



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΚΑΙ
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ,
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ.**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΑΚΙΡΗΣ
Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Λουπασάκης, καθηγητής ΕΜΠ

Πάτρα, Ιούλιος 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΚΑΙ
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ,
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ.**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΑΚΙΡΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Λουπασάκης

Καθηγητής Σχολής Μηχ. Μεταλλείων –
Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Ιωάννα Ηλία

PhD, MSc Γεωλόγος

Πάτρα, Ιούλιος 2023

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη, Καθηγητή στο τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για τα σχόλια του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ελευθερία Πογιατζή, Τεχνικό Γεωλόγο στο ΙΓΜΕ, για την ευγενική παραχώρηση της έκθεσης για το Μικρό Χωριό, στην οποία ήταν συν-συγγραφέας. Επιπλέον, για τις κατολισθήσεις στο Ν. Καρδίτσας πολύτιμη ήταν η συμβολή του κ. Αλέξανδρου Γεωργαλά, Τεχνικού Γεωλόγου, ο οποίος μου διέθεσε και το σχετικό φωτογραφικό υλικό, και του κ. Γιώργου Παπαχαλαράμπους, Γεωτεχνικού Μηχανικού στο μελετητικό γραφείο Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής, για το υλικό από τις σχετικές γεωτεχνικές μελέτες αποκατάστασης. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Ιωάννα για την υποστήριξη και την υπομονή.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερευνά τις συνέπειες των κατολισθητικών φαινομένων στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, υπό το πρίσμα των σύγχρονων, ραγδαία μεταβαλλόμενων συνθηκών. Παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή, η διαρκής επέκταση ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο φυσικό περιβάλλον και επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές, λόγω της ταχείας και σε αναπτυσσόμενες χώρες άναρχης αστικοποίησης ή προς εξασφάλιση φυσικών πόρων ή η εκδήλωση κατολισθήσεων ταυτόχρονα ή αλυσιδωτά με άλλους γεωκινδύνους, συντείνουν στην εκδήλωση περισσότερων φαινομένων μεγάλης έντασης, με υψηλό δυναμικό καταστροφικότητας. Παράλληλα αυξάνονται οι κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις τους, με δυσκολία ανάκαμψης των μη ανθεκτικών κοινοτήτων. Από την άλλη, ο σχεδιασμός ολοκληρωμένων πολιτικών ανάλυσης και διαχείρισης της διακινδύνευσης έναντι κατολισθήσεων, με τη βοήθεια των ολοένα και περισσότερο διαθέσιμων και βελτιούμενων αναλυτικών εργαλείων και επιστημονικών και τεχνολογικών δυνατοτήτων έγκαιρης αναγνώρισης των κρίσιμων θέσεων, παρακολούθησης και προειδοποίησης, καταλήγει, όπως εφαρμόζεται, σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα περιορισμού των βλαβών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εξετάζονται οι επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον σε τρεις περιπτώσεις γνωστών ελληνικών κατολισθήσεων, κάθε μια εντελώς διαφορετικής εποχής, στον Τσιβλό Αχαΐας (1913), που κατέστρεψε πλήρως το χωριό Συλίβαινα και οδήγησε στη δημιουργία της ομώνυμης λίμνης, στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας (1963), το πλέον πολύνεκρο συμβάν στον ελληνικό χώρο, καθώς και τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις κατολισθήσεων από την ορεινή Καρδίτσα, αντιπροσωπευτικές των πολυάριθμων κατολισθητικών φαινομένων που εκδηλώθηκαν πρόσφατα (2020) λόγω της πολύ έντονης βροχόπτωσης κατά τον μεσογειακό κυκλώνα Ιανός. Σε κάθε μία περίπτωση εξετάστηκαν οι συνθήκες διαμόρφωσης της αστάθειας και οι συνέπειές τους. Παράλληλα, διερευνήθηκε ο ρόλος των σύγχρονων εργαλείων διερεύνησης και τηλεπισκόπησης - παρακολούθησης σε κάθε περίπτωση. Προς αυτή την κατεύθυνση εξετάστηκαν συνοπτικά και κάποιες πρόσφατες, βιβλιογραφικές περιπτώσεις συνδυαστικής εφαρμογής σύγχρονων μέσων παρακολούθησης – τηλεπισκόπησης και επιτυχούς εγκατάστασης συστήματος προειδοποίησης.

Λέξεις-Κλειδιά: Κατολισθήσεις, Επιπτώσεις, Κλιματική Αλλαγή, Ανάλυση Διακινδύνευσης, Εργαλεία Παρακολούθησης και Προειδοποίησης, Τηλεπισκόπηση, Τσιβλός, Μικρό Χωριό, Ιανός

Abstract

The current post-graduate dissertation explores the consequences of the landslides in the natural and anthropogenic environment, considering the present changing conditions. Factors like the climate change, the constant expansion of man-made activities into the natural environment, including many areas being prone to landslides, to accommodate the rapid, and in developing countries also uncontrolled, urbanization and the demand for natural resources, as well as the landslides occurring at the same time and place or in chained series with other geohazards, lead to more landslide phenomena of significant intensity, high disaster potential, an increase of the social and economic consequences and recovering difficulties for the non-resilient communities. On the other side, the design of integrated strategies for the landslide risk analysis and management, supported by the widely available and of improving capabilities analytical tools and scientific and technological systems for early recognition of critical areas, monitoring and warning, provide, where applied, very satisfactory results in terms of damage reduction.

Considering the aforementioned, the dissertation examines the consequences for the natural and man-made environment in three Greek case studies, each one of a completely different era, namely the case of Tsivlos landslide in Achaia County (1913), completely destroying the settlement of Sylivena and leading to the formation of Tsivlos dammed lake, the case of Mikro Chorio in Evrytania County (1963), being the most disastrous in terms of death toll ever recorded in Greece, as well as four characteristic landslide locations / types taking place in mountainous Karditsa County, selected as representative ones between the recent (2020) numerous landslide phenomena due to the very intense precipitation during the medicane Ianos. For each of the cases, the conditions resulting in the instability and the respective consequences were examined. Moreover, the role the modern remote sensing and monitoring tools was reviewed for each case. Following this, some additional cases available in the literature are examined, providing a combined application of modern monitoring – remote sensing tools or a successful installation of early warning system.

Keywords: Landslides, Consequences, Climate Change, Risk Analysis, Monitoring and Warning Systems, Remote Sensing, Tsivlos, Mikro Chorio, Medicane Ianos

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xvii
1 Εισαγωγή	1
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κατολισθητικών Φαινομένων	3
2.1 Ορισμοί – Ταξινομήσεις – Αίτια Εκδήλωσης.....	3
2.1.1 Ορισμός Κατολισθητικών Φαινομένων	3
2.1.2 Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων βάσει Τυπολογίας Μετακίνησης.....	4
2.1.3 Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων βάσει πρόσθετων Κριτηρίων....	10
2.1.4 Αίτια Εκδήλωσης Κατολισθητικών Φαινομένων.....	14
2.2 Τα Κατολισθητικά Φαινόμενα ως Φυσική Καταστροφή – Ποσοτικά Στοιχεία Καταγραφών.....	16
2.2.1 Η Έννοια της Φυσικής Καταστροφής	16
2.2.2 Καταγραφές Κατολισθητικών Φαινομένων – Βάσεις Δεδομένων.....	24
3 Ανάλυση Διακινδύνευσης έναντι Κατολισθητικών Φαινομένων	35
3.1 Εισαγωγή – Ορισμοί	35
3.2 Ανάλυση Διακινδύνευσης Κατολισθητικών Φαινομένων.....	39
3.2.1 Διακριτά Στάδια Ανάλυσης Διακινδύνευσης	39
3.2.2 Ανάλυση Επικινδυνότητας Κατολισθητικών Φαινομένων	40
3.2.3 Ανάλυση Συνεπειών Κατολισθητικών Φαινομένων	45
3.2.4 Αξιολόγηση και Διαχείριση Διακινδύνευσης Κατολισθητικών Φαινομένων.....	50
3.3 Σύνταξη Κατολισθητικών Χαρτών, Τύποι και Κλίμακες.....	53
4 Επιπτώσεις Κατολισθητικών Φαινομένων	58
4.1 Περιβαλλοντικές και Κοινωνικο-οικονομικές Επιπτώσεις Κατολισθήσεων	58
4.1.1 Εισαγωγή	58
4.1.2 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Κατολισθήσεων	58
4.1.3 Κοινωνικο-Οικονομικές Επιπτώσεις Κατολισθήσεων	65
4.2 Σύγχρονο Πλαίσιο Συνθηκών Εκδήλωσης, Επιπτώσεων και Αντιμετώπισης Κατολισθήσεων.....	69
4.2.1 Επέκταση Ανθρωπογενών Δραστηριοτήτων και Αναζήτησης Πόρων	69
4.2.2 Κατολισθήσεις και Ταχεία Αστικοποίηση	71
4.2.3 Κατολισθήσεις και Κλιματική Αλλαγή	73
4.2.4 Ανισοκατανομή Συνεπειών και Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας.....	80
4.2.5 Συνδυασμός Κατολισθήσεων και Λοιπών Γεωκινδύνων – Αλυσιδωτά γεγονότα	85
4.2.6 Σύγχρονο Πλαίσιο Αντιμετώπισης - η Έννοια της Ανθεκτικότητας.....	86
5 Σύγχρονα Μέσα Διερεύνησης, Παρακολούθησης και Προειδοποίησης Κατολισθητικών Φαινομένων	92
5.1 Εισαγωγή – Γενική Περιγραφή.....	92
5.2 Χρήση Δεκτών GNSS σε Κατολισθήσεις.....	97
5.3 Συμβολομετρία Ραντάρ (InSAR).....	101
5.3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία Δορυφορικής Συμβολομετρίας	101
5.3.2 Εφαρμογές Δορυφορικής Συμβολομετρίας σε Κατολισθήσεις.....	104
5.3.3 Επίγεια Συμβολομετρία και Εφαρμογές σε Κατολισθήσεις.....	107

5.4	Αεροφωτογραφίες, Ψηφιακή Φωτογραμμετρία και Χρήση UAVs.....	108
5.4.1	Εισαγωγή – Καθιερωμένη Χρήση Αεροφωτογραφιών	108
5.4.2	Ψηφιακή Φωτογραμμετρία και Παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους από UAVs.....	110
5.5	Χρήση Τεχνολογίας Αποτύπωσης LiDAR	114
5.5.1	Εισαγωγικά Στοιχεία	114
5.5.2	Επίγεια Σάρωση TLS.....	116
5.5.3	Εναέρια Σάρωση ALS	119
5.6	Λοιπές Μέθοδοι – Συνδυαστική Εφαρμογή Μεθόδων.....	121
5.6.1	Λοιπές Σύγχρονες Μέθοδοι με Εφαρμογή σε Κατολισθητικές Αναλύσεις	121
5.6.2	Σύγκριση και Συνδυαστική Χρήση Μεθόδων	121
6	Κατολισθητικά Φαινόμενα στον Ελληνικό Χώρο.....	124
6.1	Εισαγωγικά Στοιχεία Συνθηκών Εκδήλωσης Κατολισθήσεων	124
6.2	Καταγραφή και Ταξινόμηση Κατολισθήσεων στον Ελληνικό Χώρο	127
6.2.1	Ιστορικό Αντιμετώπισης Κατολισθητικών Φαινομένων.....	127
6.2.2	Καταγραφές και Ταξινομήσεις, Εθνικοί Χάρτες Επιδεκτικότητας.....	129
6.3	Συνέπειες Κατολισθητικών Φαινομένων στον Ελληνικό Χώρο	135
7	Πρώτη Περίπτωση Μελέτης – Λίμνη Τσιβλού	139
7.1	Εισαγωγή	139
7.2	Ιστορικό Κατολίσθησης.....	140
7.3	Τεχνικογεωλογικό Πλαίσιο, Αίτια και Μηχανισμός Αστοχίας	143
7.4	Συνέπειες Κατολίσθησης	147
7.5	Γενική Εκτίμηση Τρεχουσών Συνθηκών στην Περιοχή.....	151
8	Δεύτερη Περίπτωση Μελέτης – Μικρό Χωριό Ευρυτανίας	155
8.1	Εισαγωγή	155
8.2	Ιστορικό Κατολίσθησης.....	156
8.3	Τεχνικογεωλογικό Πλαίσιο, Αίτια και Μηχανισμός Αστοχίας	158
8.4	Συνέπειες Κατολίσθησης	164
8.5	Γενική Εκτίμηση Τρεχουσών Συνθηκών στην Περιοχή.....	167
9	Τρίτη Περίπτωση Μελέτης – Κατολισθητικά Φαινόμενα λόγω του Ιανού, Τέσσερις Χαρακτηριστικές Θέσεις στο Ν. Καρδίτσας	172
9.1	Εισαγωγή	172
9.2	Χαρακτηριστικά και Συνέπειες του Μεσογειακού Κυκλώνα «Ιανός».....	174
9.2.1	Εισαγωγή – Στοιχεία Βροχόπτωσης.....	174
9.2.2	Κατολισθητικά Φαινόμενα κατά τον Ιανό	177
9.3	Χαρακτηριστικές Περιπτώσεις Κατολισθητικά Φαινόμενα λόγω του Ιανού (Μούχα, Καστανιά – Γιαννουσαίικα, Ίταμος).....	180
9.3.1	Εισαγωγή	180
9.3.2	Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3α – Πλησίον Οικισμού Μούχα	181
9.3.3	Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β – Οδός Καστανιά – Γιαννουσαίικα	185
9.3.4	Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ – Οδός Καστανιά – Γιαννουσαίικα	188
9.3.5	Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3δ – Ορεινός Όγκος Ίταμος.....	191
9.4	Συνέπειες Κατολισθήσεων.....	193
9.5	Συνθήκες Ευστάθειας μετά τις Κατολισθήσεις – Τηλεπισκόπηση και Παρακολούθηση	196
10	Περιπτώσεις Συνδυαστικής Εφαρμογής Σύγχρονων Μεθόδων Τηλεπισκόπησης στον Ελληνικό και Διεθνή Χώρο	199
10.1	Εισαγωγή.....	199

10.2	1η Περίπτωση – Παρακολούθηση Ενεργής Κατολίσθησης στο Άνω Κεράσοβο Αιτωλοακαρνανίας	199
10.3	2η Περίπτωση – Παρακολούθηση Βραδέως Εξελισσόμενης Κατολίσθησης στο Μέτσοβο	204
10.4	3η Περίπτωση – Επιτυχημένη Λειτουργία Συστήματος Προειδοποίησης στις Ιταλικές Άλπεις.....	207
11	Συμπεράσματα.....	210
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	217
	Βιβλιογραφικές Αναφορές στην Αγγλική Γλώσσα.....	217
	Βιβλιογραφικές Αναφορές στην Ελληνική Γλώσσα	227
	Ιστοσελίδες	230

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Πίνακας Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Varnes (1978).....	5
Σχήμα 2: Χάρτης Ταξινόμησης και Τυπολογίας Κατολισθητικών Φαινομένων (Varnes, 1978, Figure 2.1)	6
Σχήμα 3: Πρόταση Αναθεώρησης Ταξινόμησης κατά Varnes (Hungr et al., 2014).....	7
Σχήμα 4: Πιθανά Κριτήρια Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων (Cruden & VanDine, 2013)	11
Σχήμα 5: Σκαριφήματα ταξινόμησης βάσει : α) Τρέχουσας Κατάστασης κατολισθήσεως (Fig. 1&2) β) Χωρικής Κατανομής της μετακίνησης (Fig. 3) γ) Τύπων Γεωμετρίας μετακίνησης κατολισθητικών φαινομένων (Fig. 4) Πηγή :WP/ WLI. 1993.....	12
Σχήμα 6: Ταξινόμηση κατολισθήσεων βάσει ταχύτητας μετακίνησης. Πηγή: International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, 1995.....	13
Σχήμα 7: Πρόταση ταξινόμησης / ονοματολογίας ροών κατά Hungr et al., 2001.....	13
Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση φάσεων πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων (πηγή WP/ WLI, Popescu, 1994).....	14
Σχήμα 9: Αίτια πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων (Cruden & VanDine, 2013, προσαρμογή από WP/ WLI, 1994).....	15
Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση ανθρώπινων απωλειών ανά φυσική καταστροφή με το χρόνο (πηγή: https://ourworldindata.org/natural-disasters#what-share-of-deaths-are-from-natural-disasters , χρήση στοιχείων βάσης δεδομένων EM-DAT).....	20
Σχήμα 11: Ανθρώπινες απώλειες ανά φυσική καταστροφή και ήπειρο (πηγή: Λέκκας, 2000).....	21
Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση ανθρώπινων απωλειών και πληττόμενων με το χρόνο (πηγή: Ramachandran et al., 2010 (The World Bank), χρήση στοιχείων βάσης δεδομένων EM-DAT)	21
Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση εξέλιξης αριθμού συμβάντων και κόστους βλαβών φυσικών καταστροφών με το χρόνο (πηγή: Munich Re, 2011 Natural Catastrophe Year in review, https://www.iii.org/sites/default/files/docs/pdf/MunichRe-010412.pdf).....	22
Σχήμα 14: Διάγραμμα καταγραφών συμβάντων κατολισθήσεων στη βάση δεδομένων EM-DAT ανά έτος (πηγή δεδομένων https://public.emdat.be/ , ίδια επεξεργασία).....	25
Σχήμα 15: Διάγραμμα αριθμού θανάτων, πληττόμενων και κόστους βλαβών κατολισθήσεων στη βάση δεδομένων EM-DAT ανά έτος (πηγή δεδομένων https://public.emdat.be/ , ίδια επεξεργασία).....	25
Σχήμα 16: Γεωγραφική Κατανομή Κατολισθητικών Συμβάντων στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018)	28
Σχήμα 17: Εξέλιξη αριθμού κατολισθήσεων και ανθρώπινων απωλειών από αυτές στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018)	29
Σχήμα 18: Κατανομή Αιτιών Κατολισθήσεων πλην βροχοπτώσεων και σεισμών στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018).....	29
Σχήμα 19: Γεωγραφική Κατανομή Κατολισθητικών Συμβάντων με ή χωρίς ανθρώπινες απώλειες στη βάση δεδομένων GLC για τα έτη 2007-2013 (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)	31
Σχήμα 20:(Αριστερά) Συσχέτιση καταγραφών με συμβάντα βροχοπτώσεων (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)	32
Σχήμα 21: (Δεξιά) Συσχέτιση ανθρ. απωλειών/χώρα με κατά κεφαλήν ΑΕΠ (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)	32
Σχήμα 22: Γεωγραφική απεικόνιση σύνθεσης καταγραφών από Γεωλογικά Ινστιτούτα ευρωπαϊκών χωρών, αριθμός και τύπος συμβάντων (πηγή: Herrera et al., 2018)	33

Σχήμα 23: Καταγραφές κατολισθητικών συμβάντων και ανθρώπινων απωλειών στην Ευρώπη από τη σύνθεση τοπικών βάσεων δεδομένων (πηγή: Haque et al., 2016)	34
Σχήμα 24: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης των εννοιών διακινδύνευσης με πιθανότητα κινδύνου, τρωτότητα και έκθεση (πηγή: Lee & Jones, 2004).....	39
Σχήμα 25: Σχηματική σύνθεση παραμέτρων διακινδύνευσης και συνεπειών (πηγή UNISDR, 2017).....	39
Σχήμα 26: Βασικό Διάγραμμα Ροής Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας, Επικινδυνότητας και Διακινδύνευσης (Petley et al., 2012).....	39
Σχήμα 27: Διάγραμμα Ροής Ανάλυσης, Αξιολόγησης και Διαχείρισης Διακινδύνευσης... 40	
Σχήμα 28: Μεθοδολογίες ανάλυσης επικινδυνότητας κατολισθήσεων (πηγή: Βασιλειάδης, 2010, αρχική αναφορά Aleotti & Chowdhury, 1999)	42
Σχήμα 29: Ενδεικτική Μεθοδολογία Εκτίμησης Συχνότητας Εκδήλωσης Κατολίσθησης (AGS, 2000)	44
Σχήμα 30: Τυπική Μορφή σχέσης έντασης κατολισθητικού συμβάντος και πιθανότητας εκδήλωσης (από Evans et al., 2005).....	45
Σχήμα 31: Προτεινόμενες Τιμές Τρωτότητας Κτιρίων βάσει πίεσης πρόσκρουσης (Kang & Kim, 2006 από Park et al., 2016)	47
Σχήμα 32: Τρωτότητα κτιρίων και ατόμων για ροή κορημάτων (Από Lee & Jones, 2004)48	
Σχήμα 33: Τρωτότητα ατόμων ανάλογα με όγκο κατολίσθησης (Από Lee & Jones, 2004)	48
Σχήμα 34: Ποιοτική Ανάλυση Διακινδύνευσης (AGS, 2000)	50
Σχήμα 35: Προτεινόμενες Τιμές Ανεκτής Διακινδύνευσης κατά AGS, 2000 (από Fell et al., 2005).....	51
Σχήμα 36: Προτεινόμενες Τιμές αποδεκτής Διακινδύνευσης για κοινότητες κατά GEO Report 75, 1998	51
Σχήμα 37: Διάγραμμα ροής διαχείρισης / απομείωσης της διακινδύνευσης (Aleotti & Chowdhury, 1999).....	52
Σχήμα 38: Στάδια Σύνθεσης Χάρτη Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης δύο μεταβλητών (Soeters & van Westen, 1996).....	55
Σχήμα 39: Στάδια Σύνθεσης Χάρτη Επικινδυνότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών (Soeters & van Westen, 1996).....	55
Σχήμα 40: Διαφορετικές κλίμακες κατολισθητικής ζωνοποίησης και διαφορετικά επίπεδα εφαρμογών της (AGS, 2007).....	55
Σχήμα 41: Ευρωπαϊκός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας από το πρόγραμμα ELSUS ver. 2 (Wilde et al. 2018, https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2).....	56
Σχήμα 42: Παγκόσμιος χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Stanley & Kirschbaum, 2017).....	57
Σχήμα 43: Ταξινόμηση Πιθανών Καταστροφών από Κατολισθήσεις βάσει κατηγορίας Ταχύτητας, Cruden & Varnes (1996).....	58
Σχήμα 44: Παράδειγμα καταστροφής δάσους λόγω ροής κορημάτων (Geertsema et al., 2009).....	61
Σχήμα 45: Χρόνος Αστοχίας Πρόχειρων Φραγμάτων που αστοχούν (Costa & Schuster, 1988).....	63
Σχήμα 46: Εκτίμηση μελλοντικής αστικοποίησης σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές με τροπικό κλίμα και απότομο ανάγλυφο (Ozturk et al., 2022).....	72
Σχήμα 47: Σύγκριση αριθμού καταγραφόμενων κατολισθήσεων τις δεκαετίες 1995-2004 και 2005-2014 και συσχέτιση με ύψος ακραίων βροχοπτώσεων (Haque et al., 2019).....	76

Σχήμα 48: Απομείωση κλίσης ευστάθειας φυσικού πρανούς λόγω αστικοποίησης και λόγω συνδυαστικής θεώρησης κλιματικής αλλαγής, περίπτωση μελέτης για το Φρίταουν Σιέρα Λεόνε (Ozturk et al., 2022).....	77
Σχήμα 49: Πρόβλεψη μεταβολής κατολισθητικής επικινδυνότητας στην Ευρώπη από το 2010 και ανά 20 έτη έως το 2090 (SafeLand, 2011, Deliverable 3.7)	78
Σχήμα 50: Εξίσωση Κατωφλιού πρόκλησης κατολίσθησης από βροχόπτωση - Calcaterra et al. (2000) για την Καμπανία. Πηγή: http://www.db.gndci.cnr.it/php2/rainfall_thresholds/thresholds_type.php?typesigla=I-D).....	80
Σχήμα 51: Επίτευξη σταδιακής απομείωσης θανατηφόρων κατολισθήσεων στην Ιταλία (Πηγή: Gariano & Guzetti, 2016).....	81
Σχήμα 52: Επίτευξη σταδιακής απομείωσης θανατηφόρων κατολισθήσεων στο Χόνγκ Κόνγκ (Πηγή: Kjekstad & Highland, 2009).....	81
Σχήμα 53: Διαφοροποίηση Τρωτότητας ως λόγου θανάτων προς κανονικοποιημένο εκτιθέμενο πληθυσμό μεταξύ ορεινών κρατών. Πηγή: Nadim et al., 2006.	83
Σχήμα 54: Γραφική απεικόνιση σχήματος «πίεσης και εκτόνωσης» για την ανάλυση της αυξημένης τρωτότητας σε αναπτυσσόμενες χώρες (Πηγή: Blaikie et al., 1994).....	84
Σχήμα 55: Εξειδίκευση επιμέρους πεδίων θεωρητικού πλαισίου ανθεκτικότητας (Tobin, 1999).....	89
Σχήμα 56: Κυκλικό Διάγραμμα διαχείρισης επικινδυνότητας (Crozier, 2005).	90
Σχήμα 57: «Πρόγνωση» Πιθανότητας Εκδήλωσης Κατολισθήσεων (περιοχή Ισημερινού, 16/07/2023) (https://landslides.nasa.gov/viewer).....	95
Σχήμα 58: Σκαρίφημα Δομής Παγκόσμιου Δορυφορικού Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) (πηγή: https://www.esa.int/Applications/Technology_Transfer/Space-Based_Architecture_for_GNSS_Augmentation_Systems).....	98
Σχήμα 59: Εικόνες δεκτών GNSS (α): δέκτης τύπου SimpleRTK2B, (b): κεραία δέκτη αναφοράς, (d): σημείο παρακολούθησης κατολίσθησης με δέκτη GNSS (πηγή: Hamza et al., 2023).....	100
Σχήμα 60: Σκαριφηματική ροή μετρήσεων από μόνιμους δέκτες GNSS (πηγή: Šegina et al., 2020).....	100
Σχήμα 61: Σκαρίφημα διάταξης σάρωσης με όργανο SAR (πηγή: Φουμέλης, 2009).	102
Σχήμα 62: Σύνταξη τρισδιάστατου Μοντέλου Εδάφους από τις ενδείξεις οργάνου SAR (πηγή: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work/).	102
Σχήμα 63: Αρχή Προσδιορισμού Εδαφικής Μετακίνησης από τις ενδείξεις οργάνου SAR (πηγή: https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/).....	103
Σχήμα 64: Παράδειγμα Συμβολογραφήματος InSAR (Σεισμός Izmit, 1999, πηγή: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work/).	103
Σχήμα 65: Αποκατάσταση Φάσης Συμβολογραφημάτων (πηγή: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf)..	103
Σχήμα 66: Παράδειγμα Εφαρμογής μεθοδολογίας D-InSAR για τον εντοπισμό θέσεων υψηλής κατολισθητικής διακινδύνευσης (πηγή: Casagli et al., 2017).	106
Σχήμα 67: Επίγειο Ραντάρ (αριστερά) και Διάταξη Εφαρμογής Μεθόδου Επίγειας Συμβολομετρίας (δεξιά) (πηγή: Casagli et al., 2018).....	108
Σχήμα 68: Τυποποίηση Χαρακτηριστικών Μοτίβων Κατολισθητικών Φαινομένων και αντίστοιχα φωτογραφικά χαρακτηριστικά (πηγή: Soeters & Van Westen, 1996).....	109
Σχήμα 69: Σκαρίφημα Αρχών Φωτογραμμετρίας μέσω UAVs (πηγή: Karantanellis, 2021).	111

Σχήμα 70: Διαδικασία Παραγωγής τρισδιάστατου νέφους σημείων, ψηφιακού μοντέλου εδάφους και ορθοφωτογραφιών μέσω φωτογραμμετρίας UAVs (πηγή: Javadnejad et al., 2021).....	112
Σχήμα 71: Παραδείγματα παραγώγων μέσω ψηφιακής φωτογραμμετρίας (τρειςδιάσταση απεικόνιση, ψηφιακό μοντέλο εδάφους) (πηγή: Karantanellis, 2021).....	113
Σχήμα 72: Ενδεικτικά Εμπορικά UAVs (πηγή: Greenwood et al., 2019).....	113
Σχήμα 73: Ενδεικτικά Σύγχρονα Όργανα TLS LiDAR (πηγή: Kersten & Lindstaedt, 2022).	115
Σχήμα 74: Εφαρμογές LiDAR σε κατολισθητικές αναλύσεις (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).....	115
Σχήμα 75: Αρχές Μέτρησης Απόστασης με τη μέθοδο LiDAR (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).....	116
Σχήμα 76: Παράδειγμα διαδοχικής σάρωσης κατολίσθησης με τη μέθοδο TLS LiDAR (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).....	117
Σχήμα 77: Πηγές Σφαλμάτων αποτυπώσεων από TLS LiDAR (πηγή: Staiger, 2005).....	117
Σχήμα 78: Σκαρίφημα Αποτύπωσης με ALS LiDAR (πηγή: Tomljenovic et al., 2015)..	119
Σχήμα 79: Χρονική Εξέλιξη Εξοπλισμού, Χαρακτηριστικών Παλμών και Μεθόδων ALS LIDAR (πηγή: https://www.gim-international.com/content/article/recent-developments-in-airborne-lidar-2).	119
Σχήμα 80: Παράδειγμα διαδοχικής σάρωσης κατολίσθησης με τη μέθοδο ALS LiDAR (πηγή: Pellicani et al., 2019).....	120
Σχήμα 81: Σύγκριση διάφορων μεθόδων ως προς τη (α) διάσταση της περιοχής αποτύπωσης, (b) την περιοχή κάλυψης, (c) το μήκος της σάρωσης, (d) το χρόνο επανάληψης της σάρωσης, (e) την ακρίβεια των μετρήσεων και (f) τη δυνατότητα αντίληψης της ταχύτητας μετακίνησης (πηγή: Casagli et al., 2023).....	122
Σχήμα 82: Ενδεικτική ακρίβεια και έκταση πεδίου εφαρμογής σύγχρονων μεθόδων παρακολούθησης (πηγή: Greenwood et al., 2019).....	123
Σχήμα 83: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης Ελλάδας (αριστερά, Koukis, 1988, έχει ληφθεί από Koukis et al., 2005) και διαχωρισμός χώρας σε τρεις ζώνες (δεξιά, Koukis, 1982).....	125
Σχήμα 84: Κατανομή Κατολισθήσεων ανά Σχηματισμό (Koukis & Ziourkas, 1991).....	130
Σχήμα 85: Χάρτης Κατολισθητικών Συμβάντων από Βάση Δεδομένων ΙΓΜΕ, 2011 (από SafeLand, Deliverable D2.3, 2011, η σημερινή (2023) γεωπύλη του ΕΑΓΜΕ https://gaia.igme.gr/portal/home/ δεν περιλαμβάνει τα σχετικά στοιχεία).....	131
Σχήμα 86: Χάρτης Κατολισθητικής πυκνότητας (από Koukis et al., 2005)	133
Σχήμα 87: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Γκουρνέλλος κ.α., 2006).....	133
Σχήμα 88: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής επιδεκτικότητας με 3 διαφορετικές στατιστικές μεθοδολογίες (Ferentinou & Chalkias, 2013).....	133
Σχήμα 89: Χάρτης Εκτίμησης Επικινδυνότητας (Βασιλειάδης, 2010)	134
Σχήμα 90: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Sabatakakis et al., 2013).....	134
Σχήμα 91: Χάρτης Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας κοιλάδας π. Κράθη (πηγή: Polykretis et. al., 2015).....	139
Σχήμα 92: Σήμανση αναγνωριζόμενων περιοχών υψηλής και πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην εξεταζόμενη περιοχή (πηγή: Strutyńska, 2017).....	140
Σχήμα 93: Φωτογραφία Πέτρινης Γέφυρας π. Κράθη, 1903, Frédéric Boissonnas, (πηγή: http://eliaserver.elia.org.gr:8080/Iselia/rec.aspx?id=540394)	142
Σχήμα 94: Αεροφωτογραφία του 1939 της περιοχής της κατολίσθησης, με ενδεικτική επισήμανση των ορίων της (πηγή: https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/)	144
Σχήμα 95: Σύγχρονη τρισδιάστατη απεικόνιση της κατολίσθησης (πηγή: google earth).	144
Σχήμα 96: Επικάλυψη Γεωλογικού Χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλου «Δερβένι» επί της περιοχής εκδήλωσης κατολίσθησης	145

