ασφαλή και μη ασφαλή και βασίζεται σε παραμέτρους όπως το ύψος του πρηνούς, την κλίση, τη συνοχή, τη γωνία τριβής και τη μέγιστη επιτάχυνση εδαφική επιτάχυνση. Το ύψος του πρηνούς επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη σεισμική διέγερση, καθώς μεγαλύτερο ύψος οδηγεί σε αυξημένες δυνάμεις αδράνειας και μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας (Asteris et al., 2022). Η κλίση του πρηνούς (β) καθορίζει τη βασική γεωμετρική διάταξη και την κρίσιμη επιτάχυνση που απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης, με απότομα πρηνή να παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε αστοχία. Οι παράμετροι αντοχής των εδαφικών υλικών, δηλαδή η συνοχή (c) και η γωνία τριβής (ϕ), αποτελούν τους θεμελιώδεις παράγοντες που αντιστέκονται στις δυνάμεις που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση, με υψηλότερες τιμές να συνεισφέρουν στην ευστάθεια του πρηνούς. Τέλος, η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA) που αναμένεται κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων αντιπροσωπεύει το εξωτερικό φορτίο που επιβάλλεται στο σύστημα, με υψηλότερες επιταχύνσεις να αυξάνουν την πιθανότητα υπέρβασης της αντοχής των υλικών. Η συνδυαστική αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ή αναλυτικών μεθόδων επιτρέπει τη δημιουργία κατωφλίων ασφαλείας και

την κατηγοριοποίηση των πρανών σε διακριτές κλάσεις κινδύνου, παρέχοντας έτσι ένα αντικειμενικό και αναπαραγώγιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού και διαχείρισης κινδύνου (Εικόνα 1) (Asteris et al., 2022).



Εικόνα 1 Γεωμετρικό μοντέλο αναπαράστασης του πρανούς για την ανάλυση της σταθερότητάς του (W : βάρος, τ : αντοχή σε διάτμηση, k_h : σεισμικός συντελεστής, g : επιτάχυνση λόγω βαρύτητας, β : κλίση της πλαγιάς, H : ύψος της πλαγιάς) (Πηγή: Asteris et al., 2022).

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η πολυπλοκότητα της σεισμικής συμπεριφοράς των πρανών απαιτεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνυπολογίζει όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες. Η ανάλυση σεισμικής ευστάθειας ενός πρανού αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δράσης και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους. Η κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων ανάλυσης και πρόβλεψης της σεισμικής συμπεριφοράς των πρανών, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η παρουσία υδροφόρων οριζόντων περιπλέκει περαιτέρω το πρόβλημα που δημιουργείται (Asteris et al., 2022, Reichenback et al., 2018, Soddu et al., 2003).

1.2 Μηχανισμοί Αστοχίας Πρανών κατά τη Διάρκεια Σεισμικών Δονήσεων

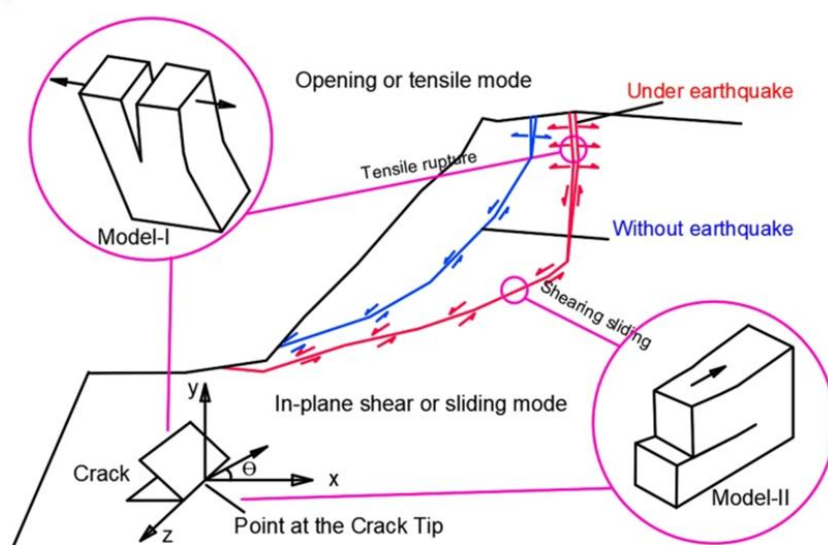
Οι μηχανισμοί αστοχίας πρανών κατά τη διάρκεια ακολουθιών σεισμικών διεγέρσεων αποτελούν σύνθετα φαινόμενα που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μεταξύ των δυνάμεων και των ιδιοτήτων του εδάφους του πρανού. Οι σεισμικές επιταχύνσεις και οι δυνάμεις αδράνειας αποτελούν τη θεμελιώδη αιτία των καταπονήσεων που υφίστανται τα πρανή κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων, λειτουργώντας ως το

πρωταρχικό σύστημα φόρτισης που μετατρέπει την κίνηση του εδάφους σε δυνάμεις που επιδρούν στη μάζα του πρανούς (Peng et al., 2023, Liu et al., 2020).

Η θεμελιώδης σχέση $F = M \times A$ (δύναμη = μάζα $\times$ επιτάχυνση) αποκαλύπτει ότι όταν το έδαφος επιταχύνεται λόγω σεισμικών κυμάτων, κάθε στοιχείο της εδαφικής μάζας του πρανούς αναπτύσσει μια δύναμη αδράνειας ανάλογη της μάζας του και της επιτάχυνσης που υφίσταται. Αυτό σημαίνει ότι μεγαλύτερα πρανή με περισσότερη εδαφική μάζα θα αναπτύξουν μεγαλύτερες δυνάμεις, εξηγώντας γιατί η γεωμετρία και οι διαστάσεις του πρανούς παίζουν κρίσιμο ρόλο στη σεισμική του συμπεριφορά. Αυτές οι δυνάμεις δεν είναι στατικές αλλά μεταβάλλονται συνεχώς καθώς η σεισμική επιτάχυνση αλλάζει κατά τη διάρκεια του σεισμού. Στην πρακτική μηχανική, η πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά απλοποιείται θεωρώντας ότι η σεισμική δύναμη μπορεί να αναπαρασταθεί ως το γινόμενο μιας "σταθερής" επιτάχυνσης (που αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική επιτάχυνση του σεισμού) με τη συνολική μάζα του δυνητικά ολισθαίνοντος τμήματος του πρανούς. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τον υπολογισμό τόσο των οριζόντιων όσο και των κάθετων συνιστωσών της σεισμικής δύναμης, καθώς οι σεισμοί προκαλούν κίνηση προς όλες τις κατευθύνσεις. Η οριζόντια συνιστώσα συνήθως θεωρείται η πιο σημαντική για την ευστάθεια πρανών, καθώς τείνει να "σπρώχνει" το πρανές προς την κατεύθυνση της πιθανής ολίσθησης (Peng et al., 2023).

Η ισχυρή οριζόντια σεισμική δύναμη αδράνειας δημιουργεί ένα χαρακτηριστικό μοτίβο καταπόνησης που οδηγεί σε συγκεκριμένους τύπους ρωγμών. Η κάθετη ρωγμή που σχηματίζεται στην κορυφή του πρανούς προκύπτει από εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται όταν η οριζόντια δύναμη αδράνειας προσπαθεί να "τραβήξει" το ανώτερο τμήμα του πρανούς. Αυτή η ρωγμή εμφανίζεται κάθετα στην κατεύθυνση της κυρίαρχης σεισμικής δύναμης επειδή οι εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται κάθετα προς τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Ταυτόχρονα, η πλευρική παραμόρφωση κατά την οριζόντια κατεύθυνση αντανάκλα την τάση του πρανούς να μετακινηθεί ως σύνολο προς την κατεύθυνση της σεισμικής δύναμης. Το γεγονός ότι η κάθετη ρωγμή εμφανίζεται σε προγενέστερο χρόνο, υποδηλώνει μια χρονική αλληλουχία στην ανάπτυξη της αστοχίας. Η εφελκυστική αστοχία στην κορυφή προηγείται χρονικά επειδή τα εδαφικά υλικά έχουν πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή

σε σχέση με τη διατμητική τους αντοχή. Μόλις σχηματιστεί αυτή η αρχική ρωγμή, δημιουργείται μια ελεύθερη επιφάνεια που αλλάζει την κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του πρανούς, διευκολύνοντας την περαιτέρω ανάπτυξη πλευρικών παραμορφώσεων και τελικά την ολίσθηση. Αυτός ο μηχανισμός εξηγεί γιατί πολλές σεισμικές αστοχίες πρανών χαρακτηρίζονται από έναν συνδυασμό εφελκυστικής ρήξης στο ανώτερο τμήμα και διατμητικής ολίσθησης στο κατώτερο τμήμα του πρανούς (Εικόνα 2) (Liu et al., 2020).

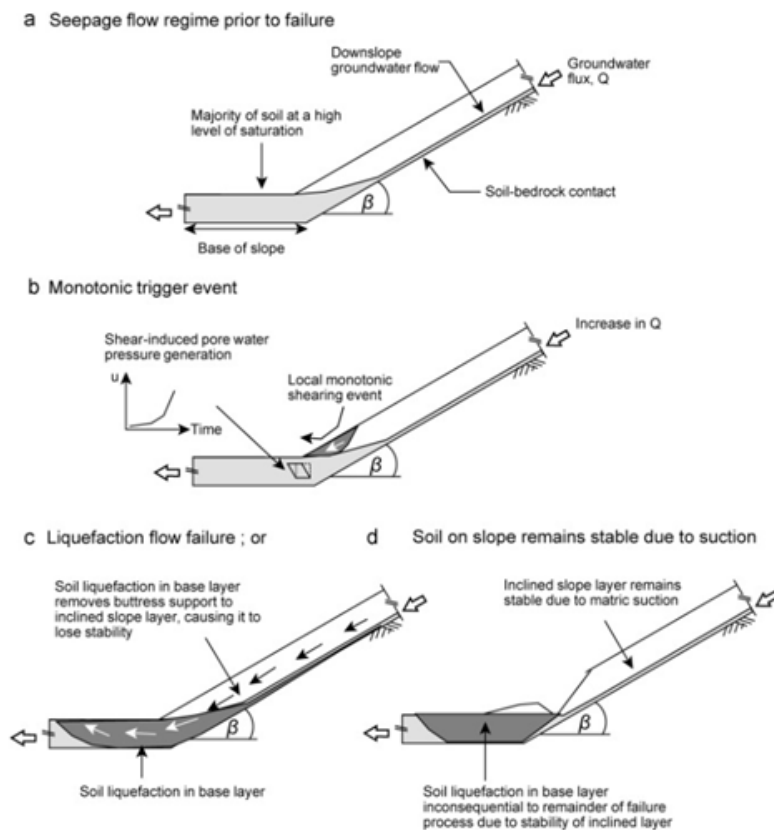


Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών επιφανειών ολίσθησης υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Υπό σεισμικές συνθήκες παρατηρούνται εφελκυστικές ρωγμές στην κορυφή του πρανούς, ενώ διατμητική ολίσθηση σχηματίζεται μετά την εφελκυστική ρήξη. Απεικονίζονται επίσης οι τρόποι φόρτισης τάσεων και το σύστημα συντεταγμένων των ρωγμών (Πηγή: Liu et al., 2020).

Η φύση των σεισμικών δυνάμεων προκαλεί διαφορετικούς τύπους αστοχίας ανάλογα με τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του πρανούς. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η δυναμική αστοχία του πρανούς αποτελεί σύνθεση της εφελκυστικής αστοχίας στο ανώτερο τμήμα και της διατμητικής αστοχίας στο κατώτερο τμήμα. . Όταν ένα αντικλινές πρανός υπόκειται σε σεισμική φόρτιση, τα τμήματά του τα οποία έχουν μικρότερη αναλογία διαστάσεων αρχίζουν να κινούνται αρχικά, συνεπώς η σειρά μετάδοσης δύναμης μεταξύ των τμημάτων αυτών εξαρτάται από την αναλογία των διαστάσεων τους (Yagoda – Biran & Hatzor, 2013).

Επιπρόσθετα, η απώλεια συνοχής και τριβής στο έδαφος αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους μηχανισμούς που οδηγεί σε σεισμική αστοχία σε ένα πρανές αφού οδηγεί σε προοδευτική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών. Κατά το μηχανισμό της κυκλικής φόρτισης στη διάρκεια ενός σεισμού, το έδαφος υπόκειται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις που αλλάζουν κατεύθυνση και μέγεθος με υψηλή συχνότητα. Αυτή η κυκλική φόρτιση προκαλεί σταδιακή εξασθένηση των δεσμών μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων, μειώνοντας τη συνοχή (c) του υλικού. Ταυτόχρονα, η επαναλαμβανόμενη διάτμηση οδηγεί σε αναδιάταξη των σωματιδίων και μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ), ιδιαίτερα σε χαλαρά εδάφη. Η μείωση αυτών των βασικών παραμέτρων αντοχής (c και ϕ) έχει άμεσο αντίκτυπο στη συνολική ικανότητα του πρανούς να αντιστέκεται στις ολισθητικές δυνάμεις. Σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma' \tan \phi$), η μείωση της συνοχής και της τριβής οδηγεί σε δραματική μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και με τις ίδιες εξωτερικές δυνάμεις, το πρανές μπορεί να χάσει την ευστάθειά του καθώς οι δυνάμεις αντίστασης γίνονται ανεπαρκείς (Peng et al., 2023).

Σε χαλαρά, λεπτόκοκκα, κορεσμένα υλικά (κυρίως άμμοι και ιλύς), η κυκλική φόρτιση οδηγεί σε ένα ειδικό φαινόμενο: την ρευστοποίηση. Οι επαναλαμβανόμενες δονήσεις προκαλούν τάση των σωματιδίων να πλησιάσουν περισσότερο μεταξύ τους (συμπυκνωθούν), αλλά επειδή το έδαφος είναι κορεσμένο με νερό και η φόρτιση είναι πολύ γρήγορη, το νερό δεν έχει χρόνο να αποστραγγιστεί. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της πίεσης του νερού στους πόρους, η οποία μπορεί να φτάσει σε τέτοιο σημείο που να εξουδετερώσει εντελώς τις ενεργές τάσεις μεταξύ των σωματιδίων, με αποτέλεσμα το έδαφος να συμπεριφέρεται σαν υγρό (Εικόνα 3) (Lade & Yamamuro, 2011).

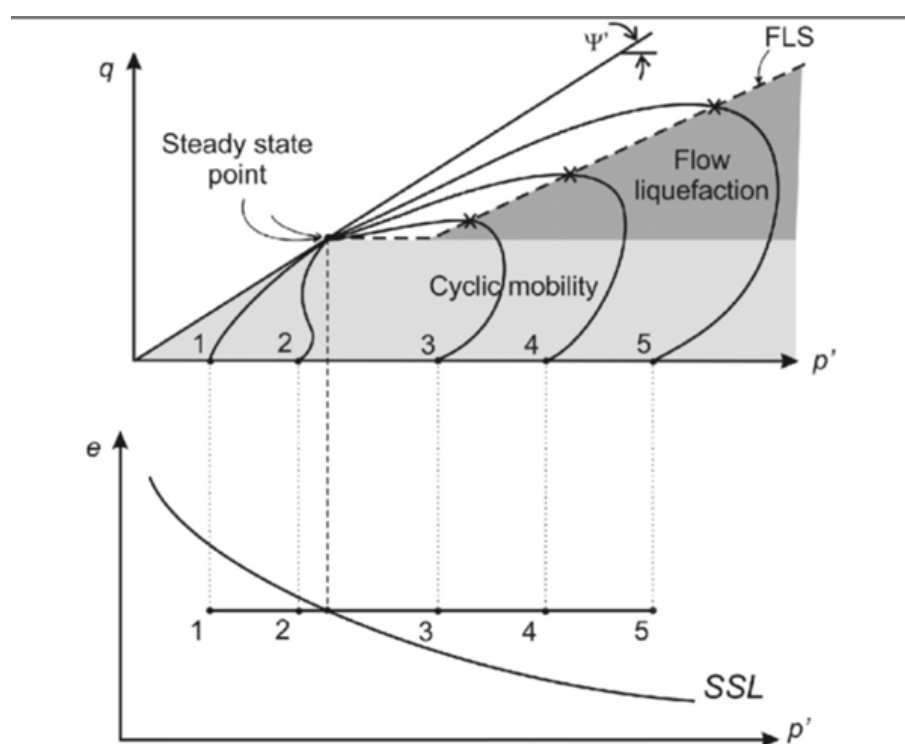


Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών ρευστοποίησης σε πρανή: (α) καθεστώς ροής υπόγειου νερού πριν την αστοχία, (β) μονοτονικό ερέθισμα που προκαλεί ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων, (γ) αστοχία λόγω ρευστοποίησης στη βάση του πρανούς με απώλεια στήριξης και ολίσθηση, και (δ) περίπτωση όπου το πρανές παραμένει σταθερό λόγω αναρρόφησης (Πηγή: Beddoe & Take, 2016).

Η αντοχή των εδαφών βασίζεται στην έννοια της ενεργού τάσης, όπως διατυπώνεται από την αρχή του Terzaghi: $\sigma' = \sigma - u$, όπου σ' είναι η ενεργός τάση, σ η ολική τάση και u η πίεση νερού πόρων. Καθώς η πίεση νερού πόρων αυξάνεται λόγω σεισμικής φόρτισης, η ενεργός τάση μειώνεται αναλογικά, οδηγώντας σε άμεση μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb ($\tau = c' + \sigma' \tan \phi$). Αυτή η διαδικασία είναι προοδευτική, καθώς η αρχική μείωση της αντοχής επιτρέπει μεγαλύτερες παραμορφώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν περαιτέρω αύξηση της πίεσης πόρων, δημιουργώντας έναν "φάυλο κύκλο" που μπορεί να οδηγήσει στην πλήρη απώλεια της αντοχής (Huang & Yu, 2013).

Οι σεισμικές δονήσεις επιβάλλουν κυκλικές διατμητικές τάσεις στα κορεσμένα εδάφη, προκαλώντας επαναλαμβανόμενη συμπίεση και επαναδιαστολή των εδαφικών σωματιδίων. Σε χαλαρά, κορεσμένα κοκκώδη εδάφη, αυτή η κυκλική φόρτιση οδηγεί

σε μία τάση αναδιάταξης των σωματιδίων σε πιο συμπαγή διάταξη, μειώνοντας τον όγκο των κενών ανάμεσά τους. Επειδή το νερό είναι ασυμπίεστο και δεν παίρνει χρόνο να αποστραγγιστεί λόγω της ταχύτητας της σεισμικής φόρτισης (undrained conditions), η μείωση του όγκου των κενών οδηγεί σε δραματική αύξηση της πίεσης του νερού στους πόρους. Όταν αυτή η πίεση φτάσει στο επίπεδο της ολικής τάσης ($u = \sigma$), η ενεργός τάση γίνεται μηδέν ($\sigma' = 0$), και το έδαφος χάνει εντελώς τη διατμητική του αντοχή, συμπεριφερόμενο όπως ένα πυκνό υγρό (Εικόνα 4) (Ben-Zeev et al., 2023).



Εικόνα 4 Διαγραμματική απεικόνιση που αναπαριστά τη διαδικασία ρευστοποίησης (liquefaction) σε κορεσμένα κοκκώδη εδάφη: η επαναλαμβανόμενη (κυκλική) διατμητική φόρτιση οδηγεί σε συμπίεση, αύξηση της πίεσης πόρων και τελικά «υγροποίηση» (το έδαφος μπορεί να χάσει εντελώς τη διατμητική του αντοχή και να συμπεριφερθεί ρευστά) (Πηγή: Ben-Zeev et al., 2023) .