Σχήμα 97: Τοπογραφικές αποτυπώσεις και εγκάρσιες τομές περιοχής κατολίσθησης (Fig. 3) και γεωμετρία ρήγματος Βαλιμής ως προς τη γεωμετρία μετακίνησης (Fig. 10) (Zygouri & Koukouvelas (2019)	146
Σχήμα 98: Δύο Λίμνες σε αεροφωτογραφία του 1939 (πηγή: https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/).....	148
Σχήμα 99: Πρόσφατες Φωτογραφίες περιοχής κατολίσθησης στον Τσιβλό	149
Σχήμα 100: Συμπληρωματικές Πρόσφατες Φωτογραφίες περιοχής κατολίσθησης στον Τσιβλό.....	150
Σχήμα 101: Αποτύπωση Καταγεγραμμένων Κατολισθήσεων πλησίον της περιοχής μελέτης (στοιχεία από Κάβουρα, 2017).	151
Σχήμα 102: Κάνναβος Ποσοτικού Προσδιορισμού Εδαφικών Μετακινήσεων στην Περιοχή Μελέτης (https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service).	152
Σχήμα 103: Διαγράμματα εδαφικών υποχωρήσεων σε επιλεγμένα σημεία στην περιοχή μελέτης (στοιχεία από https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service)	153
Σχήμα 104: Χάρτης Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας λεκάνης π. Κρικελιώτη Ν. Ευρυτανίας (Τσαμπά, 2018).....	155
Σχήμα 105: Χάρτης Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας Δήμων Ναυπακτίας και Καρπενησίου (Κρασάκης, 2017).....	156
Σχήμα 106: Μικρό Χωριό πριν και μετά την Κατολίσθηση (πηγή: Κοντογιώργος, 2018)	159
Σχήμα 107: Περιοχή Κατολίσθησης στο Μικρό Χωριό αμέσως μετά την εκδήλωσή της (πηγή: Πλάκας, 2016, Μικροχωρίτικα Γράμματα, 2013).	159
Σχήμα 108: Αεροφωτογραφία του 1946 της περιοχής πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης (πηγή: https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/)	160
Σχήμα 109: Αεροφωτογραφία του 1965 της περιοχής μετά την εκδήλωση της κατολίσθησης (πηγή: https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/)	160
Σχήμα 110: Αποσπάσματα από Φύλλο ΙΓΜΕ «Φραγκίστα» και εγγύς τεχνικογεωλογικός χάρτης Μικρού Χωριού (Ρόζος και Αποστολίδης, 2004)	163
Σχήμα 111: Φωτογραφίες σχετικές με την κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό.....	166
Σχήμα 112: Αγιογράφιση της κατολίσθησης και η σύνδεση της εκδήλωσης της κατολίσθησης την ώρα της θείας λειτουργίας με την Κιβωτό του Νώε (Πηγή: Κοντογιώργης, 2018).....	167
Σχήμα 113: Μετακατολισθητική Διάκριση περιοχών οικιστικής καταλληλότητας στο παλαιό Μικρό Χωριό (πηγή: Ρόζος και Αποστολίδης, 2004).	169
Σχήμα 114: Κάνναβος Ποσοτικού Προσδιορισμού Εδαφικών Μετακινήσεων στην Περιοχή Μελέτης (https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service) και επιλεγμένα σημεία αποτυπωμένα στο google earth.	170
Σχήμα 115: Διαγράμματα εδαφικών υποχωρήσεων σε επιλεγμένα σημεία στην περιοχή μελέτης (στοιχεία από https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service).	170
Σχήμα 116: Αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης 48ώρου κατά τον Ιανό (Lagouvardos et al., 2022).....	174
Σχήμα 117: Ημερήσιες Μετρήσεις Βροχόπτωσης σε Σταθμούς του ΕΑΑ στο νομό Καρδίτσας 2010-2023 (πηγή: https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm , ιδία επεξεργασία).	175
Σχήμα 118: Ωριαίες Μετρήσεις Βροχόπτωσης σε Σταθμούς του ΕΑΑ στο νομό Καρδίτσας κατά τον Ιανό 17-20/09/2020 (πηγή: στοιχεία ΕΑΑ μετά από επικοινωνία).	175

Σχήμα 119: Καταγραφές Βροχόπτωσης ως προς τις Εξισώσεις Κατωφλιού Πρόκλησης Κατολίσθησης, βάσει αθροιστική βροχόπτωσης (αριστερά) και ωριαίας έντασης (δεξιά) (Πηγή διαγραμμάτων: Lainas et al., 2015).....	176
Σχήμα 120: Συσχέτιση Ετήσιας Βροχόπτωσης με Συχνότητα Εκδήλωσης Κατολισθήσεων στην ορεινή Καρδίτσα (πηγή: Pyrgiotis et. al., 2007).	177
Σχήμα 121: Κατολισθητική Πιθανότητα κατά τη διάρκεια του Ιανού, βάσει υπηρεσίας LHASA της NASA (πηγή: Zekkos et al., 2020)	177
Σχήμα 122: Χάρτης Κατολισθήσεων και Πυκνότητας κατολισθήσεων στην περιοχή της Καρδίτσας κατά τον Ιανό, βάσει δορυφορικών εικόνων (πηγή: Valkaniotis et al., 2022)	179
Σχήμα 123: Θέσεις Εξεταζόμενων Χαρακτηριστικών Κατολισθήσεων με υπόβαθρο google earth	180
Σχήμα 124: Θέσεις Εξεταζόμενων Χαρακτηριστικών Κατολισθήσεων επί του γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, Φύλλο «Φουρνάς».....	181
Σχήμα 125: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση 3α - Κατολίσθηση πλησίον του οικισμού Μούχα.....	183
Σχήμα 126: Στοιχεία σχετικά με τη Διερεύνηση και την Πρόταση Αποκατάστασης στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3α πλησίον του οικισμού Μούχα.	184
Σχήμα 127: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίκα.....	186
Σχήμα 128: Στοιχεία σχετικά με τη διερεύνηση και την πρόταση αποκατάστασης στην Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίκα.....	187
Σχήμα 129: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίκα.....	190
Σχήμα 130: Στοιχεία σχετικά με τη τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ (οδός Καστανιά – Γιαννουσαίκα).....	191
Σχήμα 131: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση 3δ Κατολίσθησης στο Όρος Ίταμος.	192
Σχήμα 132: Δορυφορικές Εικόνες Χαρακτηριστικής Θέσης Κατολίσθησης 3δ στο Όρος Ίταμος, ημερομηνία 05/09/2020 πριν τον Ιανό (αριστερά) και 25/09/2020 μετά τον Ιανό (δεξιά) (πηγή: https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/ με εστίαση στην εξεταζόμενη περιοχή).	193
Σχήμα 133: Επισήμανση στο Σχήμα 82 της επιδιωκόμενης ακρίβειας σε κάθε χαρακτηριστική θέση (πηγή διαγράμματος: Greenwood et al., 2019).	198
Σχήμα 134: Κατολίσθηση στο Άνω Κεράσοβο, επάνω απεικόνιση από google earth πριν (αριστερά) και μετά το συμβάν (δεξιά), κάτω φωτογραφία από τοπική ιστοσελίδα (https://sinidisi.gr/synechizetai-katolisthisi-dromoy-pros-to-ano-kerasovo/)	200
Σχήμα 135: Κάτοψη αρχικής Κατολίσθησης και επόμενων φάσεων επανενεργοποίησης – επέκτασης, θέσεις εγκατάστασης δεκτών GNSS (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)	201
Σχήμα 136: Αποτελέσματα αποτυπώσεων και παραγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους με εντοπισμό διαφοροποιήσεων (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023).....	202
Σχήμα 137: Αποτελέσματα μετρήσεων στους δέκτες GNSS (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023).....	203
Σχήμα 138: Διάγραμμα Καταγραφής Εδαφικής Υποχώρησης στην περιοχή της αστοχίας με τη μέθοδο InSAR (EGMS), επισημαίνεται η ένδειξη κατά την πρώτη ενεργοποίηση (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)	203
Σχήμα 139: Οριζοντιογραφία και Χαρακτηριστική Τομή Κατολίσθησης στο Μέτσοβο (πηγή: Depountis et al., 2022)	204
Σχήμα 140: Αποτελέσματα μετακινήσεων από δύο δέκτες GNSS (πηγή: Depountis et al., 2022).....	205

Σχήμα 141: Επισημάνση περιοχών με συγκριτικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις βάσει της διαφορικής συμβολομετρίας InSAR (πηγή: Depountis et al., 2022).....	206
Σχήμα 142: Περιοχή Επιτυχούς Προειδοποίησης Κατολίσθησης με Επίγειο Ραντάρ GB-InSAR (πηγή: Carlà et al., 2019).	207
Σχήμα 143: Φωτογραφία Ασταθούς βραχώδους τεμάχους πριν την αστοχία και αποτύπωση σε τομή (πηγή: Carlà et al., 2019).	208
Σχήμα 144: Έγκαιρη Αναγνώριση Πρόδρομων Ενδείξεων Κατολίσθησης βάσει της παρακολούθησης με το Επίγειο Ραντάρ GB-InSAR (πηγή: Carlà et al., 2019).....	208
Σχήμα 145: Φωτογραφίες από το Συμβάν της Βραχοκατάπτωσης (πηγή: https://www.santuariogallivaggio.it/frana-di-gallivaggio/)	209

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Varnes (1978) - Μετάφραση.....	5
Πίνακας 2: Ταξινόμηση Τύπων Μετακίνησης Μάζας κατά Hutchinson (1988)	8
Πίνακας 3: Ταξινόμηση Τύπων Μετακίνησης Μάζας επί πρανούς κατά Hutchinson (1968)	9
Πίνακας 4: Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Záruba-Mencl (Záruba-Mencl, 1969, στοιχεία από Λουπασάκη, 2013 και Λέκκα, 2000)	10
Πίνακας 5: Περιγραφή Αιτίων Εκδήλωσης Κατολισθητικών Φαινομένων (Σχήμα 8, μετάφραση).....	15
Πίνακας 6: Γενική Ταξινόμηση Καταστροφών (μετάφραση από https://public.emdat.be/about).	17
Πίνακας 7: Προτάσεις Δεικτών Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας (βάσει SafeLand, Deliverable D2.6, 2012)	48
Πίνακας 8: Σχήμα 43 - Μετάφραση	58
Πίνακας 9: Σύνοψη αναμενόμενης μεταβολής συνθηκών λόγω της κλιματικής αλλαγής και ποιοτική επιρροή στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων (μετάφραση από Gariano & Guzetti, 2016).....	75
Πίνακας 10: Σύνοψη Δράσεων Μετριασμού Κατολισθ. Διακινδύνευσης (στοιχεία από Crozier, 2005).....	91
Πίνακας 11: Περιγραφή Επιπτώσεων στις Χαρακτηριστικές Θέσεις 3α έως 3δ.	195

1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην επισκόπηση των επιπτώσεων των κατολισθητικών φαινομένων στο φυσικό περιβάλλον, σε οικισμούς και στον περιβάλλοντα χώρο οικισμών όπου αναπτύσσεται ανθρωπογενής δραστηριότητα. Στα αρχικά κεφάλαια παρουσιάζεται θεωρητική διερεύνηση του θέματος βάσει σχετικής βιβλιογραφίας, όπου περιλαμβάνονται γενικές αναφορές για τους ορισμούς των κατολισθητικών φαινομένων και την ταξινόμησή τους και εξετάζονται οι κρίσιμοι παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων (Κεφ. 2). Επίσης περιγράφονται οι σύγχρονες μεθοδολογίες αναγνώρισης και εκτίμησης της κατολισθητικής διακινδύνευσης και της διαχείρισης της, με τη βοήθεια και σχετικών χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας ή επικινδυνότητας (Κεφ. 3). Εν συνεχεία εξετάζονται οι επιπτώσεις των κατολισθητικών φαινομένων στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, η σημασία των τοπικών συνθηκών, αλλά και σύγχρονα θέματα της συσχέτισης της εκδήλωσής τους με τη διαρκή επέκταση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο φυσικό περιβάλλον και την κλιματική αλλαγή (Κεφ. 4). Παράλληλα, εξετάζονται οι δυνατότητες των πλέον σύγχρονων, σε πολλές περιπτώσεις τηλεπισκοπικών μεθόδων, οργάνων και εργαλείων εκπόνησης κατολισθητικών μελετών, παρακολούθησης των προκαλούμενων μετακινήσεων και έγκαιρης αναγνώρισης της εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων προς προειδοποίηση, μέσω των δυνατοτήτων παρακολούθησης των πρόδρομων φαινομένων τους, σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο (Κεφ. 5).

Μετά από μια εισαγωγή στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κατολισθητικών φαινομένων στον ελληνικό χώρο (Κεφ. 6), τα εξεταζόμενα στο θεωρητικό μέρος θέματα συγκεκριμενοποιούνται για τρία παραδείγματα γνωστών κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο, την κατολίσθηση Τσιβλού στην Αχαΐα, που οδήγησε στο σχηματισμό της ομώνυμης λίμνης (Κεφ. 7), την κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας (Κεφ. 7), αλλά και την πρόσφατη περίπτωση των πολυάριθμων κατολισθητικών φαινομένων που εκδηλώθηκαν ως συνέπεια του μεσογειακού κυκλώνα «Ιανός», με τέσσερις αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις από κατολισθήσεις στο Ν. Καρδίτσας (Κεφ. 8). Εξετάζονται τα χαρακτηριστικά των φαινομένων μέσω των τοπικών μορφολογικών, τεχνικογεωλογικών/υδρογεωλογικών συνθηκών και οι επιπτώσεις τους στους οικισμούς και τον περιβάλλοντα χώρο τους, συμπεριλαμβανομένης της λίμνης στην περίπτωση του Τσιβλού και του οδικού δικτύου μεταξύ των οικισμών στην περίπτωση του Ν. Καρδίτσας.

Επίσης γίνεται διερευνάται για τις δύο πρώτες περιπτώσεις η χρησιμότητα των διαθέσιμων τηλεπισκοπικών δεδομένων προς τη μακροσκοπική εκτίμηση της σημερινής κατάστασης. Εν συνεχεία ακολουθεί μια συνοπτική εξέταση τριών βιβλιογραφικών περιπτώσεων, όπου εφαρμόστηκαν συνδυαστικά, σύγχρονα, τηλεπισκοπικά μέσα παρακολούθησης της κατολισθητικής δραστηριότητας (Κεφ. 10). Η διατριβή ολοκληρώνεται με την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων (Κεφ. 11).

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κατολισθητικών Φαινομένων

2.1 Ορισμοί – Ταξινομήσεις – Αίτια Εκδήλωσης

2.1.1 Ορισμός Κατολισθητικών Φαινομένων

Ο πιο καθιερωμένος, περιεκτικός και απλός ορισμός των κατολισθητικών φαινομένων (Cruden, 1991) αναφέρεται σε μετακίνηση μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων κατά μήκος πρανούς προς τα κατόντη (“A landslide is a the movement of a mass of rock, earth or debris down a slope”). Ο παραπάνω ορισμός έχει υιοθετηθεί μεταξύ άλλων στις σχετικές αναφορές των ιστοσελίδων των Γεωλογικών Υπηρεσιών των Ηνωμένων Πολιτειών και του Ηνωμένου Βασιλείου (<https://www.usgs.gov/faqs/what-landslide-and-what-causes-one>, <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/landslides/>). Ο παραπάνω γενικός ορισμός περικλείει ευρύτερα φαινόμενα που δεν συμπεριλαμβάνονταν σε προγενέστερους, περισσότερο περιοριστικούς, όπως αυτός του Terzaghi (1950), που αναφέρεται σε ταχεία μετατόπιση μάζας βράχου, παραμένοντος εδάφους ή ιζημάτων επί πρανούς, όπου το κέντρο βάρους της μάζας μετακινείται προς τα κάτω και τα έξω (“rapid displacement of a mass of rock, residual soil or sediments adjoining a slope in which the centre of gravity of the moving mass advances in a downward and outward direction”), όπου η σαφής αναφορά στην ταχύτητα της κίνησης, αλλά και στα αίτια εκδήλωσης, υπονοεί κίνηση βασικά στερεών υλικών.

Αντίστοιχα πλήρης είναι ο ορισμός που είχε περιληφθεί σε Τεχνικές Εκθέσεις Οργανισμών των Ηνωμένων Πολιτειών, με αρχική διατύπωση στην Ειδική Έκθεση 29 (1958) (Varnes, 1958) και επαναδιατύπωση στην Ειδική Έκθεση 176 (1978) (Varnes, 1978) του Συμβουλίου Έρευνας Αυτ/μων (Highway Research Board, Special Report 29, 1958 & Transportation Research Board, Special Report 176, 1978), σύμφωνα με τον οποίον ο όρος κατολισθήσεις περιγράφει μια ευρεία ποικιλία διεργασιών που καταλήγει σε μετακίνηση των υλικών του πρανούς προς τα κατόντη και προς τα έξω, που μπορεί να περιλαμβάνουν βραχώδη ή γαιώδη υλικά ή τεχνητές επιχώσεις ή συνδυασμούς αυτών. Η κίνηση των υλικών μπορεί να αφορά πτώση, ανατροπή, ολίσθηση, διασπορά ή ροή¹.

¹ Παρατίθεται ο ορισμός στην αγγλική γλώσσα: “The term “landslide” describes a wide variety of processes that result in the downward and outward movement of slope-forming materials including rock, soil, artificial fill, or a combination of these. The materials may move by falling, toppling, sliding, spreading, or flowing.”

Τέλος παρατίθεται ένας ακόμα εναλλακτικός ορισμός των κατολισθητικών φαινομένων, ως την κίνηση προς τα κατάντη εδαφικού ή βραχώδους υλικού, που λαμβάνει χώρα κατά μήκος επιφάνειας διάρρηξης, είτε κυκλικής (περιστροφική ολίσθηση) ή επίπεδης (μετατόπιση), με το υλικό να κινείται ως επί το πλείστον ως συνεκτική ή ημισυνεκτική μάζα με μικρή εσωτερική παραμόρφωση² (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.2 Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων βάσει Τυπολογίας Μετακίνησης

Ταξινόμηση κατά Varnes

Ο παραπάνω ορισμός των κατολισθητικών φαινομένων από την Ειδική Έκθεση 176 αποτελεί ουσιαστικά τη σύνοψη της ταξινόμησης των κατολισθητικών φαινομένων κατά Varnes (1978), συγγραφέα και του αντίστοιχου κεφαλαίου 2 της Έκθεσης. Η ταξινόμηση αφορά την τυπολογία των κατολισθητικών φαινομένων βάσει του είδους των υλικών (βραχώδη ή γαιώδη υλικά ή τεχνητές επιχώσεις) και των πέντε διαφορετικών ομάδων τύπων μετακίνησης. Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται τα σχετικά σχήματα από την Ειδική Έκθεση 176 της ταξινόμησης κατά Varnes, με τον πίνακα ταξινόμησης (Σχήμα 1 και μετάφρασή στον Πίνακα 1) και τη σχηματική παρουσίαση του κάθε τύπου (Σχήμα 2). Η ταξινόμηση κατά Varnes (1978) διεύρυνε την τυπολογία των κατολισθητικών φαινομένων και σε μορφές που δεν περιλαμβάνονται σε άλλες, παλαιότερες προτάσεις ταξινόμησης (πχ κατά Záruba-Mencl, Sentio, Hoek-Bray για βραχώμαζα κ.α.).

Σημειώνεται ότι στα κατολισθητικά φαινόμενα δεν εντάσσεται το σύνολο των δυνατών μορφών μετακινήσεων εδαφικής μάζας, καθώς υπάρχουν μορφές μετακίνησης πέραν των προαναφερόμενων πέντε (πτώση, ανατροπή, ολίσθηση, διασπορά ή ροή) που δεν αφορούν πρηνή και δεν ικανοποιούν τις συνθήκες που ορίζονται στον ορισμό των κατολισθητικών φαινομένων. Τέτοιες μορφές μετακίνησης είναι η ανύψωση του υπεδάφους (π.χ. λόγω απομείωσης κατακόρυφων τάσεων λόγω διάβρωσης υλικών ή ανθρώπινης δραστηριότητας), ο ερπυσμός ως ανεξάρτητο φαινόμενο και όχι ως πρόδρομο ή υπόλειμμα κατολίσθησης ή η ταπείνωση του υπεδάφους από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια (π.χ. λόγω διάλυσης υδατοδιαλυτών σχηματισμών, μεταλλευτική ή εξορυκτική δραστηριότητα ή υπεραντλήσεις υπογείων υδάτων).

² Παρατίθεται και αυτός ορισμός στην αγγλική γλώσσα: “A landslide is a downslope movement of rock or soil, or both, occurring on the surface of rupture -either curved (rotational slide) or planar (translational slide) rupture- in which much of the material often moves as a coherent or semicoherent mass with little internal deformation.”

Figure 2.2. Abbreviated classification of slope movements.
(Figure 2.1 in pocket in back of book gives complete classification with drawings and explanatory text.)

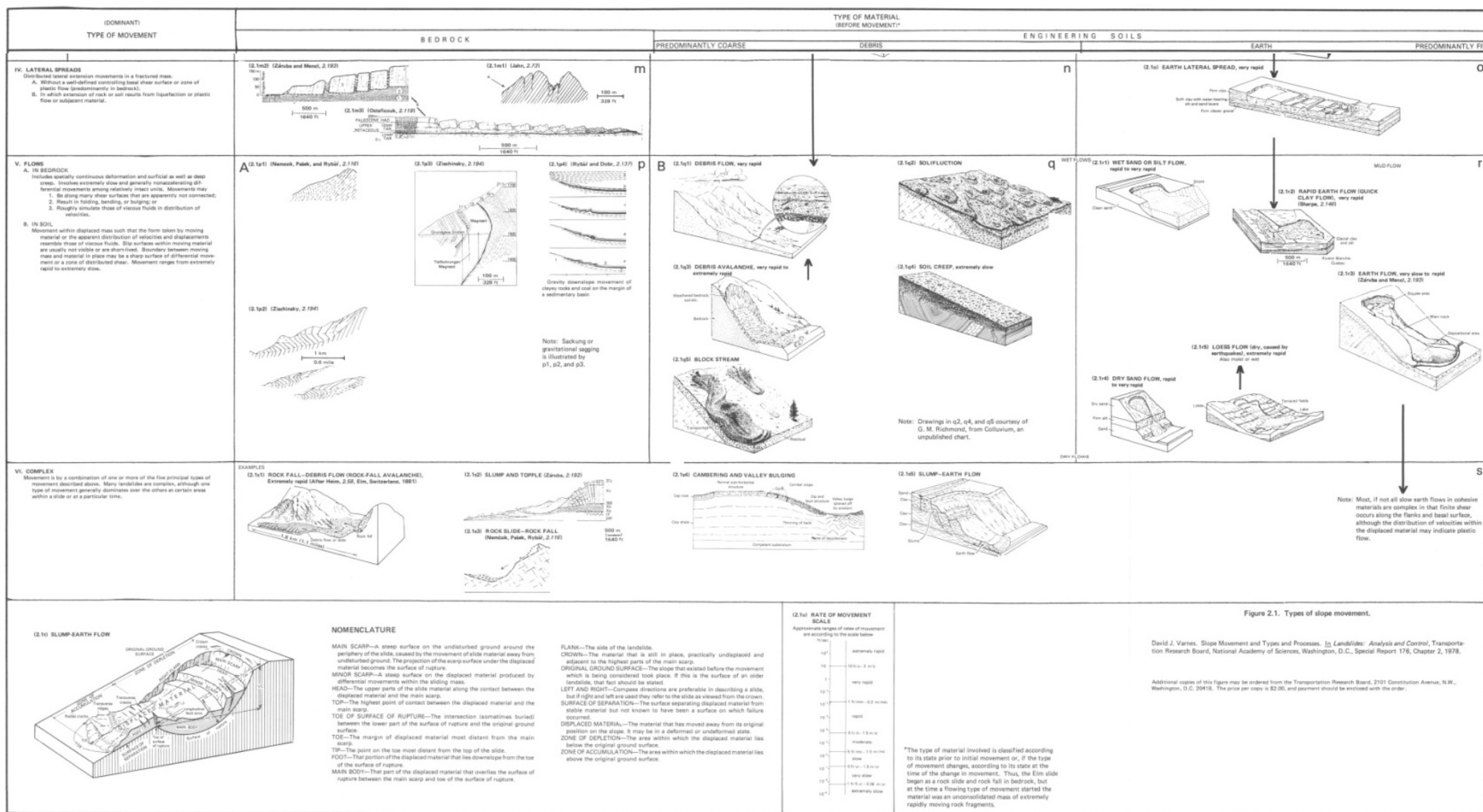
TYPE OF MOVEMENT			TYPE OF MATERIAL		
			BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
				Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS			Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES			Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	FEW UNITS	Rock slump	Debris slump	Earth slump
	TRANSLATIONAL		Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
		MANY UNITS	Rock slide	Debris slide	Earth slide
LATERAL SPREADS			Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS			Rock flow (deep creep)	Debris flow (soil creep)	Earth flow
COMPLEX			Combination of two or more principal types of movement		

Σχήμα 1: Πίνακας Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Varnes (1978)

Πίνακας 1: Πίνακας Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Varnes (1978) - Μετάφραση

Τύπος Μετακίνησης			Τύπος Γεωυλικών		
			Βραχομάζα	Γαιώδη υλικά	
				Κυρίως Αδρόκοκκα	Κυρίως Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση			Βραχοκαταπτώσεις	Καταπτ. Κορημάτων	Καταπτ. Φυσ. Εδάφους
Ανατροπή			Ανατροπή Βραχοτεμαχών	Ανατροπή Κορημάτων	Ανατροπή Φυσ. Εδάφους
Ολίσθηση	Περιστροφική	Μικρή Κλίμακα	Περιστρ. Ολίσθ. Βραχομάζας	(Περιστρ. Ολίσθ. Κορημάτων)	Ολίσθηση Φυσ. Εδάφους
	Επίπεδη (Μετάθεσης)		Μεγάλη Κλίμακα	Επίπεδη/Σφηνοειδής Ολίσθ. Βραχοτεμαχών Μεγάλης / Μικρής Κλίμακας	Επίτ. Ολίσθ. επί επιφάνειας Κορημάτων
		Πλευρική Εξάπλωση		Πλ. Εξάπλωση βροχοτεμαχών	Πλ. Εξάπλωση Κορημάτων
Ροή			Ροή βραχομάζας (βαθύς ερπυσμός)	Ροή Φυσ. Κορημάτων	Ροή Φυσ. Εδάφους
				(εδαφικός ερπυσμός)	
Σύνθετη με Συνδυαστική παρουσία δύο ή περισσότερων Τύπων Μετακίνησης					

(DOMINANT) TYPE OF MOVEMENT	BEDROCK		TYPE OF MATERIAL (BEFORE MOVEMENT)*	
			PREDOMINANTLY COARSE	ENGINEERING SOILS
I. FALLS Mass in motion travels most of the distance through the air. Includes free fall, movement by hops and bounds, and rolling of fragments of bedrock or soil.	(2.1a) ROCK FALL, extremely rapid		a	b
				c
II. TOPPLES Movement due to forces that cause an overturning moment about a pivot point below the center of gravity of the unit. If unchecked, will result in a fall or slide.	(2.1a1) ROCK TOPPLE (see Fellenz and Waters, 2.37)		d	e
				f
III. SLIDES Movement involves shear displacement along one or several surfaces, or within a relatively narrow zone, which are visible or may reasonably be inferred.	A. ROTATIONAL Movement due to forces that cause a turning moment about a point above the center of gravity of the unit. Surface of rupture concave upward.		g	h
	(2.1a) ROCK SLUMP, extremely slow to moderate			i
	B. TRANSLATIONAL Movement predominantly along more or less planar or gently undulatory surfaces. Movement frequently is directionally controlled by surfaces of weakness, such as faults, joints, bedding planes, and variations in shear strength between layers of bedded deposits, or by the contact between firm bedrock and overlying detritus.		j	k
	(2.1a1) (Newmark, 2.715, after Beck, 2.5)			l



Σχήμα 2: Χάρτης Ταξινόμησης και Τυπολογίας Κατολισθητικών Φαινομένων (Varnes, 1978, Figure 2.1)

Σημειώνεται ότι παρόλο που η ταξινόμηση κατά Varnes αποτελεί την πιο διαδεδομένη στον αγγλόφωνο κόσμο, εμπεριέχει κάποια ασάφεια στην περιγραφή και το διαχωρισμό των υλικών, καθώς η αναφορά σε “rock, debris and earth” στο πρωτότυπο αγγλικό κείμενο είναι αμφίσημη και όχι πάντα ξεκάθαρη με γεωλογικούς ή γεωτεχνικούς όρους. Λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον την ανάγκη για πιο ακριβή υιοθέτηση ορολογίας για κάθε τύπο κατολισθητικών φαινομένων, αλλά και την καλύτερη κατανόηση του εύρους των κατολισθητικών φαινομένων τις τελευταίες δεκαετίες, οι Hungr et al. (2014) πρότειναν σχετική τροποποίηση του συστήματος ταξινόμησης Varnes, με 32 τύπους, εισάγοντας και τη γενική κατηγορία της παραμόρφωσης πρανούς (Σχήμα 3).

Table 5 Summary of the proposed new version of the Varnes classification system. The words in *italics* are placeholders (use only one)

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice</i> fall ^a	2. <i>Boulder/debris/silt</i> fall ^a
Topple	3. <i>Rock block</i> topple ^a	5. <i>Gravel/sand/silt</i> topple ^a
	4. <i>Rock flexural</i> topple	
Slide	6. <i>Rock rotational</i> slide	11. <i>Clay/silt rotational</i> slide
	7. <i>Rock planar</i> slide ^a	12. <i>Clay/silt planar</i> slide
	8. <i>Rock wedge</i> slide ^a	13. <i>Gravel/sand/debris</i> slide ^a
	9. <i>Rock compound</i> slide	14. <i>Clay/silt compound</i> slide
	10. <i>Rock irregular</i> slide ^a	
Spread	15. <i>Rock slope</i> spread	16. <i>Sand/silt liquefaction</i> spread ^a
		17. <i>Sensitive clay</i> spread ^a
Flow	18. <i>Rock/ice avalanche</i> ^a	19. <i>Sand/silt/debris</i> dry flow
		20. <i>Sand/silt/debris</i> flowslide ^a
		21. <i>Sensitive clay</i> flowslide ^a
		22. <i>Debris</i> flow ^a
		23. <i>Mud</i> flow ^a
		24. <i>Debris</i> flood
		25. <i>Debris avalanche</i> ^a
		26. <i>Earthflow</i>
Slope deformation	28. <i>Mountain slope</i> deformation	27. <i>Peat</i> flow
		30. <i>Soil slope</i> deformation
		31. <i>Soil</i> creep
		32. <i>Solifluction</i>

For formal definitions of the landslide types, see text of the paper.

^a Movement types that usually reach extremely rapid velocities as defined by Cruden and Varnes (1996). The other landslide types are most often (but not always) extremely slow to very rapid

Σχήμα 3: Πρόταση Αναθεώρησης Ταξινόμησης κατά Varnes (Hungr et al., 2014)

Ταξινόμηση κατά Hutchinson

Κάποιες από αυτές τις πρόσθετες μορφές μετακίνησης εντάσσονται στην επίσης πολύ ευρέως διαδεδομένη ταξινόμηση εδαφικών μετακινήσεων κατά Hutchinson (1988)

(Πίνακας 2) με εντονότερο το γεωλογικό – υδρογεωλογικό κριτήριο στις τυπολογίες, και η προγενέστερη εκδοχή για μετακινήσεις μάζας επί πρανών του 1966 (Πίνακας 3).

Πίνακας 2: Ταξινόμηση Τύπων Μετακίνησης Μάζας κατά Hutchinson (1988)

Κατηγορία Μετακίνησης		Τυπολογία
A	Ανύψωση	1. Μετακινήσεις που συνδέονται με ανθρωπογενείς εκσκαφές 2. Μετακινήσεις που συνδέονται με φυσική διάβρωση σε κοιλάδες
B	Ερπυσμός	1. Επιφανειακός, κυρίως εποχιακός ερπυσμός, ερπυσμός μανδύα αποσάθρωσης 2. Βαθύς, συνεχής ερπυσμός, ερπυσμός μάζας 3. Ερπυσμός πριν από αστοχία: προοδευτικός ερπυσμός 4. Ερπυσμός μετά από αστοχία
C	Χαλάρωση Ορεινών Πρανών	1. Μονόπλευρη χαλάρωση, συσχετιζόμενη με τα αρχικά στάδια ολίσθησης 2. Αμφίπλευρη χαλάρωση, σχετιζόμενη με τα αρχικά στάδια αμφίπλευρης ολίσθησης 3. Χαλάρωση συσχετιζόμενη με πολλαπλές ανατροπές
D	Κατολισθήσεις	1. Αστοχίες με περιορισμό κίνησης 2. Περιστροφικές ολισθήσεις 3. Σύνθετες αστοχίες, με ξεκάθαρα μη κυκλική, ελλειψοειδή ή τεθλασμένη επιφάνεια 4. Επίπεδες μετακινήσεις
E	Κίνηση Κορημάτων υπό μορφή ροής	1. Λασπορροές (μη παγετώδεις) 2. Παγετώδεις Λασπορροές λόγω εποχιακού εαρινού κορεσμού των επιφανειακών αργιλικών στρωμάτων (gelifluction of clays) 3. Ολισθήσεις λόγω ροής υδάτων 4. Ταχεία έως εξαιρετικά ταχεία ροή υδάτων κορημάτων 5. Εξαιρετικά ταχεία στοιβάδα κορημάτων εν ξηρώ (sturzstorm)
F	Ανατροπές	1. Ανατροπές που ορίζονται από προϋπάρχουσες ασυνέχειες 2. Ανατροπές που ορίζονται από εφελκυστική αστοχία στο οπίσθιο μέρος της ανατρεπόμενης μάζας
G	Καταπτώσεις	1. Πρωτογενής, που περιλαμβάνει πρόσφατη αποδόμηση του υλικού, εδαφικής και βραχώδεις καταπτώσεις 2. Δευτερογενής, που περιλαμβάνει χαλαρά υλικά που είχαν αποδομηθεί σε προγενέστερη φάση, πτώσεις βραχοτεμαχών
H	Σύνθετες μετακινήσεις πρανών	1. Μετακινήσεις μάζας ή πτυχώσεις υπό το βάρος, την κίνηση ή τις μεταβολές της κατάστασης παγετώνων 2. Μετακίνηση επί πρανούς υπό μορφή σταθερού σώματος 3. Εγκαταλελειμμένα αργιλικά φυσικά πρανή 4. Ολισθήσεις που στη βάση τους εξελίσσονται ως λασπορροές ή υδαρείς ολισθήσεις 5. Ολισθήσεις λόγω αποδόμησης από ροή υπόγειων υδάτων 6. Ολισθήσεις επί πολλαπλών αναβαθμών 7. Ολισθήσεις επί πολλαπλών στρωμάτων

Πίνακας 3: Ταξινόμηση Τύπων Μετακίνησης Μάζας επί πρανούς κατά Hutchinson (1968)

Κατηγορία Μετακίνησης	Τυπολογία
Ερπυσμός	(1) Επιφανειακός, κυρίως εποχιακός ερπυσμός (a) Εδαφικός ερπυσμός (b) Ερπυσμός βραχοτεμαχών – κορημάτων (2) Βαθύς, συνεχής ερπυσμός, ερπυσμός μάζας (3) Προοδευτικός ερπυσμός
Φαινόμενα σε Ζώνες Παγετώνων	(4) Κινήσεις λόγω κύκλου παγετού – λωσίματος (Freeze-thaw) (a) Ερπυσμοί και μετακινήσεις λόγω εποχιακού κύκλου παγετού – λωσίματος (Solifluction) (b) Μετακινήσεις μάζας ή πτυχώσεις υπό το βάρος, την κίνηση ή τις μεταβολές της κατάστασης παγετώνων (c) ροές κορημάτων (d) καταπτώσεις βράχων σε συνδυασμό με μάζες πάγου ή παγωμένου εδάφους (rock glacier)
Κατολισθήσεις	(5) Επίπεδες – μεταθετικές Ολισθήσεις (a) Ολισθήσεις βράχων, βραχοτεμαχών (b) Ολισθήσεις πλακών ή φλούδας (c) Ολισθήσεις βραχωδών αποσαθρωμάτων ή κορημάτων (d) λασπορροές (i) λασπορροές λόγω κλιματικών φαινομένων (ii) λασπορροές λόγω ηφαιστειών (e) λασπορροές οργανικών υλικών σε βάλτους (bog flows, bog bursts) (f) Ροές (i) Αστοχίες σε σχηματισμούς Loess (περιπαγετικοί ή αιολικοί) (ii) Ολισθήσεις λόγω ροών υδάτων (6) Περιστροφικές Ολισθήσεις (a) Απλές περιστροφικές ολισθήσεις (b) Πολλαπλές περιστροφικές ολισθήσεις (i) σε στιφρές, ρωγματωμένες αργίλους (ii) σε μαλακές, εξαιρετικά ευαίσθητες αργίλους, υδαρείς ροές (c) Διαδοχικές, ή βαθμιδωτές περιστροφικές ολισθήσεις (7) Καταπτώσεις (a) Καταπτώσεις βραχοτεμαχών ή ογκολίθων (b) Καταπτώσεις βραχομάζας ή εδάφους (8) Υποθαλάσσιες Ολισθήσεις (a) Ολισθήσεις ροής (b) Κατολισθήσεις σε υποστερεοποιημένες αργίλους

Ταξινόμηση κατά Záruba-Mencl

Αξίζει επίσης αναφοράς η ταξινόμηση κατά Záruba-Mencl, καθώς είναι απλή και με καλή ανταπόκριση στις συνθήκες του ελληνικού χώρου (Λουπασάκης, 2013), κάνοντας διάκριση σε τέσσερις κύριες κατηγορίες μετακίνησης πρανών, ομοίως ανάλογα με τη σύσταση των μετακινούμενων υλικών, και συγκεκριμένα μετακινήσεις επιφανειακών

αποθέσεων, μετακινήσεις στα αργιλικά εδάφη και πετρώματα, μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων και ειδικούς τύπους μετακίνησης. Οι κατηγορίες αυτές υποδιαιρούνται περαιτέρω, όπως παρουσιάζεται ακολούθως (

).

Πίνακας 4: Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων κατά Záruba-Mencl (Záruba-Mencl, 1969, στοιχεία από Λουπασάκη, 2013 και Λέκκα, 2000)

Κατηγορία	Είδος
Μετακινήσεις επιφανειακών αποθέσεων	Ερπυσμός κορημάτων και κάμψη της κεφαλής των στρωμάτων
	Ολισθήσεις κορημάτων και μανδύα αποσάθρωσης
	Ροές γαιών
	Ροές κορημάτων
Μετακινήσεις στα αργιλικά εδάφη και πετρώματα	Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης
	Ολισθήσεις κατά μήκος σύνθετων επιφανειών ολίσθησης
	Μετακίνηση πάνω σε πλαστικούς σχηματισμούς
Μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων	Ολισθήσεις βράχων κατά μήκος υφιστάμενων ασυνεχειών
	Ολισθήσεις βαρύτητας (μακροχρόνιες παραμορφώσεις πρηνών)
	Καταπτώσεις βράχων
Ειδικοί τύποι μετακίνησης	Εδαφική ροή λόγω παγετού
	Ολισθήσεις ή ροή σε ευαίσθητες αργίλους,
	Υποθαλάσσιες ολισθήσεις

2.1.3 Ταξινόμηση Κατολισθητικών Φαινομένων βάσει πρόσθετων Κριτηρίων

Πέραν της ταξινόμησης των κατολισθητικών φαινομένων στη βάση της τυπολογίας των υλικών και της μετακίνησης, συστήματα ταξινόμησης είναι δυνατόν να συνταχθούν και βάσει άλλων κριτηρίων ή παραμέτρων, όπως είναι η τρέχουσα φάση ενεργότητας, η γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά και η ταχύτητα μετακίνησης ή η παρουσία (ή η απουσία) νερού σε κάποια μορφή. Τα παραπάνω κριτήρια ταξινόμησης περιγράφονται αναλυτικά και με παραδείγματα για κάθε κριτήριο στη βιβλιογραφία (Cruden & VanDine, 2013), και συνοπτικά στο Σχήμα 4. Η ταξινόμηση βάσει της τρέχουσας κατάστασης της κατολίσθησης που περιλαμβάνει τη φάση απομείωσης ευστάθειας, της οριακής ισορροπίας, την ενεργή φάση, την περίπτωση επανενεργοποίησης, ή περιορισμού ή τις μη ενεργές κατολισθήσεις (Σχήμα 5α). Αντίστοιχα η κατανομή της κίνησης της κατολίσθησης και η ταξινόμηση βάσει αυτής περιλαμβάνει τις εκδοχές της μετακίνησης χωρίς μεταβολή

του όγκου, της προώθησης με σταδιακή αύξηση του όγκου, της επαναφοράς, διαπλάτυνσης ή επιμήκυνσης, του περιορισμού της κίνησης ή της μείωσης του όγκου (Σχήμα 5β), ενώ ο τύπος γεωμετρίας μετακίνησης του κατολισθητικού φαινομένου μπορεί να διακριθεί σε ενιαία κίνηση, διαδοχική κίνηση σε περισσότερες της μίας επιφάνειες, πολλαπλή / επαναλαμβανόμενη, σύνθετη με διαφορετικούς τύπους μετακίνησης σε διαφορετικές θέσεις ή πολύπλοκη με εναλλαγές στους τύπους της μετακίνησης (Σχήμα 5γ). Επιπρόσθετα η ταχύτητα ή ο ρυθμός της μετακίνησης κυμαίνεται από πολύ αργή (μη αντιληπτή παρά μόνο με όργανα) έως εξαιρετικά ταχεία (αδυναμία διαφυγής, μεγάλες δυνάμεις πρόσκρουσης στις κατασκευές, αυξημένο δυναμικό καταστροφής), με τα προτεινόμενα ποσοτικά όρια να παρατίθενται στο Σχήμα 6.

Table 1. Landslide classification criteria and descriptors.

State of activity	Distribution of activity	Style of activity	Rate of movement	Water condition	Type of material	Mode of movement
Preparatory	Moving	Single	Extremely slow	Dry	Rock	Fall
Marginal	Advancing	Successive	Very slow	Moist	Soil	Topple
Active	Retrogressing	Multiple	Slow	Wet	Debris	Slide
Reactivated	Widening	Composite	Moderate	Very Wet	Earth	Spread
Suspended	Enlarging	Complex	Rapid	Frozen	Sand	Flow
Inactive	Confined		Very rapid	Thawed	Silt	
Dormant	Diminishing		Extremely rapid		Clay	
Abandoned						
Repaired						
Stabilized						
Relict						

Σχήμα 4: Πιθανά Κριτήρια Ταξινόμησης Κατολισθητικών Φαινομένων (Cruden & VanDine, 2013)

Τέλος παρουσιάζεται (Σχήμα 7) και η πρόταση ταξινόμησης από τους Hungr et al (2001), που αφορά αποκλειστικά στους τύπους «ροής» υλικών, με εσωτερική παραμόρφωση της ολισθούμενης μάζας κατά την κίνηση. Αυτή η ταξινόμηση προσπαθεί να ομαδοποιήσει κάτω από συγκεκριμένο όνομα (τελευταία στήλη στο Σχήμα 7) τους τύπους ροών, με σαφή αναφορά σε υλικά, υδατικές συνθήκες, επικρατούσα κατάσταση και ταχύτητα.

Σχήμα 5α, Ταξινόμηση βάσει τρέχουσας κατάστασης

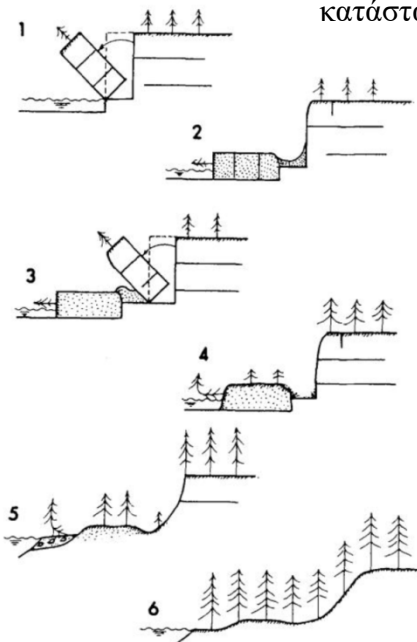


Fig. 1 : Sections through topples in different States of Activity : 1) Active, erosion at the toe of the slope causes a block to topple; 2) Suspended, local cracking in the crown of the topple; 3) Reactivated, another block topples; 4) Dormant, the displaced mass begins to regain its tree cover, scarps are modified by weathering; 5) Abandoned, fluvial deposition at the toe of the slope, the scarp begins to regain its tree cover; 6) Relict, uniform tree cover over the slope.

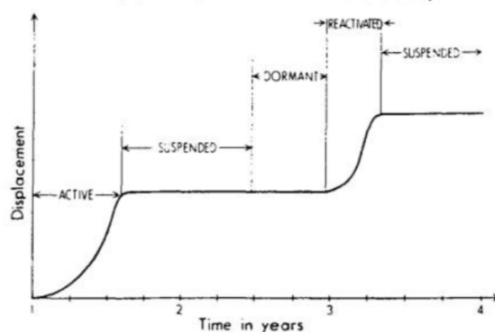


Fig. 2 : Displacement of a landslide in different states of activity.

Σχήμα 5β, Ταξινόμηση βάσει χωρικής κατανομής μετακίνησης

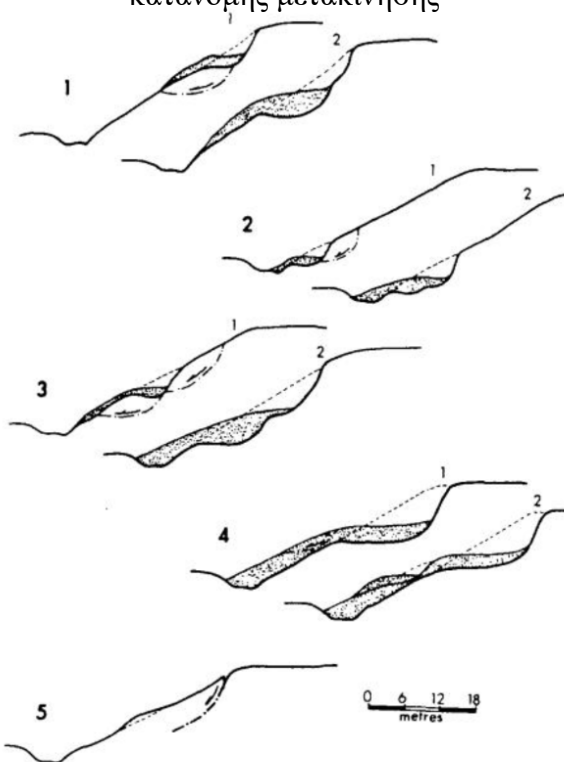


Fig. 3 : Sections through slides showing different distributions of activity : 1) Advancing; 2) Retrogressing; 3) Enlarging; 4) Diminishing; 5) Confined. In diagrams 1-4, Section 2 shows the slope after movement on the rupture surface indicated by the shear arrow in the section. Displaced material is dotted. Diagrams 1-3 show multiple slides.

Σχήμα 5: Σκαριφήματα ταξινόμησης βάσει :
α) Τρέχουσας Κατάστασης κατολίσθησης (Fig. 1&2)
β) Χωρικής Κατανομής της μετακίνησης (Fig. 3)
γ) Τύπων Γεωμετρίας μετακίνησης κατολισθητικών φαινομένων (Fig. 4) Πηγή :WP/WLI. 1993

Σχήμα 5γ, Τύποι γεωμετρίας μετακίνησης κατολισθήσεων

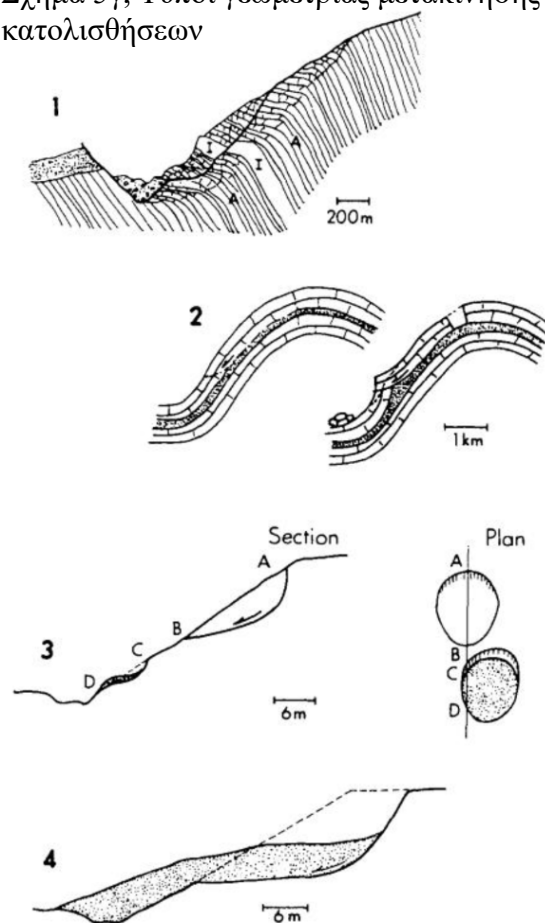


Fig. 4 : Sections through landslides showing different styles of activity : 1) Complex, gneiss (A) and migmatites (I) toppled with valley incision, alluvial deposits filled in the valley bottom. After weathering weakened the toppled material, some of the displaced mass slid (Giraud et al., 1990); 2) Composite, limestones have slid on the underlying shales causing toppling below the toe of the slide rupture surface (Harrison and Falcon, 1934); 3) Successive, the later slide, AB, is of the same type as slide, DC, but does not share displaced material or a rupture surface with it; 4) Single.

Table 1 : Velocity Classes

OLD CLASSES (Varnes, 1978)		NEW CLASSES (WP/WLI, 1994)				
Velocity	Value in mm/sec	Vel Class	Description of velocity	Examples (Table 2)	Velocity limits	Value in mm/sec
3 m/sec 600 ¹⁾	$3 \cdot 10^3$	7	Extremely rapid	1-8 ²⁾	5 m/sec 100 ¹⁾	$5 \cdot 10^3$
0.3 m/min 288	5	6	Very rapid	8 ²⁾ -9	3 m/min 100	50
1.5 m/day 30	$17 \cdot 10^{-3}$	5	Rapid	10-11	1.8 m/hour 100	0.5
1.5 m/month 12	$0.6 \cdot 10^{-3}$	4	Moderate	12-14	13 m/month 100	$5 \cdot 10^{-3}$
1.5 m/year 25	$48 \cdot 10^{-6}$	3	Slow	15-17	1.6 m/year 100	$50 \cdot 10^{-6}$
0.06 m/year	$1.9 \cdot 10^{-6}$	2	Very slow	18-22	16 mm/year	$0.5 \cdot 10^{-6}$
		1	Extremely slow	23-24		

¹⁾ Multiplication factor between lower and higher velocity limit

²⁾ Two estimated values are available (see Table 2)

Σχήμα 6: Ταξινόμηση κατολισθήσεων βάσει ταχύτητας μετακίνησης. Πηγή: International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, 1995

Table 4. Classification of landslides of the flow type.

Material	Water Content ¹	Special Condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock ²	saturated at rupture surface content	- liquefiable material ³ , - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction <i>in situ</i> , ³ - constant water content ⁴	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plug flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel ⁵ , - increased water content ⁴	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	- fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood ⁶	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel ⁵ , - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	- intact rock at source, - large volume ⁷	Ex. Rapid	Rock avalanche

¹ Water content of material in the vicinity of the rupture surface at the time of failure.

² Highly porous, weak rock (examples: weak chalk, weathered tuff, pumice).

³ The presence of full or partial *in situ* liquefaction of the source material of the flow slide may be observed or implied.

⁴ Relative to *in situ* source material.

⁵ Presence or absence of a defined channel over a large part of the path, and an established deposition landform (fan). Debris flow is a recurrent phenomenon within its path, while debris avalanche is not.

⁶ Peak discharge of the same order as that of a major flood or an accidental flood. Significant tractive forces of free flowing water. Presence of floating debris.

⁷ Volume greater than 10,000 m³ approximately. Mass flow, contrasting with fragmental rock fall.

Σχήμα 7: Πρόταση ταξινόμησης / ονοματολογίας ροών κατά Hungr et al., 2001

2.1.4 Αίτια Εκδήλωσης Κατολισθητικών Φαινομένων

Τα αίτια πρόκλησης των κατολισθητικών φαινομένων αντίστοιχα κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις βασικές ομάδες βάσει προέλευσης:

- Συνθήκες Υπεδάφους
- Γεωμορφολογικές Διεργασίες
- Φυσικές Διεργασίες
- Ανθρωπογενείς Διεργασίες

Η αναλυτική παράθεση των αιτιών ανά ομάδα παρουσιάζονται στον πίνακα στο Σχήμα 9, ενώ ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τη μετάφρασή του. Επιπρόσθετα τα αίτια μπορούν να διακριθούν στα εγγενή αίτια (preparatory causes) ή στους προδιαθετικούς παράγοντες, που μεταβάλλουν σταδιακά μια αρχικά ευσταθή κατάσταση πρανούς (συντελεστής ασφαλείας, ως ο λόγος αντιστάσεων προς δράσεις αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας) σε κατάσταση οριακής ή κρίσιμης ευστάθειας (συντελεστής ασφαλείας λίγο μεγαλύτερος της μονάδας), και σε (εναυσματικούς) παράγοντες ενεργοποίησης (triggering causes), που αναφέρονται στο γεγονός ή τα γεγονότα που πυροδοτούν την εκδήλωση του φαινομένου αστάθειας, με μείωση του συντελεστή ασφαλείας κάτω της μονάδας (Σχήμα 8). Συνήθως η εκδήλωση μιας κατολίσθησης συμβαίνει σε περιοχή που συνυπάρχουν δύο ή περισσότερα εγγενή αίτια και κατά το χρόνο που η ένταση των παραγόντων ενεργοποίησης μεγιστοποιείται ή ξεπερνάει ένα κρίσιμο κατώφλι έντασης.

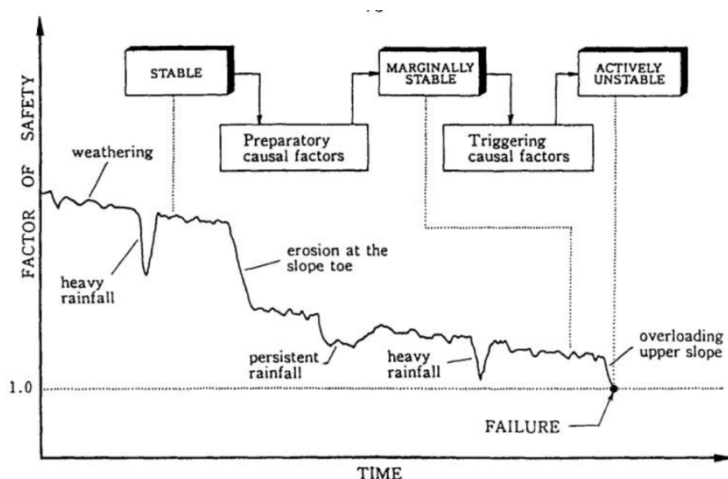


Fig. 1 : An example of changes in the factor of safety with time.

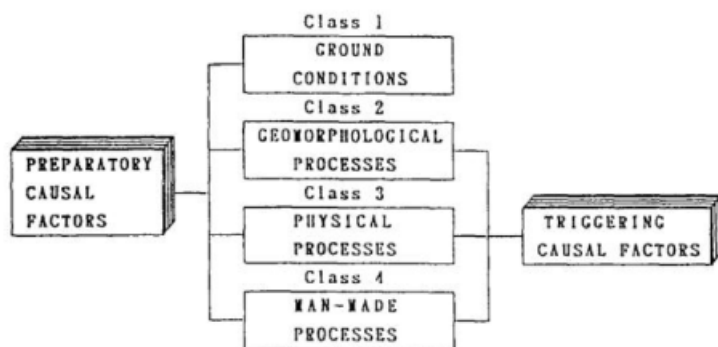


Fig. 2 : Types of causal factors of landslides.

Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση φάσεων πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων (πηγή WP/WLI, Popescu, 1994)

Table 9. Checklist of landslide causes (modified from WP/WLI, 1994).

Ground Conditions	
Weak materials	Adversely-oriented, mass discontinuity
Sensitive materials	Adversely-oriented, structural discontinuity
Weathered materials	Contrast in permeability
Sheared materials	Contrast in stiffness
Jointed or fissured materials	
Geomorphological Processes	
Tectonic uplift	Erosion of the lateral margins
Glacial rebound	Subterranean erosion (solution, piping)
Fluvial erosion of the slope toe	Deposition loading the slope or its crest
Wave erosion of the slope toe	Vegetation removal (by forest fire, drought)
Glacial erosion of the slope toe	
Physical Processes	
Intense rainfall	Ice damming
Rapid snow melt	Thawing
Prolonged exceptional precipitation	Freeze and thaw weathering
Rapid drawdown (of floods and tides)	Shrink and swell weathering
Earthquake	
Artificial Processes	
Excavation of the slope or its toe	Mining
Loading of the slope or its crest	Artificial vibration
Drawdown (of reservoirs)	Water leakage from utilities
Deforestation	Defective surface drainage
Irrigation	Dumping of loose materials

Σχήμα 9: Αίτια πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων (Cruden & VanDine, 2013, προσαρμογή από WP/ WLI, 1994)

Πίνακας 5: Περιγραφή Αιτίων Εκδήλωσης Κατολισθητικών Φαινομένων (Σχήμα 8, μετάφραση)

Ομάδα	Περιγραφή Αιτίων	
Συνθήκες Υπεδάφους	Ασθενή Υλικά	Δυσμενής Προσανατολισμός ασθενούς μάζας
	Ευαίσθητα Υλικά	Δυσμενής Προσανατολισμός δικτύου
	Διαβρωμένα Υλικά	ασυνεχειών – στρώσεων
	Διατμημένα Υλικά	Διαφοροποίηση Διαπερατότητας
	Διακλασμένα – Ρωγματοωμένα Υλικά	Διαφοροποίηση Αντοχής – Δυσκαμψίας
Γεωμορφολογικές Διεργασίες	Τεκτονική Ανύψωση	Πλευρική Διάβρωση πρανούς
	Ανύψωση λόγω παγετώνων	Υπόγεια Διάβρωση (χημική διάλυση, συνθήκες ρευστοποίησης)
	Ποτάμια διάβρωση πόδα πρανούς	Επιφόρτιση πρανούς ή στέψης πρανούς λόγω απόθεσης
	Διάβρωση πόδα πρανούς από θαλάσσιο κυματισμό	Αφαίρεση φυτοκάλυψης (δασική πυρκαγιά, ξηρασία)
	Διάβρωση πόδα πρανούς από δράση παγετώνων	

Ομάδα	Περιγραφή Αιτίων	
Φυσικές Διεργασίες	Έντονη Βροχόπτωση Ταχύ λιώσιμο χιονοκάλυψης Παρατεταμένοι, ιδιαίτεροι όμβροι Σεισμοί	Φράγματα πάγου Διάβρωση υπεδάφους λόγω παγετού Διάβρωση υπεδάφους λόγω συρρίκνωσης και διόγκωσης
Ανθρωπογενείς Διεργασίες	Εκσκαφή πρανούς ή βάσης πρανού Επιφόρτιση πρανούς ή στέψης πρανού Μείωση στάθμης ταμιευτήρων Αποψίλωση Δασών Άρδευση	Μεταλλευτικές Δραστηριότητες Τεχνητές δονήσεις Διαρροή νερού από δίκτυο Ατελής αποστράγγιση Απόρριψη χαλαρών υλικών

2.2 Τα Κατολισθητικά Φαινόμενα ως Φυσική Καταστροφή – Ποσοτικά Στοιχεία Καταγραφών

2.2.1 Η Έννοια της Φυσικής Καταστροφής

Ταξινόμηση Καταστροφών και Φυσικών Καταστροφών

Η έννοια της καταστροφής ορίζεται ως «η κατάσταση ή το συμβάν που ξεπερνάει τις τοπικές δυνατότητες αντιμετώπισης και απαιτεί εξωτερική συμβολή σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο, ένα απρόβλεπτο και εν πολλοίς ξαφνικό συμβάν που προκαλεί σημαντικές ζημιές, καταστροφές και ανθρώπινη οδύνη. Τα αίτια είναι συχνά φυσικά (φυσική καταστροφή), αλλά και ανθρωπογενούς προέλευσης»³.