Η ρευστοποίηση δεν είναι ένα ομογενές φαινόμενο αλλά εμφανίζεται αρχικά σε τοπικές περιοχές όπου οι συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές (χαλαρότερα εδάφη, υψηλότερες σεισμικές επιταχύνσεις). Όταν δημιουργούνται αυτές οι αρχικές εστίες ρευστοποίησης με διαφορετικές πιέσεις πόρων, στη συνέχεια αναπτύσσονται υδραυλικές κλίσεις που προκαλούν ροή νερού από τις περιοχές υψηλής πίεσης προς τις περιοχές χαμηλής

πίεσης. Αυτή η ροή μεταφέρει την υπερπίεση σε γειτονικές περιοχές που αρχικά δεν είχαν ρευστοποιηθεί, επεκτείνοντας σταδιακά την περιοχή αστοχίας. Επιπλέον, η ροή νερού μπορεί να προκαλέσει έκπλυση λεπτόκοκκων υλικών (ripping), δημιουργώντας κανάλια που διευκολύνουν την περαιτέρω διάδοση του φαινομένου και μπορούν να οδηγήσουν σε επιφανειακές εκδηλώσεις όπως αμμοβολές (sand boils), ενώ παράλληλα η αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας της εδαφικής μάζας επηρεάζει την κατανομή των πιέσεων πόρων σε ευρύτερη κλίμακα (Youd, 2003).

Η ρευστοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές αστοχίες πρανών. Η αστοχία εδάφους με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται πλευρική εξάπλωση και μπορεί να συμβεί σε πολύ μικρές κλίσεις με γωνίες μόνο 1 ή 2 μοίρες από το οριζόντιο επίπεδο. Πρόσφατες μελέτες φυσικών μοντέλων συμπεριφοράς κατολίσθησης σε χαλαρά, κοκκώδη πρανή έχουν δείξει ότι το έδαφος στη βάση ενός πρανού μπορεί να είναι αυξημένου κινδύνου ρευστοποίησης καθώς αυτή η περιοχή βρίσκεται άμεσα στη διαδρομή μονοτονικών διατμητικών γεγονότων. Οι αστοχίες πρανών που σχετίζονται με αυτόν τον τύπο ανακατανομής πίεσης πόρων μπορεί να συμβούν σε χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από λεπτά έως ώρες μετά από ισχυρή σεισμική δόνηση εδάφους (Youd, 2003).

Η επίδραση της σεισμικής ενίσχυσης (seismic amplification) παίζει καθοριστικό ρόλο στην ένταση των σεισμικών δυνάμεων που επιδρούν στα πρανή. Η δημιουργία επιφανειακών κυμάτων λόγω διάδοσης κυμάτων σώματος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία, με αυτό το φαινόμενο να συμβαίνει τυπικά σε περιοχές με τοπογραφικές μεταβολές (Chen et al., 2024). Η μέγιστη ενίσχυση επιτάχυνσης επιτυγχάνεται για γωνία πρανού $\alpha = 32.3^\circ$, με το ύψος του πρανού να επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος της ενίσχυσης αλλά να μην επηρεάζει την κατανομή της μέγιστης ενίσχυσης όταν είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της εισερχόμενης κίνησης. Η γωνία 32.3° αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη γεωμετρική παράμετρο που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των προσπιπτόντων σεισμικών κυμάτων και της τοπογραφίας του πρανού, δημιουργώντας τις ιδανικές συνθήκες για την εστίαση της σεισμικής ενέργειας. Σε αυτή τη συγκεκριμένη κλίση, τα σεισμικά κύματα που προσπίπτουν στην επιφάνεια του πρανού υφίστανται ανακλάσεις και συμβολές που οδηγούν σε συντονισμό κυμάτων, καθώς τα ανακλώμενα κύματα από την επιφάνεια του πρανού συμβάλλουν εποικοδομητικά με τα προσπίπτοντα κύματα. Η

συγκεκριμένη κλίση διευκολύνει επίσης την "παγίδευση" σεισμικής ενέργειας κοντά στην επιφάνεια του πρανούς, ενώ σε γωνίες μικρότερες από 32.3° το πρανές είναι πολύ ήπιο για να δημιουργήσει σημαντική ενίσχυση, και σε μεγαλύτερες γωνίες η απότομη γεωμετρία οδηγεί σε διασπορά της σεισμικής ενέργειας αντί για εστίαση (Dahal et al., 2024).

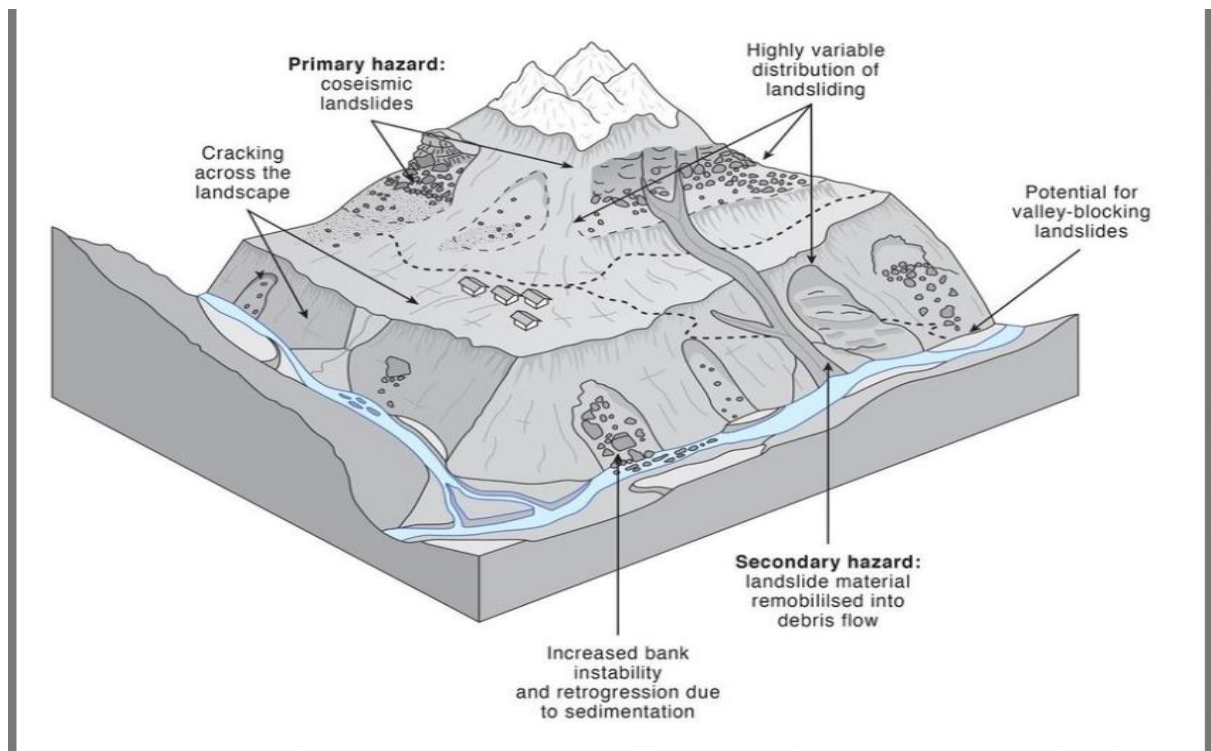
Επιπρόσθετα, το μέγεθος της ενίσχυσης επηρεάζεται και από το ύψος του πρανούς, επειδή μεγαλύτερο ύψος σημαίνει ότι προκειμένου να αλληλοεπιδράσουν με την τοπογραφία του πρανούς, πρέπει να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση. Συνεπώς, αυτό επιτρέπει περισσότερες ανακλάσεις κυμάτων και οδηγεί σε μεγαλύτερη συσσώρευση ενέργειας, ενώ παράλληλα μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες συντονισμού μεταξύ της φυσικής περιόδου δόνησης του πρανούς και των χαρακτηριστικών του εισερχόμενου κύματος. Ωστόσο, όταν το ύψος του πρανούς υπερβαίνει το μήκος κύματος της εισερχόμενης σεισμικής κίνησης, παρατηρείται ότι η θέση όπου εμφανίζεται η μέγιστη ενίσχυση παραμένει σχετικά σταθερή, με τη περαιτέρω αύξηση του ύψους να μην μετατοπίζει το σημείο μέγιστης ενίσχυσης, φαινόμενο που συμβαίνει επειδή τα σεισμικά κύματα αντιλαμβάνονται το πρανές ως μια τοπική ανωμαλία με συγκεκριμένες διαστάσεις σε σχέση με το δικό τους μήκος κύματος (Dahal et al., 2024).

1.3 Κατολισθήσεις σε πρανή μετά από σεισμική δραστηριότητα

Οι σεισμικές κατολισθήσεις αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους δευτερογενείς κινδύνους που σχετίζονται με σεισμικές διεγέρσεις, διακρινόμενες χρονικά σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση την εμφάνισή τους σε σχέση με το κύριο σεισμικό γεγονός. Οι ενεργές αργές κατολισθήσεις παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συγχρονική και μετασεισμική συμπεριφορά, με ορισμένες κατολισθήσεις να μην παρουσιάζουν καμία μετασεισμική επιτάχυνση, ενώ πολλές άλλες να έχουν αυξημένη κίνηση τις ημέρες έως εβδομάδες μετά από έναν σεισμό (Murphy, 2015). Οι συνσεισμικές κατολισθήσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού ή αμέσως μετά από αυτόν, οφειλόμενες κυρίως στις άμεσες δυναμικές δυνάμεις που επιβάλλονται από τη σεισμική διέγερση. Αυτού του τύπου οι κατολισθήσεις αποτελούν σημαντικά

αποτελέσματα ισχυρών σεισμών ωστόσο οι μηχανισμοί τους δεν είναι πλήρως μελετημένοι, καθώς οδηγούνται από δυνάμεις αδράνειας που ενεργούν στα πρανή και μπορούν να ποικίλλουν σε μέγεθος από μεμονωμένους βραχώδεις φραγμούς λίγων m³ σε όγκο έως καταστροφικές πτώσεις πολλών Mm³ (Εικόνα 4) (Murph, 2015).

Οι μεταγενέστερες κατολισθήσεις εμφανίζονται μετά τον κύριο σεισμό και μπορεί να συνεχιστούν για μήνες ή ακόμη και χρόνια μετά το αρχικό σεισμικό γεγονός. Τόσο ο αριθμός όσο και η περιοχή των χαρτογραφημένων κατολισθήσεων παραμένουν σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με τα επίπεδα των συνσεισμικών κατολισθήσεων αφού εξακολουθούν να εντοπίζονται ακόμη και 3.5 χρόνια μετά τον σεισμό. . Οι επιπτώσεις των μετασεισμών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη μεταγενέστερων κατολισθήσεων. Οι μετασεισμοί μπορούν να είναι σημαντικός παράγοντας ενεργοποίησης για περαιτέρω σεισμικές κατολισθήσεις όπως αναφέρθηκε. Η εξασθένιση υλικών λόγω κατακερματισμού αποτελεί έναν κρίσιμο μηχανισμό που αυξάνει την ευπάθεια των πρανών σε μεταγενέστερες αστοχίες. Οι παρατηρήσεις πεδίου έδειξαν επίσης ότι οι σεισμοί μπορούν να έχουν επίσης μακροπρόθεσμες επιδράσεις στην ευστάθεια πρανών: στα χρόνια που ακολούθησαν τον σεισμό της 21ης Σεπτεμβρίου 1999 στην Ταϊβάν, για παράδειγμα, υπήρξε αύξηση στον αριθμό των κινήσεων εδάφους που προκλήθηκαν από τη συγκεκριμένη σεισμική δραστηριότητα (Εικόνα 5) (Xi et al., 2024).



Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση που αναδεικνύει τη διαφορά ανάμεσα σε συνσεισμικές (coseismic) και μετασεισμικές (post-seismic) κατολισθήσεις. Η εικόνα αποτυπώνει δύο διακριτές φάσεις: Συνσεισμικές κατολισθήσεις οι οποίες εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά ένα σεισμό, εξαιτίας των άμεσων δυναμικών επιβαρύνσεων και μετασεισμικές κατολισθήσεις οι οποίες εμφανίζονται σε χρονικό διάστημα ημερών έως εβδομάδων μετά τη δόνηση, και τυπικά σχετίζονται με αργή κινητοποίηση υδάτων ή μεταβολή της ευστάθειας λόγω καθυστερημένων μηχανισμών (πηγή: Kohler & Puzrin, 2023).

Η επίδραση βροχοπτώσεων σε πρηνή αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς μεταγενέστερων κατολισθήσεων. Οι σεισμοί αναγνωρίζονται ως σημαντικός παράγοντας επικινδυνότητας για την αύξηση της μετασεισμικής δραστηριότητας σε κατολισθήσεις είτε διαταράσσοντας την αντοχή και/ή τη γεωμετρία των υλικών των πρηνών είτε παράγοντας συγχρονικές αποθέσεις κατολισθήσεων, οι οποίες είναι επιρρεπείς σε αστάθειες κυρίως λόγω μεταγενέστερων επεισοδίων βροχοπτώσεων. Η μεταβλητή δραστηριότητα και επιτάχυνση αργών ενεργών κατολισθήσεων που παρατηρείται κατά τη διάρκεια και μετά από σεισμούς μπορεί να εξηγηθεί από αλληλεπιδράσεις μεταξύ δυναμικής πίεσης υδάτινων πόρων και της εξάρτησης της αντοχής του πρηνούς από το ρυθμό της κατολίσθισης (Sassa et al., 2007).

Ακόμη μία σημαντική κατηγορία κατολισθήσεων η οποία επηρεάζει τα πρηνή είναι οι κατολισθήσεις βράχων. Διακρίνονται διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση

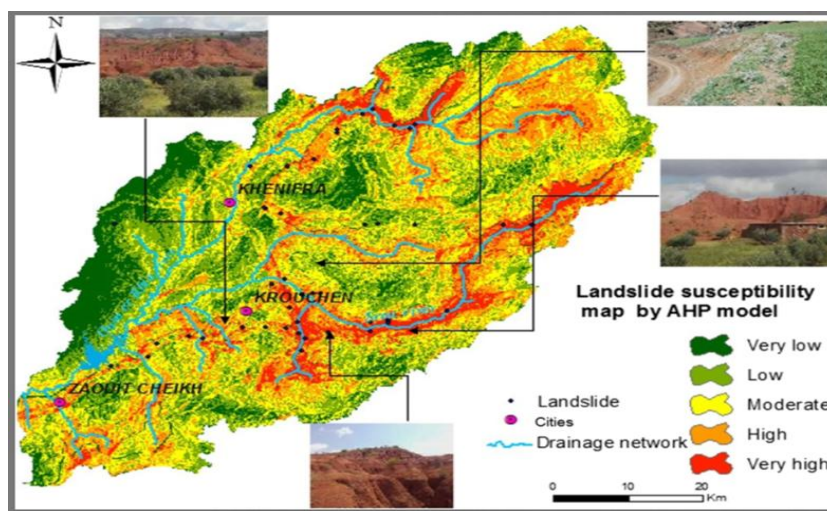
τον τρόπο κίνησής τους. Οι πτώσεις βράχων (rock falls) χαρακτηρίζονται από την απότομη αποκόλληση βραχωδών τεμαχίων από απότομες επιφάνειες και την κίνησή τους μέσω ελεύθερης πτώσης, αναπήδησης και κύλισης κάτω από την επίδραση της βαρύτητας. Οι ολισθήσεις βράχων (rock slides) αφορούν τη κίνηση μεγαλύτερων βραχωδών μαζών κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών αδυναμίας, όπως στρωματώσεις, ρωγμές ή επιφάνειες αποσάθρωσης. Η κυριαρχία των πτώσεων βράχων στα σεισμικά γεγονότα οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελούν τη φυσική απόκριση σε εντοπισμένες ζώνες εντάσεων που δημιουργούνται από τη σεισμική διέγερση, ενώ απαιτούν χαμηλότερα επίπεδα σεισμικής ενέργειας για την ενεργοποίησή τους σε σχέση με μεγάλες βαθιές ολισθήσεις (Goodman & Kieffer, 2000).

Το βασικό όριο των 40° το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση των κατολισθήσεων στα πρηνή, αναφέρεται στην κλίση των πρηνών και έχει φυσική και μηχανική βάση. Σε γωνίες μικρότερες από αυτό το όριο, οι βραχώδεις μάζες τείνουν να παραμένουν σταθερές ακόμη και υπό σεισμική διέγερση, καθώς η συνιστώσα της βαρύτητας παράλληλα στην επιφάνεια δεν είναι αρκετή για να υπερνικήσει την τριβή και τη συνοχή. Σε κλίσεις μεγαλύτερες των 40° , τα σεισμικά κύματα μπορούν εύκολα να διαταράξουν την ισορροπία των βραχωδών τμημάτων, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν προϋπάρχουσες ασυνέχειες ή αδύναμες περιοχές. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το φαινόμενο δεν εξαρτάται από την εδαφολογία αλλά κυρίως από τη γεωμετρία και την παρουσία ασυνεχειών (Kanamori & Borsky, 2001).

1.3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά πρηνών και ευπάθεια στις κατολισθήσεις

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των πρηνών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ευπάθειά τους έναντι σεισμικών κατολισθήσεων, με τη γεωμετρία, τη γεωλογική δομή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες να επηρεάζουν σημαντικά την πιθανότητα αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση πρηνών και οι κρίσιμες γωνίες αποτελούν βασικούς παράγοντες καθορισμού της σεισμικής ευπάθειας. Οι συνσεισμικές κατολισθήσεις είναι στενά συσχετισμένες με τις τοπογραφικές συνθήκες καθώς και την ένταση της δόνησης, με τις περισσότερες συγχρονικές κατολισθήσεις να συμβαίνουν σε περιοχές με τραχύτητα, κλίση πρηνούς και προσανατολισμό πρηνούς >1.2 , >30 , και μεταξύ 90 και

270, αντίστοιχα. Τα πλέον επικίνδυνα ορυκτά βρίσκονται σε πρηνή με μεγάλες κλίσεις (από 35 μοίρες και πάνω) και πρηνή που υποστηρίζονται από ιζήματα που είναι επιρρεπή σε ρευστοποίηση (Εικόνα 6).

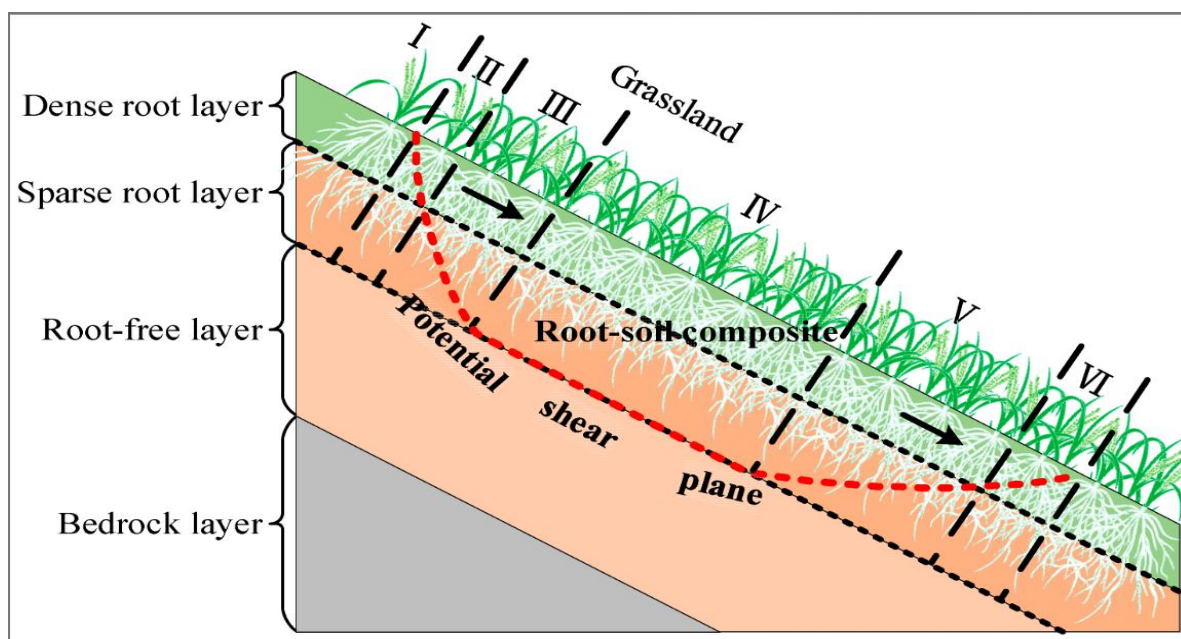


Εικόνα 6 Χάρτης ευπάθειας πρηνών σε κατολισθήσεις, όπου φαίνονται οι περιοχές με μεγάλη κλίση καθώς και η γεωμορφολογική τους δομή (Πηγή: Nurwatik et al., 2022).