Οι καταστροφές διακρίνονται στις φυσικές καταστροφές και τις τεχνολογικές / ανθρωπογενείς και, σε κάποιες περιπτώσεις και με διασταλτική ερμηνεία του όρου, και τις κοινωνικές καταστροφές. Τα κατολισθητικά φαινόμενα εντάσσονται στις φυσικές

³ Μετάφραση από τα αγγλικά του: “Situation or event, which overwhelms local capacity, necessitating a request to national or international level for external assistance; An unforeseen and often sudden event that causes great damage, destruction and human suffering. Though often caused by nature, disasters can have human origins” (πηγή: <https://public.emdat.be/about>,).

Ένας εναλλακτικός ορισμός από το Γραφείο του ΟΗΕ για τη Μείωση του Κινδύνου των Καταστροφών (UNDRR) περιγράφει τις καταστροφές ως «σοβαρή διαταραχή της λειτουργίας μιας κοινότητας ή κοινωνίας σε οποιαδήποτε κλίμακα λόγω επικίνδυνων συμβάντων που επιδρούν με τις συνθήκες έκθεσης, τρωτότητας και τις δυνατότητες αντιμετώπισης και οδηγούν σε ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα αποτελέσματα: ανθρώπινες, υλικές, οικονομικές ή περιβαλλοντικές απώλειες και επιπτώσεις. (“A serious disruption of the functioning of a community or a society at any scale due to hazardous events interacting with conditions of exposure, vulnerability and capacity, leading to one or more of the following: human, material, economic and environmental losses and impacts.” (πηγή: <https://www.undrr.org/terminology/disaster>). Ένας δεύτερος εναλλακτικός ελληνικός ορισμός της έννοιας της καταστροφής παρατίθεται στην ΥΑ 1299/2003 ΦΕΚ 423/Β/10.4.2003 «Καταστροφή νοείται κάθε ταχείας ή βραδείας εξέλιξης φυσικό φαινόμενο ή τεχνολογικό συμβάν στο χερσαίο, θαλάσσιο και εναέριο χώρο, το οποίο προκαλεί εκτεταμένες δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο, καθώς και στο ανθρωπογενές ή φυσικό περιβάλλον.»

καταστροφές. Σύμφωνα με την περαιτέρω ταξινόμηση που ακολουθείται στην καθιερωμένη παγκόσμια βάση δεδομένων Emergency Events Database (EM-DAT) του Κέντρου Έρευνας Επιδημιολογίας Καταστροφών (CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters), τα κατολισθητικά φαινόμενα εντάσσονται τόσο στην ομάδα «Mass Movement», που αναφέρεται σε περιπτώσεις μετακίνησης μάζας εν ξηρώ (πχ βραχοκαταπτώσεις) και εντάσσεται στην υποκατηγορία των Φυσικών Καταστροφών «Γεωφυσικές Καταστροφές», μαζί με τα Σεισμικά και τα Ηφαιστειακά Συμβάντα, όσο και στην ομάδα «Landslides», που αναφέρεται σε μετακινήσεις λόγω της δράσης / με παρουσία επιφανειακού ή υπόγειου, γλυκού ή θαλασσινού, νερού (συμπεριλαμβανόμενων και των χιονοστιβάδων), και εντάσσεται στην υποκατηγορία Φυσικών Καταστροφών «Υδρολογικές Καταστροφές», μαζί με τα Πλημμυρικά Φαινόμενα και τη Δράση των Κυμάτων. Στη βάση δεδομένων (EM-DAT) εντάσσονται στις φυσικές καταστροφές, πέραν των Γεωφυσικών και Υδρολογικών Καταστροφών και οι Μετεωρολογικές, Κλιματολογικές, Βιολογικές και Εξωπλανητικές, ενώ στις Τεχνολογικές Καταστροφές τα βιομηχανικά ατυχήματα, τα ατυχήματα σε μέσα μεταφοράς και τα διάφορα λοιπά ατυχήματα (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Γενική Ταξινόμηση Καταστροφών (μετάφραση από <https://public.emdat.be/about>).

Κατηγορία	Υποκατηγορία	Ορισμός - Περιγραφή	Βασικές Ομάδες Τυπολογίας
Φυσικές Καταστροφές	Γεωφυσικές Καταστροφές	Κίνδυνος που προέρχεται από το στερεό φλοιό της γης. Εναλλακτικά αναφέρονται και ως Γεωλογικές Καταστροφές	Σεισμικά Γεγονότα
			Μετακίνηση Μάζας εν ξηρώ <ul style="list-style-type: none"> • Βραχοκαταπτώσεις • Εδαφικές Ολισθήσεις
			Ηφαιστειακή Δραστηριότητα
	Μετεωρολογικές	Κίνδυνος που προκαλείται από πρόσκαιρες ακραίες καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες μικρής – μέσης κλίμακας, με διάρκεια από λεπτά έως ημέρες.	Ακραίες Θερμοκρασίες
			Ομίχλη
			Κатаγίδες / Θύελλες
	Υδρολογικές	Κίνδυνος που προκαλείται από την παρουσία, κίνηση και διασπορά του επιφανειακού και υπόγειου γλυκού ή θαλασσινού νερού.	Πλημμύρα
			Κατολισθήσεις <ul style="list-style-type: none"> • Ροές υλικών (χιονοστιβάδες, κορήματα, λασπορροή, βραχοκαταπτώσεις)
			Δράση Κυματισμών

Κατηγορία	Υποκατηγορία	Ορισμός - Περιγραφή		Βασικές Ομάδες Τυπολογίας
Φυσικές Καταστροφές	Κλιματολογικές	Κίνδυνος που προκαλείται από μακροχρόνιες ατμοσφαιρικές διεργασίες μέσης – μεγάλης κλίμακας, με κλιματικές διαφοροποιήσεις σε κυμαινόμενο χρονικό εύρος (διεποχιακό έως πολλών δεκαετιών).		Ξηρασία
				Πλημμύρες λόγω διάρρηξης σε Παγετώδεις Λίμνες
				Δασικές Πυρκαγιές
	Βιολογικές	Κίνδυνος που προκαλείται από την έκθεση σε ζωντανούς οργανισμούς και τις τοξικές ουσίες τους (π.χ. δηλητήριο, μούχλα) ή σε ασθένειες που μεταδίδονται με διαβιβαστές και μπορεί να μεταφέρουν.		Επιδημίες
				Προσβολή Εντόμων
				Ζωικά Ατυχήματα
	Εξωπλανητικές	Κίνδυνος που προκαλείται από αστεροειδείς, μετεωροειδείς και κομήτες που περνούν κοντά ή εισέρχονται στη γήινη ατμόσφαιρα και/ή προσκρούουν στη Γη, και από αλλαγές στις διαπλανητικές συνθήκες που επηρεάζουν τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα της γης.		Πρόσκρουση
				Διαστημικός καιρός
Τεχνολογικές Καταστροφές	Βιομηχανικά Ατυχήματα		Χημική Διαρροή	Δηλητηρίαση
			Κατάρρευση	Ακτινοβολία
			Έκρηξη	Διαρροή Πετρελαίου
			Πυρκαγιά	Άλλο
			Διαρροή Αερίου	
	Ατυχήματα σε Συστ. Μεταφοράς		Αεροπορικά Ατυχήματα	Σιδηροδρομικά Ατυχήματα
			Οδικά Ατυχήματα	Ατυχήματα σε δίκτυα νερού
	Διάφορα Ατυχήματα		Κατάρρευση	Πυρκαγιά
			Έκρηξη	Άλλο

Πέρα από την αυστηρή ταξινόμηση των καταστροφών στις παραπάνω κατηγορίες (Πίνακας 6), είναι αντιληπτό ότι δύο ή και περισσότερες φυσικές καταστροφές μπορούν να λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα ή με μικρή χρονική απόκλιση, με τη μία να αποτελεί τη γενεσιουργό αιτία ή το μηχανισμό ωρίμανσης - ενεργοποίησης ή την παράπλευρη συνέπεια της άλλης ή των άλλων. Αναφορικά με τα κατολισθητικά φαινόμενα, αναφέρεται ενδεικτικά η περίπτωση εκδήλωσης - ενεργοποίησης τους λόγω -και ταυτόχρονα ή με μικρή χρονική απόκλιση- με σεισμικά ή ηφαιστειακά συμβάντα ή πλημμύρες, ή, αντίστοιχα, η περίπτωση η εκδήλωση δασικών πυρκαγιών να αποτελεί πρόδρομο συμβάν – εγγενές αίτιο της εκδήλωσης μελλοντικών κατολισθήσεων ή πλημμυρών. Αντίστοιχα, υπό συνθήκες τα κατολισθητικά φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν άλλες φυσικές καταστροφές, όπως συνέβη στη γνωστή περίπτωση του φράγματος Vajont στην Ιταλία

(1963), όπου κατολίσθηση πολύ μεγάλης κλίμακας εντός του ταμιευτήρα του φράγματος προκάλεσε κυματισμό (τσουνάμι), με αποτέλεσμα τεράστιος όγκος νερού να υπερπηδήσει το φράγμα και να πλημμυρίσει τους κατάντη οικισμούς, με ~2000 ανθρώπινες απώλειες (https://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam).

Καταστροφικότητα Φυσικών Καταστροφών, Στοιχεία Βάσεων Δεδομένων

Η καταστροφικότητα των φυσικών καταστροφών διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο τους και μεταβάλλεται με το χρόνο, καθώς αντίστοιχα και έναντι των συνθηκών που επιβάλλει κάθε φυσική καταστροφή μεταβάλλονται παράγοντες όπως οι δυνατότητες πρόληψης, προστασίας, αντιμετώπισης και αποκατάστασης, η τρωτότητα του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, ο αριθμός των ατόμων σε κίνδυνο κ.α., με τις μεταβολές να παρουσιάζουν και γεωγραφικές διαφοροποιήσεις, ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης, τις συνθήκες αστικοποίησης κτλ. Μια σύγκριση της καταστροφικότητας μεταξύ των φυσικών καταστροφών παρουσιάζεται σε εποπτικό διάγραμμα στο Σχήμα 10, με σύγκριση του αριθμού των ανθρώπινων απωλειών ανά φυσική καταστροφή μετά το 1900 έως το 2020, βάσει των στοιχείων της βάσης δεδομένων EM-DAT, ενώ παλαιότερη συλλογή στοιχείων, αλλά και με γεωγραφικό διαχωρισμό ανά ήπειρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. Τα στοιχεία από το Σχήμα 10 συνηγορούν στη μείωση των ανθρώπινων απωλειών από φυσικές καταστροφές με την εξέλιξη του 20ου αιώνα, κυρίως λόγω περιορισμού των πολύ καταστροφικών επιπτώσεων από ξηρασία (κυρίως στην Ασία) και πλημμύρες και σχετικό περιορισμό των επιπτώσεων από σεισμικά γεγονότα, ενώ θα πρέπει να θεωρείται δεδομένο ότι τα παλαιότερα στοιχεία υποκαταγράφονται.

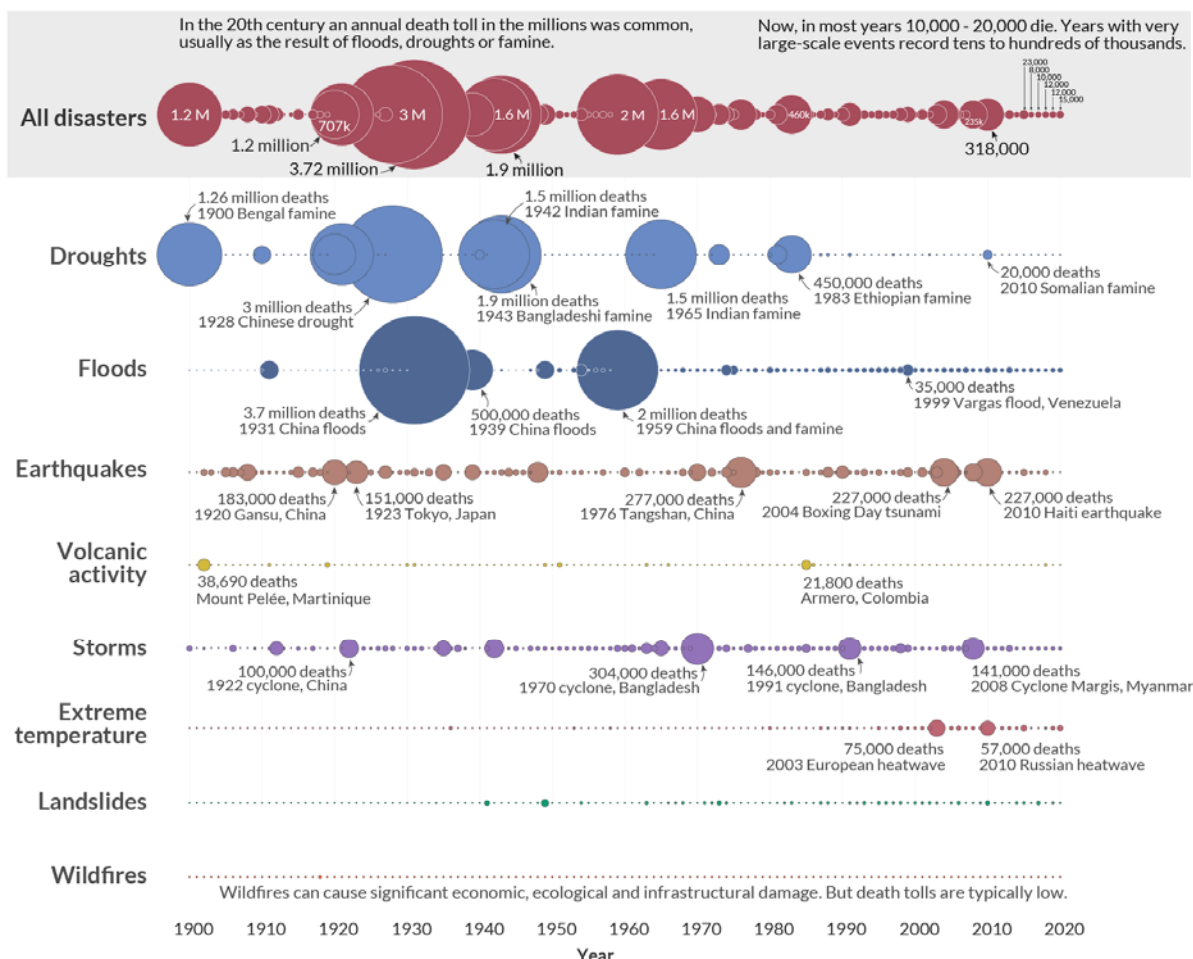
Ωστόσο τα τελευταία 50 χρόνια η σαφής τάση απομείωσης των απωλειών από φυσικές καταστροφές έχει αποκοπεί και παρατηρούνται διακυμάνσεις στις καταγραφές ανά έτος, που καθορίζονται εν πολλοίς από την τυχατική εμφάνιση υπερκαταστροφικών «μέγασυμβάντων», ενώ αυξάνεται ο αριθμός των πληττόμενων (Σχήμα 12). Οι διακυμάνσεις αποτελούν σε ένα βαθμό απόρροια της έντονης γεωγραφικής διαφοροποίησης στις καταγραφές, ακόμα και για πολύ αδρό διαχωρισμό σε επίπεδο ηπείρων, καθώς για κάθε ήπειρο διαφοροποιούνται οι κρίσιμες παράμετροι που καθορίζουν την καταστροφικότητα κάθε συμβάντος, όπως η έκθεση σε κάθε τύπο καταστροφής (εκτεθειμένα άτομα και στοιχεία σε διακινδύνευση), το μέσο επίπεδο ανάπτυξης των κρατών και η συσχέτιση του με την τρωτότητα του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος κ.α.. Για παράδειγμα παρά την παγκόσμια τάση της σχετικής σταθεροποίησης των καταγραφών ανθρώπινων απωλειών με

ετήσιες διακυμάνσεις, παρατηρείται αύξηση των θανάτων στην Αφρική, κυρίως λόγω κλιματολογικών – υδρολογικών καταστροφών (πρωταρχικά ξηρασίες και δευτερευόντως πλημμύρες), στη βάση σταθερής ετήσιας αύξησης του πληθυσμού της ηπείρου με ρυθμό >2% τις τελευταίες δεκαετίες (άρα αύξηση των ατόμων σε κίνδυνο), υπό συνεχιζόμενες συνθήκες υπανάπτυξης – έλλειψης υποδομών, αλλά και παραγόντων όπως η έλλειψη δημοκρατίας ή η διαφθορά (Kahn, 2005), ενώ αντίστοιχα αποτυπώνεται μείωση των θανάτων στις αναπτυσσόμενες – αναπτυγμένες χώρες (Ramachandran et al., 2010). Οι φυσικές καταστροφές με τις περισσότερες ανθρώπινες απώλειες είναι οι σεισμοί και οι θύελλες, όπου η πληττόμενη περιοχή είναι δυνητικά πολύ μεγάλη και πυκνοκατοικημένη.

Global deaths from disasters over more than a century

The size of the bubble represents the estimated annual death toll. The largest years are labeled with this total figure, alongside large-scale events that contributed to the majority – although usually not all – of these deaths.

Our World
in Data



Data source: EM-DAT, CRED / UCLouvain, Brussels, Belgium – www.emdat.be (D. Guha-Sapir).
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

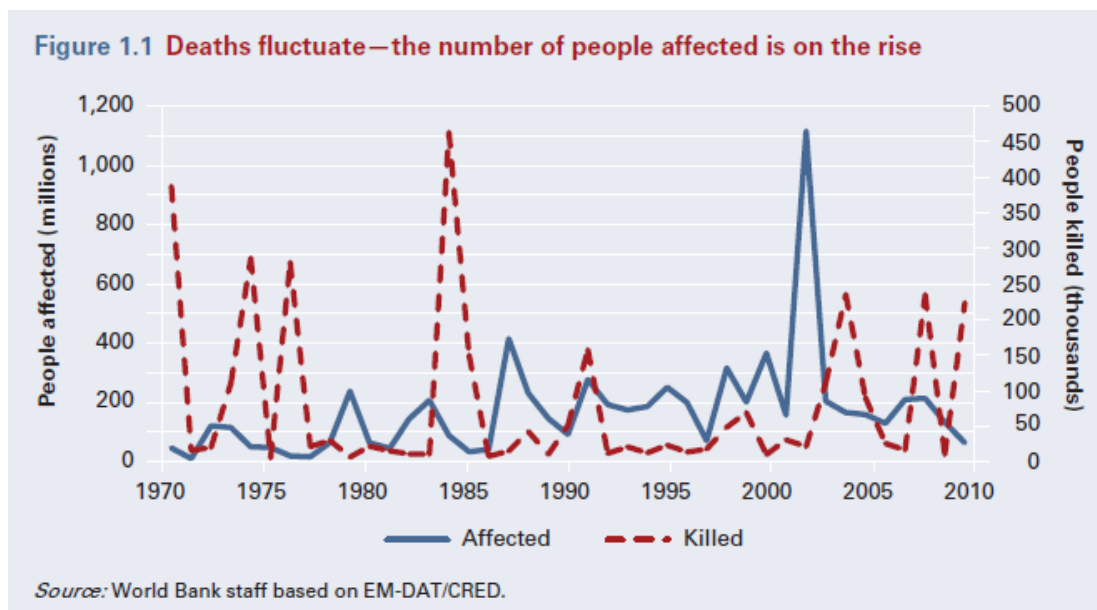
Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση ανθρώπινων απωλειών ανά φυσική καταστροφή με το χρόνο (πηγή: <https://ourworldindata.org/natural-disasters#what-share-of-deaths-are-from-natural-disasters>, χρήση στοιχείων βάσης δεδομένων EM-DAT)

Πίνακας 1.1

Θάνατοι από καταστροφικά γεγονότα ανά ήπειρο κατά τα έτη 1947-80.

Τύπος	Αριθμός γεγονότων	Ασία	Ωκεανία	Αφρική	Ευρώπη	Νότια Αμερική	Καραϊβική & Κεντρική Αμερική	Βόρεια Αμερική
Σεισμός	180	354.521	18	18.232	7.750	38.837	30.613	77
Τσουνάμι	7	4.459	—	—	—	—	—	60
Ηφαιστειακή έκρηξη	18	2.805	4.000	—	2.000	440	151	34
Πλημμύρα	333	170.664	77	3.891	11.199	4.396	2.575	1.633
Κυκλώνας	210	478.574	290	864	250	—	16.541	1.997
Τυφώνας	119	4.308	—	548	39	—	26	2.727
Αντατή καταιγίδα	73	22.008	—	5	146	205	310	303
Ομίλη	3	—	—	—	3.550	—	—	—
Καύσιονας	25	4.705	100	—	340	135	—	2.190
Χιονοστιβάδα	12	335	—	—	340	4.350	—	—
Χιονόπτωση & δυνατό κρύο	46	7.690	17	—	2.780	—	200	2.510
Κατολίσθηση	33	4.021	—	—	300	912	260	—
Σύνολο		1.054.090	4.502	23.540	28.694	49.275	50.676	11.531

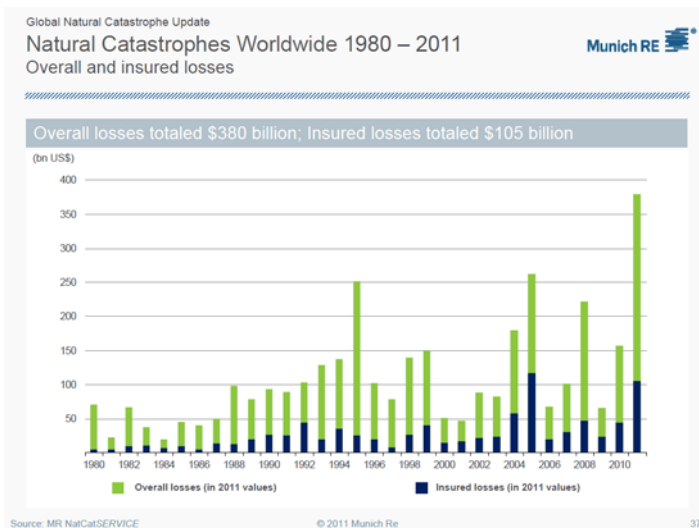
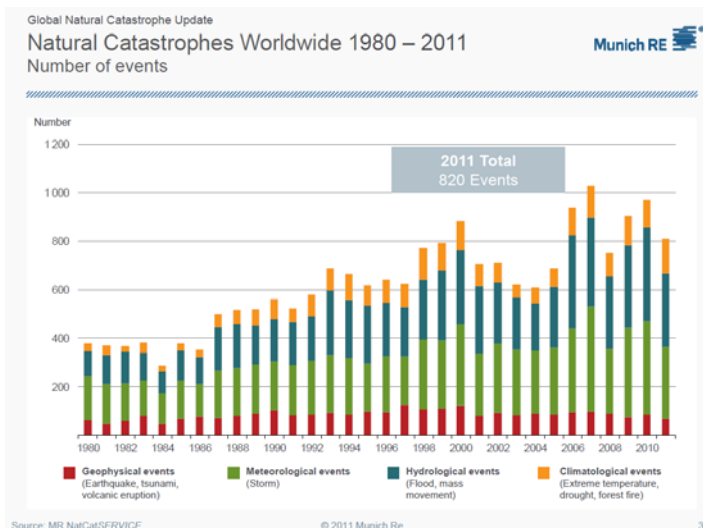
Σχήμα 11: Ανθρώπινες απώλειες ανά φυσική καταστροφή και ήπειρο (πηγή: Λέκκας, 2000)



Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση ανθρώπινων απωλειών και πληττόμενων με το χρόνο (πηγή: Ramachandran et al., 2010 (The World Bank), χρήση στοιχείων βάσης δεδομένων EM-DAT)

Από τις καταγραφές σε άλλη βάση δεδομένων (πάροχος ασφαλειών Munich Re, βάση δεδομένων NatCatService, προσανατολισμένη στα κόστη βλαβών από φυσικές καταστροφές) αφενός επιβεβαιώνεται η αύξηση του αριθμού των μετεωρολογικών, υδρολογικών και κλιματολογικών συμβάντων, ή, ακριβέστερα, των καταγραφών συμβάντων τις τελευταίες δεκαετίες (Σχήμα 13α, ράβδοι με πράσινο, γαλάζιο και κίτρινο χρώμα), που αποδίδεται αφενός σε υποκαταγραφές στα προηγούμενα έτη και αφετέρου

στην τεκμηριωμένη αύξηση της συχνότητας εμφάνισης τους λόγω κλιματικής αλλαγής, και η σχετική σταθερότητα των καταγραφών γεωφυσικών συμβάντων (Σχήμα 13α, ράβδοι με κόκκινο χρώμα), που περιλαμβάνουν κυρίως σεισμικά γεγονότα που δεν υποκαταγράφονται λόγω των δυνατοτήτων καταγραφών με ακρίβεια σε παγκόσμια κλίμακα εδώ και πολλές δεκαετίες. Επίσης καταγράφεται γενική αύξηση στα κόστη των βλαβών από φυσικές καταστροφές (Σχήμα 13β), με ετήσιες διακυμάνσεις που αφορούν την τυχαία εκδήλωση «μέγα-συμβάντων» σε ανεπτυγμένες χώρες (π.χ. θύελλες και τυφόνες στις Ηνωμένες Πολιτείες όπως ο «Κατρίνα» το 2005, σεισμός Mw=9 και τσουνάμι στην Ιαπωνία του 2011). Ωστόσο είναι αντιληπτό ότι η υποκαταγραφή στα κόστη των βλαβών είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη σε σχέση με τις ανθρώπινες απώλειες, και ακόμα και τα τελευταία χρόνια παραμένει σημαντική (Jones et al., 2022).



Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση εξέλιξης αριθμού συμβάντων και κόστους βλαβών φυσικών καταστροφών με το χρόνο (πηγή: Munich Re, 2011 Natural Catastrophe Year in review, <https://www.iii.org/sites/default/files/docs/pdf/MunichRe-010412.pdf>)

Σύγχρονες Εξελίξεις και Μελλοντικές Τάσεις

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται φαινόμενη αύξηση στις καταγραφές των απωλειών «σύγχρονων» φυσικών καταστροφών, όπως οι ακραίες θερμοκρασίες (Σχήμα 10). Οι καταγραφές αυτές αποτελούν «προειδοποιητικό δείγμα» εκδήλωσης της κλιματικής αλλαγής, από κοινού με την ήδη παρατηρούμενη μείωση της περιόδου επαναφοράς των τροπικών κυκλώνων. Η κλιματική αλλαγή αναγνωρίζεται καθολικά ως καθοριστικός παράγοντας για τα χαρακτηριστικά των φυσικών καταστροφών στο μέλλον και πέραν από τα πρώτες συνέπειες που ήδη καταγράφονται, τις επόμενες δεκαετίες ενδέχεται αυτές να επεκταθούν, π.χ. λόγω της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας, της διατάραξης των

θαλάσσιων ρευμάτων στους ωκεανούς έως το λιώσιμο των πάγων και την απελευθέρωση του μεθανίου που έχει παγιδευτεί κάτω από τους παγετώνες.

Πέραν της κλιματικής αλλαγής, ο έτερος καθοριστικός παράγοντας στην εκδήλωση μελλοντικών φυσικών καταστροφών αποτελεί η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, που συνεπάγεται την εντατική αναζήτηση φυσικών πόρων κάθε είδους, με διαρκή επέκταση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε φυσικά συστήματα, αλλά και την ένταση της αστικοποίησης με υπέρμετρη και ανεξέλεγκτη χωρική επέκταση των πόλεων, κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες. Οι παράγοντες αυτοί εξετάζονται και στο Κεφ. 4.2 ως προς τα κατολισθητικά φαινόμενα.

Σε επίπεδο αντιμετώπισης, η επιστημονική και τεχνολογική γνώση συνεισφέρει στην καθιέρωση και βελτίωση των δυνατοτήτων των αντίστοιχων εργαλεία υποβοήθησης σε διαφορετικά επίπεδα (πρόγνωσης και προειδοποίησης, επισκόπησης, τηλεπισκόπησης, επέμβασης, μείωσης της τρωτότητας κατασκευών και υποδομών, κινητοποίησης συνεργείων διάσωσης κ.α.). Σε παγκόσμια κλίμακα και επίπεδο Ηνωμένων Εθνών, οι σύγχρονες στοχεύσεις αποτυπώνονται στο Πλαίσιο Sendai για την Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών (Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030, UNISDR, 2015). Πρόκειται για μη δεσμευτικό Πλαίσιο, το οποίο έχει υπογραφεί σε εθελοντική βάση από τα μέλη του ΟΗΕ και αποτελεί το διάδοχο του αντίστοιχου Πλαισίου Χιόγκο (Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters). Στο Πλαίσιο Sendai έχουν τεθεί ποσοτικοί στόχοι για την απομείωση του αριθμού των ανθρώπινων απωλειών και των πληττόμενων, του κόστους βλαβών και των βλαβών σε κρίσιμες υποδομές, και αντίστοιχα για την αύξηση του αριθμού των κρατών με εθνικές στρατηγικές αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών, της διεθνούς συνεργασίας για αρωγή σε αναπτυσσόμενες χώρες και της διαθεσιμότητας συστημάτων προειδοποίησης και πληροφορίας. Επίσης έχουν οριστεί 4 ομάδες προτεραιοτήτων όσων αφορά τις δράσεις των κρατών σε εθνικό και τοπικό επίπεδο:

- Προτεραιότητα 1: Κατανόηση της Διακινδύνευσης από Φυσικές Καταστροφές
- Προτεραιότητα 2: Ενίσχυση της Διακυβέρνησης έναντι της Διακινδύνευσης από Φυσικές Καταστροφές για τη Διαχείριση της
- Προτεραιότητα 3. Επένδυση στην απομείωση της Διακινδύνευσης από Φυσικές Καταστροφές μέσω της Ενίσχυσης της Ανθεκτικότητας

Προτεραιότητα 4. Προώθηση της Ετοιμότητας για Αποτελεσματική Αντιμετώπιση έναντι Φυσικών Καταστροφών και «Βελτιωμένη Ανοικοδόμηση» κατά την Επανόρθωση, Αποκατάσταση και Επανακατασκευή.

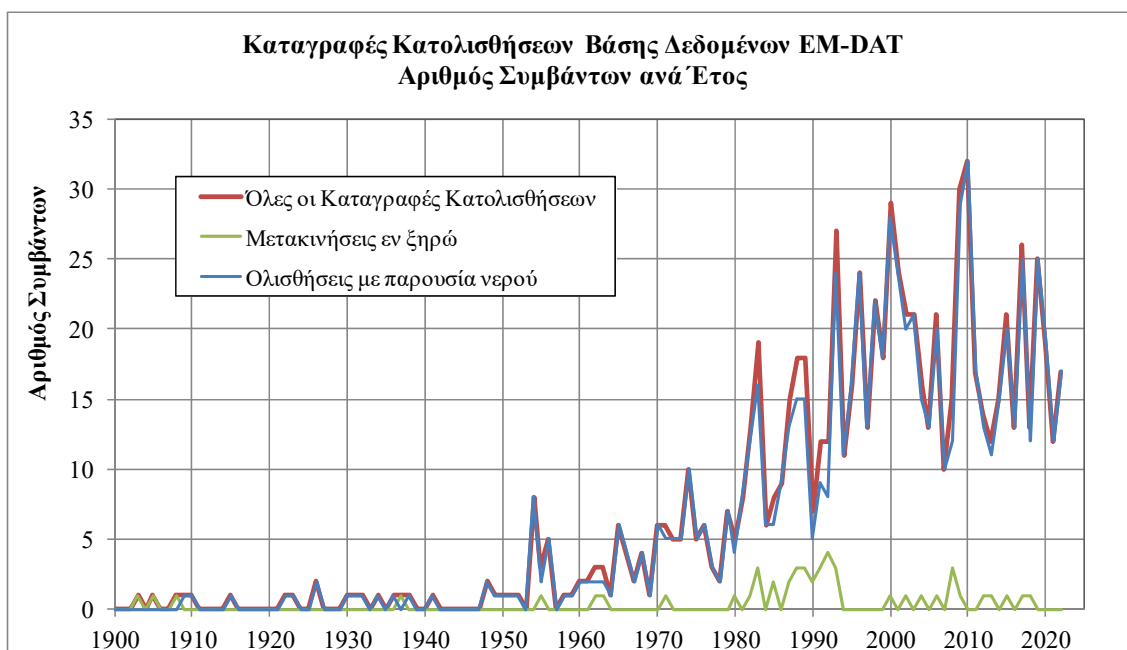
Για κάθε ομάδα προτεραιοτήτων παρουσιάζονται επιμέρους συστάσεις δράσεων σε παγκόσμιο – υπερεθνικό και σε εθνικό – τοπικό επίπεδο.

2.2.2 Καταγραφές Κατολισθητικών Φαινομένων – Βάσεις Δεδομένων

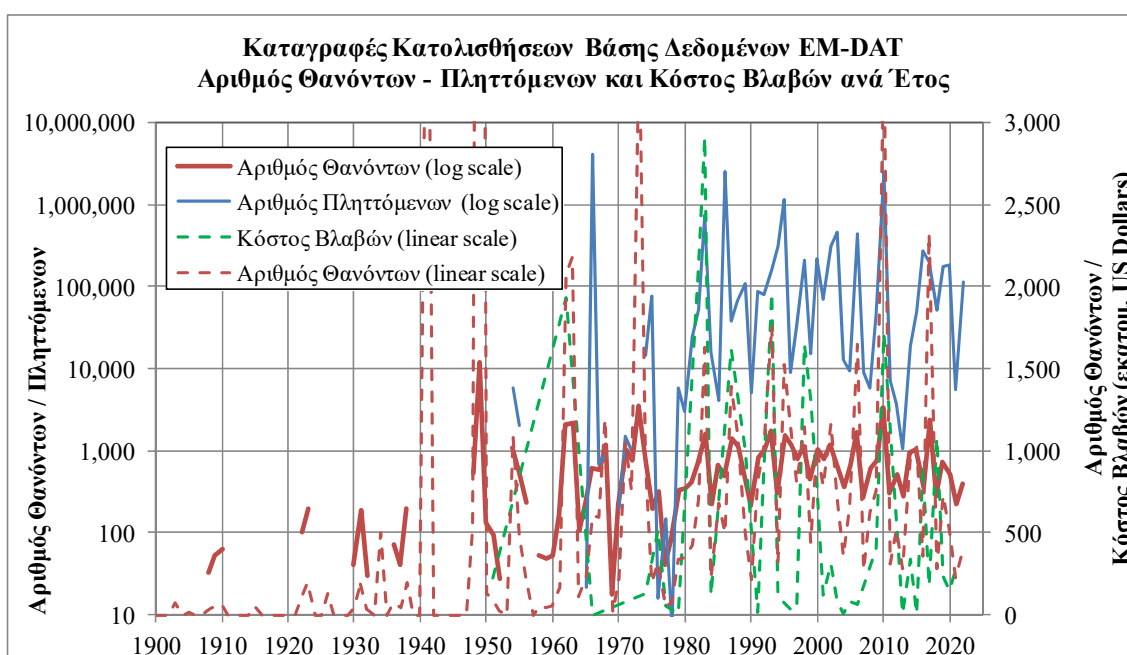
Βάση Δεδομένων EM-DAT

Επικεντρώνοντας στα κατολισθητικά φαινόμενα, οι καταγραφές κατολισθητικών φαινομένων περιλαμβάνονται στις διεθνείς βάσεις δεδομένων ιστορικών φυσικών καταστροφών, με την πλέον διαδεδομένη να είναι η Emergency Events Database (EM-DAT) του Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), που καλύπτει την περίοδο από το 1900 μέχρι σήμερα και στοιχεία του έχουν χρησιμοποιηθεί και στο Σχήμα 10. Για την ένταξη ενός συμβάντος κατολίσθησης στη συγκεκριμένη βάση δεδομένων απαιτείται πλήρωση ενός εκ των ακόλουθων τριών κριτηρίων: (α) πρόκληση τουλάχιστον 10 ανθρώπινων απωλειών, (β) πρόκληση επιπτώσεων σε τουλάχιστον 100 άτομα (τραυματίες, πληττόμενοι ή εκτοπιζόμενοι), ή (γ) χαρακτηρισμός της κατάστασης από κρατικές υπηρεσίες ως έκτακτης ανάγκης και την έκκληση για διεθνή βοήθεια (<https://public.emdat.be/about>), δηλαδή καταγράφονται μόνο τα συμβάντα μεγάλης κλίμακας και/ή με σημαντικές απώλειες.

Στο ακόλουθα διαγράμματα παρατίθενται στοιχεία αναφορικά με τον παγκόσμιο αριθμό συμβάντων κατολισθήσεων (Σχήμα 14) και ανθρώπινων απωλειών από αυτές (Σχήμα 15) στην παραπάνω βάση δεδομένων (κατηγορίες «μετακίνηση εν ξηρώ» και «ολίσθηση με παρουσία νερού»), ενώ σε αυτές δεν περιλαμβάνονται εδαφικές κινήσεις – ολισθήσεις άμεσα συνδεδεμένες με σεισμικά γεγονότα. Είναι προφανής η υποκαταγραφή των παλαιότερων συμβάντων, πολύ μεγάλη έως το 1950 και σταδιακά απομειούμενη έως το 1990, και τη διακύμανση έκτοτε σε εύρος 10-30 συμβάντων που να ικανοποιούν τουλάχιστον ένα από τα παραπάνω κριτήρια ανά έτος. Προφανώς, παρά τα «πληρέστερα» στοιχεία που καλύπτουν μια περίοδο περίπου 40 ετών (μετά το 1990), οι τυχατικές διακυμάνσεις ανά έτος είναι έντονες και δεν είναι δυνατόν να διακριθεί με ασφάλεια από αυτά τα στοιχεία κάποια τάση αύξησης ή μείωσης του αριθμού των συμβάντων (για το ζήτημα αυτό, ωστόσο, υπάρχουν και διαφορετικά στοιχεία από τις λοιπές βάσεις δεδομένων, όπως αναφέρεται στις επόμενες παραγράφους).



Σχήμα 14: Διάγραμμα καταγραφών συμβάντων κατολισθήσεων στη βάση δεδομένων EM-DAT ανά έτος (πηγή δεδομένων <https://public.emdat.be/>, ιδία επεξεργασία)



Σχήμα 15: Διάγραμμα αριθμού θανάτων, πληττόμενων και κόστους βλαβών κατολισθήσεων στη βάση δεδομένων EM-DAT ανά έτος (πηγή δεδομένων <https://public.emdat.be/>, ιδία επεξεργασία)

Αναφορικά με τις ανθρώπινες απώλειες από κατολισθήσεις, αυτές καταγράφονται στη βάση δεδομένων EM-DAT άνω των 1000 κατά μέσο όρο ανά έτος (Σχήμα 15). Τόσο ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών όσο και των πληττόμενων, όπως σημειώθηκε παραπάνω, παραμένει χαμηλός και σχετικά σταθερός, σε σχέση και με τις καταγραφές απωλειών και τις μεγάλες διακυμάνσεις (και κατά περίπτωση απομειώσεις) άλλων φυσικών καταστροφών. Το στοιχείο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ποιοτικά, καθώς οι

κατολισθήσεις χαρακτηρίζονται τοπικής κλίμακας φαινόμενα, με την πληττόμενη περιοχή σε μια μεγάλης έκτασης κατολίσθηση ή σε περίπτωση πολλαπλών κατολισθήσεων σε μια ευρύτερη περιοχή παραμένει κατά τάξεις μεγέθους μικρότερη σε σχέση με την εν δυνάμει πληττόμενη περιοχή σε περιπτώσεις σημαντικών γεγονότων ξηρασίας, πλημμύρας, ακραίας θερμοκρασίας ή σεισμικού συμβάντος, ενώ τα καταγραφόμενα τις τελευταίες δεκαετίες κατολισθητικά μέγα-συμβάντα που να προκαλούν πολλές χιλιάδες ανθρώπινων απωλειών είναι σπάνια, και οι ανθρώπινες απώλειες από αυτά αναφέρονται συχνά στις απώλειες λόγω του σεισμικού ή πλημμυρικού γεγονότος ενεργοποίησης. Συχνά επίσης η εκδήλωση των κατολισθήσεων δεν αφορά αστικές ή περιαστικές, πυκνοκατοικημένες περιοχές, αλλά ορεινές ή αγροτικές περιοχές, που, τουλάχιστον στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού.

Αναφορικά με την πληρότητα και την ακρίβεια της παραπάνω βάσης δεδομένων (EM-DAT), στη βιβλιογραφία (Petley, 2012, Zhang et al., 2014) τεκμηριώνεται σοβαρή υποκαταγραφή και των σύγχρονων (μετά το 1990) κατολισθητικών φαινομένων, τόσο αναφορικά με τον αριθμό των συμβάντων, όσο και με τις καταγραφόμενες ανθρώπινες απώλειες⁴. Δύο προφανείς βασικοί λόγοι εντοπίζονται αφενός στο κριτήριο των τουλάχιστον 10 ανθρώπινων απωλειών ανά καταγραφόμενο συμβάν, που εξαιρεί σημαντικό αριθμό συμβάντων και απωλειών, και αφετέρου την απόδοση πολλών θανάτων από κατολισθήσεις ως συνοδή εκδήλωση άλλης καταστροφής (πλημμύρα, σεισμός κτλ.) στην γενεσιουργό αιτία και όχι στην πραγματική αιτία των ανθρώπινων απωλειών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπολογίζεται ότι το 20-25% των ~87.000 απωλειών από το

⁴ Με γρήγορο έλεγχο των στοιχείων της βάσης δεδομένων EM-DAT, δεν περιλαμβάνεται κανένα συμβάν κατολίσθησης από τον ελληνικό χώρο, που συνιστά έλλειψη, καθώς χωρίς ιδιαίτερη αναζήτηση στη μεν κατολίσθηση του 1963 στο Μικρό Χωρίο Ευρυτανίας καταγράφηκαν 13 ανθρώπινες απώλειες, ενώ ο πληθυσμός στο νυν εγκαταλελειμμένο οικισμό του Ροπωτού Τρικάλων στην απογραφή του 2011, ένα έτος πριν την κλιμάκωση των κατολισθητικών φαινομένων, ήταν 125 άτομα (<https://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous>), αμφότερες πληρώντας τα κριτήρια εισαγωγής.

Για λόγους σύγκρισης σημειώνεται επίσης ότι οι καταγραφές φυσικών καταστροφών στον ελληνικό χώρο στην βάση δεδομένων EM-DAT περιλαμβάνουν 106 συμβάντα (44 σεισμικά γεγονότα, 28 πλημμυρικά γεγονότα, 16 δασικές πυρκαγιές, 9 καταιγίδες, 8 συμβάντα ακραίων θερμοκρασιών και 1 συμβάν ξηρασίας), ενώ είναι ξεκάθαρο ότι υπάρχει σοβαρή υποκαταγραφή των γεγονότων προ του 1980 (που εξηγεί σε ένα βαθμό την απουσία της κατολίσθησης στο Μικρό Χωρίο Ευρυτανίας), καθώς τα συμβάντα που περιλαμβάνονται είναι αναλογικά πολύ λίγα (22 σε 80 χρόνια από το σύνολο των 106 συμβάντων) και αναφέρονται στη συντριπτική τους πλειονότητα σε σεισμικά συμβάντα (18, καθώς και 2 πλημμύρες και 2 καταιγίδες).

Σημειώνεται επίσης ότι στη βιβλιογραφία (Nadim et al., 2006) εκτιμάται ότι το ύψος των αναμενόμενων ετήσιων ανθρώπινων απωλειών από κατολισθήσεις ανέρχεται στις 4.300, όπως προκύπτει μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης και συσχέτισης της κατολισθητικής διακινδύνευσης και του πληθυσμού σε παγκόσμια κλίμακα.

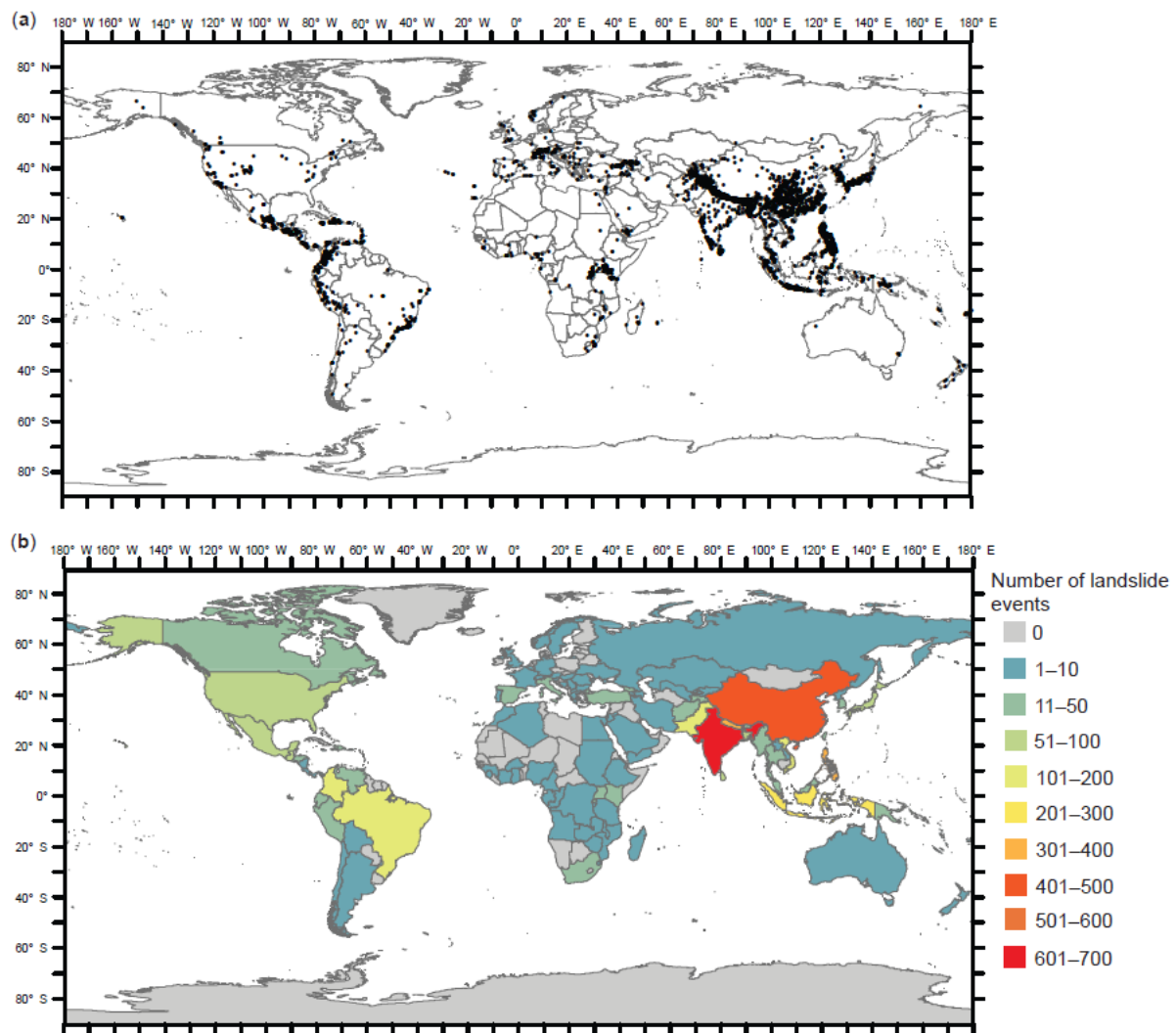
σεισμό του Sichuan στην Κίνα το 2008 προκλήθηκαν από τις κατολισθήσεις που ενεργοποίησε το σεισμικό γεγονός (Zhang et al., 2014, Κεφ. 4.2.5).

Βάση Δεδομένων GFLD

Καθώς οι ελλείψεις της γενικής βάσης δεδομένων EM-DAT ως προς τα κατολισθητικά συμβάντα είναι αντιληπτές, λόγω μη εξειδίκευσης της σε αυτά και της συμπερίληψης μόνον συμβάντων μεγάλης κλίμακας ή / και πολλών απωλειών, η δημιουργία βάσεων δεδομένων αποκλειστικά κατολισθήσεων, με τις όποιες αντικειμενικές δυσκολίες περιλαμβάνει κάτι τέτοιο λόγω του τοπικού χαρακτήρα των συμβάντων, προσφέρει την απαιτούμενη εξειδίκευση και μεγαλύτερη πληρότητα. Αναφέρονται ακολούθως δύο σύγχρονες βάσεις δεδομένων κατολισθήσεων. Η πρώτη βάση δεδομένων (GFLD, <https://shefuni.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=98462998953c4f1fbd7caaa166373f63> - Global Fatal Landslide Database) αναπτύχθηκε αρχικά στο πανεπιστήμιο του Durham και εν συνεχεία στο πανεπιστήμιο του Sheffield και καλύπτει τα έτη 2004-2017 με αναλυτικές καταγραφές κατολισθήσεων με τουλάχιστον ένα νεκρό. Τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των δεδομένων παρουσιάζονται από τους Froude & Petley (2018) και συνοψίζονται ακολούθως:

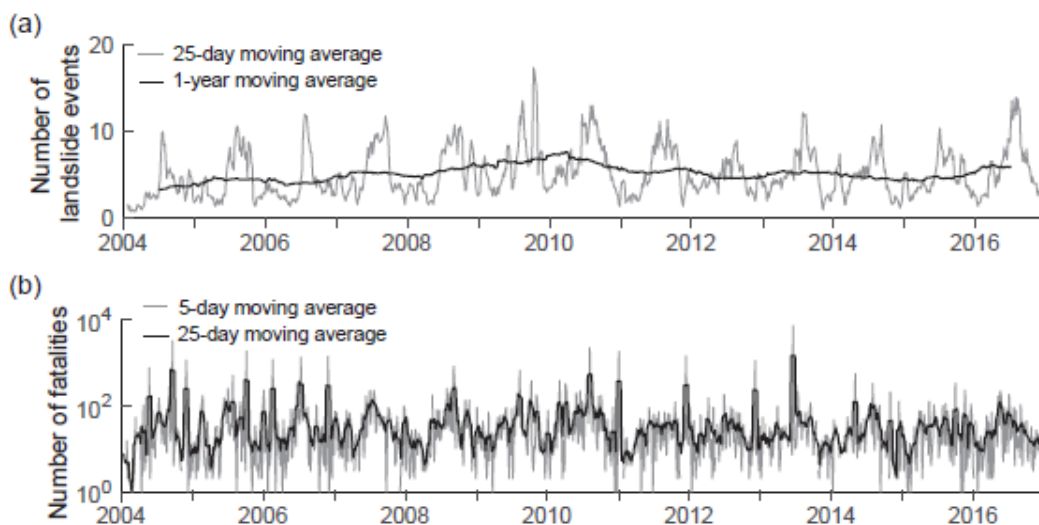
- Από τις καταγραφές, στις οποίες έχουν εξαιρεθεί λόγω αβεβαιοτήτων συμβάντα και απώλειες από κατολισθήσεις λόγω σεισμών, αναδεικνύονται ως ζώνες συστηματικής εκδήλωσης κατολισθήσεων η Κεντρική Αμερική, η Καραϊβική, η Λατινική Αμερική σε ζώνη κατά μήκος των Άνδεων και στην Ανατολική Ακτή της Βραζιλίας (πολιτείες Σάο Πάολο και Ρίο ντε Τζανέιρο), η Ανατολική Αφρική σε χώρες με απότομο ανάγλυφο και τροπικό κλίμα, η Τουρκία, το Ιράν, η περιοχή των Άλπεων και κυρίως η περιοχή της Ασίας στο Τόξο των Ιμαλαΐων, τμήματα της Ινδίας και της νοτιοανατολικής Κίνας, οι χώρες της Ινδοκίνας, η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες, στις οποίες αντιστοιχεί το 75% των καταγραφών (Σχήμα 16). Σε άλλη βιβλιογραφική αναφορά (Nadim et al., 2006) αναφέρονται ως πλέον «επικίνδυνες» χώρες, σε όρους πιθανότητας διακινδύνευσης ανθρώπινων απωλειών ανά έτος ανά 1km² η Κολομβία, το Τατζικιστάν, η Ινδία και το Νεπάλ (τιμή πιθανότητας > 0,01).
- Δεν τεκμηριώνεται συστηματική τάση μείωσης ή αύξησης των ετήσιων ανθρωπίνων απωλειών από κατολισθητικά φαινόμενα, στο χρονικό διάστημα της βάσης δεδομένων (Σχήμα 17). Προκύπτουν ωστόσο στοιχεία αύξησης των καταγεγραμμένων συμβάντων με 1 ανθρώπινη απώλεια (πιθανώς και λόγω μείωσης

υποκαταγραφής των λιγότερο σοβαρών συμβάντων λόγω της διάχυσης της πληροφόρησης μέσω διαδικτύου εντός της δεκαετίας που καλύπτει η βάση δεδομένων) και μείωση των συμβάντων με $64 < \text{θανάτους} \leq 128$.



Σχήμα 16: Γεωγραφική Κατανομή Κατολισθητικών Συμβάντων στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018)

- Ο συντριπτικά επικρατέστερος παράγοντας ενεργοποίησης κατολισθητικών φαινομένων είναι οι βροχοπτώσεις (~80%) και με δεδομένο ότι η συχνότητα και ένταση των βροχοπτώσεων παρουσιάζει εποχικότητα, κατ' αντιστοιχία καταγράφεται εποχικότητα και στην εκδήλωση των κατολισθήσεων, που διαφοροποιείται ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα σε κάθε περιοχή. Αντίστοιχα, κατά την εμφάνιση των φαινομένων El Nino και El Nina (2009-2011), όπου κυρίως κατά το 2010 παρατηρήθηκε σε επίπεδο έτους η εκδήλωση ακραίων και συνεχόμενων βροχοπτώσεων σε ευάλωτες έναντι κατολισθήσεων περιοχές, παρατηρήθηκε αύξηση στις καταγραφές κατολισθητικών συμβάντων.



Σχήμα 17: Εξέλιξη αριθμού κατολισθήσεων και ανθρώπινων απωλειών από αυτές στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018)

- Στις κατολισθήσεις λόγω λοιπών παραγόντων (χαρακτηρίζονται NSNR / non-seismic, non-rainfall triggered), σημαντικά μερίδια των αιτιών αφορούν την εκτέλεση κατασκευαστικών έργων και την εξορυκτική / μεταλλευτική δραστηριότητα, νόμιμη ή παράνομη, αλλά και οι αυθαίρετες εκσκαφές περιαστικών λόφων για αστική επέκταση (hill cutting), στο πλαίσιο της διαδικασίας άναρχης αστικοποίησης, κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής (Σχήμα 18).

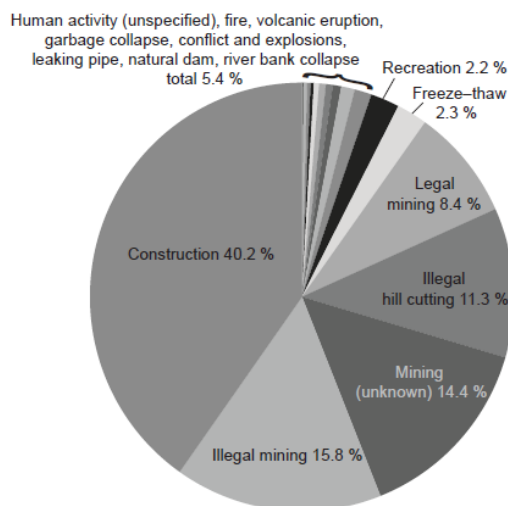


Figure 7. Distribution of triggers of NSNR landslide events (770 events).

Σχήμα 18: Κατανομή Αιτιών Κατολισθήσεων πλην βροχοπτώσεων και σεισμών στη βάση δεδομένων GFLD για τα έτη 2004-2016 (πηγή: Froude & Petley, 2018)

- Η εκδήλωση κατολισθήσεων με τουλάχιστον μια ανθρώπινη απώλεια είναι συχνότερη πλησίον πόλεων και σε χώρες με χαμηλότερο εισόδημα, συγκρίνοντας περιοχές με αυξημένο δυναμικό εκδήλωσης κατολισθήσεων. Τα πιο θανατηφόρα συμβάντα καταγράφονται σε πυκνοδομημένα, φτωχά αστικά τμήματα.
- Και σε αυτή τη βάση δεδομένων διακρίνονται ελλείψεις, με την κυριότερη να αφορά την έλλειψη άμεσης γνώσης των συμβάντων και των συνθηκών εκδήλωσής τους,

καθώς βασική πηγή πληροφόρησης της ομάδας σύνταξης με έδρα στο Ην. Βασίλειο είναι η ερμηνεία από καταγραφές αναφορών τοπικών ειδησεογραφικών δικτύων.⁵

Βάση Δεδομένων GLC

Πρόκειται για δεύτερη βάση δεδομένων αποκλειστικά κατολισθήσεων, που αφορά αντίστοιχη, ομοίως σχετικά περιορισμένη, χρονική περίοδο κάλυψης και περιλαμβάνει μόνο κατολισθητικά φαινόμενα που είχαν τις βροχοπτώσεις ως παράγοντα ενεργοποίησης τους. Το πλεονέκτημα αυτής της βάσης δεδομένων είναι ότι περιλαμβάνει και κατολισθητικά συμβάντα χωρίς ανθρώπινες απώλειες, ενώ η συσχέτιση της εκδήλωσης των συμβάντων με τη βροχόπτωση είναι ακριβέστερη, καθώς χρησιμοποιούνται και αξιολογούνται τηλεπισκοπικά στοιχεία βροχοπτώσεων στην περιοχή κάθε κατολίσθησης, μέσω δορυφορικών δεδομένων της NASA. Τα κύρια ευρήματα και συμπεράσματα από τις καταγραφές της βάσης δεδομένων GLC (Kirschbaum et al., 2015) είναι:

- Η αποτύπωση των συμβάντων σε παγκόσμιο χάρτη επιβεβαιώνει το σχηματισμό παγκόσμιων «ζωνών» εκδήλωσης των περισσότερων και σοβαρότερων κατολισθητικών φαινομένων (Σχήμα 19 και σύγκριση με Σχήμα 16). Τα στοιχεία του χάρτη γενικώς παρουσιάζουν σχετικά καλή συμφωνία με τις απόπειρες σύνταξης παγκόσμιων χαρτών επιδεκτικότητας κατολισθητικών φαινομένων (Κεφ. 3.3), ειδικά σε περιοχές με σχετική πληρότητα καταγραφών (Dandridge et al., 2023).
- Επιβεβαιώνεται η εποχικότητα στην εκδήλωση των κατολισθητικών συμβάντων, σχετιζόμενη με την εποχικότητα της συχνότητας και έντασης των βροχοπτώσεων. Οι καταγραφές των κατολισθήσεων συσχετίστηκαν με τα στοιχεία βροχοπτώσεων, εμπλουτισμένα και με δορυφορικά δεδομένα, και εξεταζόμενα σε επίπεδο αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης σε διάστημα 1, 3 και 7 ημερών. Η συσχέτιση είναι ξεκάθαρη, καθώς το ~60% των κατολισθήσεων εκδηλώνεται σε περιόδους που

⁵ Παράδειγμα λάθους ερμηνείας είναι η καταγραφή στη συγκεκριμένη βάση δεδομένων ως «κατολισθητικού» του συμβάντος στον ποταμό Λούσιο τον 05/2007 με 8 ανθρώπινες απώλειες (πιθανότατα η παρερμηνεία προέκυψε από την αναφορά ότι κάποιες από τις απώλειες προήλθαν από πρόσκρουση των παρασυρμένων από τα νερά του ποταμού ατομών σε βράχια). Πληροφοριακά, η βάση δεδομένων GFLD περιλαμβάνει επίσης τα ακόλουθα συμβάντα από τον ελληνικό χώρο:

- βραχοκαταπτώσεις στα Τέμπη, 17/12/2009, με 1 νεκρό (Σέρτζιο Σιάνι),
- βραχοκαταπτώσεις στη Σαντορίνη (Οία), 23/05/2011, με 1 νεκρό,
- βραχοκαταπτώσεις στο νομό Χανίων (Σφακιά), 24/05/2015, με 1 νεκρό,
- συμβάν πλημμύρας στο νομό Χανίων (Αποκόρωνας), όπου αποδίδεται ως αίτιο θανάτου του 1 από τους συνολικά 4 νεκρούς σε κατολίσθηση,
- 2 συμβάντα αστοχιών σε κατασκευαστικές εργασίες σε Σάμο και Ηράκλειο Κρήτης το 2007.

σημειώνονται πολύ έντονες βροχοπτώσεις (που αντιστοιχούν στο 95^ο εκατοστημόριο των καταγραφών βροχόπτωσης) ή το ~75% των κατολισθήσεων συνδέεται με βροχοπτώσεις στο 90^ο εκατοστημόριο των καταγραφών βροχόπτωσης (Σχήμα 20).