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη σεισμική συμπεριφορά των πρηνών, ιδιαίτερα όσον αφορά την ανάπτυξη πίεσης στο υδάτινο περιβάλλον και την επίδραση στην αντοχή των υλικών του πρηνούς. Κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων, η στάθμη των υπόγειων υδάτων δεν παραμένει στατική αλλά υφίσταται δυναμικές μεταβολές που επηρεάζουν άμεσα την ευστάθεια των πρηνών. Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν προσωρινή άνοδο της στάθμης λόγω της συμπίεσης των υδροφόρων στρωμάτων, ή αντίθετα, να δημιουργήσουν τοπικές πτώσεις λόγω της δημιουργίας νέων δρόμων διαφυγής μέσω ρωγμάτωσης. Αυτές οι ταχείες μεταβολές διαταράσσουν την υδροστατική ισορροπία που είχε αναπτυχθεί με το χρόνο, δημιουργώντας μεταβατικές συνθήκες όπου οι πιέσεις πόρων μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες ισορροπίας. Επιπρόσθετα, η δημιουργία νέων ρωγμών και η διαστολή υπαρχουσών μπορεί να αλλάξει δραματικά τη διαπερατότητα των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών, επηρεάζοντας τη μελλοντική υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής και δημιουργώντας νέες ζώνες ευπάθειας για μελλοντικά γεγονότα (Brain et al., 2021).

Τέλος, βλάστηση και το ριζικό σύστημα παίζουν σημαντικό ρόλο στη σεισμική ευστάθεια των πρηνών, τόσο ως παράγοντες σταθεροποίησης όσο και ως δείκτες

ανάκτησης μετά από σεισμικές διαταραχές. Θετικές συσχετίσεις μεταξύ του χρόνου ανάκτησης κατολισθήσεων και διαφόρων παραγόντων όπως το ποσό των συγχρονικών αποθέσεων κατολισθήσεων, η ένταση της σεισμικότητας όσον αφορά τόσο τους κύριους σεισμούς όσο και τους μετασεισμούς ή ο ρυθμός επαναβλάστησης είναι παράμετροι οι οποίοι τονίζονται στη βιβλιογραφία. Το ριζικό σύστημα παρέχει μηχανική ενίσχυση μέσω της αύξησης της συνοχής του εδάφους, ενώ η επαναβλάστηση μετά από σεισμικές διαταραχές μπορεί να συμβάλει στη σταδιακή σταθεροποίηση των διαταραγμένων πρανών. Ωστόσο, η απότομη απώλεια βλάστησης λόγω κατολισθήσεων μπορεί να αφήσει τα πρανή εκτεθειμένα σε περαιτέρω διάβρωση και αστάθεια, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια μεταγενέστερων βροχοπτώσεων ή μετασεισμών (Εικόνα 7) (Masi et al., 2021).



Εικόνα 7 Σχηματική απεικόνιση της δράσης της βλάστησης και του ριζικού συστήματος στην ενίσχυση ευστάειας των πρανών. Παρουσιάζονται οι ζώνες διείσδυσης των ριζών και τον μηχανισμό σταθεροποίησης μέσω της ενσωμάτωσης των ριζικών ινών στο έδαφος—ιδανική για να υποστηρίξει την παράγραφο σου (Πηγή: Masi et al., 2021)

1.4 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών υπό σεισμική φόρτιση

1.4.1 Μέθοδος Newmark

Η μέθοδος Newmark αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις προσεγγίσεις στην ανάλυση σεισμικής ευστάθειας πρανών, αναπτυχθείσα από τον Nathan M. Newmark το 1965. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου βασίζεται στη μοντελοποίηση πρανών ως ελαστοπλαστικών συστημάτων, όπου η σεισμική συμπεριφορά αναλύεται μέσω της έννοιας του ολισθαίνοντος τμήματος. Σύμφωνα με τον Kramer, η μέθοδος Newmark αποτελεί βελτίωση της παραδοσιακής ψευδοστατικής μεθόδου που εξετάζει τη σεισμική αστοχία πρανούς μόνο σε οριακές συνθήκες (δηλαδή όταν ο συντελεστής ασφαλείας γίνεται ίσος με 1) και παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση κατάρρευσης αλλά καμία πληροφορία για τις προκαλούμενες παραμορφώσεις. Με αυτή την προσέγγιση, όταν ο συντελεστής ασφαλείας γίνεται μικρότερος από 1, δεν είναι σίγουρο ότι θα συμβεί η αστοχία αφού το χρονικό διάστημα είναι ελάχιστο (Leshchinsky, 2018).

Η έννοια της κρίσιμης επιτάχυνσης (yield acceleration) αποτελεί τον θεμελιώδη παράγοντα της μεθόδου και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη οριζόντια επιτάχυνση που απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης. Η επιτάχυνση διαρροής αποτελεί το δεύτερο ουσιαστικό μέγεθος στη θεωρία τμήματος Newmark για τον υπολογισμό της σεισμικής μόνιμης μετατόπισης πρανούς και καθορίζεται συνήθως βάσει της οριακής κατάστασης του ολισθαίνοντος σώματος υπό σεισμική φόρτιση (Leshchinsky, 2018).

Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου Newmark βασίζεται σε σαφείς και εφαρμόσιμες εξισώσεις που συνδέουν τη σεισμική φόρτιση με τις αναμενόμενες μετακινήσεις. Η κρίσιμη επιτάχυνση υπολογίζεται από τη θεμελιώδη σχέση: $a_c = (FS - 1) \times g \times \sin \alpha$, όπου FS είναι ο στατικός συντελεστής ασφαλείας, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και α η γωνία κλίσης του πρανούς. Αυτή η εξίσωση εκφράζει τη φυσική αρχή ότι όσο υψηλότερος είναι ο στατικός συντελεστής ασφαλείας, τόσο μεγαλύτερη επιτάχυνση απαιτείται για την έναρξη της κίνησης. Ο υπολογισμός των μετακινήσεων πραγματοποιείται μέσω διπλής ολοκλήρωσης της σεισμικής καταγραφής. Βάσει της θεωρίας τμήματος Newmark, η σεισμική μόνιμη μετατόπιση καθορίζεται με την ολοκλήρωση της χρονικής ιστορίας επιτάχυνσης δύο φορές όταν η απόκριση επιτάχυνσης υπερβαίνει την επιτάχυνση διαρροής του ολισθαίνοντος σώματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση επιταχυνσιογραφημάτων ως δεδομένα, από τα

οποία υπολογίζονται οι σωρευτικές μετακινήσεις κάθε φορά που η επιβαλλόμενη επιτάχυνση υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή (Ji et al., 2021).

Η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου Newmark ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια που διασφαλίζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης μέσω στατικής ανάλυσης ευστάθειας, ενώ το δεύτερο στάδιο αφορά τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης για αυτή την επιφάνεια. Η επιλογή κατάλληλων σεισμικών καταγραφών αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα, καθώς πρέπει να αυτές πρέπει να υπολογίζουν τις σεισμολογικές συνθήκες της περιοχής και τα δεδομένα τους να είναι συμβατά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους (Leshchinsky, 2018).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν την απλότητα εφαρμογής που την καθιστά προσιτή σε μηχανικούς χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση σε δυναμική ανάλυση, την αμεσότητα των αποτελεσμάτων που επιτρέπει γρήγορη αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων, και την ευρεία αποδοχή στη διεθνή πρακτική που διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των ειδικών. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος ολισθαίνοντος τμήματος Newmark υποθέτει ακαμψία – τέλεια πλαστικότητα που δεν είναι ρεαλιστική. . Επιπρόσθετα, δεν συνεκτιμά την εξασθένιση αντοχής των υλικών κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης και χρησιμοποιεί απλοποιημένη μοντελοποίηση της γεωμετρίας που μπορεί να μην αντιπροσωπεύει επαρκώς πολύπλοκα γεωλογικά περιβάλλοντα (Leshchinsky, 2018).

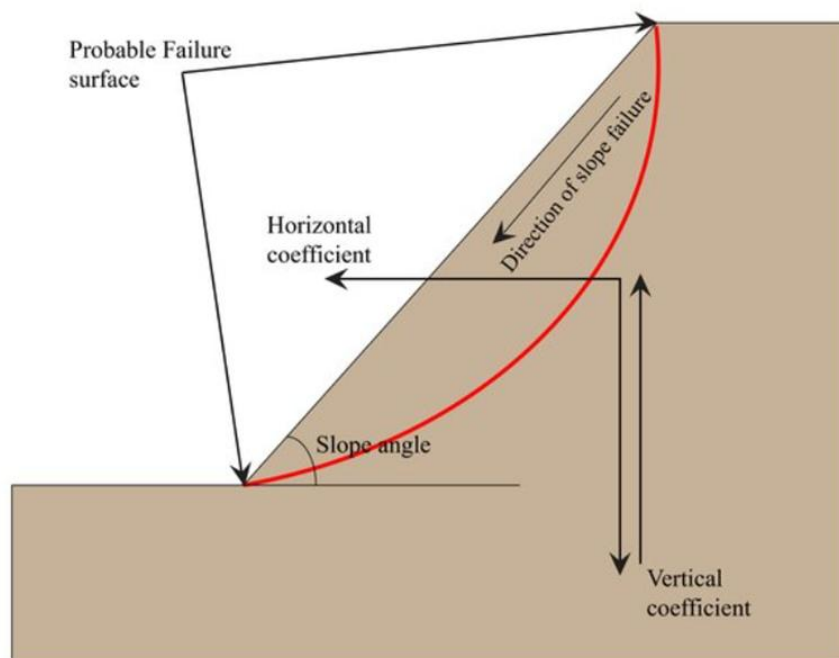
1.4.2 Ψευδοστατική μέθοδος

Η ψευδοστατική μέθοδος αποτελεί την παλαιότερη και πιο ευρέως εφαρμοσμένη προσέγγιση για την ανάλυση σεισμικής ευστάθειας πρανών, βασιζόμενη στις αρχές που αναπτύχθηκαν στις αρχές του 20ού αιώνα. Η ψευδοστατική ανάλυση ήταν η πρώτη μέθοδος που περιλάμβανε απλώς την προσθήκη μιας μόνιμης δύναμης σώματος που αντιπροσωπεύει τη σεισμική δόνηση σε μια στατική ανάλυση οριακής ισορροπίας. . Η πρώτη γνωστή τεκμηρίωση της ψευδοστατικής ανάλυσης στη τεχνική βιβλιογραφία παρουσιάστηκε από τον Terzaghi το 1950, καθιερώνοντας τη μέθοδο ως θεμελιώδες εργαλείο της γεωτεχνικής μηχανικής (Jibson, 2011).

Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου βασίζεται στη μοντελοποίηση των σεισμικών φορτίων ως στατικών δυνάμεων που ενεργούν συνεχώς στη μάζα του πρσανούς. Η ψευδοστατική ανάλυση μοντελοποιεί τη σεισμική δόνηση ως μια μόνιμη δύναμη σώματος που προστίθεται στο διάγραμμα δύναμης-σώματος μιας συμβατικής στατικής ανάλυσης οριακής ισορροπίας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη χρήση μεθόδων στατικής ανάλυσης με την προσθήκη επιπλέον δυνάμεων που αντιπροσωπεύουν τη σεισμική επίδραση. Οι σεισμικοί συντελεστές (k_h για οριζόντια και k_v για κατακόρυφη κατεύθυνση) αποτελούν τους βασικούς παραμέτρους της μεθόδου και εκφράζουν το κλάσμα της βαρύτητας που αντιπροσωπεύει τη σεισμική επιτάχυνση. Στην ψευδοστατική μέθοδο, η δυναμική δύναμη αδράνειας ενός σεισμού απλοποιείται ως το γινόμενο της σταθερής επιτάχυνσης στις οριζόντιες και κάθετες κατευθύνσεις με τη μάζα του πρσανούς. Ο καθορισμός των συντελεστών αυτών καθορίζει και την τελική αξιοπιστία της μεθόδου. Επίσης, η σχέση με τις φασματικές επιταχύνσεις παρέχει τη σύνδεση μεταξύ της πληροφορίας των σεισμικών δονήσεων και των παραμέτρων σχεδιασμού του πρσανούς. Οι σεισμικοί συντελεστές συνήθως προσδιορίζονται ως κλάσμα της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης ή των φασματικών επιταχύνσεων για συγκεκριμένες περιόδους που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά του πρσανούς (Kog, 2008).

Η μεθοδολογία υπολογισμού της ψευδοστατικής μεθόδου ακολουθεί τις καθιερωμένες αρχές της στατικής ανάλυσης ευστάθειας με την προσθήκη σεισμικών δυνάμεων. Η μέθοδος των τεμνουσών αποτελεί τη βασική προσέγγιση για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, όπου το πρσάνε διαίρεται σε μικρότερα τμήματα και εξετάζεται η ισορροπία κάθε τμήματος υπό την επίδραση όλων των ενεργούντων δυνάμεων, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών. Η ανάλυση κυκλικών επιφανειών αστοχίας αποτελεί την πιο συνήθη εφαρμογή της μεθόδου, καθώς παρέχει καλή προσέγγιση για πολλούς τύπους εδαφών και συνθήκες φόρτισης. Η εφαρμογή στις κλασικές μεθόδους όπως Bishop, Spencer και Morgenstern-Price επιτρέπει την αξιοποίηση επαληθευμένων αλγορίθμων, με την προσαρμογή τους για να περιλαμβάνουν τις σεισμικές δυνάμεις. Η επίδραση των σεισμικών δυνάμεων εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων μαθηματικών σχέσεων. Η οριζόντια σεισμική δύναμη υπολογίζεται ως $W_h = k_h \times W$, όπου W είναι το βάρος του τεμαχίου ή της

ολισθαίνουσας μάζας, ενώ η κατακόρυφη σεισμική δύναμη ως $W_v = k_v \times W$. Ο συνδυασμός αυτών των δυνάμεων και η εξέταση κρίσιμων κατευθύνσεων (ανερχόμενες ή κατερχόμενες κατακόρυφες δυνάμεις) καθορίζουν την τελική αξιολόγηση της ευστάθειας (Εικόνα 8) (Sazzad et al., 2021).



Εικόνα 8. Διάγραμματική απεικόνιση της ψευδοστατικής μεθόδου (*pseudo-static analysis*) για την ευστάθεια πρανών υπό σεισμική δράση. Διακρίνονται η κεκλιμένη επιφάνεια ολίσθησης και οι ψευδοστατικές δυνάμεις: η οριζόντια ($W_h = k_h \cdot W$) και την κατακόρυφη ($W_v = k_v \cdot W$) —που εφαρμόζονται στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας και αναπαριστούν τη σεισμική επιδραστική δύναμη (Πηγή: Sazzad et al., 2021).

Ο καθορισμός των σεισμικών συντελεστών στηρίζεται σε κανονισμούς και οδηγίες που έχουν αναπτυχθεί βάσει εμπειρίας και ερευνητικών αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών και οι παράγοντες τοπογραφικής ενίσχυσης μέσω διορθωτικών συντελεστών που τροποποιούν τις βασικές τιμές των σεισμικών συντελεστών. Αυτοί οι παράγοντες αντιπροσωπεύουν τη φυσική πραγματικότητα ότι διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και τοπογραφικές διαμορφώσεις μπορεί να ενισχύσουν ή να μειώσουν τη μετακίνηση του εδάφους μέσω σεισμικής ακολουθίας (Sazzad et al., 2021).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ψευδοστατικής μεθόδου περιλαμβάνουν την απλότητα υπολογισμών που την καθιστά εύκολα κατανοητή και εφαρμόσιμη από μηχανικούς διαφορετικών επιπέδων εμπειρίας. Σημαντικό είναι επίσης ότι ο τρόπος υπολογισμού είναι συμβατότητα με υπάρχοντα λογισμικά και αυτό επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση σε τυπικές διαδικασίες σχεδιασμού, ενώ η εύκολη παραμετρική ανάλυση διευκολύνει τη μελέτη εναλλακτικών σεναρίων και την αξιολόγηση ευαισθησίας (Macero & Candia, 2020).

Ωστόσο, η μέθοδος εμφανίζει και αντίστοιχα μειονεκτήματα. Παρόλα αυτά, αγνοεί τη δυναμική μη γραμμική συμπεριφορά και τον νόμο εξέλιξης της βραχο-εδαφικής μάζας και δεν μπορεί να αντικατοπτρίσει τη μηχανική απόκριση ενός πρανού υπό κυκλική φόρτιση. Η συντηρητική προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος, ενώ η μη συνεκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της σεισμικής φόρτισης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιορισμούς που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις της πραγματικής συμπεριφοράς του πρανού (Macero & Candia, 2020).

1.4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

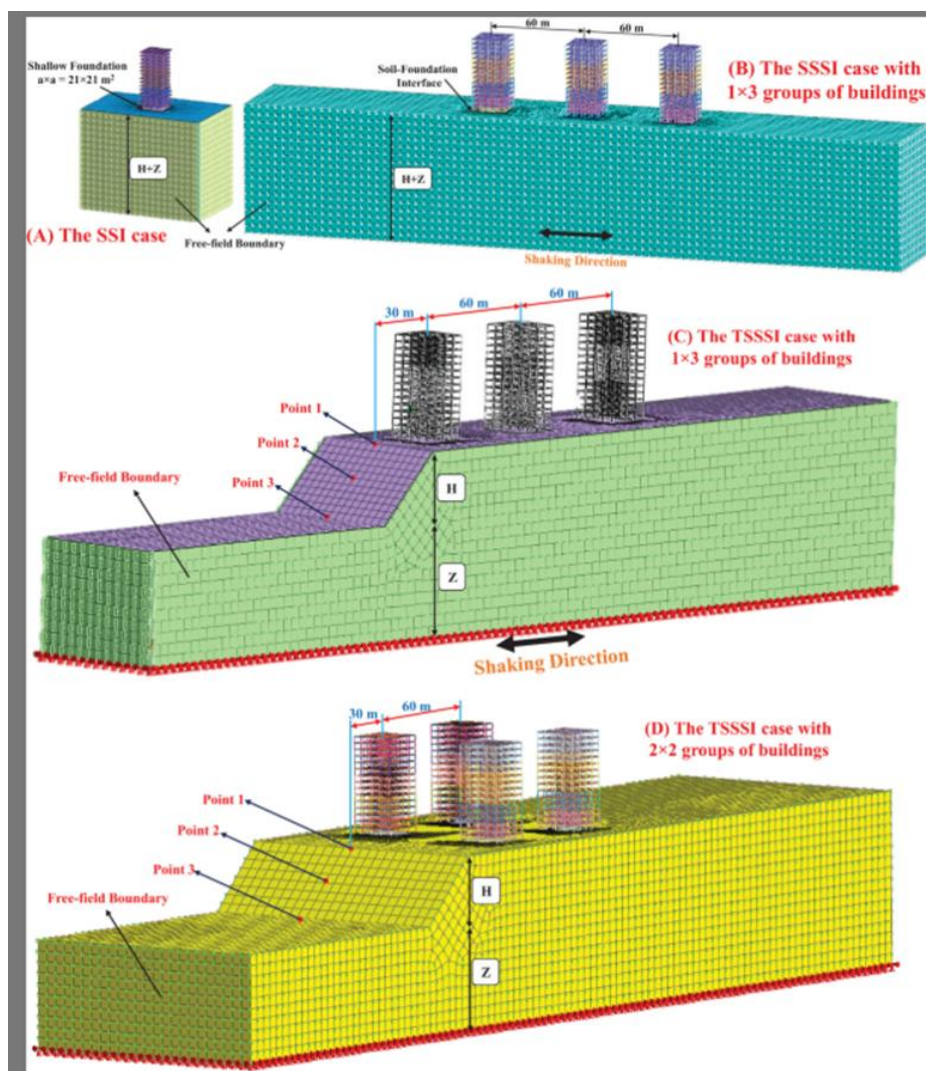
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί την πιο προηγμένη και ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάλυση σεισμικής ευστάθειας πρανών, βασιζόμενη στα θεωρητικά πλαίσια της μηχανικής συνεχών μέσων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπεύει μια ισχυρή εναλλακτική προσέγγιση για την ανάλυση ευστάθειας πρανών που είναι ακριβής, ευέλικτη και απαιτεί λιγότερες εκ των προτέρων παραδοχές, ιδιαίτερα όσον αφορά τον ίδιο το μηχανισμό της αστοχίας. Οι εξισώσεις κίνησης σε συνεχή μέσα διέπουν τη δυναμική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών υπό σεισμική διέγερση, εκφράζοντας την ισορροπία των δυνάμεων αδράνειας, των εσωτερικών τάσεων και των εξωτερικών φορτίων. Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων περιγράφουν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων μέσα από το εδαφικό μέσο και την αλληλεπίδρασή τους με τη γεωμετρία του πρανού (Guo et al., 2011).