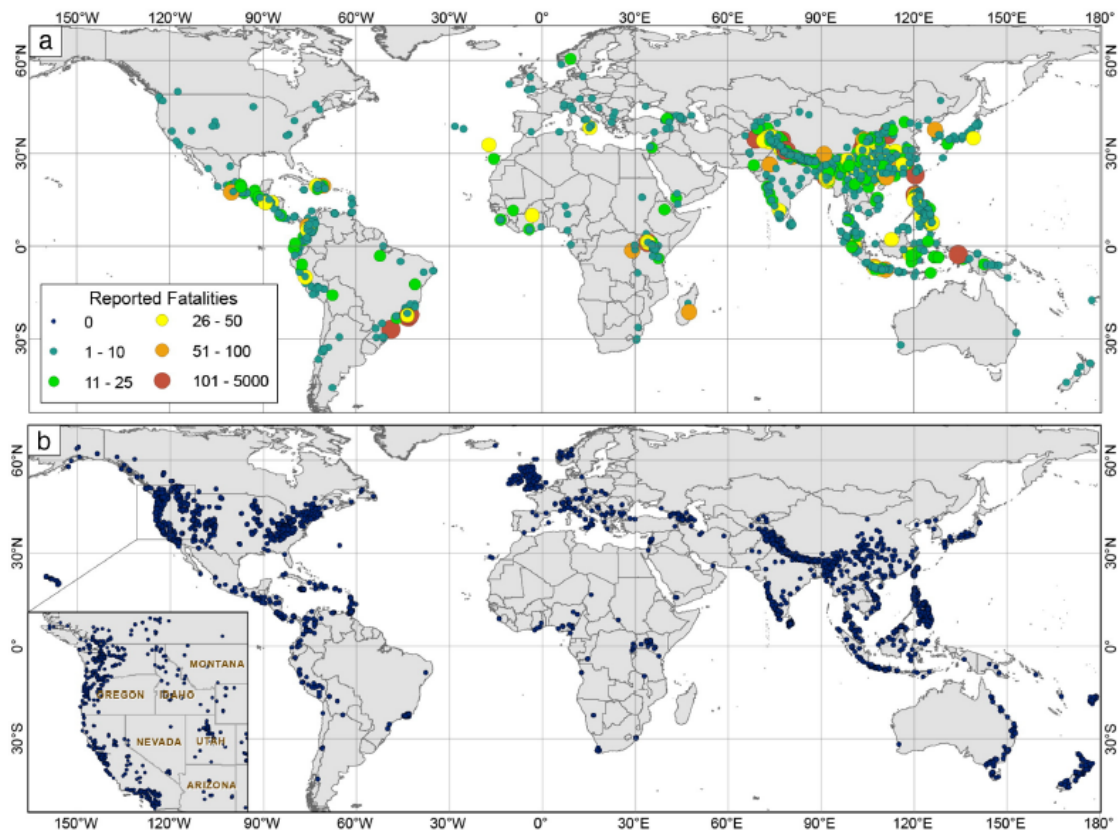


Fig. 1. Global map of reported landslide events from 2007–2013 in the GLC showing a) landslides with fatalities and b) landslides with no fatalities. The size and color of the data point indicates the number of reported fatalities for each event. A subset from the U.S. west coast is shown to highlight the distribution of landslide reports with no fatalities in this area. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Σχήμα 19: Γεωγραφική Κατανομή Κατολισθητικών Συμβάντων με ή χωρίς ανθρώπινες απώλειες στη βάση δεδομένων GLC για τα έτη 2007-2013 (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)

- Επίσης επιβεβαιώνεται η συσχέτιση του ύψους των ανθρώπινων απωλειών με το επίπεδο ανάπτυξης των χωρών (σε επίπεδο κατά κεφαλήν ΑΕΠ, Σχήμα 21). Πέραν αυτού, η πληρότητα των καταγραφών της βάσης δεδομένων ομοίως διαφοροποιείται με κριτήρια γεωγραφικά και επιπέδου ανάπτυξης, καθώς σε αναπτυγμένες χώρες ο λόγος νεκρών προς καταγραφές είναι μικρός και καταγράφεται μεγάλος αριθμός γεγονότων χωρίς απώλειες, ενώ το αντίστροφο παρατηρείται σε αναπτυσσόμενες περιοχές, όπου προφανώς καταγράφονται μόνον τα σοβαρότερα συμβάντα. Επιπλέον προκύπτει αφενός πληρέστερη καταγραφή κατολισθητικών συμβάντων σε αγγλόφωνες χώρες σε σχέση με μη αγγλόφωνες, αφετέρου εύλογα μεγαλύτερος αριθμός καταγραφών πλησίον πυκνοκατοικημένων περιοχών και οδικών δικτύων, λόγω προφανούς υποκαταγραφής συμβάντων σε αραιοκατοικημένες ορεινές

περιοχές. αλλά και της ένδειξης (δεν τεκμηριώνεται επαρκώς στατιστικά στην συγκεκριμένη βάση δεδομένων) του ρόλου των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων ως συνοδευτικός παράγοντας πρόκλησης - ενεργοποίησης κατολισθήσεων.

Table 2
Percentage of landslides exceeding the 50th, 90th, 95th and 99th percentiles based on 1, 3 and 7-day rainfall accumulations within the several weeks surrounding the reported event.

	50th	90th	95th	99th
1-day	97.4%	78.1%	61.3%	27.3%
3-day	96.5%	74.7%	59.5%	27.5%
7-day	96.9%	72.5%	56.3%	25.9%

Σχήμα 20:(Αριστερά) Συσχέτιση καταγραφών με συμβάντα βροχοπτώσεων (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)

Σχήμα 21: (Δεξιά) Συσχέτιση ανθρ. απωλειών/χώρα με κατά κεφαλήν ΑΕΠ (πηγή: Kirschbaum et al., 2015)

- Από σύγκριση των καταγραφών και σε αυτή τη βάση δεδομένων με τα ευρήματα από δορυφορικές εικόνες για συγκεκριμένες περιοχές, επιβεβαιώνεται ότι τα καταγραφόμενα συμβάντα εξακολουθούν να υπολείπονται κατά πολύ των πραγματικών συμβάντων (Dandridge et al., 2023).

Τοπικές Βάσεις Δεδομένων, Σύνθεση και Σημασία

Λόγω του τοπικού χαρακτήρα, της φύσης και ευρείας τυπολογίας των κατολισθητικών συμβάντων, η σύνταξη παγκόσμιων βάσεων δεδομένων παρουσιάζει εγγενή θέματα πληρότητας και ακρίβειας καταγραφών, αλλά και υποκειμενικότητας επί της ακριβούς εκτίμησης των αιτιών, των χαρακτηριστικών και των συνεπειών τους, ειδικά σε σύγκριση με βάσεις δεδομένων άλλων φυσικών καταστροφών (π.χ. κυρίως σεισμικών γεγονότων αλλά και πλημμυρών ή δασικών πυρκαγιών κ.α.), όπου υπάρχουν τα μέσα για αντικειμενικότερες και πληρέστερες καταγραφές. Υπό αυτό το πρίσμα, η σύνταξη βάσεων δεδομένων σε τοπικό επίπεδο, που εκ των πραγμάτων καλύπτουν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα καταγραφών και είναι προσανατολισμένες στο τεχνικογεωλογικό και μορφολογικό περιβάλλον και τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής, κράτους ή ευρύτερης περιοχής, και η αποτύπωση τους σε χάρτες (χάρτες καταγραφών ή πυκνότητας - συχνότητας κατολισθήσεων, Κεφ. 3.3) έχουν ιδιαίτερη και εν γένει μεγαλύτερη σημασία, ειδικά ως απαραίτητο στάδιο για τη σύνταξη και τεκμηρίωση χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας σε μια γεωγραφική ενότητα και εν τέλει στην ανάλυση και αξιολόγηση της διακινδύνευσης έναντι τέτοιων συμβάντων.

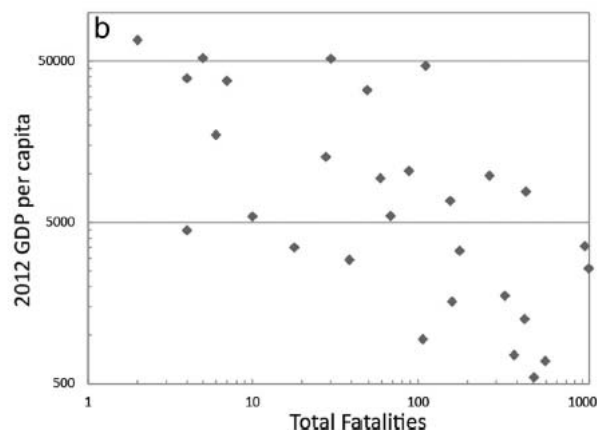
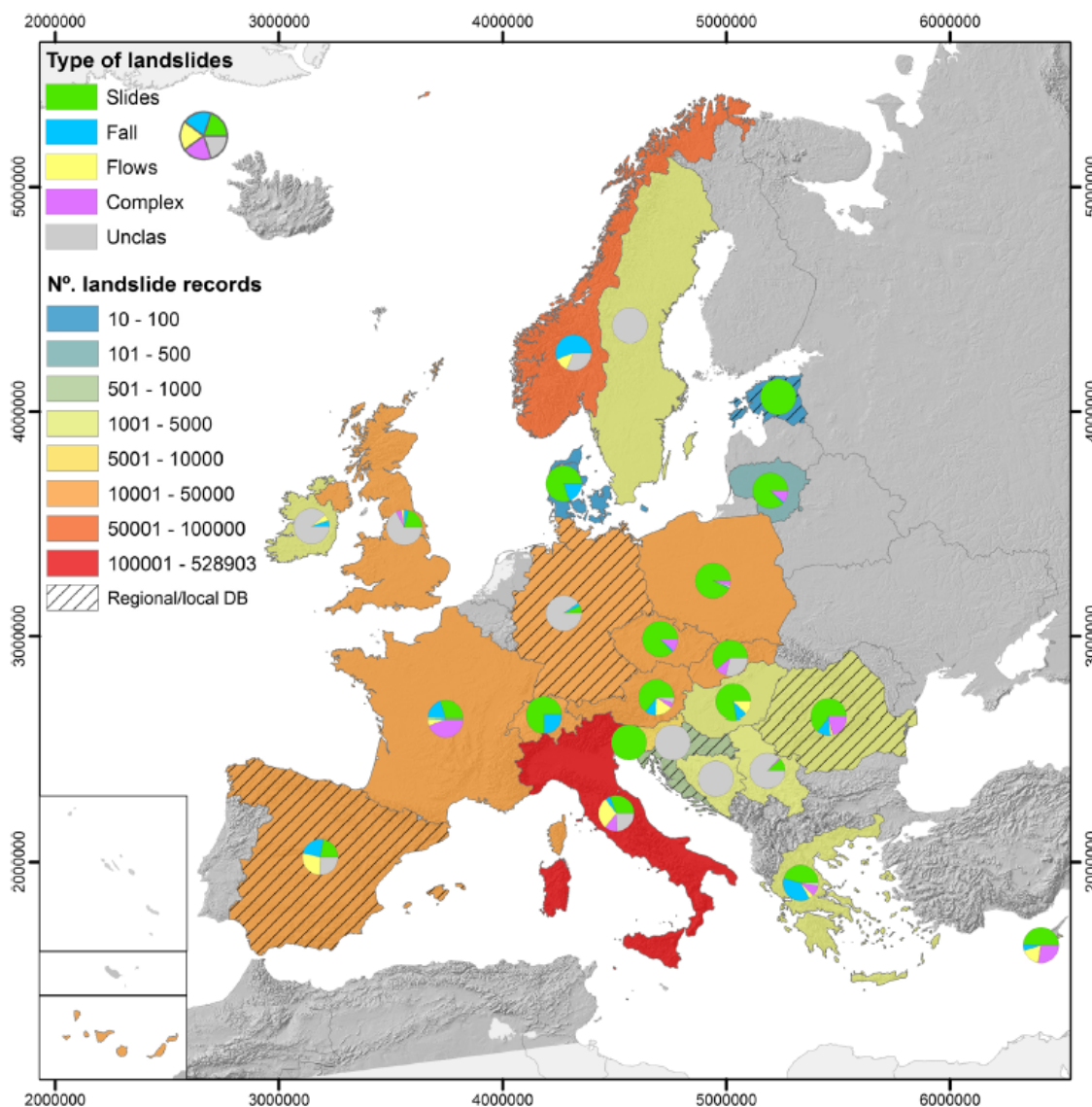


Fig. 4. Evaluation of countries with at least 20 landslide reports over 2007–2013, showing the country's 2012 GDP per capita (2012 USD) versus: a) the percentage of landslide reports with at least one fatality; and b) the total number of fatalities for each country within a log-log plot.



Σχήμα 22: Γεωγραφική απεικόνιση σύνθεσης καταγραφών από Γεωλογικά Ινστιτούτα ευρωπαϊκών χωρών, αριθμός και τύπος συμβάντων (πηγή: Herrera et al., 2018)

Σε ηπειρωτικό – διακρατικό επίπεδο, έχει επιχειρηθεί σύνθεση των δεδομένων τοπικών βάσεων δεδομένων, αξιοποιώντας σε επίπεδο κράτους κυρίως τα στοιχεία των κρατικών γεωλογικών ινστιτούτων ή των περιφερειακών αρχών, τα οποία γενικώς περιλαμβάνουν καταγραφές πολλών δεκαετιών, για τον ευρωπαϊκό χώρο συνήθως στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων, όπως το SafeLand (2012) και το ELSUS για τη σύνταξη διευρωπαϊκού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Κατά τη σύνθεση των δεδομένων επιχειρείται η κατά το δυνατόν ομογενοποίηση των καταγραφών στην Ευρώπη και η ένταξη της πληροφορίας σε σύγχρονο περιβάλλον GIS (Van Den Eeckhaut et al., 2013, Herrera et al., 2018 από όπου και το Σχήμα 22), ενώ έχει γίνει και απόπειρα σύνθεσης ενιαίας ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων (ELS-DAT, Haque et al., 2016, Σχήμα 23).

Ομοίως, η σύνταξη βάσεων δεδομένων με λιγότερα αριθμητικά πλην αναλυτικότερα στοιχεία και ανάλυση του κάθε συμβάντος στη βάση ερευνητικών εργασιών, συνεπώς με ακριβή στοιχεία αναφορικά με την περιοχή και τα όρια εκδήλωσης του κάθε φαινομένου, τα χαρακτηριστικά, τα αίτια και τους μηχανισμούς ενεργοποίησης είναι εξίσου σημαντική. Προς αυτή την κατεύθυνση αναφέρεται η βάση δεδομένων με λίγα ακόμα περιστατικά υπό την αιγίδα της διεθνούς σύμπραξης για τις κατολισθήσεις ICL (International Consortium on Landslides, IPL WEB Database “World Reports on Landslides (WRL), <http://iplhq.org/ls-world-report-on-landslide/>). Επίσης αναφέρεται η πρόσφατη σύνταξη της βάσης δεδομένων Geoland από ερευνητές του ΕΜΠ, με κατολισθήσεις από 30 χώρες (Nefros & Loupasakis, 2022, <http://geoland.metal.ntua.gr/#7/37.949/22.670>).

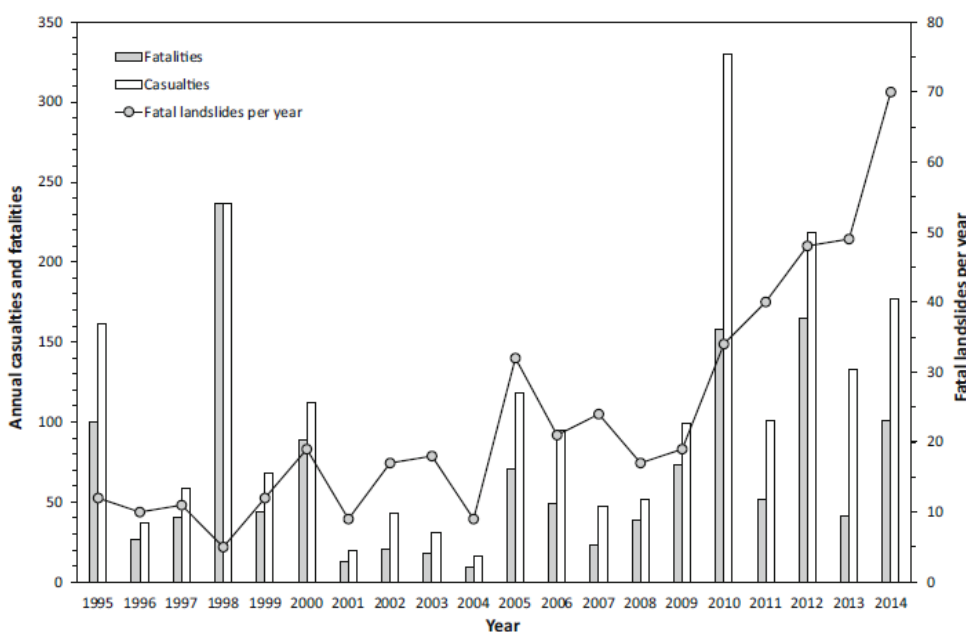


Fig. 2 Annual casualties and fatalities and fatal landslides per year for the studied period 1995–2014

Σχήμα 23: Καταγραφές κατολισθητικών συμβάντων και ανθρώπινων απωλειών στην Ευρώπη από τη σύνθεση τοπικών βάσεων δεδομένων (πηγή: Haque et al., 2016)

Στο Κεφ. 6.2.2 γίνεται αναφορά στις βάσεις δεδομένων του ελληνικού χώρου.

3 Ανάλυση Διακινδύνευσης έναντι Κατολισθητικών Φαινομένων

3.1 Εισαγωγή – Ορισμοί

Η εκτίμηση της διακινδύνευσης (αποτελεί ακριβέστερο όρο έναντι του γενικού όρου κινδύνου και αναφέρεται στην πιθανοτική εκτίμηση του «ρίσκου») ενός συστήματος έναντι οποιαδήποτε καταστροφής αποτελεί σύνθεση των εννοιών της επικινδυνότητας της καταστροφής (ομοίως αποτελεί ακριβέστερο όρο έναντι του γενικού όρου κινδύνου και αναφέρεται στα χαρακτηριστικά και τη συχνότητα εκδήλωσης της καταστροφής), της τρωτότητας του συστήματος και της έκθεσης του συστήματος στην καταστροφή. Σχηματικά ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις, οι οποίες θα γίνουν περισσότερο κατανοητές και θα εξειδικευτούν περαιτέρω μέσω των σχετικών ορισμών, που παρατίθενται ακολούθως, που έχουν ληφθεί από τη σχετικής έκθεση του Γραφείου του ΟΗΕ για τη Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών (UNISDR, 2017b):

$$\text{Συνέπειες Καταστροφής} = (\text{Επικινδυνότητα Καταστροφής}) \times (\text{Έκθεση}) \times (\text{Τρωτότητα}) \quad (1)$$

$$\text{Διακινδύνευση} = (\text{Πιθανότητα Επικινδυνότητας}) \times (\text{Συνέπειες Καταστροφής}) \quad (2)$$

Διακινδύνευση (Risk): Αφορά το ενδεχόμενο απώλειας ανθρωπίνων ζώων, τραυματισμών, καταστροφών ή βλαβών σε πόρους που μπορούν να προκληθούν σε ένα σύστημα, κοινωνία ή κοινότητα σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο, που προσδιορίζεται πιθανοτικά ως συνάρτηση της επικινδυνότητας της καταστροφής, της έκθεσης, της τρωτότητας και της φέρουσας ικανότητας του συστήματος. Η έννοια της διακινδύνευσης δεν είναι μονοσήμαντη και διαφοροποιείται κατά περίπτωση ανάλογα με το κοινωνικο-οικονομικό περιβάλλον στο οποίο υλοποιείται μια επικινδυνότητα και την διαφορετική αντίληψη του κινδύνου από τους ανθρώπους. Ανάλογα με το επίπεδο ή την ένταση της διακινδύνευσης, μπορούν γίνουν οι σχετικές διακρίσεις σε:

- **Αποδεκτό Επίπεδο Διακινδύνευσης:** Το επίπεδο διακινδύνευσης που θεωρείται αποδεκτό και καθορίζεται από τις υφιστάμενες κοινωνικές, οικονομικές, πολιτισμικές, περιβαλλοντικές, τεχνικές κ.α. συνθήκες. Η ποσοτικοποίηση του εισάγεται εμμέσως στον τεχνικό σχεδιασμό των έργων μέσω των σχετικών κανονισμών ή την κοινή πρακτική.
- **Παραμένον Επίπεδο Διακινδύνευσης:** Αφορά το επίπεδο διακινδύνευσης μετά τη λήψη των βασικών μέτρων ανάσχεσης του κινδύνου, και αφορά την παρακολούθηση

και υποστήριξη της φέρουσας ικανότητας του συστήματος, την ετοιμότητα, τα σχέδια ανάγκης, τις πολιτικές και μηχανισμούς προστασίας κτλ.

- Διακινδύνευση έναντι τακτικών καταστροφών: Αφορά τη διακινδύνευση έναντι συχνών συμβάντων σχετικά χαμηλής σημασίας, κυρίως τοπικού χαρακτήρα.
- Διακινδύνευση έναντι έντονων καταστροφών: Αφορά τη διακινδύνευση έναντι σπάνιων συμβάντων υψηλής σημασίας, υπερτοπικού χαρακτήρα.
- Εθνική Διακινδύνευση: Περιλαμβάνει τις διακινδυνεύσεις έναντι τακτικών και έντονων καταστροφών, που απαιτούν εθνικό συντονισμό και/ή συνεπάγονται κρίσιμες επιπτώσεις επί του πληθυσμού.

Εκτίμηση Διακινδύνευσης (Risk Assessment): Ποιοτική ή ποσοτική προσέγγιση για προσδιορισμό της φύσης και της έκτασης της διακινδύνευσης έναντι μιας καταστροφής, με ανάλυση της επικινδυνότητας της και εκτίμηση των συνθηκών έκθεσης και τρωτότητας, που από κοινού θα μπορούσαν να βλάψουν ανθρώπους, περιουσίες, υποδομές, βιοκοινότητες και το περιβάλλον.

Επικινδυνότητα (/ Κίνδυνος) (Hazard): Περιλαμβάνονται οι διεργασίες, φαινόμενα ή ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορεί να προκαλέσουν απώλειες ζωής, τραυματισμούς ή άλλες επιπτώσεις στην υγεία, βλάβες σε περιουσίες και κοινωνικοοικονομικές διαταραχές ή περιβαλλοντική υποβάθμιση και συνδέονται με φυσικές διεργασίες ή φαινόμενα (φυσικές καταστροφές) ή και προκαλούνται πλήρως ή κυρίως από την ανθρώπινη δραστηριότητα (ανθρωπογενείς καταστροφές) ή συνδυασμό αυτών (υβριδικά).

Έκθεση / Στοιχεία σε Διακινδύνευση (Exposure / Elements at risk): Αναφέρεται στην κατάσταση των ανθρώπων, των υποδομών, των κατοικιών, των μέσων παραγωγής και των λοιπών υλικών πόρων σε μια περιοχή ευάλωτη σε μια επικινδυνότητα. Συχνά, και για λόγους ευκολότερης ποσοτικοποίησης της έκθεσης, γίνεται διάκριση μεταξύ του συνόλου των στοιχείων σε διακινδύνευση και της έννοιας της έκθεσης, που προκύπτει μετά από σύνθεση με την πιθανότητα του κάθε στοιχείου σε διακινδύνευση να είναι παρόν κατά την εκδήλωση της επικινδυνότητας.

Τρωτότητα (Vulnerability): Οι συνθήκες που διαμορφώνονται από φυσικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες ή διεργασίας που αυξάνουν την επιδεκτικότητα ενός ατόμου, κοινότητας, πόρου ή συστήματος στις επιπτώσεις από τις επικινδυνότητες. Ο ορισμός της έννοιας της τρωτότητας συζητείται και παρακάτω.

Φέρουσα Ικανότητα (Capacity): Ο συνδυασμός της ισχύος, των χαρακτηριστικών και των πόρων που διατίθενται εντός ενός οργανισμού, κοινότητας ή κοινωνίας για τη διαχείριση και τη μείωση της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας. Η φέρουσα ικανότητα μπορεί να περιλαμβάνει υποδομές, οργανισμούς, ανθρώπινη γνώση και δεξιότητες και συλλογικά χαρακτηριστικά (π.χ. κοινωνικές σχέσεις, ηγεσία, διαχειριστικότητα).

Υποκείμενοι Παράγοντες Διακινδύνευσης (Underlying disaster risk drivers): Διαδικασίες ή συνθήκες, γενικά συσχετιζόμενες με το επίπεδο ανάπτυξης, που επηρεάζουν το επίπεδο διακινδύνευσης από καταστροφές, αυξάνοντας τα επίπεδα έκθεσης και τρωτότητας ή μειώνοντας τη φέρουσα ικανότητα. Περιλαμβάνονται σε αυτούς η φτώχεια, η ανισότητα, η κλιματική αλλαγή και μεταβλητότητα, η ανεξέλεγκτη και ταχεία αστικοποίηση, η απουσία κατανόησης της διακινδύνευσης από καταστροφές στη χωροταξία και την περιβαλλοντική διαχείριση, αλλά και οι δημογραφικές αλλαγές, η απουσία πολιτικής προστασίας, οι κανονιστικές ελλείψεις, η απουσία κινήτρων για ιδιωτικές επενδύσεις μείωσης της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών, οι πολύπλοκες αλυσίδες εφοδιασμού, η περιορισμένη διαθεσιμότητα της τεχνολογίας, η μη βιώσιμη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, οι πανδημίες και οι επιδημίες.

Συνέπειες Καταστροφής (Disaster Impact / Consequences): Είναι το συνολικό αποτέλεσμα ενός συμβάντος καταστροφής, συμπεριλαμβανομένων αρνητικών επιπτώσεων (π.χ. οικονομικές απώλειες) και θετικών συνεπειών (π.χ. οικονομικά κέρδη), και περιλαμβάνει οικονομικές, ανθρώπινες και περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μπορεί να περιλαμβάνει θανάτους, τραυματισμούς, ασθένειες και άλλες αρνητικές επιπτώσεις στη φυσική, ψυχική και κοινωνική υγεία των ανθρώπων.

Οι παραπάνω έννοιες, ειδικά οι παράγοντες της έκθεσης, της τρωτότητας, αλλά και της φέρουσας ικανότητας και των υποκείμενων παραγόντων, είναι δυναμικές και ευμετάβλητες, και συνεπώς μεταβάλλεται αντίστοιχα και το επίπεδο διακινδύνευσης και των συνεπειών καταστροφής κάθε συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Ενδεικτικά αναφέρεται, για την περίπτωση των κατολισθητικών φαινομένων (Lee & Jones, 2004):

- Αναφορικά με τη έκθεση και το χρόνο αυτής, δύο ακραίες περιπτώσεις για να γίνει αντιληπτή η μεταβλητότητας της είναι η ενδεικτική περίπτωση πρανούς με επικρεμάμενα, δυνητικά ασταθή βραχοτεμάχια και αφενός η τυχαία διέλευση ενός

πεζού στη βάση αυτού του πρανούς ή η κατασκευή ενός ημιμόνιμου στεγάστρου ή μόνιμου κτίσματος στη βάση του.

- Αναφορικά με την τρωτότητα, για παράδειγμα στην ενδεικτική περίπτωση αργής μετακίνησης εδαφικής μάζας στα ανάντη ενός κτιρίου, η τρωτότητα είναι διαφορετική για ένα κτίριο από σκυρόδεμα και για ένα ξύλινο κτίριο.

Με βάση τα προαναφερόμενα, η ανωτέρω ποιοτική σχέση (1) περιγράφει ότι οι συνέπειες σε μια περιοχή (C από Consequences) αποτελούν αποτέλεσμα ενός συμβάντος μιας επικινδυνότητας (H από Hazard), της τρωτότητας της περιοχής (V από Vulnerability) έναντι της επικινδυνότητας και της έκθεσης στον κίνδυνο, η οποία αποτελεί σύνθεση των στοιχείων σε διακινδύνευση (E από Elements at risk) και της σχετικής πιθανότητας παρουσίας του κάθε στοιχείου κατά την εκδήλωση του συμβάντος (E_x από Exposure proportion).

$$C = (H) \times (V) \times (E \times E_x) \quad (1\alpha)$$

Για τη μετάβαση από τις συνέπειες (C) στην έννοια της διακινδύνευσης (R) και την με ποσοτική ή ποιοτική προσέγγιση ανάλυση της, υπεισέρχεται επίσης ένας πιθανοτικός συντελεστής (σχέση 2, Σχήμα 24), που αντιστοιχεί στη συχνότητα / πιθανότητα εκδήλωσης της επικινδυνότητας σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο (μετάβαση από (H) σε P(H)). Συνεπώς από σύνθεση των σχέσεων (2) και (1α) προκύπτει η γενική σχέση (2α), η οποία για πολλαπλά στοιχεία έκθεσης και πολλαπλές επικινδυνότητες (π.χ. μια περιοχή με διαφορετικούς τύπους πιθανών κατολισθήσεων) διαμορφώνεται στις σχέσεις (2β) και (2γ), αντίστοιχα:

$$R(\text{Risk}) = P(H) \times (V \times E \times E_x)$$

$$R(\text{Risk}) = \{P_L \times P_{T:L}\} \times \{(V_{D:T}) \text{ ή } V_{\text{prop:T}}\} \times E \times \{P_{S:T}\} \quad (2\alpha)$$

$$R_s = P(H) * \sum^n (V \times E \times E_x) \quad (2\beta)$$

$$R_t = \sum^n R_s \quad (2\gamma)$$

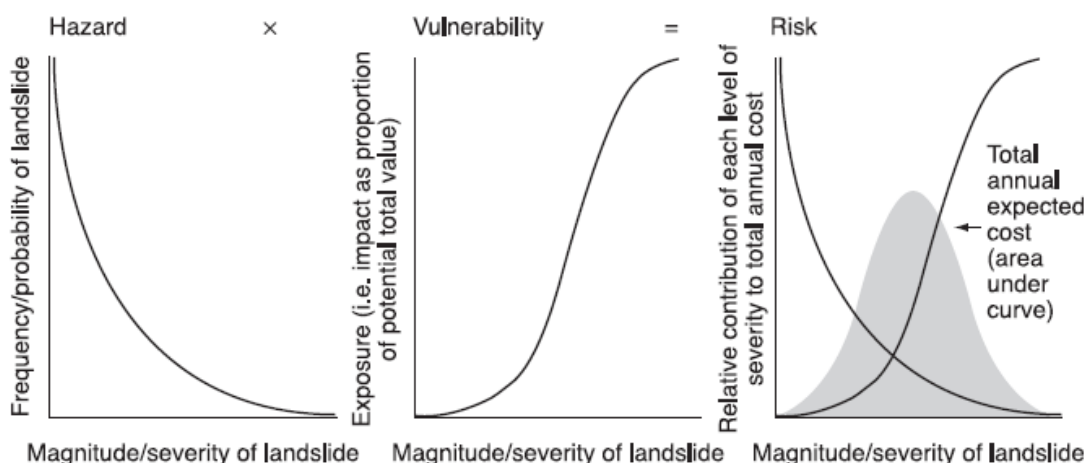


Fig. 1.2. Diagrammatic representation to show how risk is the product of hazard and vulnerability (based on Coburn and Spence, 1992)

Σχήμα 24: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης των εννοιών διακινδύνευσης με πιθανότητα κινδύνου, τρωτότητα και έκθεση (πηγή: Lee & Jones, 2004)