Η διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία μετατρέπει το συνεχές πρόβλημα σε ένα διακριτό σύστημα εξισώσεων που μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά. Η αρχή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται κυρίως για τη διακριτοποίηση του τομέα της εδαφικής μάζας σε πεπερασμένα στοιχεία, στοχεύοντας στην κατασκευή ενός κινηματικά επιτρεπτού μηχανισμού αστοχίας. Η ποιότητα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, απαιτώντας προσεκτική ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και ακρίβειας. Η χρονική ολοκλήρωση πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένων αλγορίθμων όπως η μέθοδος Newmark-β και η Wilson-θ, οι οποίες παρέχουν αριθμητική σταθερότητα και ακρίβεια στον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης της απόκρισης του συστήματος (Mebrahtu et al., 2022).

Τα καταστατικά μοντέλα εδαφών καθορίζουν τη σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων και αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την ακρίβεια της ανάλυσης. Τα γραμμικά ελαστικά μοντέλα, παρόλο που απλοποιημένα, παρέχουν μια πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς των εδαφών. Οι παράμετροι περιλαμβάνουν το μέτρο του Young και το λόγο του Poisson του εδάφους. Η ιξώδης απόσβεση, συχνά μοντελοποιούμενη μέσω του μηχανισμού Rayleigh, αντιπροσωπεύει την απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς σε μεγάλες παραμορφώσεις όπου η γραμμική συμπεριφορά δεν είναι πλέον έγκυρη (Guo et al., 2011).

Τα μη γραμμικά μοντέλα προσφέρουν πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των εδαφών. Υπό το συγκεκριμένο πλαίσιο, χρησιμοποιείται ευρέως το κριτήριο Mohr-Coulomb για την περιγραφή της αστοχίας εδαφών, ενώ η διάκριση μεταξύ σκληρών και μαλακών εδαφών επιτρέπει τη μοντελοποίηση της μεταβολής της αντοχής με την αύξηση των παραμορφώσεων. Η εισαγωγή σεισμικών καταγραφών στο μοντέλο πραγματοποιείται συνήθως στη βάση του μοντέλου, προσομοιώνοντας την άφιξη των σεισμικών κυμάτων από το υποκείμενο βραχώδες υπόβαθρο. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις επίσης δείχνουν ότι μια αύξηση στην ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ή μείωση στο ύψος του πρανούς οδηγούν σε μικρότερες μετακινήσεις, αν και η επίδραση της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων είναι πιο σημαντική. Τα απορροφητικά σύνορα (absorbing boundaries) αποτελούν μία σημαντική παράγραφο για την αποφυγή

τεχνητών ανακλάσεων από τα όρια του μοντέλου που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η ελεύθερη επιφάνεια και τα τοπογραφικά φαινόμενα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στη μοντελοποίηση, καθώς μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ενίσχυση ή εξασθένηση της σεισμικής κίνησης (Εικόνα 9) (Feng & Yin, 2025).



Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση αριθμητικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση σεισμικής απόκρισης πρानούς. Το σχήμα αναπαριστά χαρακτηριστικά όπως τη μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους, την εισαγωγή σεισμικών καταγραφών από τη βάση του μοντέλου, σύνολα απορρόφησης και ελεύθερη επιφάνεια όπου συμβαίνουν τοπογραφικά φαινόμενα (Πηγή: Feng & Yin, 2025).

Η ανάλυση αποτελεσμάτων από την της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων παρέχει πολυάριθμες πληροφορίες που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των πρानών. Αναλυτικότερα, τα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων

παρέχουν το χρονικό ιστορικό σε κρίσιμα σημεία και τις κατανομές των μέγιστων τιμών, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό τον εντοπισμό ζωνών όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων και δυνητικών επιφανειών αστοχίας. Η αστοχία του πρανούς στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζεται 'φυσικά' μέσω των ζωνών στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι ανεπαρκής για να αντισταθεί στις διατμητικές τάσεις. Οι παράγοντες ασφαλείας (FOS – Factors of Safety) μπορούν να υπολογιστούν σε κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης, παρέχοντας πληροφορίες για την εξέλιξη της ευστάθειας κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Οι μετακινήσεις καθώς επίσης και οι μόνιμες παραμορφώσεις αποτελούν κρίσιμους δείκτες απόδοσης, με τις σωρευτικές μετακινήσεις να παρέχουν άμεση εικόνα των αναμενόμενων ζημιών. Τέλος, οι ζώνες ροής και οι μηχανισμοί αστοχίας αναδεικνύουν τη φυσική εξέλιξη της αστοχίας, η οποία μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις απλοποιημένες παραδοχές άλλων μεθόδων (Feng & Yin, 2025).

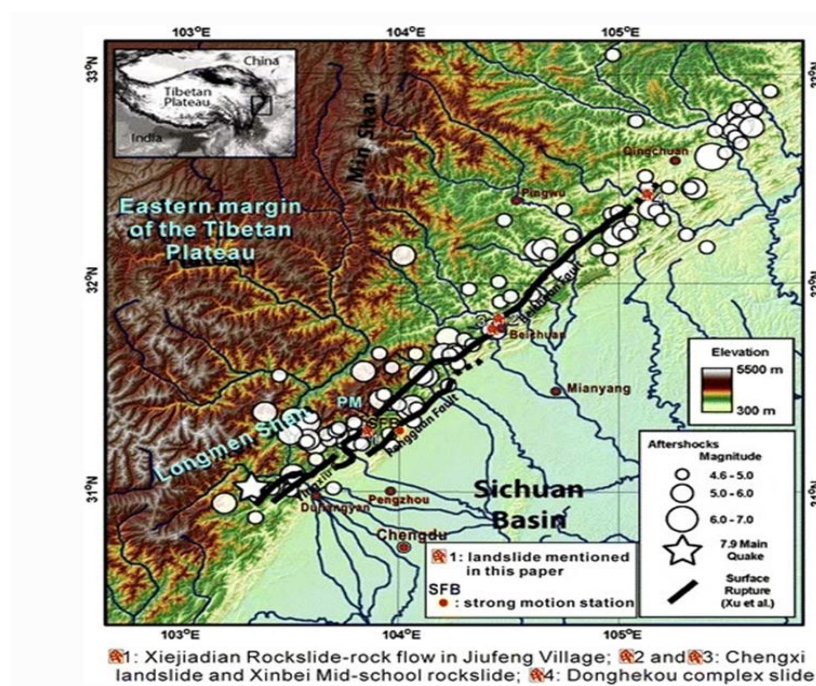
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν τη ρεαλιστική μοντελοποίηση που λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, των υλικών και των συνοριακών συνθηκών. Η μέθοδος είναι ευέλικτη στο να εξετάζει την ομογένεια και μη ομογένεια των ιδιοτήτων αντοχής εδάφους στην ανάλυση σεισμικής ευστάθειας πρανών (Ullah et al., 2020). Από την άλλη μεριά, η μέθοδος παρουσιάζει και αρκετούς περιορισμούς και πιο συγκεκριμένα, Η υπολογιστική πολυπλοκότητα απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένο λογισμικό, ενώ η απαίτηση εξειδικευμένων παραμέτρων για τα καταστατικά μοντέλα μπορεί να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην πρακτική εφαρμογή της. Η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης χρειάζεται να αποκτήσει μεγάλο αριθμό φυσικών και μηχανικών παραμέτρων, επιπλέον το κόστος και η δυσκολία υπολογισμού είναι πολύπλοκα για πρακτική εφαρμογή και δεν είναι κατάλληλα για χρήση στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού ενός έργου. Τέλος, λόγω της πολυπλοκότητας, η ανάλυση παίρνει αρκετό χρόνο και αυτός είναι και ο λόγος που η χρήση της περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται γρήγορες αποφάσεις ή εκτεταμένες αναλύσεις με πολλές παραμέτρους (Wang et al., 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

2.1 Η Κατολίσθηση Donghekou κατά τον Σεισμό Wenchuan του 2008

2.1.1 Γενικά Στοιχεία

Ο σεισμός Wenchuan που συνέβη στις 12 Μαΐου 2008 στην επαρχία Sichuan της Κίνας αποτελεί μία από τις πιο καταστροφικές σεισμικές δραστηριότητες του 21ου αιώνα, με μέγεθος Ms 8.0 σύμφωνα με τη Διοίκηση Σεισμών της Κίνας και Mw 7.9 σύμφωνα με την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (Wang et al., 2014). Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε στην πόλη Yingxiu του νομού Wenchuan, σε βάθος 14 km, ενώ η πιο επηρεασμένη περιοχή εκτεινόταν κατά μήκος των κεντρικών και μετωπικών ρηγμάτων του συστήματος ρηγμάτων Longmen Shan στη δυτική Sichuan, σε μια ζώνη μήκους 300 km (Εικόνα 10) (Wang et al., 2014). Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της κινεζικής κυβέρνησης, ο σεισμός προκάλεσε 69.200 γνωστούς θανάτους, 18.195 αγνοούμενους, 374.216 τραυματίες και άφησε περισσότερους από πέντε εκατομμύρια ανθρώπους άστεγους, ενώ περίπου το ένα τρίτο των απωλειών και ζημιών οφείλονταν σε κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό (Cui et al., 2009; Yin et al., 2009).



Εικόνα 10. Γεωγραφία, τοπογραφία και οι ποταμοί που έπαιξαν ρόλο στην περιοχή του σεισμού. Απεικονίζονται επίσης οι 4 μεγαλύτερες κατολισθήσεις που επηρέασαν τα πρηνή (Πηγή: Wang et al., 2014).

Η περιοχή του χωριού Donghekou στον νομό Qingchuan αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικών δυνάμεων, γεωλογικών συνθηκών και υδρογεωλογικού περιβάλλοντος. Η τεκτονικά ενεργή περιοχή χαρακτηρίζεται από απότομα βουνά και ποτάμια συστήματα που σχηματίζονται στα όρια μεταξύ του Θιβετιανού Οροπεδίου και της Λεκάνης Sichuan, καθιστώντας την περιοχή επιδεκτική σε διάβρωση και κατολισθήσεις (Ouimet, 2010). Το χωριό Donghekou βρίσκεται στη συμβολή του ποταμού Hongshi και του ποταμού Xiasi, όπου η σχετικά ήπια τοπογραφία που υπάρχει σε ορισμένες περιοχές του συστήματος ρηγμάτων Longmen Shan είχε προσελκύσει κατοίκους λόγω της καλής παροχής υπόγειων υδάτων και του ήπιου κλίματος (Wang et al., 2014). Η γεωλογική σύσταση της περιοχής της κατολίσθησης Donghekou παρουσιάζει σημαντική ποικιλομορφία και πολυπλοκότητα. Η περιοχή προέλευσης της βραχολίσθησης εντοπίζεται σε δολομιτικούς ασβεστόλιθους και σερικιτικούς ασβεστόλιθους του σχηματισμού Yuanji της Σινιανής περιόδου (Προκαμβρίου Αιώνα), με τα στρώματα να εμβαπτίζουν προς τα βορειοδυτικά με μέση γωνία κλίσης 10 μοιρών και κατεύθυνση εμβάπτισης περίπου 90 μοιρών σε σχέση με την κατεύθυνση ολίσθησης της κατολίσθησης (Wang et al., 2014). Εντός της διαδρομής μετακίνησης, η μετατοπισμένη ολισθαίνουσα μάζα κινήθηκε μέσα από αποσπασμένο τουφώδη ψαμμίτη, φυλλίτη και ανθρακο-πυριτικό σχιστόλιθο της Καμβρίου περιόδου, υλικά που παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό για κατάτμηση κόκκων όταν υπόκεινται σε διάτμηση και σχετικά χαμηλή διαπερατότητα (Wang et al., 2014).

2.1.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες και Επίδραση στη Σεισμική Συμπεριφορά

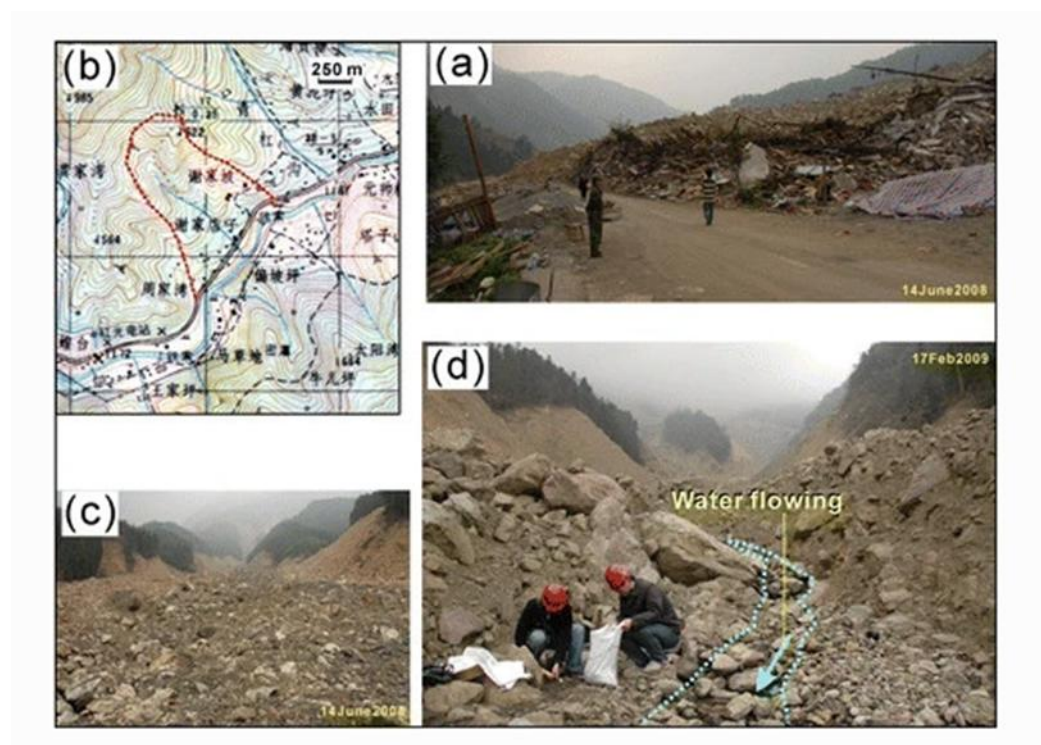
Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή της κατολίσθησης Donghekou αποδείχθηκαν καθοριστικές για τη συμπεριφορά και την εξέλιξη του φαινομένου. Στη θέση όπου βρισκόταν το χωριό, ο ποταμός Hongshi σχημάτισε έναν κώνο κορημάτων με πλημμυρικές αποθέσεις, ενώ στις δύο πλευρές του ποταμού Hongshi κοντά στο σημείο σύγκλισης, η στάθμη του εδάφους ήταν λιγότερο από 1 μέτρο πάνω από τη στάθμη του νερού στον ποταμό (Wang et al., 2014). Αυτή η γεωμετρική διάταξη δημιούργησε συνθήκες όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις πλημμυρικές αποθέσεις εκτιμάται ότι ήταν πολύ ρηχή, με τις αποθέσεις της κοιλάδας να βρίσκονται σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες (Wang et al., 2014).

Επιπρόσθετα, οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν άμεσα πριν από τον σεισμό παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών κατά τη στιγμή της σεισμικής διέγερσης. Με βάση τα δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό του νομού Pingwu, που βρίσκεται κοντά στο κέντρο της σεισμόπληκτης περιοχής και 50 km δυτικά της κατολίσθησης Donghekou, η συνολική βροχόπτωση το 2008 ήταν 718,5 mm, με την περίοδο από τον Μάρτιο έως τον Μάιο να χαρακτηρίζεται από μέτριες βροχοπτώσεις (Wang et al., 2014). Η προηγούμενη βροχόπτωση πριν από τον σεισμό ήταν 58,8 mm για έναν μήνα (από 12 Απριλίου έως 12 Μαΐου) και 33,3 mm για δέκα ημέρες (από 2 Μαΐου έως 12 Μαΐου), γεγονός που υποδηλώνει ότι ο σεισμός συνέβη κατά τη διάρκεια μιας περιόδου μέτριων βροχοπτώσεων που ευνοούσε την ύπαρξη αρκετής υγρασίας στο εδαφικό περιβάλλον χωρίς όμως να δημιουργεί συνθήκες υπερκορεσμού (Wang et al., 2014).

2.1.3 Περιγραφή και Χαρακτηριστικά Κατολίσθησης

Η κατολίσθηση Donghekou αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο που εξελίχθηκε από αρχική βραχολίσθηση σε κατάρρευση κορημάτων καθώς κινούνταν κατά μήκος του βουνού. Η αρχική βραχολίσθηση που πραγματοποιήθηκε στο βουνό πίσω από το χωριό Donghekou μετατράπηκε σε κατάρρευση κορημάτων λόγω της αλλαγής των τοπογραφικών και γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της διαδρομής μετακίνησης (Wang et al., 2014). Στην περιοχή προέλευσης, το μέσο μήκος είναι περίπου 1 km, το μέσο πλάτος περίπου 920 m, ενώ το συνολικό μήκος της βραχολίσθησης και της κατάρρευσης κορημάτων έφτασε περίπου τα 3 km (Wang et al., 2014). Το μέσο πάχος της ολισθαίνουσας μάζας στην περιοχή προέλευσης ήταν περίπου 75 m, με μέγιστο πάχος 110 m, και ο συνολικός όγκος της βραχολίσθησης Donghekou ήταν περίπου 69 εκατομμύρια m³ (Wang et al., 2014). Συνδέοντας το ανώτερο σημείο της βραχολίσθησης με την άκρη της κατάρρευσης κορημάτων, η φαινόμενη γωνία τριβής της βραχολίσθησης-κατάρρευσης κορημάτων προσδιορίστηκε στις 11 μοίρες, γεγονός που υποδεικνύει υψηλή κινητικότητα για τη βραχολίσθηση-κατάρρευση κορημάτων (Εικόνα 11) (Wang et al., 2014). Αυτή η εξαιρετικά χαμηλή γωνία φαινόμενης τριβής αποτελεί ένδειξη της ση-

μαντικής μείωσης της αντίστασης διάτμησης που επετεύχθη κατά τη διάρκεια της κίνησης της κατολίσθησης, υποδηλώνοντας την ύπαρξη μηχανισμών που διευκόλυναν την ταχεία και μακρινή μετακίνηση του υλικού.



Εικόνα 11. Φωτογραφίες και χάρτης της κατολίσθησης Donghekou. (α) Το μέτωπο της ροής βράχου (λήψη 14 Ιουνίου 2008). (β) Παλιός χάρτης που απεικονίζει την κοιλάδα κατά μήκος της διαδρομής κίνησης. (γ) Η πορεία μετακίνησης της ροής βράχου (λήψη 14 Ιουνίου 2008). (δ) Ροή νερού τροφοδοτούμενη από υπόγεια εκφόρτιση στην περιοχή προέλευσης (λήψη 17 Φεβρουαρίου 2009) (Πηγή: Wang et al., 2014).