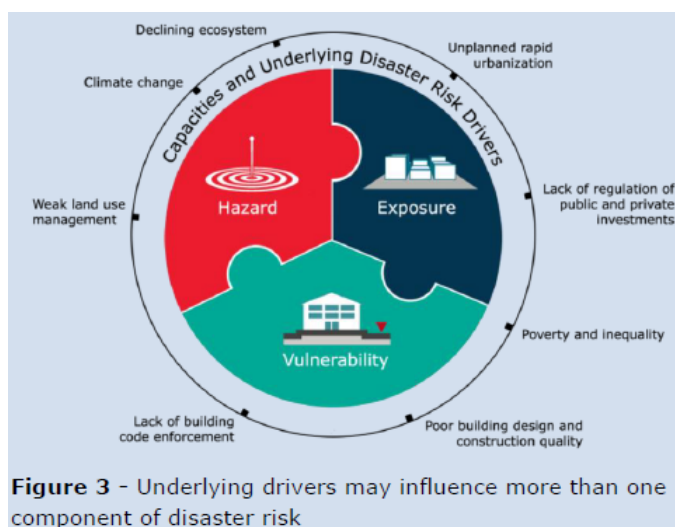
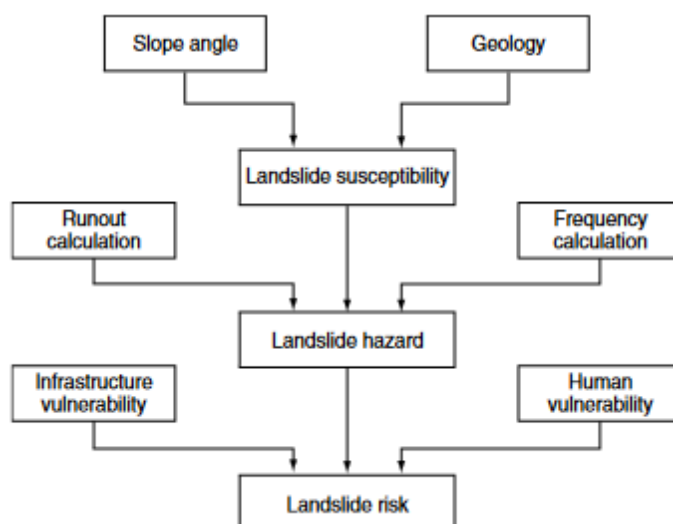


Figure 3 - Underlying drivers may influence more than one component of disaster risk

Σχήμα 25: Σχηματική σύνθεση παραμέτρων διακινδύνευσης και συνεπειών (πηγή UNISDR, 2017)



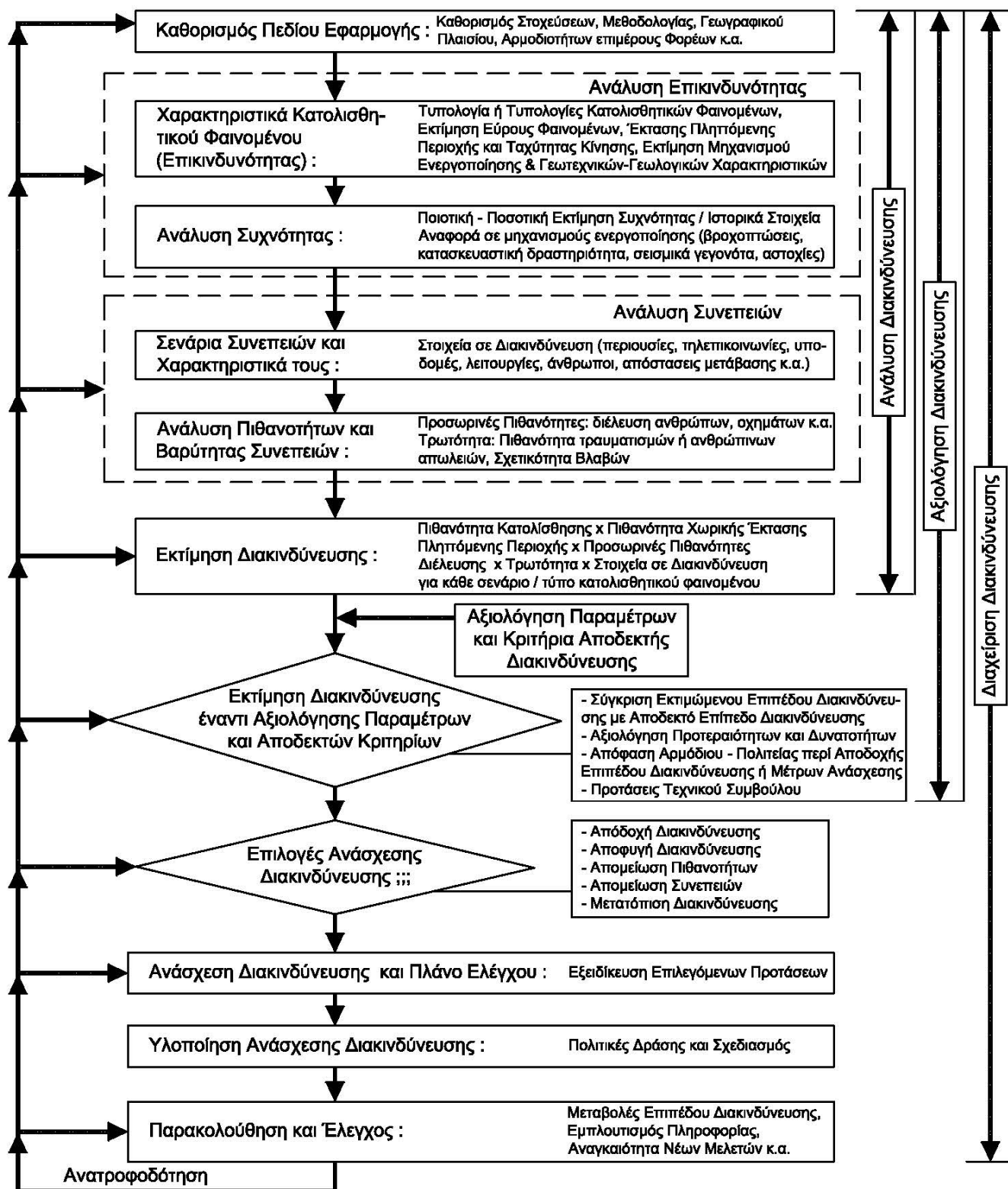
Σχήμα 26: Βασικό Διάγραμμα Ροής Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας, Επικινδυνότητας και Διακινδύνευσης (Petley et al., 2012)

3.2 Ανάλυση Διακινδύνευσης Κατολισθητικών Φαινομένων

3.2.1 Διακριτά Στάδια Ανάλυσης Διακινδύνευσης

Η διαχείριση των κατολισθητικών φαινομένων περιλαμβάνει τα διακριτά στάδια της Ανάλυσης της Διακινδύνευσης, που διαχωρίζεται στην Ανάλυση της Επικινδυνότητας και την Ανάλυση των Συνεπειών και καταλήγει στην ποσοτική / ποιοτική Εκτίμηση της Διακινδύνευσης. Ακολουθούν τα στάδια της Αξιολόγησης της Διακινδύνευσης και της Διαχείρισής της (διαθέσιμες επιλογές, απόφαση, υλοποίηση, παρακολούθηση και έλεγχος).

Τα παραπάνω αποτυπώνονται πιο αναλυτικά στο εποπτικό διάγραμμα ροής στο Σχήμα 27 (συνδυασμός και μετάφραση από Fell et al., 2005, Lee & Jones, 2004, AGS, 2000).



Σχήμα 27: Διάγραμμα Ροής Ανάλυσης, Αξιολόγησης και Διαχείρισης Διακινδύνευσης

3.2.2 Ανάλυση Επικινδυνότητας Κατολισθητικών Φαινομένων

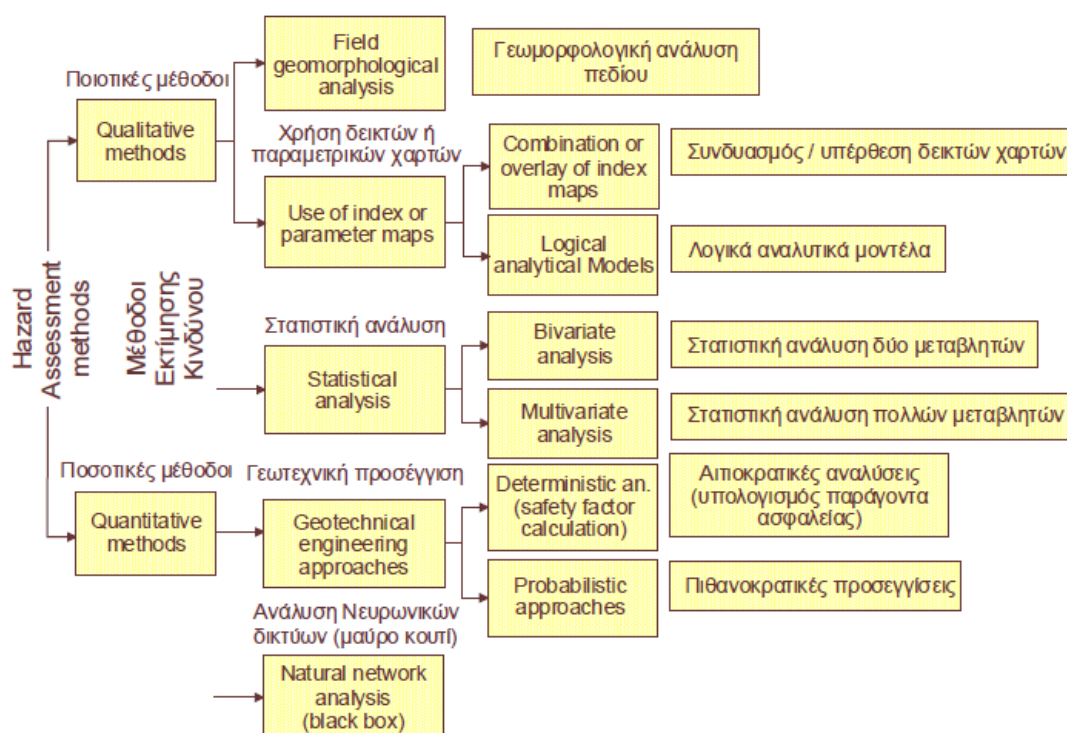
Η ανάλυση της επικινδυνότητας αποτελεί βασικό στάδιο στην ανάλυση και διαχείριση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθητικών φαινομένων και αφορά την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης συμβάντος συγκεκριμένου μεγέθους σε μια ορισμένη περιοχή εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, αφορά δε σχηματικά τον πιθανοτικό παράγοντα $P(H)$ της εξίσωσης (2α) ή το αριστερό διάγραμμα στο Σχήμα 24. Η ανάλυση της επικινδυνότητας περιλαμβάνει τη σύνθεση όλων εκείνων των παραγόντων – αιτιών (εγγενών αιτιών και παραγόντων ενεργοποίησης, Κεφ. 2.1.4) που η συνδυαστική και ταυτόχρονη παρουσία τους σε μία περιοχή μπορεί να οδηγήσει στην εκδήλωση μιας κατολίσθησης σε ένα χρονικό πλαίσιο, περιλαμβάνοντας τόσο χωρική όσο και χρονική διάσταση. Κατά συνέπεια, σε όρους πιθανοτήτων, η $P(H)$ της εξίσωσης (2α) αποτελεί σύνθεση της «χωρικής» πιθανότητας P_L (πιθανότητα χωρικής επέκτασης πληττόμενης περιοχής για κάθε τύπο κατολίσθησης) και της «χρονικής» πιθανότητας $P_{T:L}$.

Χωρική Ανάλυση Επικινδυνότητας / Επιδεκτικότητα Κατολισθήσεων

Κατά το αρχικό στάδιο ανάλυσης της επικινδυνότητας σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 27 απαιτείται η αναλυτική διερεύνηση και κατανόηση των συνθηκών (μορφολογικών, τεχνικογεωλογικών, υδρογεωλογικών, κλιματικών, σεισμικών, στοιχείων βλάστησης, χρήσεων γης κτλ.) που επικρατούν στην περιοχή μελέτης ή αναμένεται να επικρατήσουν μετά από σχεδιαζόμενες αλλαγές (χωρική επέκταση ή μεταβολή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων), ώστε να προσδιοριστεί ο τύπος ή οι τύποι πιθανών κατολισθήσεων στην περιοχή και, σε δεύτερο επίπεδο, οι μηχανισμοί ενεργοποίησης τους, η εκτίμηση της πιθανής διαδρομής και της ταχύτητας της μετακίνησης και να οριστεί η δυνητικά πληττόμενη περιοχή (και αν και κατά πόσο επηρεάζει την περιοχή μελέτης). Ο όρος της επιδεκτικότητας περιγράφει ακριβώς το κατά πόσο υπάρχει το δυναμικό εκδήλωσης κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης, και όχι το χρονικό πλαίσιο (συχνότητα) ή την καταστροφικότητα των δυνητικών συμβάντων.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης διακινδύνευσης, η εκτίμηση της χωρικής πιθανότητας επικινδυνότητας θα πρέπει τελικά να εκφραστεί ποσοτικά (πιθανότητα χωρικής επέκτασης πληττόμενης περιοχής για κάθε τύπο κατολίσθησης / $P_{T:L}$), παρά τις εγγενείς αβεβαιότητες που την καθιστούν και εκ των πραγμάτων σε ένα βαθμό υποκειμενική. Για την ακριβέστερη και κατά το δυνατόν αντικειμενική προσέγγιση απαιτείται αναλυτική διερεύνηση των επικρατουσών συνθηκών στο πεδίο και κατανόηση του μηχανισμού του κάθε πιθανού τύπου κατολίσθησης, με υποβοήθηση από το ιστορικό της περιοχής και

προτάσεις ή εργαλεία της βιβλιογραφίας για τους αντίστοιχους τύπους κατολίσθησης, αλλά και χρήση συγκεκριμένης ποσοτικής ή ημι-ποσοτικής μεθοδολογίας. Σημειώνεται ότι η παραπάνω «χωρική» πιθανότητα, και κατ' αντιστοιχία η έννοια της επιδεκτικότητας, βασίζεται κυρίως στις «εγγενείς» συνθήκες / προδιαθετικούς παράγοντες μιας περιοχής (κλίσεις αναγλύφου, λιθολογία, τεκτονικές δομές κ.α.) («στατικοί παράγοντες»). Η σύνθεση των επιμέρους παραγόντων, με αποτίμηση της βαρύτητας της κάθε μίας και της χωρικής κατανομής τους, δεν είναι δεδομένη και σταθερή και διαμορφώνεται ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 6.2. Προτεινόμενη ταξινόμηση μεθόδων προσδιορισμού κινδύνου κατολισθήσεων κατά Aleotti et al. (1999).

Σχήμα 28: Μεθοδολογίες ανάλυσης επικινδυνότητας κατολισθήσεων (πηγή: Βασιλειάδης, 2010, αρχική αναφορά Aleotti & Chowdhury, 1999)

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί τις τελευταίες δεκαετίες πολλές μεθοδολογίες αναλυτικής προσέγγισης της επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων, οι οποίες υποστηρίζονται από τα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία κάθε εποχής. Οι κυριότερες μεθοδολογίες συνοψίζονται στο Σχήμα 28, με αδρό διαχωρισμό σε ποιοτικές και ποσοτικές μεθόδους. Ωστόσο αυτός ο διαχωρισμός είναι εν πολλοίς ξεπερασμένος, υπό την έννοια ότι οι ποιοτικές μέθοδοι, που καταλήγουν συνήθως σε περιγραφικό χαρακτηρισμό της επικινδυνότητας και είναι σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικές και βασίζονται στην κρίση και εμπειρία κάποιου ή κάποιων τεχνικών συμβούλων, έχουν

πρακτικά υποχωρήσει τις τελευταίες δεκαετίες ή εφαρμόζονται προκαταρκτικά ή συμπληρωματικά. Οι ποσοτικές μεθοδολογίες καταλήγουν σε ποσοτικοποίηση της πιθανότητας της επικινδυνότητας, με «αντικειμενικό» τρόπο, ωστόσο εξαρτώνται από την ποσότητα και την αξιοπιστία των εισαγόμενων δεδομένων στην ανάλυση, ενώ αυτές οι μεθοδολογίες προσαρμόζονται στις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων κάθε εποχής (π.χ. των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών). Από τις μεθοδολογίες που αναφέρονται στο Σχήμα 28, διαδεδομένες είναι οι στατιστικές αναλύσεις, στις οποίες η βαρύτητα των επιμέρους προδιαθετικών παραγόντων (κλίση πρανών, λιθολογία κτλ) προσεγγίζεται μέσω σχετικών συντελεστών, με συσχέτιση της παρουσίας τους και του μεγέθους τους μετά από βαθμονόμηση, με την τυχόν εκδήλωση κατολισθήσεων και την πυκνότητα τους σε μια περιοχή αναφοράς, καθώς και την εξαγωγή κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας για κάθε παράγοντα. Αυτό προϋποθέτει καταρχάς τη σύνθεση μιας βάσης δεδομένων των πραγματικών περιστατικών κατολισθήσεων που έχουν λάβει χώρα στη περιοχή μελέτης σε μορφή χάρτη (inventory maps, Κεφ. 3.3).

Η στατιστική ανάλυση δύο μεταβλητών εξετάζει τον κάθε παράγοντα μεμονωμένα, με σύγκριση του μεγέθους του / της παρουσίας τους ή της απουσίας του στην εκδήλωση των παλαιών κατολισθήσεων, μετά από διαχωρισμό της περιοχής σε επίπεδο καννάβου και εξαγωγή κατάλληλων συντελεστών επιρροής-βαρύτητας (Σχήμα 38). Η ανάλυση πολλών μεταβλητών εξετάζει τους παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων συνδυασμένους από κοινού και σύγκριση της συνδυαστικής παρουσίας τους με την εκδήλωση παλαιών κατολισθήσεων, ώστε να αναιρεθεί κατά το δυνατόν ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της ανάλυσης δύο μεταβλητών, που θεωρεί εξ ορισμού τον κάθε παράγοντα πρόκλησης κατολισθήσεων εντελώς ανεξάρτητο από τους υπόλοιπους (Κορδούλη, 2020). Τα παραπάνω αποτυπώνονται σχηματικά στο Σχήμα 39.

Το θέμα της χωρικής ανάλυσης της επικινδυνότητας, όσον αφορά τους χάρτες ζωνοποίησης και κατολισθητικής επιδεκτικότητας εξετάζεται και στο ακόλουθο Κεφ. 3.3.

Ανάλυση Συχνότητας

Στο πλαίσιο της ανάλυσης συχνότητας προσεγγίζεται, κατά προτίμηση ποσοτικά και όχι μόνο ποιοτικά, η πιθανότητα εκδήλωσης του κάθε ενδεχόμενου τύπου κατολισθήσης ανά έτος (P_L), συμπεριλαμβάνοντας τόσο συμβάντα με πολύ μικρή πιθανότητα εκδήλωσης (αλλά εύλογα μεγάλης καταστροφικότητας), όσο και συχνά συμβάντα με σχετικά περιορισμένες αναμενόμενες βλάβες. Η αρχική εκτίμηση της συχνότητας των φαινομένων

μπορεί να προέλθει από ιστορικά στοιχεία κατολισθήσεων από την περιοχή ή γειτονικές περιοχές με ανάλογα χαρακτηριστικά (χάρτες καταγραφών), ωστόσο αυτή η εκτίμηση ενέχει μεγάλα περιθώρια λαθών και απαιτεί αναλυτικές καταγραφές σε βάθος χρόνου, ενώ αποκλείει πλήρως ευάλωτες περιοχές στις οποίες δεν έχουν συμβεί ή καταγραφεί ιστορικά συμβάντα (Dai et al., 2002). Η όποια πληροφορία από τα ιστορικά στοιχεία κατολισθήσεων θα πρέπει να συνδυαστεί με την κατανόηση των επικρατουσών συνθηκών, των αιτιών και των μηχανισμών ενεργοποίησης, την -εν πολλοίς υποκειμενική- εκτίμηση των τεχνικών συμβούλων, τη χρήση εμπειρικών μεθόδων, αλλά και τη συσχέτιση με τη συχνότητα εκδήλωσης των μηχανισμών ενεργοποίησης («δυναμικοί παράγοντες»: σεισμικό συμβάν συγκεκριμένου μεγέθους ή εδαφικής επιτάχυνσης που αποτελεί «κατώφλι» για τη συνοδευτική εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων κάποιου ή κάποιων τύπων ή βροχόπτωση συγκεκριμένου μεγέθους-έντασης), καθώς και στοιχείων από την παρακολούθηση της περιοχής (μετρήσεις μετακινήσεων, στάθμης υπογείων υδάτων κτλ.), ή λοιπών μεθοδολογιών ή υποβοηθητικών συστημάτων ταξινόμησης – ποσοτικοποίησης.

Hazard Scenario	Applicable Methods (1)
	Natural Slopes
First time slides and shallow existing slides not identified specifically	Hazard zones based on geomorphological mapping and interpretation should identify areas or slope facets more prone to failure. Frequency may be derived from inventories of the historic occurrence of landslides in a part of the landscape. Associations of occurrences with major triggers such as rainfall and seismic events may also form part of the analysis.
Rockfalls, boulder falls and debris flows	Hazard zones based on geomorphological mapping and interpretation should identify areas prone to failure and knowledge of apparent friction angles should indicate travel distances. Frequency may be derived from knowledge of the process rate within hazard zones allowing assessment of recurrence intervals. Associations of occurrences with major triggers such as rainfall and seismic events may also form part of the analysis. Note that process rate may change with time.
Deep slides in rock or soil	Geomorphological mapping of slide and environs should establish extent, geometry, controls and potential area of influence. Movement is likely to reflect piezometric response to rainfall or other source of water. Appropriate soil/rock mechanics principles will assist formulation of a geotechnical model. Frequency may be derived from regional studies of similar occurrences, geological history of site and timing of major movements, records of movement measurements, and/or recurrence interval of triggers such as rainfall patterns or seismic events in conjunction with stability analyses.
Constructed Slopes	
Cuts and fills	Geological and geotechnical mapping and inspection should establish typical performance of similar cuts or fills and information on existing failures. Data collection on the controls on stability (especially defects in rock masses) may provide statistical information for analysis. Engineering assessment of construction quality, performance history, drainage adequacy etc is useful. Frequency may be derived from statistics of similar cuts or fills, recurrence intervals of triggers such as rainfall patterns, or seismic events. Deterministic/probabilistic analyses based on geological and geotechnical data and soil/rock mechanics may be useful for very important cuts or fills in conjunction with other methods.

Note (1): Choice of applicable method may depend on whether a preliminary study or more detailed study is being carried out.

Table 1 Methods for estimating the frequency of landsliding

Σχήμα 29: Ενδεικτική Μεθοδολογία Εκτίμησης Συχνότητας Εκδήλωσης Κατολίσθησης (AGS, 2000)

Στο Σχήμα 29 (AGS, 2000) γίνεται σχετική επιγραμματική αναφορά, με αναφορά στον τύπο του ενδεχόμενου συμβάντος (πρώτη ολίσθηση ή επανενεργοποίηση σχετικά ρηχών ολισθήσεων, βαθιές ολισθήσεις, βραχοκαταπτώσεις, ροές ή αστοχίες τεχνητών πρανών).

Τυπικά από τη σύνθεση της διαθέσιμης πληροφορίας και αξιολόγησης προκύπτουν καμπύλες συσχέτισης της έντασης ολίσθησης (εκφρασμένης συμβατικά μέσω μεγέθους αναφοράς της επιφάνειας της μετακίνησης ή του όγκου των μετακινούμενων υλικών) και της συχνότητας εκδήλωσης, στη μορφή του διαγράμματος στο Σχήμα 30 (σε λογαριθμική κλίμακα και για τους δύο άξονες). Για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κατολισθήσεις αναμένεται η παρουσία κάποιου σημείου καμπής, πέρα από το οποίο η σχέση έντασης – πιθανότητας καθίσταται εκθετική.

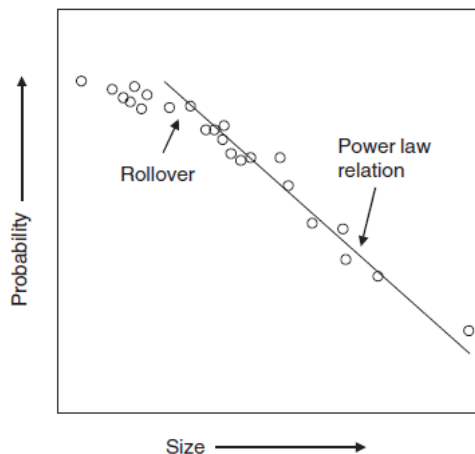


Figure 2. The conceptual relationship between landslide magnitude and frequency. Typically a power law relation is observed for medium and large landslides (the power law relation is a straight line with a negative slope on log-log scale axes), but for smaller landslides a flattening of actual data is common. Smaller landslides are often well described by an exponential curve, and probably relate to physical processes in the landscape.

Σχήμα 30: Τυπική Μορφή σχέσης έντασης κατολισθητικού συμβάντος και πιθανότητας εκδήλωσης (από Evans et al., 2005)

3.2.3 Ανάλυση Συνεπειών Κατολισθητικών Φαινομένων

Ποσοτική Ανάλυση Συνεπειών: Στοιχεία σε Διακινδύνευση και Πιθανότητα Διέλευσης

Η ανάλυση συνεπειών αναφέρεται σε προφανείς περιπτώσεις συνεπειών σε άτομα, περιουσίες και υποδομές. Η ποσοτικοποίηση των συνεπειών (παράμετρος “Ε” στην εξίσωση 2α) κατά την ανάλυση διακινδύνευσης περιλαμβάνει την καταγραφή των στοιχείων σε διακινδύνευση (πληθυσμός που κατοικεί, εργάζεται ή διέρχεται από την περιοχή μελέτης, κτίρια, κατασκευές και υποδομές, οχήματα, περιβαλλοντικά συστήματα, οικονομικές αλλά και κοινωνικές ή πολιτισμικές δραστηριότητες και λειτουργίες). Επιπλέον μπορούν να γίνουν περαιτέρω ή επιμέρους διαχωρισμοί σε υλικές, κοινωνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές ή πολιτισμικές, άμεσες ή έμμεσες (με αναφορά σε μακρύτερο χρονικό διάστημα, ενδεικτικά της τάξης των 5 ετών) ή δευτερογενείς / μακροπρόθεσμες (και με αναφορά στο αποτέλεσμα της εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης), μετρήσιμες ή μη μετρήσιμες συνέπειες (Κεφ. 4.1, 4.2).

Η ποσοτικοποίηση των συνεπειών περιλαμβάνει και την πιθανότητα προσωρινής διέλευσης ($P_{S,T}$) για κάθε στοιχείο και δηλώνει την πιθανότητα παρουσίας του στοιχείου σε κίνδυνο κατά την εκδήλωση του κατολισθητικού συμβάντος. Ενδεικτικά λαμβάνει τιμή μονάδας για κτίριο που βρίσκεται εντός της διαδρομής της μετακίνησης, ή τιμή ίση με το κλάσμα της αναλογίας του χρόνου εργασίας - διαβίωσης ενός ατόμου σε κάποιο κτίριο ή το χρόνο διέλευσης οχημάτων από μια οδό ως προς τον συνολικό χρόνο ενός έτους κτλ. Η πιθανότητα προσωρινής διέλευσης διαφοροποιείται έμμεσα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κατολισθητικού συμβάντος, καθώς κάποιοι τύποι ολίσθησης εκδηλώνονται με απότομη θραύση και κάποιοι με πρόδρομα, προειδοποιητικά φαινόμενα που επιτρέπουν τον έγκαιρο αποκλεισμό της περιοχής, ή αντίστοιχα οι κάτοικοι και τα οχήματα επί της μετακινούμενης μάζας αντιλαμβάνονται την εκδήλωση του συμβάντος και άρα τη διακινδύνευση νωρίτερα σε σχέση με αυτούς στα κατάντη της κίνησης. Επίσης η έγκαιρη προειδοποίηση του πληθυσμού για επερχόμενη κατολίσθηση μέσω κάποιου συστήματος παρακολούθησης που μπορεί να έχει εγκατασταθεί σε με ευάλωτη περιοχή μπορεί επιτύχει μείωση της πιθανότητας προσωρινής διέλευσης του πληθυσμού από την κρίσιμη περιοχή (απαγόρευση διέλευσης ή προληπτική απομάκρυνση κατοίκων), οδηγώντας σε μείωση των συνεπειών.

Ποσοτική Ανάλυση Συνεπειών: Φυσική Τρωτότητα

Η έννοια της τρωτότητας είναι γενικά αφηρημένη με δυσδιάκριτα όρια και πεδία, καθώς, όπως προκύπτει και από τον σχετικό ορισμό που παρατίθεται στο Κεφ. 3.1, αναφέρεται στη βάση φυσικών, κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Κατά συνέπεια μπορεί να αφορά «κακής ποιότητας σχεδιασμό και κατασκευή κτιρίων, ανεπαρκή προστασία στοιχείων της πολιτιστικής κληρονομιάς, ελλείψεις και ανεπάρκειες στην πληροφόρηση και εγρήγορση του κοινού, περιορισμένη επίγνωση των κινδύνων από τους αρμόδιους και έλλειψη μέτρων ετοιμότητας, αδιαφορία για ζητήματα ορθολογικής περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η τρωτότητα ποικίλει στο εσωτερικό μιας κοινότητας και αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου.» (Σαπουντζάκη & Δανδουλάκη, 2016). Υπό αυτό το πρίσμα, σε πρώτο επίπεδο η τρωτότητα αναφέρεται στη φυσική τρωτότητα ενός ατόμου, κοινότητας, κτιρίου, υποδομών ή εγκαταστάσεων και ποσοτικοποιείται με τιμή σε κλίμακα από το 0 (μηδενική απώλεια) έως 1 (ολική απώλεια / θάνατος για άτομα). Οι ενδιάμεσες τιμές αναφέρονται για το κάθε άτομο στην πιθανότητα θανάτου κατά την εκδήλωση της επικινδυνότητας και για τις ακίνητες περιουσίες, υποδομές ή εγκαταστάσεις την αναλογία του ύψους της αναμενόμενης βλάβης ως προς τη συνολική αξία της.

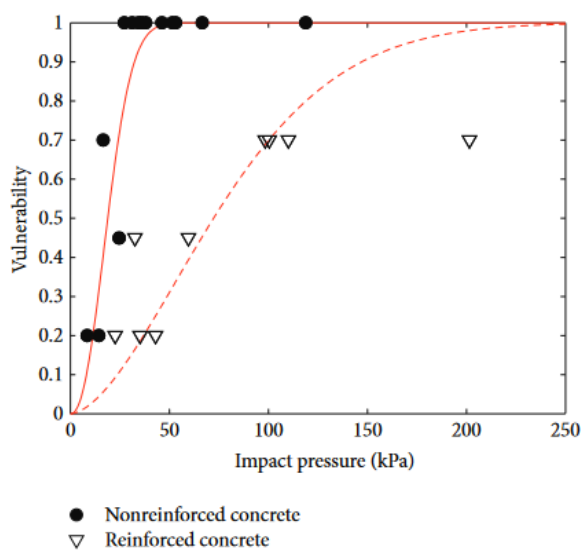


FIGURE 4: Vulnerability curves depending on impact pressure [6].

Σχήμα 31: Προτεινόμενες Τιμές Τρωτότητας Κτιρίων βάσει πίεσης πρόσκρουσης (Kang & Kim, 2006 από Park et al., 2016)

Στην περίπτωση των κατολισθητικών φαινομένων, η έννοια της (φυσικής) τρωτότητας ενός στοιχείου σε κίνδυνο (π.χ. κτιρίου) έναντι βλαβών επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης, όπως τον όγκο των μετακινούμενων υλικών σε σχέση με τον όγκο του κάθε στοιχείου σε κίνδυνο, τη θέση του στοιχείου σε κίνδυνο σε σχέση με τη μετακίνηση (επί της μετακινούμενης μάζας ή στα κατάντη αυτής, το μήκος της μετακίνησης και το μέγεθος της παραμόρφωσης εντός της μετακινούμενης μάζας.