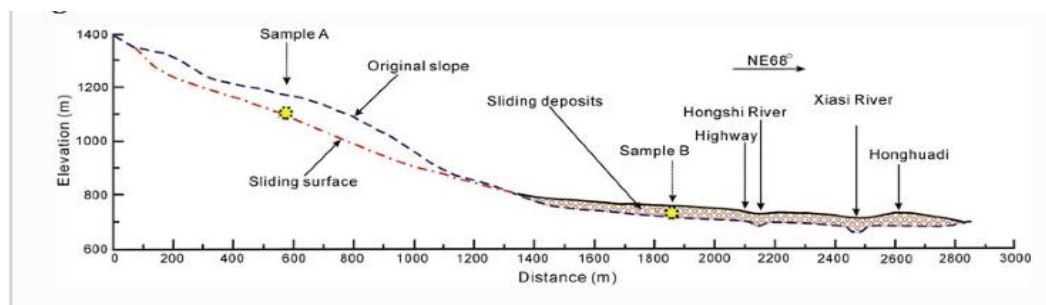
Η κατολίσθηση Donghekou προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές και σημαντικές ανθρώπινες απώλειες που αναδεικνύουν τη σοβαρότητα των επιπτώσεων που μπορούν να προκληθούν από σεισμικές κατολισθήσεις σε κατοικημένες περιοχές. Η κατολίσθηση κατέστρεψε όλα τα σπίτια στην περιοχή και δημιούργησε φράγματα στους ποταμούς, με τέσσερα υπο-χωριά και ένα δημοτικό σχολείο να καταστρέφονται πλήρως και περίπου 700 ανθρώπους να χάνουν τη ζωή τους (Wang et al., 2014). Η κατάρρευση κορημάτων δημιούργησε φράγμα στον ποταμό Xiasi και τον παραπόταμό του Hongshi, σχηματίζοντας δύο λίμνες κατολίσθησης, ενώ τμήμα της μετατοπισμένης ολισθαίνουσας μάζας εισήλθε στον ποταμό Xiasi και κατέρρευσε κατά μήκος του ρεύματος ως κατάρρευση κορημάτων (Wang et al., 2014).

2.1.4 Ο Ρόλος των Υδρογεωλογικών Συνθηκών στο Μηχανισμό Αστοχίας

Οι εκτεταμένες μελέτες οι οποίες διενεργήθηκαν από τους ερευνητές σε διάφορες χρονικές περιόδους μετά τον σεισμό αποκάλυψαν τον καθοριστικό ρόλο των υδρογεωλογικών συνθηκών στον μηχανισμό έναρξης και κίνησης της κατολίσθησης Donghekou. Κατά τη διάρκεια της τέταρτης έρευνας που διενεργήθηκε τον Φεβρουάριο του 2009 (κατά τη διάρκεια της ξηρής εποχής στην περιοχή), διαπιστώθηκε ότι νερό έρρεε από την επιφάνεια ολίσθησης και την περιοχή προέλευσης της κατολίσθησης Donghekou, παρόλο που τα κορήματα γύρω από το βουνό ήταν στεγνά (Wang et al., 2014). Αυτή η παρατήρηση υποδηλώνει την ύπαρξη μόνιμου υδρογεωλογικού συστήματος που συνέχιζε να τροφοδοτεί την περιοχή με νερό ακόμη και μήνες μετά τον σεισμό και κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου του έτους. Η ανάλυση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν από την περιοχή προέλευσης αποκάλυψε την παρουσία αποσαθρωμένου ανθρακο-πυριτικού σχιστόλιθου που παρουσίαζε χαρακτηριστικά διάτμησης, όπως αυτά υποδεικνύονται από τη στρωματώδη δομή του σχιστόλιθου με διείσδυση μαλακού κίτρινου αργίλου (Wang et al., 2014). Η παρουσία αυτών των χαρακτηριστικών διάτμησης σε συνδυασμό με τη συνεχή ροή νερού υποδηλώνει ότι η περιοχή της επιφάνειας ολίσθησης βρισκόταν σε συνεχή επαφή με υπόγεια νερά, δημιουργώντας συνθήκες που ευνοούσαν τη μείωση της αντοχής των υλικών. Παλαιές αποθέσεις κοιλάδας βρέθηκαν κάτω από τα μετατοπισμένα κορήματα που κινήθηκαν σε αυτό το γεγονός, γεγονός που υποδηλώνει την προϋπάρχουσα ύπαρξη υδατικού συστήματος στην περιοχή που διευκόλυνε την κίνηση και μετακίνηση του υλικού (Wang et al., 2014).

Για τη διερεύνηση των μηχανισμών έναρξης και κίνησης της κατολίσθησης Donghekou, διενεργήθηκαν εξειδικευμένες εργαστηριακές δοκιμές με χρήση του undrained ring shear apparatus (συσκευή διάτμησης δακτυλίου χωρίς αποστράγγιση) που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Kyoto της Ιαπωνίας (Sassa, 1997; Sassa et al., 2004). Οι δοκιμές αυτές περιλάμβαναν την αναπαραγωγή των αρχικών συνθηκών τάσης που επικρατούσαν στο πρανές πριν από τον σεισμό, καθώς και την εφαρμογή της πραγματικής σεισμικής κίνησης που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού Wenchuan (Wang et al., 2014). Για την αρχική τασική κατάσταση της βραχολίσθησης Donghekou, χρησιμοποιήθηκε γωνία πρανούς 25 μοιρών στην περιοχή προέλευσης, ενώ η αρχική κανονική τάση και η διατμητική τάση προσδιορίστηκαν από τη γωνία

του πρανούς, το πάχος της ολισθαίνουσας μάζας και το ειδικό βάρος του εδάφους/βράχου (Εικόνα 12) (Wang et al., 2014).



Εικόνα 12. Διαμήκης τομή (Τομή I-I στο Σχήμα 5b) της σύνθετης κατολίσθησης Donghekou, όπου παρουσιάζονται τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της κατολίσθησης καθώς και οι θέσεις δειγματοληψίας A και B (Πηγή: Wang et al., 2014).

Τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών δοκιμών προσομοίωσης, αποκάλυψαν τον καθοριστικό ρόλο της ρευστοποίησης στον μηχανισμό αστοχίας της κατολίσθησης. Παρατηρήθηκε μια μεγάλη μείωση της αντίστασης διάτμησης και μια ταχεία παραγωγή της υπερπίεσης πόρων με την εφαρμογή της κανονικής τάσης, με το δείγμα να αστοχεί περίπου στα 10 δευτερόλεπτα από την αρχή του σεισμού και η διατμητική μετατόπιση να επιταχύνεται περίπου στα 25 δευτερόλεπτα (Wang et al., 2014). Η πίεση πόρων παρουσίασε ταχεία αύξηση από τα 20 δευτερόλεπτα και έφτασε την ίδια τιμή με την κανονική τάση περίπου στα 45 δευτερόλεπτα, φτάνοντας στο σημείο της πλήρους ρευστοποίησης (Wang et al., 2014). Αντίστοιχα με την ταχεία αύξηση της πίεσης πόρων, η αντίσταση διάτμησης μειώθηκε ταχέως και έφτασε μια πολύ χαμηλή τιμή περίπου 15 kPa, ενώ στο τέλος της σεισμικής φόρτισης, η διατμητική μετατόπιση έφτασε περίπου τα 35 m με υψηλή ταχύτητα 0,38 m/sec (Wang et al., 2014). Επιπρόσθετα, η ανάλυση της κοκκομετρικής κατανομής των δειγμάτων μετά την ολοκλήρωση της undrained διάτμησης επιβεβαίωσε τη θεωρία της "ρευστοποίησης επιφάνειας ολίσθησης" που προτάθηκε από τον Sassa et al. (2004). Όταν συγκρίθηκε με το αρχικό δείγμα, ήταν εμφανές ότι κατάτμηση κόκκων συνέβη σε όλο το υλικό των δειγμάτων, ωστόσο το υλικό στη ζώνη διάτμησης ήταν λεπτότερο από τις ανώτερες και κατώτερες ζώνες (Wang et al., 2014). Αυτή η παρατήρηση παρέχει άμεσες αποδείξεις ότι η κατάτμηση κόκκων μπορεί να συμβεί υπό συνθήκες ελάχιστης αποστράγγισης, και μπορεί να συμβάλει στη "ρευστοποίηση επιφάνειας ολίσθησης" του εδάφους κατά τη διάρκεια της διάτμησης (Wang et al., 2014).

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού επίδρασης της αστοχίας που αφορούσε την ολισθαίνουσα μάζα στις αποθέσεις της κοιλάδας, διενεργήθηκαν πειράματα προσομοίωσης της διαδικασίας κατάρρευσης κορημάτων που πυροδοτήθηκε από βραχολίσθηση, εφαρμόζοντας το μοντέλο που προτάθηκε από τους Sassa et al. (1997). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η ολισθαίνουσα μάζα κινείται κάτω από το πρηνές και ασκεί φορτίο στις αποθέσεις της κοιλάδας στον πόδα του πρηνούς, και όταν υπάρχει επιφανειακή ροή νερού ή υπόγεια ροή και ορισμένες από τις αποθέσεις είναι κορεσμένες, η απόθεση της κοιλάδας διατμάται υπό μη στραγγιζόμενη φόρτιση και μεταφέρεται προς τα κάτω μαζί με την ολισθαίνουσα μάζα (Wang et al., 2014). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αποκάλυψαν τη σημαντική επίδραση της κατάστασης κορεσμού των αποθέσεων της κοιλάδας στην κινητικότητα της κατολίσθησης. Όταν η αστοχημένη ολισθαίνουσα μάζα ταξίδεψε κάτω στις αποθέσεις της κοιλάδας σε ξηρή κατάσταση, συνέβη μόνο πολύ περιορισμένη διατμητική μετατόπιση, ενώ όταν οι αποθέσεις της κοιλάδας ήταν πλήρως κορεσμένες, συνέβη μεγάλη απόσταση μετακίνησης μαζί με κίνηση υψηλής ταχύτητας (Wang et al., 2014). Στην πλήρως κορεσμένη κατάσταση, μετρήθηκε υψηλή πίεση πόρων και η αντίσταση διάτμησης έγινε μικρή (περίπου 45 kPa), γεγονός που θα μπορούσε να είναι μια πιθανή αιτία για την κίνηση μακρινής εκροής περισσότερων από 2 km της σύνθετης κατολίσθησης Donghekou (Wang et al., 2014). Η φαινόμενη γωνία τριβής που προέκυψε από τις δοκιμές ήταν μόλις 6,0 μοίρες, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να αναμένεται υψηλή κινητικότητα της ολισθαίνουσας μάζας όταν φορτίστηκε στις κορεσμένες αποθέσεις της κοιλάδας, με τη μικρή φαινόμενη γωνία τριβής να οδηγεί σε υψηλή ταχύτητα και μεγάλη απόσταση μετακίνησης για την ολισθαίνουσα μάζα (Wang et al., 2014).

2.1.5 Επιπτώσεις στη Σεισμική Ευστάθεια Πρανών

Η μελέτη της κατολίσθησης Donghekou παρέχει σημαντικές αποκαλύψεις σχετικά με τον ρόλο των υδρογεωλογικών συνθηκών στη σεισμική συμπεριφορά των πρανών και τους μηχανισμούς που διέπουν τις καταστροφικές κατολισθήσεις μεγάλης κινητικότητας. Μέσω των επιτόπιων ερευνών των κατολισθήσεων μεγάλης εκροής που πυροδοτήθηκαν από τον σεισμό Wenchuan και της πειραματικής μελέτης της σύνθετης κατολίσθησης Donghekou συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι τα νερά της κοιλάδας και τα υπόγεια νερά έπαιξαν καθοριστικούς ρόλους στη μακρινή εκροή και την ταχεία κίνηση

της κατολίσθησης κατά τη διάρκεια του μεγάλου σεισμού (Wang et al., 2014). Αυτή η διαπίστωση αναδεικνύει τη σημασία της συστηματικής αξιολόγησης των υδρογεωλογικών συνθηκών ως αναπόσπαστου τμήματος της σεισμικής ανάλυσης ευστάθειας πρανών, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα. Τα αποτελέσματα της μελέτης, αποκάλυψαν ότι στην περιοχή προέλευσης, η κατολίσθηση απέκτησε ταχύτητα όταν συνέβη το φαινόμενο της "ρευστοποίησης επιφάνειας ολίσθησης" ως αποτέλεσμα μη στραγγιζόμενης διάτμησης σε κορεσμένη ζώνη ολίσθησης (Wang et al., 2014). Αυτός ο μηχανισμός αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στην κατανόηση των διαδικασιών που διέπουν τη σεισμική αστοχία πρανών, καθώς δείχνει πώς η παρουσία νερού μπορεί να οδηγήσει σε δραματική μείωση της αντίστασης διάτμησης μέσω της ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων, ακόμη και σε υλικά που αρχικά παρουσιάζουν επαρκή αντοχή. Η κατάτμηση κόκκων υπό μη στραγγιζόμενες συνθήκες, όπως τεκμηριώθηκε μέσω της ανάλυσης κοκκομετρικής κατανομής, παρέχει πρόσθετη επιβεβαίωση του μηχανισμού ρευστοποίησης και εξηγεί τη δραστική μείωση της αντοχής που παρατηρήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές.

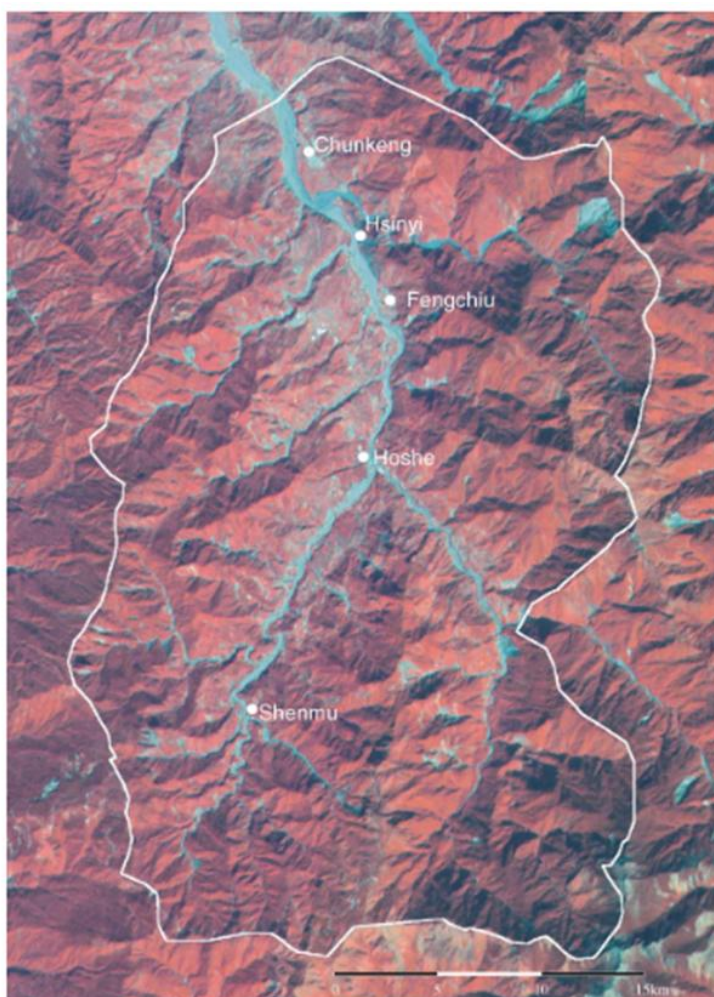
Εξίσου σημαντική είναι η διαπίστωση ότι η μετατοπισμένη ολισθαίνουσα μάζα μπορεί να ασκήσει επίδραση στην απόθεση της κοιλάδας, και όταν η απόθεση της κοιλάδας είναι επίσης κορεσμένη, μπορεί να συμβεί ρευστοποίηση που προκαλεί την απόθεση της κοιλάδας να λειτουργήσει ως ζώνη ολίσθησης με χαμηλή αντίσταση διάτμησης, μεταφέροντας την ολισθαίνουσα μάζα από την περιοχή προέλευσης για μεγάλη απόσταση (Wang et al., 2014). Αυτή η διαδικασία δύο σταδίων εξηγεί πώς σχετικά μικρές αρχικές αστοχίες μπορούν να εξελιχθούν σε καταστροφικά γεγονότα μεγάλης κλίμακας όταν οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για τη διάδοση και ενίσχυση της αστοχίας. Τέλος, η φαινόμενη γωνία τριβής των 6,0 μοιρών που προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές στις κορεσμένες αποθέσεις της κοιλάδας αντιπροσωπεύει μια εξαιρετικά χαμηλή τιμή η οποία μπορεί να εξηγήσει την υψηλή κινητικότητα και τη μεγάλη απόσταση μετακίνησης που παρατηρήθηκε στην πραγματική κατολίσθηση. Παρόλο που απαιτείται προσοχή κατά τη σύγκριση της πραγματικής τιμής φαινόμενης τριβής με αυτήν που προκύπτει από δοκιμές ring shear λόγω διαφορών στις συνοριακές συνθήκες και την κατανομή τάσεων, η συμφωνία μεταξύ της μετρημένης φαινόμενης γωνίας τριβής 11 μοιρών στην πραγματική κατολίσθηση και της εργαστηριακής τιμής

των 6 μοιρών υποδηλώνει την εγκυρότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων (Wang et al., 2014).

2.2 Ο Σεισμός Chi-Chi της Ταϊβάν 1999 και η Επίδρασή του στη Λεκάνη Chenyulan

2.2.1 Γενικές Πληροφορίες

Ο σεισμός Chi-Chi που συνέβη στις 21 Σεπτεμβρίου 1999 στις 01:47:12 τοπική ώρα στην Ταϊβάν αποτελεί έναν από τους πιο καταστροφικούς και καλύτερα μελετημένους σεισμούς στη σεισμική ιστορία της περιοχής. Το επίκεντρο εντοπίστηκε στις συντεταγμένες 23.77° Β γεωγραφικού πλάτους και 120.98° Α γεωγραφικού μήκους, 9.2 km νοτιοδυτικά της λίμνης Sun Moon, κοντά στην πόλη Jiji (Chi-Chi) του νομού Nantou, με το εστιακό βάθος να υπολογίζεται στα 8.0 km (Lin et al., 2004). Η σεισμική διέγερση χαρακτηρίστηκε από μέγεθος 7.7 Mw σύμφωνα με το διεθνή σεισμολογικό δίκτυο και 7.3 ML σύμφωνα με το Κεντρικό Μετεωρολογικό Γραφείο της Ταϊβάν, ενώ η συνολική ενέργεια που απελευθερώθηκε εκτιμάται στα 2.1×10^{17} J, περίπου ισοδύναμη με την απόδοση της βόμβας Tsar (Lin et al., 2004). Ο σεισμός Chi-Chi συνέβη κατά μήκος του ρήγματος Chelungpu στο δυτικό τμήμα του νησιού της Ταϊβάν, με το ρήγμα να εκτείνεται κατά μήκος των υπωρειών των Κεντρικών Βουνών στους νομούς Nantou και Taichung. Η σεισμική δραστηριότητα παρήγαγε επιφανειακές ρηξιγενείς παραμορφώσεις μήκους άνω των 100 km, με ορισμένα τμήματα γης κοντά στο ρήγμα να ανυψώνονται κατά 7 m, ενώ κοντά στο Dongshih, κοντά στο βόρειο άκρο του ρήγματος, δημιουργήθηκε σχεδόν κάθετος καταρράκτης ύψους 7 m λόγω της σεισμικής μετατόπισης που επηρέασε τη κοίτη του ποταμού Dajia (Lin et al., 2004). Το ρήγμα Chelungpu χαρακτηρίζεται ως ώθηση ρήγμα όπου το κρεμαστό τοίχωμα κινήθηκε δυτικά και ανοδικά κατά μήκος μιας γραμμής σχεδόν 100 km μήκους, με την ανύψωση να κυμαίνεται από περισσότερα από 3 πόδια (1 μέτρο) στο νότο έως 26 πόδια (8 μέτρα) στο βορρά (Εικόνα 13) (Ma et al., 1999).



Εικόνα 13. Η περιοχή του σεισμού η οποία σημειώνεται με άσπρη γραμμή (Πηγή: Lin et al., 2004)

Η Ταϊβάν βρίσκεται στην περιοχή σύγκρουσης όπου η Θαλάσσια Πλάκα των Φιλιππίνων κινείται προς την Ευρασιατική Πλάκα σε κατεύθυνση 310° με ρυθμό 70-80 mm/έτος, δημιουργώντας ένα περίπλοκο τεκτονικό περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμική δραστηριότητα (Heermance et al., 2003). Αυτό το τεκτονικό πλαίσιο έχει δημιουργήσει μια περιοχή με απότομη ορεινή τοπογραφία και πυκνά ποτάμια δίκτυα που καθιστούν την περιοχή ιδιαίτερα επιδεκτική σε κατολισθήσεις και άλλες μορφές αστάθειας πρανών, ιδιαίτερα όταν αυτά τα γεωλογικά χαρακτηριστικά συνδυάζονται με έντονη σεισμική διέγερση (Lin et al., 2004).

Η λεκάνη του ποταμού Chenyulan στην κεντρική Ταϊβάν επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της επίδρασης του σεισμού Chi-Chi στην εμφάνιση κατολισθήσεων και για τη διερεύνηση των αρχικών συνθηκών που πυροδοτούν κατακρημνίσεις κορημάτων λόγω της εκτεταμένης τεκμηρίωσης και έρευνας που είχε διεξαχθεί στην περιοχή αυτή μετά

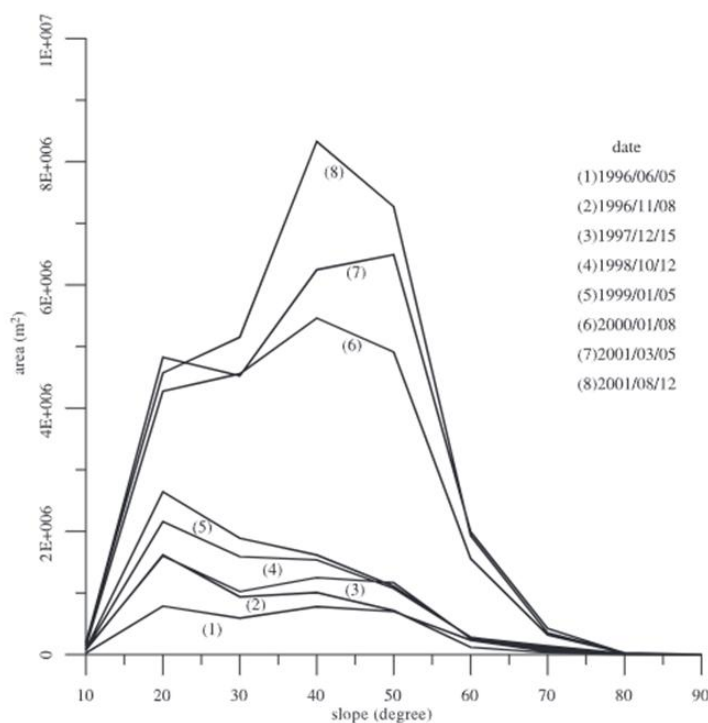
από προηγούμενα καταστροφικά γεγονότα (Lin et al., 2004). Η περιοχή μελέτης καλύπτει περίπου 21×36 km και βρίσκεται περίπου 12 km ανατολικά του Chi-Chi, της πόλης που βρισκόταν πλησιέστερα στο επίκεντρο του σεισμού της 21ης Σεπτεμβρίου 1999 (Lin et al., 2004). Η εν λόγω λεκάνη είχε υποστεί επικίνδυνες κατακρημνίσεις κορημάτων και σε προηγούμενες περιπτώσεις, κατά τη διάρκεια του τυφώνα Herb τον Ιούλιο του 1996, γεγονός που είχε οδηγήσει σε εκτεταμένη μελέτη από γεωλόγους και μηχανικούς σχετικά με την εμφάνιση, τον μηχανισμό και τη μείωση κινδύνου από κατακρημνίσεις κορημάτων, παρέχοντας έτσι μια σημαντική βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση των επιδράσεων του σεισμού (Chen, 2000; Chen & Su, 2001; Lin et al., 2000).

Επίσης, η λεκάνη του ποταμού Chenyulan αποτελεί το μεγαλύτερο ποτάμιο σύστημα της Ταϊβάν και βρίσκεται στη λεκάνη απορροής Chen-Yu-Lan που επηρεάστηκε έντονα από τον σεισμό Chi-Chi του 1999 (Lin et al., 2006). Ο σταθμός παρακολούθησης Shenmu βρίσκεται στο χωριό Shenmu του νομού Nantou στο κεντρικό τμήμα της Ταϊβάν, το οποίο αποτελεί μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Chen-Yu-Lan, με τρεις δυνητικούς χείμαρρους κορημάτων να συγκλίνουν στο Shenmu (οι Aiyuzi, Huosa και Chushuei) και η συνολική περιοχή απορροής να καλύπτει 72.2 km^2 (Huang et al., 2013). Οι κατακρημνίσεις κορημάτων συμβαίνουν συνήθως στον χείμαρρο Aiyuzi λόγω της απότομης μορφολογίας του (μέση κλίση κοίτης περίπου 39°) και των μεγάλων περιοχών κατολισθήσεων στη λεκάνη απορροής του (σχεδόν 25% επηρεάζονται από αστάθειες πρηνών) (Wei et al., 2018; Huang et al., 2013).

2.2.2 Αντίκτυπος Σεισμού στις Κατολισθήσεις και Σχέση με τις Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Ο σεισμός Chi-Chi προκάλεσε δραματικές αλλαγές στην έκταση και την κατανομή των κατολισθήσεων στη λεκάνη Chenyulan, όπως τεκμηριώνεται μέσω της συγκριτικής ανάλυσης δορυφορικών εικόνων SPOT που λήφθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η σύγκριση πέντε εικόνων SPOT που λήφθηκαν μεταξύ Ιουνίου 1996 (πριν από τον τυφώνα Herb του Ιουλίου 1996) και Σεπτεμβρίου 1999 (πριν από τον σεισμό Chi-Chi) δείχνει ότι η περιοχή κατολισθήσεων αυξήθηκε από 7.1×10^6 σε $7.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (Lin et al., 2004). Ωστόσο, μέχρι τον Ιανουάριο του

2000 (μετά τον σεισμό Chi-Chi), η περιοχή κατολισθήσεων σχεδόν τριπλασιάστηκε σε $20.8 \times 10^6 \text{ m}^2$, ενώ οι μετρήσεις εικόνων που λήφθηκαν τον Μάρτιο και Αύγουστο του 2001 αποκαλύπτουν ότι η περιοχή κατολισθήσεων είχε επεκταθεί περαιτέρω σε 24.2×10^6 και $27.5 \times 10^6 \text{ m}^2$, αντίστοιχα (Lin et al., 2004). Αυτή η εκθετική αύξηση της έκτασης των κατολισθήσεων μετά τον σεισμό αντιπροσωπεύει μια από τις πιο εντυπωσιακές περιπτώσεις επίδρασης σεισμού στην ευστάθεια πρανών που έχει τεκμηριωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Μετά τον σεισμό Chi-Chi, πάνω από 20.000 κατολισθήσεις συνολικής έκτασης περίπου 113 km^2 είχαν συμβεί σε μια περιοχή 2.400 km^2 στην κεντρική Ταϊβάν, με περισσότερες από 90% των κατολισθήσεων να είναι μικρότερες από 0.01 km^2 σε κλίμακα και τις περισσότερες να είναι ρηχές ολισθήσεις κορημάτων, αν και λίγες να είναι μεγάλες και βαθιές (Wang et al., 2000; Hung et al., 2000). Η περιοχή της λεκάνης Chenyulan αντιπροσωπεύει περίπου το 0.4% της συνολικής περιοχής που επηρεάστηκε από τον σεισμό Wenchuan, αλλά ο αριθμός και η έκταση των συνσεισμικών κατολισθήσεων κατέλαβαν το 4% και 6.8%, αντίστοιχα, της συνολικής περιοχής του σεισμού Wenchuan (Εικόνα 14) (Li et al., 2010).



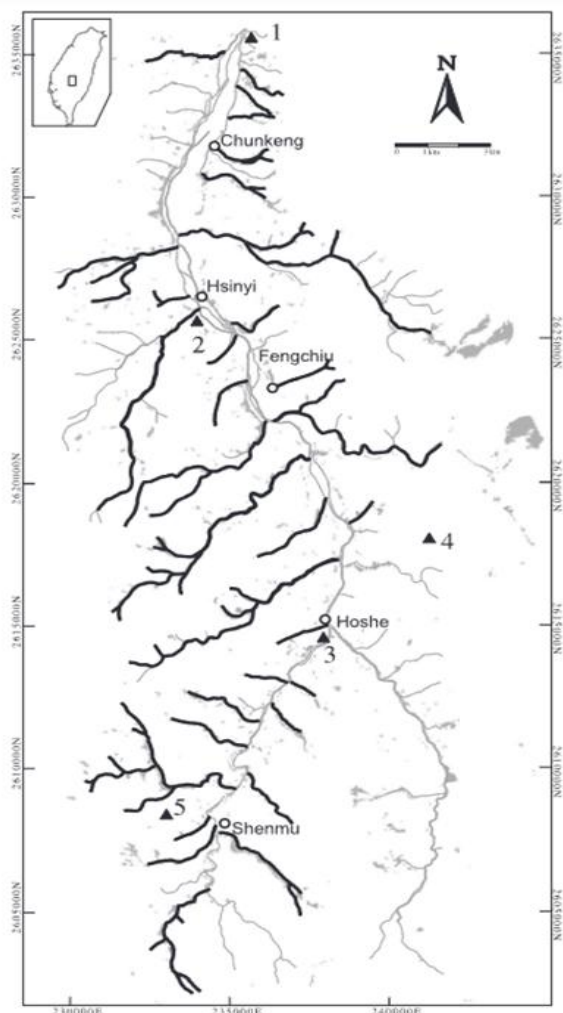
Εικόνα 14. Γράφημα της έκτασης κατολισθήσεων σε διαφορετικές κλίσεις πρανών. Πριν τον σεισμό Chi-Chi, οι κατολισθήσεις εντοπίζονταν κυρίως σε περιοχές με κλίση $20-30^\circ$. Μετά τον σεισμό, οι αστοχίες πρανών παρατηρήθηκαν κυρίως σε κλίσεις $40-50^\circ$ (Πηγή: Lin et al., 2004)

Η επίδραση του σεισμού Chi-Chi στις υδρογεωλογικές συνθήκες και στη σεισμική συμπεριφορά των πρηνών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των μεταβολών που παρατηρήθηκαν στη στάθμη των υπόγειων υδάτων και στη συσχέτιση τους με την εμφάνιση ρευστοποίησης. Η ρευστοποίηση εδάφους παρατηρήθηκε στην περιοχή του Yuanlin και προκάλεσε καθίζηση θεμελίων κτιρίων και γέμισμα πηγαδιών νερού από άμμο, ενώ σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ χαμηλής συχνότητας εδαφικών κινήσεων και αυξημένης πίεσης πόρων και στάθμης υπόγειων υδάτων έγιναν εμφανείς (Wang et al., 2003). Παρόλο που υπάρχουν εκτεταμένες ενδείξεις ότι οι χαμηλής συχνότητας εδαφικές κινήσεις συσχετίζονται καλύτερα με αυξημένη πίεση πόρων και στάθμη υπόγειων υδάτων από ότι οι υψηλής συχνότητας κινήσεις, δεν είναι σαφές προς το παρόν εάν η χαμηλής συχνότητας εδαφική κίνηση ήταν η αιτία για τη συνσεισμική μεταβολή στάθμης υπόγειων υδάτων και ρευστοποίηση ή εάν οι υδρολογικές μεταβολές, συμπεριλαμβανομένης της ρευστοποίησης, προκάλεσαν τη διαφορετική φασματική σύσταση των παρατηρούμενων σειсмоγραφημάτων (Wang et al., 2003).

Η συσχέτιση της εμφάνισης ρευστοποίησης με την επιτάχυνση είναι καλύτερη στο 1 Hz από ότι για τη μέγιστη επιτάχυνση, υποδηλώνοντας τη σημασία των χαρακτηριστικών συχνότητας της σεισμικής διέγερσης στην ανάπτυξη υδρογεωλογικών φαινομένων (Wang et al., 2003). Αυτή η διαπίστωση έχει σημαντικές προεκτάσεις για την κατανόηση των μηχανισμών που συνδέουν τη σεισμική διέγερση με τις μεταβολές στις υδρογεωλογικές συνθήκες και την επακόλουθη επίδραση αυτών των μεταβολών στην ευστάθεια των πρηνών. Η οριζόντια μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA) κατά τη διάρκεια του σεισμού Chi-Chi μαζί με τοποθεσίες ρευστοποίησης δείχνουν τη χωρική κατανομή των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικής διέγερσης και υδρογεωλογικής απόκρισης (Wang et al., 2003).

Μία από τις πιο σημαντικές διαπιστώσεις από τη μελέτη της λεκάνης Chenyulan είναι η δραματική μεταβολή στα κατώφλια βροχόπτωσης που απαιτούνται για την πυροδότηση κατολισθήσεων και κατακρημνίσεων κορημάτων μετά τον σεισμό Chi-Chi. Οι περισσότερες κατακρημνίσεις κορημάτων στην περιοχή μελέτης προέκυψαν από κατολισθήσεις που ξεκινούσαν από την κεφαλή των χαράδρων, και η συσσωρευμένη βροχόπτωση και η μέγιστη ωριαία ένταση βροχόπτωσης που απαιτούνται για την πυροδότηση μιας κατακρήμνισης κορημάτων μειώθηκαν σημαντικά μετά τον σεισμό Chi-Chi, γεγονός που πιθανότατα αποδίδεται στις αλλαγές των τοποθεσιών όπου συνέβαιναν

κατολισθήσεις (Lin et al., 2004). Πριν από τον σεισμό Chi-Chi, οι περισσότερες αστοχίες συνέβαιναν σε τοποθεσίες με κλίση μεταξύ 20° και 30° , αλλά μετά τον σεισμό, συνέβαιναν κυρίως σε τοποθεσίες με κλίση μεγαλύτερη από 55° , υποδηλώνοντας ότι ο σεισμός είχε αποσταθεροποιήσει τα απότομα πρανή και τα καταστήσει περισσότερο επιδεκτικά σε αστοχία από βροχοπτώσεις (Εικόνα 15) (Lin et al., 2004).



Εικόνα 15 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Chenyulan. Οι έντονες συνεχείς γραμμές υποδεικνύουν τις χαράδρες όπου εκδηλώθηκαν ροές κορημάτων κατά τον τυφώνα Herb. Οι σκιασμένες περιοχές απεικονίζουν κατολισθήσεις που εντοπίστηκαν σε δορυφορική εικόνα SPOT, ενώ τα συμπαγή τρίγωνα με αριθμούς αντιστοιχούν σε σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης (Πηγή: Lin et al., 2004).

2.2.3 Προεκτάσεις της Μελέτης Περίπτωσης για τη Σεισμική Μηχανική Πρανών

Οι επιπτώσεις του σεισμού Chi-Chi στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης Chenyulan επεκτείνονται πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στην ευστάθεια των πρανών, επηρεάζο-

ντας επίσης τη μακροπρόθεσμη υδρολογική συμπεριφορά και τη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων στην περιοχή. Η αύξηση της έκτασης των κατολισθήσεων και η δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων ελεύθερου υλικού στις κοίτες των ποταμών επηρέασαν σημαντικά τη υδραυλική συμπεριφορά των ποτάμιων συστημάτων, με επιπτώσεις στη μεταφορά ιζημάτων, τη διάβρωση των κοιτών και τη συνολική μορφολογία του δικτύου απορροής (Lin et al., 2008). Η έκπλυση υλικού από κατολισθήσεις που προέκυψε από τον σεισμό Chi-Chi του 1999 συνέχισε να επηρεάζει τις αιωρούμενες αποδόσεις στα ποτάμια συστήματα για αρκετά χρόνια μετά τον σεισμό, με αρκετούς τυφώνες να συμβάλλουν στην έκπλυση του υλικού που προέκυψε από κατολισθήσεις, αυξάνοντας τις αιωρούμενες αποδόσεις σε 4 φορές το επίπεδο υποβάθρου πριν να επιστρέψουν στα κανονικά επίπεδα μετά από 6 χρόνια (Lin et al., 2008).

Η μελέτη του σεισμού Chi-Chi και των επιπτώσεών του στη λεκάνη Chenyulan παρέχει σημαντικές αποκαλύψεις σχετικά με τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικών διεγέρσεων, υδρογεωλογικών συνθηκών και μακροπρόθεσμης ευστάθειας πρανών. Ο σεισμός Chi-Chi του 1999 παρείχε ένα σημαντικό σύνολο δεδομένων για τη μελέτη της επίδρασης του σεισμού στην εμφάνιση κατολισθήσεων και κατακρημνίσεων κορημάτων, με τη λεκάνη Chenyulan να αποτελεί ένα ιδανικό σημείο μελέτης για την κατανόηση αυτών των πολύπλοκων φαινομένων (Lin et al., 2004). Σε σύγκριση με την επιτόπια έρευνα, ορισμένα σφάλματα θα μπορούσαν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας εικόνες SPOT για την καταμέτρηση και τον εντοπισμό κατολισθήσεων, ωστόσο η απεραντοσύνη της περιοχής μελέτης και η κακή προσβασιμότητα στην καταστροφική περιοχή κατέστησαν τις εικόνες SPOT και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους τα πιο ιδανικά εργαλεία για την τρέχουσα έρευνα (Lin et al., 2004). Η δραματική αύξηση της έκτασης κατολισθήσεων από $7.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ πριν από τον σεισμό σε $20.8 \times 10^6 \text{ m}^2$ αμέσως μετά, και η περαιτέρω επέκταση σε $27.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ στους επόμενους δύο χρόνους, αποδεικνύει ότι οι επιπτώσεις των μεγάλων σεισμών στην ευστάθεια πρανών δεν περιορίζονται στη συνσεισμική περίοδο αλλά συνεχίζουν να εκδηλώνονται για χρόνια μετά το αρχικό γεγονός (Lin et al., 2004). Αυτή η διαπίστωση έχει σημαντικές επιπτώσεις για τη διαχείριση κινδύνου σε σεισμόπληκτες περιοχές, καθώς υποδηλώνει ότι οι στρατηγικές μείωσης κινδύνου πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο τις άμεσες επιπτώσεις του σεισμού αλλά και την παρατεταμένη περίοδο αυξημένης ευπάθειας των εδαφών με πλούσιο υδροφόρο ορίζοντα που ακολούθησε.

Η μείωση των κατωφλίων βροχόπτωσης που απαιτούνται για την πυροδότηση κατολισθήσεων και κατακρημνίσεων κορημάτων μετά τον σεισμό αντιπροσωπεύει μια από τις πιο σημαντικές πρακτικές επιπτώσεις της μελέτης. Η μετάβαση των κατολισθήσεων από περιοχές με κλίσεις 20° - 30° σε περιοχές με κλίσεις άνω των 55° υποδηλώνει μια θεμελιώδη αλλαγή στους μηχανισμούς αστοχίας και στην κατανομή του κινδύνου στο τοπίο (Lin et al., 2004). Αυτή η αλλαγή απαιτεί αναθεώρηση των υπαρχόντων χαρτών κινδύνου, των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και των πρωτοκόλλων διαχείρισης έκτακτης ανάγκης για να αντικατοπτρίζουν τη νέα κατανομή κινδύνου που δημιουργήθηκε από τον σεισμό. Τέλος, η συσχέτιση μεταξύ χαμηλής συχνότητας σεισμικών κινήσεων και αυξημένης πίεσης πόρων/στάθμης υπόγειων υδάτων που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού Chi-Chi παρέχει σημαντικές αποκαλύψεις για την κατανόηση των μηχανισμών που συνδέουν τη σεισμική διέγερση με την υδρογεωλογική απόκριση (Wang et al., 2003). Αν και δεν είναι ακόμη σαφές εάν οι χαμηλής συχνότητας εδαφικές κινήσεις προκαλούν άμεσα τις υδρογεωλογικές μεταβολές ή εάν οι υδρογεωλογικές μεταβολές επηρεάζουν τη φασματική σύσταση των καταγραφόμενων σεισμικών κινήσεων, η ισχυρή στατιστική συσχέτιση μεταξύ αυτών των φαινομένων υποδηλώνει την ύπαρξη σημαντικών μηχανισμών αλληλεπίδρασης που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης (Wang et al., 2003).

2.3 Ο Σεισμός L'Aquila 2009 στην Κεντρική Ιταλία

2.3.1 Γενικές πληροφορίες

Ο σεισμός L'Aquila που συνέβη στις 6 Απριλίου 2009 στις 03:32 τοπική ώρα στην περιφέρεια Abruzzo της κεντρικής Ιταλίας αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές σεισμικές δραστηριότητες της σύγχρονης Ευρώπης, τόσο από άποψη καταστροφών όσο και από άποψη επιστημονικής τεκμηρίωσης των φαινομένων αλληλεπίδρασης σεισμικών δυνάμεων με υδρογεωλογικές συνθήκες. Ο σεισμός, με μέγεθος 5.8-5.9 στην κλίμακα Richter και 6.3 Mw στην κλίμακα ροπής μεγέθους, είχε το επίκεντρό του κοντά στο L'Aquila, την πρωτεύουσα της περιφέρειας Abruzzo, σε εστιακό βάθος μόλις 8 km, γεγονός που ενίσχυσε σημαντικά τις καταστροφικές επιπτώσεις του σεισμού (Kawashima et al., 2010). Η σεισμική διέγερση προκάλεσε 308 θανάτους, συμπερι-

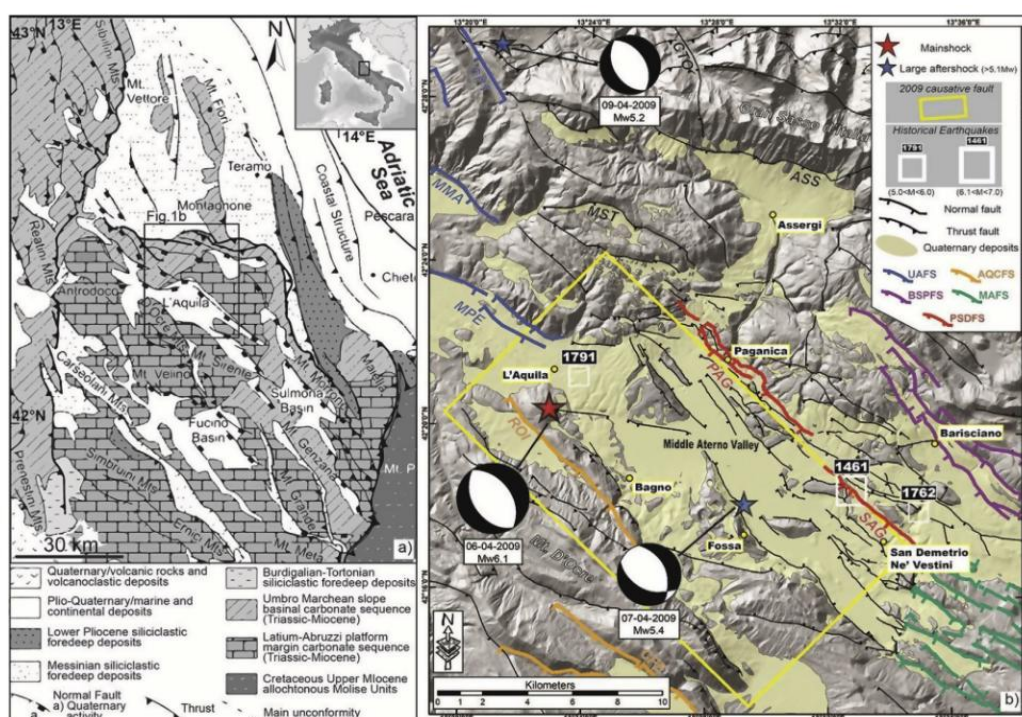
λαμβανομένων 19 αλλοδαπών υπηκόων, 1.600 τραυματίες και άφησε 67.500 ανθρώπους άστεγους, ενώ προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε 11.000 μεσαιωνικά και μπαρόκ κτίρια στο κέντρο του L'Aquila καθώς και σε σύγχρονα κτίρια στα προάστια και στις κοντινές πόλεις και χωριά (Alexander, 2010).

2.3.2 Γεωλογικό Περιβάλλον και Υδροφόρος Ορίζοντας

Η περιοχή του L'Aquila βρίσκεται στο τεκτονικά ενεργό περιβάλλον των Απεννίνων, όπου η Αφρικανική πλάκα υποβιβάζεται κάτω από την Ευρασιατική πλάκα, δημιουργώντας ένα σύνθετο σύστημα ρηγμάτων που εκτείνεται κατά μήκος της κεντρικής Ιταλίας από βορρά προς νότο. Ο σεισμός του 2009 προκλήθηκε από την ενεργοποίηση ενός προηγουμένως ελάχιστα γνωστού ρηγματικού συστήματος στην κοιλάδα Middle Aterno, το οποίο χαρακτηρίζεται από κανονικά ρήγματα με κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που ελέγχουν τη μορφολογία και την υδρογεωλογία της περιοχής (Pucci et al., 2019). Η σεισμική δραστηριότητα επηρέασε μια περιοχή 1.000 km² που χαρακτηρίστηκε από ρηξιγένεση, κατολισθήσεις και βραχώδεις κατολισθήσεις, ενώ η σεισμική διέγερση έγινε αισθητή σε όλη την κεντρική Ιταλία και μέχρι τη Ρώμη, σε απόσταση 90 km από το επίκεντρο (Alexander, 2010). Η γεωλογική δομή της περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία αποθέσεων που υπερκείνται μεσοζωικών και κενοζωικών ανθρακικών σχηματισμών. Οι αποθέσεις της λεκάνης Fucino και της κοιλάδας Middle Aterno αποτελούνται κυρίως από αργίλους, ιλεις και στρώματα άμμου που εναποτέθηκαν κατά τη διάρκεια διαφορετικών γεωλογικών περιόδων και παρουσιάζουν μεταβλητά χαρακτηριστικά διαπερατότητας και συμπίεστότητας (Boncio et al., 2018). Αυτή η ετερογένεια στη γεωλογική δομή δημιουργεί πολύπλοκες υδρογεωλογικές συνθήκες όπου διαφορετικά στρώματα μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως υδροφόροι ορίζοντες είτε ως αδιαπέρατα στρώματα, επηρεάζοντας την κατανομή και την κίνηση των υπόγειων υδάτων (Εικόνα 16) (Boncio et al., 2018).

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού L'Aquila ήταν η εμφάνιση ρευστοποίησης εδάφους σε συγκεκριμένες περιοχές, ιδιαίτερα κατά μήκος του ποταμού Aterno στην περιοχή που ονομάζεται Martini, νότια του λόφου στον οποίο βρίσκεται το παλιό κέντρο της πόλης L'Aquila. Η ρευστοποίηση

προκλήθηκε από την παραγωγή πίεσης πόρων σε πλήρως κορεσμένα αμμώδη εδάφη που αποτελούν μέρος των αλλουβιακών αποθέσεων που σχηματίστηκαν γεωλογικά κατά μήκος του ποταμού Aterno στην επικεντρική περιοχή (Kawashima et al., 2010). Ο ποταμός μαianeδρίζει στην περιοχή και είναι πιθανό ότι αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αμμωδών αποθέσεων στους μαianeδρους, δημιουργώντας τις ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση ρευστοποίησης κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης (Εικόνα 16) (Kawashima et al., 2010).



Εικόνα 16. Λεζάντα στα ελληνικά βασισμένη στα στοιχεία: **α) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης των Κεντρικών Απεννίνων (τροποποιημένο από Di Domenica et al., 2012). Στο ένθετο παρουσιάζεται η θέση της υπό μελέτη περιοχής. β) Σχηματική απεικόνιση της χωρικής σχέσης μεταξύ των συστημάτων ρηγμάτων της περιοχής. Τα κύρια συστήματα ρηγμάτων εμφανίζονται με χρώμα: Άνω Aterno (UAFS – μπλε), Aquila-Campo Felice (AQCFs – πορτοκαλί), Barisciano-San Pio (BSFfs – μωβ), Μέσο Aterno (MAFs – πράσινο). Οι δύο κύριες ενότητες του ρήγματος Paganica-San Demetrio (PSDFs) παρουσιάζονται με κόκκινο: το ρήγμα Paganica (PAG) και το ρήγμα San Giovanni (SAG) (απλοποιημένο από Cívico et al., 2015). Σημειώνονται επίσης και άλλα ρήγματα που αναφέρονται στο κείμενο: Ρήγμα Capitignano (CPT), Ρήγμα Monte Marine (MMA), Ρήγμα Monte Pettino (MPE), Ρήγμα Campotosto (CTF), Ρήγμα Monte Stabiate (MSF), Ρήγμα Assergi (AF), Ρήγμα Roio (ROI), Ρήγμα Campo Felice (CFE). Εμφανίζονται οι κύριοι σεισμοί της ακολουθίας του 2009 στην L'Aquila μαζί με τους μηχανισμούς γένεσής τους (Πηγή: Pucci et al., 2019).

Στην περιοχή Martini, η ρευστοποίηση δημιούργησε πολυάριθμες ρωγμές με κατεύθυνση BA-ND παράλληλες προς την όχθη του ποταμού, οι οποίες άνοιξαν σημαντικά

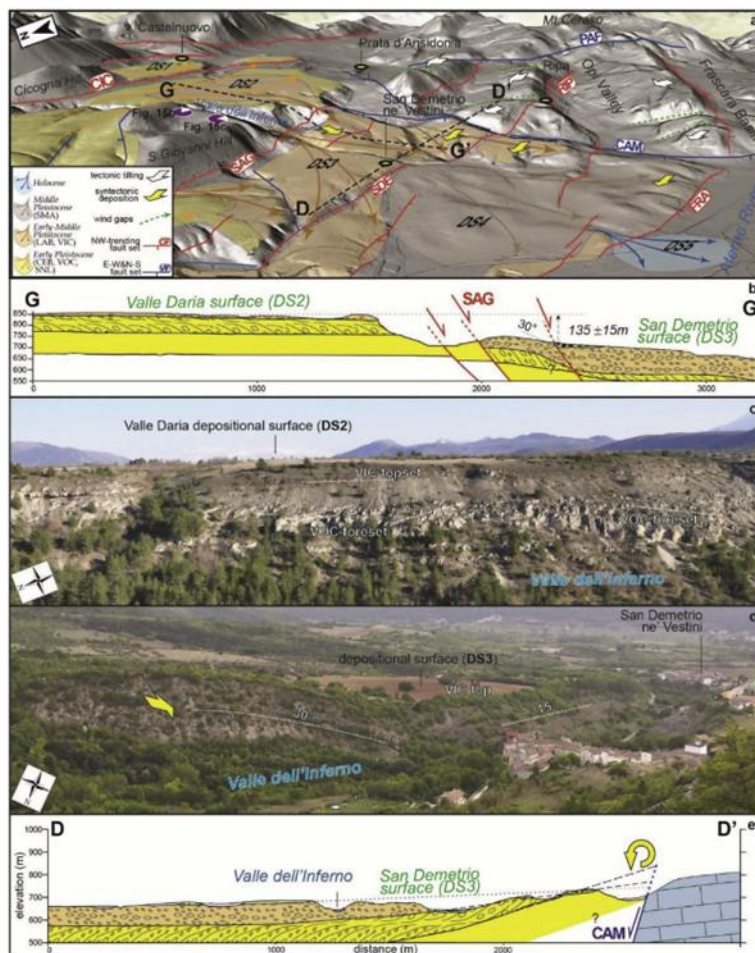
κατά τη διάρκεια του σεισμού. Παρατηρήθηκαν εκρήξεις άμμου (sand boils) πάχους έως 150 mm σε διάφορες τοποθεσίες, ενώ η κίνηση του εδάφους ήταν προς τη ΝΑ κατεύθυνση (Kawashima et al., 2010). Η ρευστοποίηση προκάλεσε πλευρική επέκταση με το άθροισμα των ανοιγμάτων των ρωγμών από το παρακείμενο αγρό προς την όχθη του ποταμού να κυμαίνεται μεταξύ 250-350 mm, δημιουργώντας σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις στο έδαφος (Kawashima et al., 2010). Παρόλο που υπήρχαν αρκετές κατασκευές τύπου αποθήκης και γέφυρες για σιδηροδρόμους και οδικά δίκτυα στην περιοχή όπου παρατηρήθηκε ρευστοποίηση εδάφους, δεν υπήρχε ορατή ζημιά στις κατασκευές πιθανότατα επειδή τα θεμέλια στηρίζονταν σε βαθιά και άκαμπτα εδάφη (Kawashima et al., 2010).

2.3.3 Κατολισθήσεις και Αστάθεια Πρανών

Οι δευτερογενείς επιπτώσεις του σεισμού L'Aquila περιλάμβαναν εκτεταμένα φαινόμενα κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων που συνέβησαν τόσο κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμικού γεγονότος όσο και κατά τη διάρκεια των μετασεισμών που ακολούθησαν. Οι μετασεισμοί πυροδότησαν κατολισθήσεις και βραχοπτώσεις, προκαλώντας ζημιές σε κατοικίες και μεταφορές, ενώ μια κατολίσθηση και λασποροή προκλήθηκαν από τη ρήξη κύριου αγωγού παροχής νερού κοντά στην πόλη Paganio (Alexander, 2010). Αυτό το γεγονός αναδεικνύει την άμεση σύνδεση μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας και των υδρογεωλογικών συνθηκών, καθώς η διαρροή νερού από τον κατεστραμμένο αγωγό δημιούργησε πρόσθετες υδρολογικές πιέσεις που συνέβαλαν στην αστάθεια του πρανούς. Η ανάλυση των φαινομένων αστάθειας πρανών στην περιοχή του L'Aquila αποκαλύπτει τη σημασία της αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικών δυνάμεων και προϋπαρχουσών υδρογεωλογικών συνθηκών. Πολλές από τις κατολισθήσεις που παρατηρήθηκαν συνδέονταν με περιοχές όπου η παρουσία υπόγειων υδάτων είχε ήδη επηρεάσει τις γεωτεχνικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών, μειώνοντας τη συνοχή και την αντοχή σε διάτμηση (Vessia et al., 2013). Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις αποθέσεις της κοιλάδας Middle Aterno βρισκόταν σχετικά κοντά στην επιφάνεια, δημιουργώντας συνθήκες όπου ακόμη και μέτριες σεισμικές διεγέρσεις μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντική αύξηση της πίεσης πόρων και αντίστοιχη μείωση της ενεργού τάσης (Vessia et al., 2013).

Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες πτυχές του σεισμού L'Aquila από την άποψη της αλληλεπίδρασης με τον υδροφόρο ορίζοντα είναι η τεκμηριωμένη εμφάνιση υδρογεωχημικών ανωμαλιών που παρατηρήθηκαν πριν και κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Το ραδόνιο, ένα αδρανές αέριο που μεταφέρεται σε αυξημένες ποσότητες στον αέρα ή τα υπόγεια ύδατα όταν προκαλείται μικρο-ρηξιγένεση γύρω από ένα ενεργό γεωλογικό ρήγμα λόγω σεισμικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιήθηκε για τη χαρτογράφηση της δομής ενεργών ρηγμάτων, συμπεριλαμβανομένων αυτών στους Αβρουζιακούς Απεννίνους (Alexander, 2010). Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν ανωμαλίες ουρανίου στα υπόγεια ύδατα που σχετίζονταν με τον σεισμό L'Aquila της 6ης Απριλίου 2009, παρέχοντας επιπρόσθετες αποδείξεις για την ύπαρξη στενής σύνδεσης μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας και των υδρογεωχημικών διεργασιών (Εικόνα 17) (Plastino et al., 2009). Αυτές οι ανωμαλίες στον υδροφόρο ορίζοντα, υποδηλώνουν ότι η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να επηρεάσει τη σύσταση και την ποιότητα των υπόγειων υδάτων μέσω διαφόρων μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένης της αλλαγής των δρόμων ροής, της αύξησης της επαφής νερού-βράχου λόγω νέας γένεσης ρήγματος, και της κινητοποίησης ραδιενεργών ή τοξικών στοιχείων από γεωλογικούς σχηματισμούς (Plastino et al., 2009). Αν και με τις τρέχουσες γνώσεις και τεχνολογία δεν μπορούν να προβλεφθούν βραχυπρόθεσμα οι σεισμοί με τέτοιες μετρήσεις, οι παρατηρήσεις αυτές παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των διεργασιών που συνδέουν τη σεισμική δραστηριότητα με το υδρογεωλογικό περιβάλλον (Alexander, 2010).

Ο σεισμός L'Aquila είχε σημαντικές επιπτώσεις στη διαχείριση υδατικών πόρων και την περιβαλλοντική προστασία της περιοχής, οι οποίες εκτείνονται πέρα από τις άμεσες φυσικές καταστροφές. Η εκτεταμένη παραγωγή κατασκευαστικών απορριμμάτων, εκτιμώμενη σε περίπου τρία εκατομμύρια τόνους, δημιούργησε σοβαρά προβλήματα διαχείρισης που επηρέασαν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων στην περιοχή (Basti et al., 2018). Το Νομοθετικό Διάταγμα αρ. 39 (άρθρο 9) επέτρεψε τη διαχείριση των καταστροφικών απορριμμάτων στο Abruzzo χωρίς να ληφθούν υπόψη οι συνήθεις διαδικασίες, όπως η αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η εκτίμηση και παρακολούθηση κινδύνου, τα μέτρα ασφαλείας, η προστασία των υπόγειων υδάτων σε χώρους διάθεσης απορριμμάτων, και τα πρότυπα δημόσιας υγείας και ασφάλειας (Alexander, 2013).



Εικόνα 17. α) Πλάγια απεικόνιση μορφολογίας του υπολεκανίου San Demetrio μέσω σκιασμένου ΨΜΕ. Διακρίνονται οι αποθέσεις (με επιφάνειες απόθεσης και διάβρωσης) και η σχέση τους με τη ρηγμάτωση· β) Εγκάρσια τομή που δείχνει την ελάχιστη μετατόπιση της αποθετικής επιφάνειας της Valle Daria. Παρατηρείται η κλίση των στρωμάτων VIC κοντά στο ρήγμα SAG· γ) Πανοραμική απεικόνιση της αποθετικής επιφάνειας Valle Daria (DS2) και της εμφανιζόμενης ακολουθίας της Valle dell'Inferno. Οι διακεκομμένες λευκές γραμμές υπογραμμίζουν τις κλίσεις του VOC foreset και του VIC topset (Πηγή: Pucci et al., 2019)

Αυτή η προσέγγιση διαχείρισης απορριμμάτων είχε πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων, καθώς η απουσία κατάλληλων μέτρων προστασίας μπορούσε να οδηγήσει σε διήθηση επικίνδυνων ουσιών στον υδροφόρο ορίζοντα. Η διαταραχή των φυσικών υδρολογικών μοτίβων λόγω της κατασκευής προσωρινών καταλυμάτων και των εργασιών ανακατασκευής επηρέασε επίσης την κατανομή και κίνηση των υπόγειων υδάτων στην περιοχή, δημιουργώντας νέες συνθήκες που μπορούσαν να επηρεάσουν τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των πρανών (Alexander, 2013). Αυτές οι επιπτώσεις αναδεικνύουν τη σημασία της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών

πόρων κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων αποκατάστασης μετά από σεισμούς, καθώς οι αποφάσεις που λαμβάνονται στην άμεση μετασεισμική περίοδο μπορούν να έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο υδρογεωλογικό περιβάλλον και την ευστάθεια των πρανών.

2.3.4 Προεκτάσεις της Μελέτης Περίπτωσης για τη Σεισμική Μηχανική Πρανών

Η μελέτη του σεισμού L'Aquila του 2009 και των επιπτώσεών του στη σεισμική συμπεριφορά των πρανών παρέχει σχετικές πληροφορίες για την κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμικών δυνάμεων και υδρογεωλογικών συνθηκών σε ευρωπαϊκό περιβάλλον. Η τεκμηριωμένη εμφάνιση ρευστοποίησης στις αποθέσεις κατά μήκος του ποταμού Aterno, παρόλο που είναι περιορισμένη σε έκταση, αποδεικνύει ότι ακόμη και σε περιοχές με μέτρια σεισμικότητα μπορούν να εμφανιστούν σημαντικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης με τον υδροφόρο ορίζοντα όταν οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Η παρουσία πλήρως κορεσμένων αμμωδών εδαφών σε συνδυασμό με την ρηχή στάθμη υπόγειων υδάτων δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη σημαντικής πίεσης των πόρων κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, οδηγώντας σε μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους με μεγέθη που κυμαίνονταν από 250 έως 350 mm (Kawashima et al., 2010).

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, αναδεικνύει τη σημασία της προσεκτικής αξιολόγησης των τοπικών υδρογεωλογικών συνθηκών κατά τη διαδικασία σεισμικής μικροζωνίωσης, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύπλοκη γεωλογική δομή όπως οι λεκάνες που περιλαμβάνουν εναλλασσόμενα στρώματα διαφορετικής διαπερατότητας. Η παρατήρηση ότι η ρευστοποίηση εμφανίστηκε κατά προτίμηση στους μαιάνδρους του ποταμού Aterno, όπου οι συνθήκες απόθεσης ευνοούσαν τη δημιουργία χαλαρών αμμωδών στρωμάτων, υπογραμμίζει τη σημασία της κατανόησης των τοπικών γεωμορφολογικών διεργασιών για την ακριβή πρόβλεψη του δυναμικού ρευστοποίησης (Kawashima et al., 2010). Αυτή η διαπίστωση έχει άμεσες εφαρμογές για την αξιολόγηση κινδύνου σε παρόμοιες γεωλογικές περιοχές της Μεσογείου, όπου παρόμοιες εδαφικές αποθέσεις αποτελούν συνήθη χαρακτηριστικά του τοπίου. Η τεκμηρίωση υδρογεωχημικών ανωμαλιών που σχετίζονται με τον σεισμό, συμπεριλαμβανομένων των διακυμάνσεων στις συγκεντρώσεις ραδονίου και ουρανίου στα υπόγεια ύδατα, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων

της σεισμικής δραστηριότητας στο υδρογεωλογικό περιβάλλον. Αυτά τα φαινόμενα υποδηλώνουν ότι οι επιπτώσεις των σεισμών στον υδροφόρο ορίζοντα δεν περιορίζονται στις άμεσες μηχανικές επιπτώσεις όπως η ρευστοποίηση, αλλά επεκτείνονται και στη μεταβολή των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων των υπόγειων υδάτων μέσω της δημιουργίας νέων δρόμων ροής και της αύξησης του επιπέδου επαφής νερού-βράχου (Plastino et al., 2009). Αυτές οι μεταβολές μπορούν με τη σειρά τους να επηρεάσουν τη μακροπρόθεσμη γεωχημική ισορροπία και τη σταθερότητα των εδαφικών υλικών, δημιουργώντας συνθήκες που μπορεί να αυξήσουν την ευπάθεια των πρανών σε μελλοντικά σεισμικά ή υδρολογικά γεγονότα.

Η περίπτωση του L'Aquila αναδεικνύει επίσης τη σημασία της ολοκληρωμένης διαχείρισης περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων αποκατάστασης μετά από σεισμούς. Η απόφαση να παρακαμφθούν οι συνήθεις περιβαλλοντικές διασφαλίσεις για τη διαχείριση των καταστροφικών απορριμμάτων είχε πιθανές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων και, κατ' επέκταση, στη σταθερότητα των γεωτεχνικών υλικών της περιοχής (Basti et al., 2018). Αυτή η εμπειρία τονίζει την ανάγκη για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων διαχείρισης καταστροφών που λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο τις άμεσες ανάγκες αποκατάστασης αλλά και τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο υδρογεωλογικό περιβάλλον και τη σεισμική ευστάθεια της περιοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως βασικό σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα στη σεισμική συμπεριφορά πρανών μέσω της ανάλυσης της διεθνούς βιβλιογραφίας και της παρουσίασης χαρακτηριστικών μελετών περίπτωσης από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Η ανάλυση του θεωρητικού πλαισίου και των τριών μελετών περίπτωσης από τη διεθνή βιβλιογραφία αποκαλύπτει επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στη σεισμική ευστάθεια πρανών, καθώς και την πολυπλοκότητα των μηχανισμών που διέπουν αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Η θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο επιβεβαιώνεται σε μεγάλο βαθμό από τα εμπειρικά στοι-

χεία των μελετών περίπτωσης. Οι βασικοί μηχανισμοί που διέπουν τη σεισμική συμπεριφορά πρανών υπό την επίδραση υδροφόρου ορίζοντα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων, τη ρευστοποίηση κορεσμένων εδαφών, και τη ρευστοποίηση επιφάνειας ολίσθησης που περιεγράφηκε στη βιβλιογραφία. Η κατολίσθηση Donghekou από τον σεισμό Wenchuan παρέχει άμεσες αποδείξεις για τη δραστική μείωση της αντίστασης διάτμησης που μπορεί να επιτευχθεί όταν κορεσμένα εδαφικά υλικά υπόκεινται σε σεισμική φόρτιση, με τη διατμητική αντοχή να μειώνεται σε μόλις 15 kPa και τη φαινόμενη γωνία τριβής να φτάνει τις 6 μοίρες στις κορεσμένες αποθέσεις κοιλάδας.

Επίσης, η σύγκριση των τριών μελετών περίπτωσης δείχνει ότι οι μηχανισμοί αστοχίας διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις τοπικές γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Στην περίπτωση του Wenchuan, η παρουσία βαθιάς στάθμης υπόγειων υδάτων σε συνδυασμό με κορεσμένες αποθέσεις κοιλάδας οδήγησε σε καταστροφικές κατολισθήσεις μεγάλης κινητικότητας. Αντίθετα, στον σεισμό Chi-Chi της Ταϊβάν, η επίδραση εκδηλώθηκε κυρίως μέσω της αλλαγής των κατωφλίων πυροδότησης κατολισθήσεων από βροχοπτώσεις, ενώ στο L'Aquila η ρευστοποίηση περιορίστηκε σε συγκεκριμένες περιοχές με ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες κορεσμού.

Τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης αποδυναμώνουν τις αδυναμίες των παραδοσιακών μεθόδων αξιολόγησης σεισμικής ευστάθειας πρανών που δεν λαμβάνουν επαρκώς υπόψη την επίδραση των υδρογεωλογικών συνθηκών. Η ψευδοστατική μέθοδος και η μέθοδος Newmark, που αποτελούν τα σημαντικότερα εργαλεία της πρακτικής μηχανικής, βασίζονται σε απλοποιημένες παραδοχές που μπορεί να υποεκτιμούν σημαντικά τον κίνδυνο όταν οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ή ρευστοποίησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις τρεις μελέτες περίπτωσης υποδηλώνει την ανάγκη για την ανάπτυξη πιο προηγμένων μεθοδολογιών που μπορούν να ενσωματώσουν δυναμικά την επίδραση των υπόγειων υδάτων και των μεταβολών τους κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων. Αντίστοιχα, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παρόλο που πιο περίπλοκη, αποδεικνύεται ότι μπορεί να παρέχει πιο ρεαλιστική αναπαράσταση των φαινομένων που παρατηρήθηκαν στις μελέτες περίπτωσης, ιδιαίτερα όταν ενσωματώνει καταστατικά μοντέλα που μπορούν να περιγράψουν την απρόβλεπτη συμπεριφορά των εδαφών υπό κυκλική φόρτιση και την ανάπτυξη πίεσης πόρων. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή αυτής της μεθόδου

απαιτεί λεπτομερή γνώση των υδρογεωλογικών παραμέτρων και προηγμένη υπολογιστική υποδομή, γεγονός που περιορίζει τη χρήση της σε περιπτώσεις υψηλού κινδύνου.

Η σύγκριση των τριών μελετών περίπτωσης από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές αναδεικνύει τη σημασία του γεωλογικού και τεκτονικού πλαισίου στον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο ο υδροφόρος ορίζοντας επηρεάζει τη σεισμική συμπεριφορά πρανών. Στην Κίνα, η παρουσία μεγάλων ορεινών μαζών με απότομα πρανή και κοιλάδες με μεγάλο βάθος, με κορεσμένες αποθέσεις δημιούργησε συνθήκες για καταστροφικές κατολισθήσεις μεγάλης κινητικότητας. Στην Ταϊβάν, το νησιωτικό περιβάλλον με έντονες βροχοπτώσεις και την παρουσία υφιστάμενων κατολισθήσεων δημιούργησε συνθήκες όπου η σεισμική δραστηριότητα επηρέασε κυρίως την ευαισθησία του συστήματος σε υδρολογικά γεγονότα. Στην Ιταλία, το περιβάλλον των λεκανών με περιορισμένες εδαφικές αποθέσεις οδήγησε σε τοπικά φαινόμενα ρευστοποίησης χωρίς στην περίπτωση αυτή να εμφανίζουν εκτεταμένες κατολισθήσεις.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexander, D. E. (2010). The L'Aquila earthquake of 6 April 2009 and Italian Government policy on disaster response. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 2(4), 325–342. <https://doi.org/10.1080/19390459.2010.511450>
- Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey. *Natural hazards and earth system sciences*, 13(11), 2707–2716.
<https://doi.org/10.5194/nhess-13-2707-2013>
- Asteris, P. G., Rizal, F. I. M., Koopialipoor, M., Roussis, P. C., Ferentinou, M., Armaghani, D. J., & Gordan, B. (2022). Slope stability classification under seismic conditions using several tree-based intelligent techniques. *Applied Sciences*, 12(3), 1753. <https://doi.org/10.3390/app12031753>
- Basti, A. (2018). Sustainable management of debris from the L'Aquila earthquake: Environmental strategies and impact assessment. *Detritus*, 2, 112–119.
<https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13661>
- Beddoe, R. A., & Take, W. A. (2016). Loss of slope support due to base liquefaction: Comparison of 1g and centrifuge landslide flume experiments. *Soils and Foundations*, 56(2), 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.008>
- Ben-Zeev, S., Goren, L., Toussaint, R., & Aharonov, E. (2023). Drainage explains soil liquefaction beyond the earthquake near-field. *Nature communications*, 14(1), 5791.

- Boncio, P., Amoroso, S., Vessia, G., Francescone, M., Nardone, M., Monaco, P., Famiani, D., Di Naccio, D., Mercuri, A., & Manuel, M. R. (2018). Evaluation of liquefaction potential in an intermountain Quaternary lacustrine basin (Fucino basin, central Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(1), 91–111. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0201-z>
- Brain, M. J., Moya, S., Kincey, M. E., Tunstall, N., Petley, D. N., & Sepúlveda, S. A. (2021). Controls on post-seismic landslide behavior in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(9), e2021JF006242.
- Chen, Z.-X., Chen, G., & Liu, Y. (2024). Effects of topographic irregularity on seismic site amplification considering input signal frequency: A case study. *Engineering Structures*, 304, 117667. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117667>
- Cui, P., Zhu, Y., Han, Y., Chen, X., & Zhuang, J. (2009). The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation. *Landslides*, 6(3), 209–223. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0160-9>
- Dahal, A., Tanyas, H., Mai, P. M., van der Meijde, M., van Westen, C., & Lombardo, L. (2024). Quantifying the influence of topographic amplification on the landslides triggered by the 2015 Gorkha earthquake. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 678. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01822-9>
- Feng, C., & Yin, Y. (2025). Stability and displacement analysis of interlayered soft-hard slopes under seismic loading. *Scientific Reports*, 15(1), 19260.

- Goodman, R. E., & Kieffer, D. S. (2000). Behavior of rock in slopes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(8), 675–684.
- Guo, M., Ge, X., & Wang, S. (2011). Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(3), 282–288. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00282>
- HARP, E. L., & NOBLE, M. A. (1993). An engineering rock classification to evaluate seismic rock-fall susceptibility and its application to the Wasatch Front. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 30(3), 293–319.
<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxx.3.293>
- Heermance, R., Shipton, Z. K., & Evans, J. P. (2003). Fault structure control on fault slip and ground motion during the 1999 rupture of the Chelungpu fault, Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1034–1050.
<https://doi.org/10.1785/0120010230>
- Huang, J.-C., Kao, S.-J., Hsu, M.-L., & Lin, J.-C. (2006). Stochastic procedure to extract and to integrate landslide susceptibility maps: An example of mountainous watershed in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(5), 803–815.
<https://doi.org/10.5194/nhess-6-803-2006>
- Huang, S., & Peng, Y. (2018). Seismic stability analysis of saturated and unsaturated soil slopes using permanent displacement. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 1786392. <https://doi.org/10.1155/2018/1786392>

- Huang, S., Zhai, S., Liu, Y., Liu, C., Goda, K., & Mou, B. (2021). Seismic behavior analysis of the bank slope considering the effect of earthquake-induced excess pore water pressure. *Frontiers in Earth Science*, 9, 799612.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.799612>
- Huang, Y., & Yu, M. (2013). Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century. *Natural hazards*, 65(3), 2375–2384.
<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0433-9>
- Hung, J.-J. (2000). Chi-Chi earthquake induced landslides in Taiwan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2(2), 25–33.
- Ji, J., Wang, C., Cui, H., Li, X., Song, J., & Gao, Y. (2021). A simplified nonlinear coupled Newmark displacement model with degrading yield acceleration for seismic slope stability analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(10), 1303–1322. <https://doi.org/10.1002/nag.3202>
- Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering geology*, 122(1–2), 43–50.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017>
- Johansson, J. (2014). *Impact of water-level variations on slope stability*.
- Kanamori, H., & Brodsky, E. E. (2001). The physics of earthquakes. *Physics today*, 54(6), 34–40.

- Kawashima, K., Aydan, Ö., Aoki, T., Kishimoto, I., Konagai, K., Matsui, T., Sakuta, J., Takahashi, N., Teodori, S.-P., & Yashima, A. (2010). Reconnaissance investigation on the damage of the 2009 L'Aquila, Central Italy earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(6), 817–841. <https://doi.org/10.1080/13632460903584055>
- Koo, R. (2008). *Seismic slope stability assessment in a moderate seismicity region, Hong Kong*. 12–17.
- Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (2011). Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 247–264. <https://doi.org/10.1139/T10-063>
- Leshchinsky, B. A. (2018). Nested Newmark model to calculate the post-earthquake profile of slopes. *Engineering Geology*, 233, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.006>
- Li, G., West, A. J., Densmore, A. L., Jin, Z., Parker, R. N., & Hilton, R. G. (2014). Seismic mountain building: Landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(4), 833–844. <https://doi.org/10.1002/2013GC005067>
- Lin, C.-W., Shieh, C.-L., Yuan, B.-D., Shieh, Y.-C., Liu, S.-H., & Lee, S.-Y. (2004). Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering geology*, 71(1–2), 49–61. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00125-X)

- Lin, G., Chen, H., Hovius, N., Horng, M., Dadson, S., Meunier, P., & Lines, M. (2008). Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(9), 1354–1373.
- Lin, G.-W., Chen, H., Chen, Y.-H., & Horng, M.-J. (2008). Influence of typhoons and earthquakes on rainfall-induced landslides and suspended sediments discharge. *Engineering Geology*, 97(1–2), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.12.001>
- Lin, P.-S., Lin, J.-Y., Hung, J.-C., & Yang, M.-D. (2002). Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan. *Engineering Geology*, 66(3–4), 295–313. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00105-9)
- Ma, K., Lee, C., Tsai, Y., Shin, T., & Mori, J. (1999). The Chi-Chi, Taiwan earthquake: Large surface displacements on an inland thrust fault. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 80(50), 605–611. <https://doi.org/10.1029/99EO00405>
- Macedo, J., & Candia, G. (2020). Performance-based assessment of the seismic pseudo-static coefficient used in slope stability analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106109. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106109>
- Masi, E. B., Segoni, S., & Tofani, V. (2021). Root reinforcement in slope stability models: A review. *Geosciences*, 11(5), 212.
- Mebrahtu, T. K., Heinze, T., & Wohnlich, S. (2022). *Slope stability analyses using the 2D and 3D finite element method along the Rift margin in Ethiopia*. 2022, EP23B-04.

- Murphy, B. (2015). Coseismic landslides. Στο *Landslide Hazards, Risks, and Disasters* (σελ. 91–129). Elsevier.
- Ng, C. W., & Pang, Y. (2000). Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(2), 157–166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:2(157))
- Nurwatik, N., Ummah, M. H., Cahyono, A. B., Darminto, M. R., & Hong, J.-H. (2022). A comparison study of landslide susceptibility spatial modeling using machine learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(12), 602.
- Peng, W., Zhao, M., Zhao, H., & Yang, C. (2023). Seismic stability and failure mode of the slope containing a two-pile foundation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1), 33. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03039-6>
- Plastino, W., Povinec, P. P., De Luca, G., Doglioni, C., Nisi, S., Ioannucci, L., Balata, M., Laubenstein, M., Bella, F., & Coccia, E. (2010). Uranium groundwater anomalies and L'Aquila earthquake, 6th April 2009 (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(1), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.009>
- Pucci, S., Villani, F., Civico, R., Di Naccio, D., Porreca, M., Benedetti, L., Gueli, A., Stella, G., Baccheschi, P., & Pantosti, D. (2019). Complexity of the 2009 L'Aquila earthquake causative fault system (Abruzzi Apennines, Italy) and effects on the Middle Aterno Quaternary basin arrangement. *Quaternary Science Reviews*, 213, 30–66. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.04.014>

- Read, J., & Beale, G. (2013). *Guidelines for evaluating water in pit slope stability*. Csiro Publishing.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-science reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., & Wang, G. (2005). Dynamic properties of earthquake-induced large-scale rapid landslides within past landslide masses. *Landslides*, 2(2), 125–134. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0055-3>
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., & Wang, G. (2007). Landslides induced by a combined effect of earthquake and rainfall. Στο *Progress in landslide science* (σελ. 193–207). Springer.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., & Ishikawa, N. (2004). Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides*, 1(1), 7–19. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0004-y>
- Sazzad, M. M., Roy, S., & Biman, N. A. (χ.χ.). *Effect of Earthquake on the Stability of Slope by Pseudo-Static and Dynamic Approach*.
- Soddu, S., Delitala, G., Sciabica, M., & Barrocu, G. (2003). Modelling groundwater effects on slope stability. *Materials and Geoenvironment*, 50, 349–352.

- Ullah, S., Khan, M. U., & Rehman, G. (2020). A brief review of the slope stability analysis methods. *Geol. Behav*, 4(2), 73–77.
<https://doi.org/10.26480/gbr.02.2020.73.77>
- Vessia, G., Parise, M., & Tromba, G. (2013). A strategy to address the task of seismic micro-zoning in landslide-prone areas. *Advances in Geosciences*, 35, 23–35.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-35-23-2013>
- Vessia, G., Rainone, M. L., & Signanini, P. (2015). Working Strategies for Addressing Microzoning Studies in Urban Areas: Lessons from the 2009 L’Aquila Earthquake. Στο *Earthquakes and Their Impact on Society* (σελ. 233–290). Springer.
- Wang, C., Hawlader, B., Islam, N., & Soga, K. (2019). Implementation of a large deformation finite element modelling technique for seismic slope stability analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105824.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105824>
- Wang, F., Sun, P., Highland, L., & Cheng, Q. (2014). Key factors influencing the mechanism of rapid and long runout landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China. *Geoenvironmental Disasters*, 1(1), 1.
<https://doi.org/10.1186/s40677-014-0001-6>
- Wang, G., & Sassa, K. (2009). Seismic loading impacts on excess pore-water pressure maintain landslide triggered flowslides. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(2), 232–241. <https://doi.org/10.1002/esp.1708>

- Wang, W., Wu, H., Nakamura, H., Wu, S., Ouyang, S., & Yu, M. (2003). Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-chi earthquake in central Taiwan. *Island Arc*, 12(4), 325–334. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2003.00400.x>
- Wei, L.-W., Huang, C.-M., Chen, H., Lee, C.-T., Chi, C.-C., & Chiu, C.-L. (2018). Adopting the I 3–R 24 rainfall index and landslide susceptibility for the establishment of an early warning model for rainfall-induced shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(6), 1717–1733. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1717-2018>
- Xi, C., Tanyas, H., Lombardo, L., He, K., Hu, X., & Jibson, R. W. (2024). Estimating weakening on hillslopes caused by strong earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 81.
- Xu, Z., Che, A., & Zhou, H. (2024). Seismic landslide susceptibility assessment using principal component analysis and support vector machine. *Scientific reports*, 14(1), 3734.
- Yagoda-Biran, G., & Hatzor, Y. (2013). A new failure mode chart for toppling and sliding with consideration of earthquake inertia force. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.035>

- Yi, G. (2006). Study on fault sliding behaviors and strong-earthquake risk of the Longmenshan-Minshan fault zones from current seismicity parameters. *Earthquake Res. China*, 22, 117–125.
- Yin, Y., Wang, F., & Sun, P. (2009). Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6(2), 139–152.
<https://doi.org/10.1007/s10346-009-0148-5>
- Youd, T. L. (2003). Liquefaction mechanisms and induced ground failure. *International Geophysics*, 81, 1159–1173. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(03\)80184-5](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(03)80184-5)