Στο Σχήμα 31 παρουσιάζεται βιβλιογραφική πρόταση συσχέτισης της τρωτότητας κτιρίου βάσει μόνον της πίεσης πρόσκρουσης από την ολισθούμενη μάζα (θεωρούμενη ως αντιπροσωπευτική κρίσιμη παράμετρος που συμπυκνώνει την ενέργεια / ταχύτητα / όγκο υλικών της μετακίνησης) για την περίπτωση ροής κορημάτων και το αν το κτίριο έχει κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα ή άλλο υλικό.

Οι αντίστοιχοι παράγοντες που καθορίζουν τη φυσική τρωτότητα στην περίπτωση μεμονωμένου ατόμου έναντι θανάτου ή τραυματισμού διαφοροποιούνται ελαφρώς και αφορούν τον όγκο, την ταχύτητα και το βάθος της μετακίνησης, καθώς και το αν το άτομο θα καλυφθεί από τα μετακινούμενα υλικά, αν θα παγιδευτεί εντός οχήματος ή κτιρίου, αν το όχημα θα καταστραφεί ή το κτίριο θα καταρρεύσει λόγω των μετακινούμενων υλικών, καθώς και τον τύπο της καταστροφής – κατάρρευσης. Σε περιπτώσεις εγκλωβισμού ατόμου εντός οχήματος ή εντός καταρρέοντος κτιρίου ή ταχύτητας μετακίνησης ολισθούμενης μάζας μεγαλύτερης της ταχύτητας διαφυγής του ατόμου, η τρωτότητα για το μεμονωμένο άτομο είναι πολύ αυξημένη και η σχετική πιθανότητα απώλειας ζωής ($V_{D,T}$) προσεγγίζει τη μονάδα.

Χαρακτηριστικές τιμές για την ποσοτικοποίηση της τρωτότητας για διαφορετικούς τύπους κατολισθητικών φαινομένων για άτομα και κτίρια παρουσιάζονται στο Σχήμα 32 και στο Σχήμα 33.

Table 5.8. Building vulnerabilities to debris flow activity, Montrose, Australia (from Moon et al., 1992; Fell and Hartford, 1997)

Debris flow risk zone	Factors	Intensity*	Vulnerability index (buildings)	Vulnerability index (people)
Extremely high	High velocity High depth	Very High	1.0	0.8
High	High-medium velocity Medium depth	High	0.7	0.5
Medium	High-low velocity Low depth	Medium	0.4	0.1
Low	Medium-low velocity Low depth	Slight	0.1	0.01

Note. *Intensities have been estimated from the classes presented in Table 5.6

Σχήμα 32: Τρωτότητα κτιρίων και ατόμων για ροή κορημάτων (Από Lee & Jones, 2004)

Table 5.9. Vulnerability factors for open hillside landslides in Hong Kong (from DNV Technica, 1996; Halcrow, 1999)

Landslide volume: m ³	Vulnerability (indoor population)	Vulnerability (outdoor population)
50	0.0002	0.03
100	0.006	0.054
500	0.011	0.078
1000	0.026	0.11
2500	0.04	0.15
5000	0.17	0.48

Σχήμα 33: Τρωτότητα ατόμων ανάλογα με όγκο κατολισθήσεως (Από Lee & Jones, 2004)

Ποσοτική Ανάλυση Συνεπειών: Κοινωνικο-Οικονομική Τρωτότητα

Πέραν της φυσικής τρωτότητας που αναφέρεται σε ανεπαρκή προστασία για άτομα, κτίρια ή υποδομές, η έννοια της τρωτότητας έχει ευρύτερη έννοια (οικονομική τρωτότητα, κοινωνική τρωτότητα, περιβαλλοντική τρωτότητα κ.α.), που εντάσσονται στους υποκείμενους παράγοντες διακινδύνευσης που αναφέρονται στους ορισμούς του Κεφ. 3.1. και θα πρέπει επίσης, έστω και σε δεύτερο επίπεδο, να συνυπολογίζονται για την πληρότητα της ανάλυσης διακινδύνευσης. Για την κατά το δυνατόν άρση των ασαφειών στην προσέγγιση της κοινωνικο-οικονομικής τρωτότητας, στη σχετική έκθεση D.2.6 από το πρόγραμμα SafeLand (2012) προτείνεται η ακόλουθη (Πίνακας 7) ομαδοποίηση και θεώρηση σχετικών δεικτών, καθώς και η αντίστοιχη βαθμονόμησή τους.

Πίνακας 7: Προτάσεις Δεικτών Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας (βάσει SafeLand, Deliverable D2.6, 2012)

Δείκτες Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας (προτεινόμενη βαθμονόμηση βαρύτητας δείκτη)		Παρατηρήσεις
Δημογραφικοί Δείκτες	Ηλικία (2)	Τα αυξημένα ποσοστά παιδιών και ηλικιωμένων στον πληθυσμό συνεπάγονται αυξημένη τρωτότητα.
	Αγροτικός Πληθυσμός (2)/ Αστικός Πληθυσμός (1)	Ο αγροτικός πληθυσμός θεωρείται πιο ευάλωτος, λόγω μικρότερων εισοδημάτων και εξαρτήσεων από τους φυσικούς πόρους πέριξ των οικισμών. Ο αστικός πληθυσμός σε πυκνοκατοικημένες περιοχές παρουσιάζει ομοίως σχετικά αυξημένη τρωτότητα λόγω δυσκολιών σε περίπτωση εκκένωσης.

Δείκτες Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας (προτεινόμενη βαθμονόμηση βαρύτητας δείκτη)		Παρατηρήσεις
Οικονομικοί Δείκτες	Προσωπική Περιουσία (2)	Αυξημένη τρωτότητα σε φτωχότερες κατά μέσο όρο κοινότητες
	Τύπος Οικίας (3)	Προφανής ρόλος τυπολογίας οικιών/κατασκευών της κοινότητας (υλικά, ανθεκτικότητα) στην εκτίμηση της τρωτότητας.
Κοινωνικοί Δείκτες	Παρουσία Ευάλωτων ομάδων λόγω γλώσσας ή πολιτιστικών εμποδίων (1)	Αυξημένη τρωτότητα σε περιπτώσεις σημαντικής παρουσίας ευάλωτων ομάδων (μπορεί να περιλαμβάνονται τουρίστες, πρόσφυγες ή πρόσφατα αφιχθέντες μετανάστες)
	Μορφωτικό επίπεδο (1)	Η παρουσία αυξημένου ποσοστού πληθυσμού με μεταλυκειακή εκπαίδευση συνεπάγεται μειωμένη τρωτότητα λόγω καλύτερης ενημέρωσης και αυξημένης επαγρύπνησης.
Δείκτες Ετοιμότητας	Διαθεσιμότητα Ανάλυσης Επικινδυνότητας έναντι κατολισθήσεων (3)	Διαφοροποίηση τρωτότητας ανάλογα με τη διαθεσιμότητα αναλυτικών χαρτών επικινδυνότητας ή το βαθμό ολοκλήρωσης της αξιολόγησης – επεξεργασίας των δεδομένων
	Κανονιστικό Πλαίσιο και Έλεγχος (3)	Βαθμός θεσμοθέτησης μέτρων και τήρησης τους αναφορικά με πολεοδομικά και οικοδομικά θέματα
	Ανταπόκριση σε Έκτακτες Ανάγκες – Πολιτική Προστασία (2)	Βαθμός ετοιμότητας και δυνατότητες επέμβασης συνεργείων διάσωσης (κεντρική παρουσία ή και αποκεντρωμένες μονάδες, θέματα συντονισμού, διάκριση ρόλων, επάρκεια εξοπλισμού και προμηθειών, εκπαίδευση προσωπικού κ.α.)
	Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (2)	Παρουσία ή μη βασικών ή επαρκών συστημάτων προειδοποίησης και συντονισμού τους με την Πολιτική Προστασία.
Δείκτες Ανάνηψης	Ασφαλιστικές Αποζημιώσεις και Ταμείο Βοήθειας Πληγέντων (2)	Παρουσία ή μη αποζημιώσεων και κρατικής οικονομικής αρωγής
	Ποιότητα Ιατρικών Υπηρεσιών (1)	Καλή ή ανεπαρκής αναλογία ιατρικού προσωπικού και εξοπλισμού στους πληγέντες.

Η κοινωνικο-οικονομική τρωτότητα αποτελεί κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί το ύψος των απωλειών μεταξύ των αναπτυσσόμενων και αναπτυγμένων χωρών (Κεφ. 4.2.4), η δε απομείωσή της, αλληλοσχετιζόμενη με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας (Κεφ. 4.2.6) αποτελεί βασική προϋπόθεση των επιπτώσεων των κατολισθητικών φαινομένων.

Ποιοτική Ανάλυση Διακινδύνευσης Κατολισθητικών Φαινομένων

Οι παραπάνω παράγραφοι αναφέρονται στην ποσοτική ανάλυση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθητικών φαινομένων, με χρήση πιθανοτικών προσεγγίσεων και τις εξισώσεις (2α) – (2γ), που αποτελεί και την προτιμητέα και καθιερωμένη πρακτική λόγω αυξημένης αντικειμενικότητας και την βαθμονόμησης της διακινδύνευσης. Πέραν αυτής της προσέγγισης, η ανάλυση μπορεί να γίνει και ποιοτικά ή ημι-ποσοτικά, με χρήση

γενικών επιπέδων χαρακτηρισμών και στοιχειώδους βαθμονόμησης, με χρήση αντίστοιχων εργαλείων πινάκων, διαγραμμάτων ροής ή κατάταξης σε συστήματα ταξινόμησης. Σε μια πολύ απλή περίπτωση (Σχήμα 34 από AGS, 2000, Appendix G) γίνεται σύνθεση της πιθανότητας εκδήλωσης κατολισθήσεως (σχεδόν βέβαιη, πιθανή, ενδεχόμενη, μη πιθανή, σπάνια, αμελητέα) με τις συνέπειες της (π.χ. καταστροφικές, σημαντικές, μέσες, δευτερεύουσες, ασήμαντες), ώστε να προσδιοριστούν πέντε επίπεδα διακινδύνευσης (πολύ υψηλό, υψηλό, μέσο, χαμηλό, πολύ χαμηλό).

Qualitative Risk Analysis Matrix – Level of Risk to Property

LIKELIHOOD	CONSEQUENCES to PROPERTY				
	1: CATASTROPHIC	2: MAJOR	3: MEDIUM	4: MINOR	5: INSIGNIFICANT
A – ALMOST CERTAIN	VH	VH	H	H	M
B – LIKELY	VH	H	H	M	L-M
C – POSSIBLE	H	H	M	L-M	VL-L
D – UNLIKELY	M-H	M	L-M	VL-L	VL
E – RARE	M-L	L-M	VL-L	VL	VL
F – NOT CREDIBLE	VL	VL	VL	VL	VL

Risk Level Implications

Risk Level		Example Implications ⁽¹⁾
VH	VERY HIGH RISK	Extensive detailed investigation and research, planning and implementation of treatment options essential to reduce risk to acceptable levels; may be too expensive and not practical
H	HIGH RISK	Detailed investigation, planning and implementation of treatment options required to reduce risk to acceptable levels
M	MODERATE RISK	Tolerable provided treatment plan is implemented to maintain or reduce risks. May be accepted. May require investigation and planning of treatment options.
L	LOW RISK	Usually accepted. Treatment requirements and responsibility to be defined to maintain or reduce risk.
VL	VERY LOW RISK	Acceptable. Manage by normal slope maintenance procedures.

Note: (1) The implications for a particular situation are to be determined by all parties to the risk assessment; these are only given as a general guide.
(2) Judicious use of dual descriptors for Likelihood, Consequence and Risk to reflect the uncertainty of the estimate may be appropriate in some cases.

Σχήμα 34: Ποιοτική Ανάλυση Διακινδύνευσης (AGS, 2000)

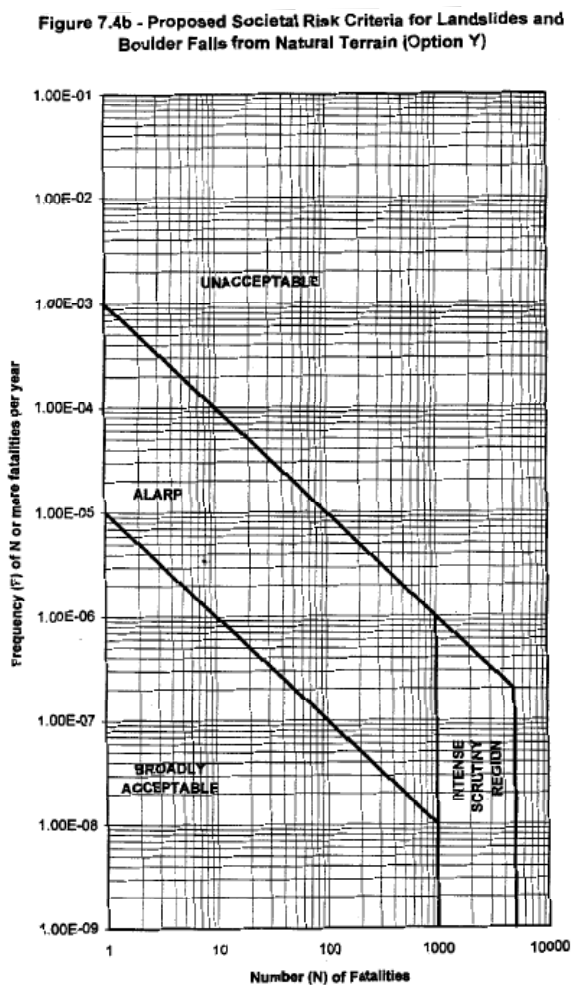
3.2.4 Αξιολόγηση και Διαχείριση Διακινδύνευσης Κατολισθητικών Φαινομένων

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 27, μετά την ανάλυση της διακινδύνευσης ακολουθεί η αξιολόγηση της ανάλυσης, συμπεριλαμβάνοντας ανάλυση ευαισθησίας των παραδοχών, και τελικά σύγκριση της διακινδύνευσης με τις τιμές αποδεκτής και/ή ανεκτής διακινδύνευσης που έχουν τεθεί ως κριτήριο. Σε απλοποιημένους όρους, και για την περίπτωση ανθρώπινων απωλειών, η σύγκριση αφορά το γινόμενο των επιμέρους πιθανοτήτων της εξίσωσης (2α) ανά έτος, χωρίς το μέγεθος της έκθεσης $\{P_L \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V_{D:T}\}$ ή αντίστοιχα το άθροισμα των γινομένων της εξίσωσης (2γ), με τις τιμές που έχουν τεθεί ως κριτήριο (ενδεικτικά στο Σχήμα 35), και οι οποίες δεν είναι γενικής εφαρμογής και σταθερές, αλλά μεταβαλλόμενες. Ενδεικτικά αναφέρεται:

Table 2. AGS (2000) suggested tolerable risk criteria.

Situation	Suggested tolerable risk for loss of life
Existing engineered slopes	10^{-4} /annum person most at risk 10^{-5} /annum average of persons at risk
New engineered slopes	10^{-5} /annum person most at risk 10^{-6} /annum average of the persons at risk

Σχήμα 35: Προτεινόμενες Τιμές Ανεκτής Διακινδύνευσης κατά AGS, 2000 (από Fell et al., 2005)



Σχήμα 36: Προτεινόμενες Τιμές αποδεκτής Διακινδύνευσης για κοινότητες κατά GEO Report 75, 1998

- Το επίπεδο ανεκτής διακινδύνευσης γενικά είναι υψηλότερο σε οικονομικά ασθενή άτομα, χωρίς πολλές δυνατότητες δράσεων, σε άτομα που εργάζονται σε επισφαλές περιβάλλον (π.χ. μεταλλεία), όπως επίσης και σε περιπτώσεις υφιστάμενων πρανών έναντι πρανών υπό διάνοιξη.

- Αποδεκτή χαρακτηρίζεται η διακινδύνευση που αποδέχεται το κάθε άτομο και συνήθως είναι αρκούντως χαμηλή, ώστε να μην απαιτούνται ιδιαίτερα μέτρα αντιμετώπισης έναντι της διακινδύνευσης, ενώ ανεκτή χαρακτηρίζεται η διακινδύνευση με την οποία μπορεί να διαβιώσει μια κοινωνία, ωστόσο είτε αυτή η διακινδύνευση έχει τεθεί υπό παρακολούθηση ή είναι σκόπιμο να απομειωθεί. Το μέγεθος της αποδεκτής διακινδύνευσης είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους χαμηλότερο από το μέγεθος της ανεκτής διακινδύνευσης. Η πρόσληψη του επιπέδου αποδεκτής ή ανεκτής διακινδύνευσης είναι για κάθε άτομο υποκειμενική και εξαρτάται από παράγοντες όπως οι διαθέσιμοι πόροι απομείωσης της, το αν υπάρχουν εναλλακτικές οίκησης, το εισόδημα, η προσήλωση του στην περιουσία, τυχόν ασφάλιση της περιουσίας, η ηλικία, ο χαρακτήρας, ενδεχόμενη προγενέστερη εμπειρία από κατολισθητικά φαινόμενα, το κανονιστικό πλαίσιο ή το αν η ανάλυση διακινδύνευσης προσλαμβάνεται ως αξιόπιστη (Fell et al., 2005).

- Το επίπεδο διακινδύνευσης έναντι μιας επικινδυνότητας (των κατολισθήσεων εν προκειμένω) δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το αντίστοιχο επίπεδο διακινδύνευσης έναντι λοιπών καθημερινών στοιχείων επικινδυνότητας.

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται προτεινόμενα επίπεδα ανεκτής διακινδύνευσης κατά τις αυστραλιανές οδηγίες AGS (2000), ενώ στο Σχήμα 36 η αντίστοιχη πρόταση για κοινότητες (πολλαπλές ανθρώπινες απώλειες) από τις αντίστοιχες οδηγίες του Χονγκ – Κονγκ (GEO Report No 75, 1998).

Μετά την αξιολόγηση του επιπέδου της διακινδύνευσης έπεται η διαχείρισή της, που ξεκινάει καταρχάς από το πόρισμα αν το επίπεδο διακινδύνευσης είναι ανεκτό ή και αποδεκτό, χωρίς καμία απαίτηση μέτρων ανάσχεσης ή παρακολούθησης, ή όχι, με αναγκαιότητα λήψη μέτρων. Η διαχείριση της διακινδύνευσης αποτελεί επαναληπτική διαδικασία με στοχεύσεις που μπορεί να αφορούν ή να εστιάζονται στην απομείωση της επικινδυνότητας, την απομείωση της τρωτότητας ή την απομείωση των στοιχείων σε διακινδύνευση (Σχήμα 37). Πιο αναλυτικά αφορά:

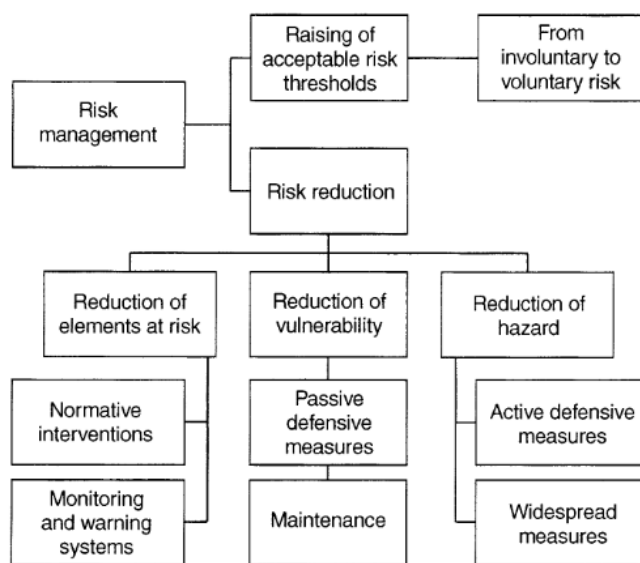


Fig. 16
Landslide risk management (after Aleotti and Polloni 1998c)

Σχήμα 37: Διάγραμμα ροής διαχείρισης / απομείωσης της διακινδύνευσης (Aleotti & Chowdhury, 1999).

- Η απομείωση της επικινδυνότητας υλοποιείται (i) είτε μέσω της μείωσης της πιθανότητας εκδήλωσης συμβάντων (μείωση μεγέθους πιθανότητας P_L), π.χ. με λήψη ενεργών μέτρων αποστράγγισης ή υποστήριξης, διαμόρφωση ηπιότερης γεωμετρίας πρανών, επιφανειακή προστασία, ελεγχόμενη απομάκρυνση επισφαλών βραχοτεμαχών κ.α. (ii) είτε μέσω της απομείωσης της πιθανότητας χωρικής επέκτασης της μάζας της κατολίσθησης στην περιοχή (μείωση μεγέθους πιθανότητας $P_{T,L}$), π.χ. με κατασκευή φρακτών ανάσχεσης βραχοκαταπτώσεων ή συγκράτησης κορημάτων ή ελεγχόμενων λεκανών απόθεσης κ.α.
- Η απομείωση της τρωτότητας $V_{D,T}$ για τα άτομα δεν είναι προφανής και μπορεί να επιτευχθεί έμμεσα, είτε με ενίσχυση ή συντήρηση των κατασκευών και των υποδομών, είτε με τα μέτρα απομείωσης της πιθανότητας χωρικής επέκτασης.

- Η απομείωση των στοιχείων σε διακινδύνευση μπορεί να αφορά τη μείωση της πιθανότητας προσωρινής διέλευσης του ατόμου από την πληττόμενη περιοχή (μείωση μεγέθους πιθανότητας $P_{S:T}$), π.χ. με άμεσο – έγκαιρο αποκλεισμό της περιοχής με χρήση συστημάτων παρακολούθησης – προειδοποίησης που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, αλλαγή των χρήσεων γης ή επαναχωροθέτηση λειτουργιών με αυξημένη επισκεψιμότητα μακριά από επισφαλείς ζώνες κ.α.
- Άλλες επιλογές διαχείρισης της διακινδύνευσης μπορεί να αφορούν την απόρριψη / εγκατάλειψη μιας περιοχής και επιλογή νέας, την ασφάλιση της περιοχής έναντι κατολισθήσεων ή την διενέργεια συμπληρωματικών ερευνών για περαιτέρω εξειδίκευση της διακινδύνευσης.

Τελικά απαιτείται η υλοποίηση των προτεινόμενων δράσεων, η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από παρακολούθηση και αξιολόγηση της μεταβολής του επιπέδου διακινδύνευσης, με προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

3.3 Σύνταξη Κατολισθητικών Χαρτών, Τύποι και Κλίμακες

Οι χάρτες με διαφορετικό περιεχόμενο (καταγραφές κατολισθήσεων, επιδεκτικότητας, επικινδυνότητας, διακινδύνευσης) και διαφορετικής κλίμακας (υπερεθνικής, εθνικής, περιφερειακής ή τοπικής) αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία για την σύνθεση και της πληροφορίας και την αλληλοσυσχέτιση των διαφορετικών παραγόντων σε διαφορετικές φάσεις της ανάλυσης της διακινδύνευσης, αλλά και για την παραστατική και εύληπτη παρουσίαση των πορισμάτων αναφορικά με θέματα ενημέρωσης του κοινού ή ένταξης της κατολισθητικής διακινδύνευσης ως παράγοντα στον χωροταξικό – πολεοδομικό σχεδιασμό (van Westen et al., 2008).

Ο τύπος και η ενσωματωμένη πληροφορία στους κατολισθητικούς χάρτες ακολουθεί τη σταδιακή πορεία της ανάλυσης διακινδύνευσης (Cascini et al., 2005). Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τη σύνταξη καταλόγου με τις καταγραφές των ιστορικών κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης (inventory) που ιδεατά περιλαμβάνουν πληροφορίες για την θέση, την κατάταξη, των όγκο, την ενεργότητα και την ημερομηνία εκδήλωσης τους (AGS, 2007), και τη σύνταξη χαρτών αποτύπωσης των ιστορικών συμβάντων (inventory maps). Στις καταγραφές περιλαμβάνονται γνωστές καταγεγραμμένες κατολισθήσεις, αλλά και ιστορικές κατολισθήσεις που μπορούν να αναγνωριστούν εκ των υστέρων από επιτόπου έρευνα και αποτύπωση (για εστιασμένες περιοχές), αλλά και ερμηνεία αεροφωτογραφιών,

σύγκριση τοπογραφικών αποκλίσεων ή άλλων σύγχρονων μεθόδων. Η πληροφορία που εντάσσεται σε αυτούς τους χάρτες, που -στο βαθμό που είναι πλήρης- προσφέρει μια πρώτη ζωνοποίηση της επικινδυνότητας, ενώ με κατάλληλη επεξεργασία οι χάρτες μπορούν να εξελιχθούν σε χάρτες της χωρικής πυκνότητας των κατολισθήσεων.

Σε δεύτερο επίπεδο μπορούν να συνταχθούν χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Susceptibility maps), που με αφετηρία τους χάρτες αποτύπωσης των ιστορικών κατολισθήσεων και επιπλέον χωρική ανάλυση (με αποτύπωσή τους σε επιμέρους χάρτες) του ρόλου και της βαθμονόμησης της σημασίας των βασικών εγγενών και προδιαθετικών παραγόντων που καθορίζουν την εκδήλωση των φαινομένων (ενδεικτικά μορφολογία, λιθολογία, υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, χρήσεις γης κ.α., Κεφ. 2.1.4), αποτυπώνουν τις επιδεκτικές σε κατολισθητικά φαινόμενα περιοχές και τις διαβαθμίζουν ως προς την εκτίμηση της έντασης των φαινομένων. Η σύνθεση των χαρτών επιδεκτικότητας με την εκτίμηση συχνότητας των κατολισθητικών φαινομένων, μετά από συσχέτιση με τα στοιχεία των ιστορικών καταγραφών και συνυπολογισμό της ιστορικής ή εκτιμώμενης συχνότητας εμφάνισης / περιόδου επαναφοράς των παραγόντων ενεργοποίησης (σεισμικό γεγονός ή βροχόπτωση) συγκεκριμένης έντασης (και διάρκειας) οδηγεί στους χάρτες επικινδυνότητας (hazard maps). Τελικά, σύζευξη αυτών με τη χωρική ανάλυση και αποτύπωση των στοιχείων σε διακινδύνευση, της τρωτότητας αλλά και της πιθανότητας προσωρινής διέλευσης, δηλαδή των εκτιμώμενων συνεπειών, καταλήγει στους χάρτες διακινδύνευσης (risk maps).

Ακολούθως παρουσιάζονται παραστατικά σχήματα της διαδικασίας σύνταξης των χαρτών, όπου στο Σχήμα 38 παρουσιάζεται η σύνταξη χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης δύο μεταβλητών και στο Σχήμα 39 η σύνταξη χάρτη επικινδυνότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών.

Το στάδιο της ανάλυσης διακινδύνευσης και το επίπεδο της ζωνοποίησης χαρακτηρίζεται προκαταρκτικό, ενδιάμεσο ή προχωρημένο (AGS, 2007 και Fell et al., 2008), ανάλογα με το βαθμό τήρησης όλων των παραπάνω, την πληρότητα και ακρίβεια των εισαγόμενων δεδομένων ή το επίπεδο της επεξεργασίας και της αποτύπωσης, προσαρμοζόμενα ανάλογα με την κλίμακα σύνταξης του χάρτη (εστιασμένη περιοχή με μεγάλη κλίμακα συνήθως 1:5.000 ή και μικρότερη, μεγάλη κλίμακα ευρύτερης περιοχής, γενική περιοχή με μέση κλίμακα τυπικά 1:25.000 – 1:50.000, ή περιφερειακή – εθνική περιοχή με μικρότερη κλίμακα). Η κλίμακα στην οποία διενεργείται η κατολισθητική ζωνοποίηση, σε

οποιαδήποτε φάση από την απλή αποτύπωση των ιστορικών έως την προχωρημένη ανάλυση διακινδύνευσης, ορίζει τις στοχεύσεις και εφαρμογές της (π.χ. εστιασμένες προβληματικές περιοχές ή ευάλωτοι οικισμοί και λειτουργίες, τοπικές έως υπερτοπικές υποδομές και έργα έως υποστήριξη κεντρικών πολιτικών δράσεων και πληροφόρηση κοινού, Σχήμα 40).

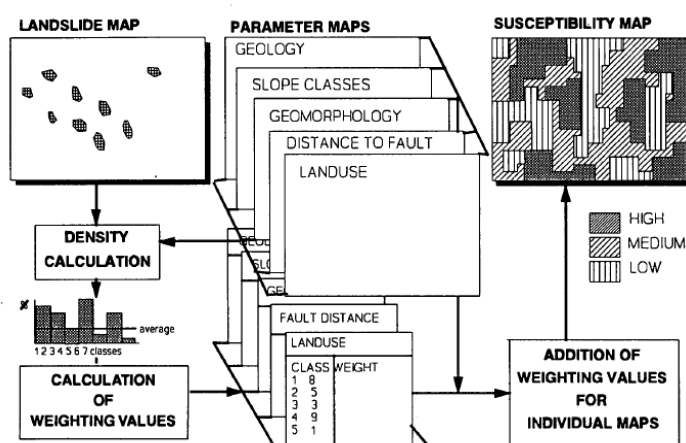


FIGURE 8-17
Use of GIS for
bivariate statistical
analysis.

Σχήμα 38: Στάδια Σύνθεσης Χάρτη Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης δύο μεταβλητών (Soeters & van Westen, 1996)

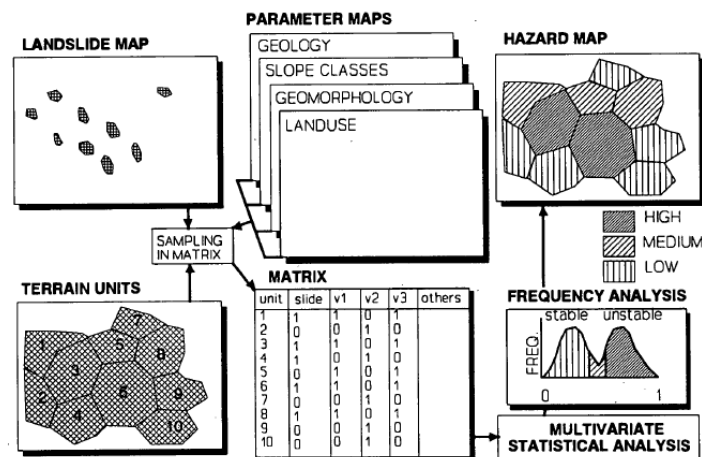


FIGURE 8-18
Use of GIS for
multivariate
statistical analysis.

Σχήμα 39: Στάδια Σύνθεσης Χάρτη Επικινδυνότητας με χρήση στατιστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών (Soeters & van Westen, 1996)

Table 3: Landslide zoning mapping scales and their application.

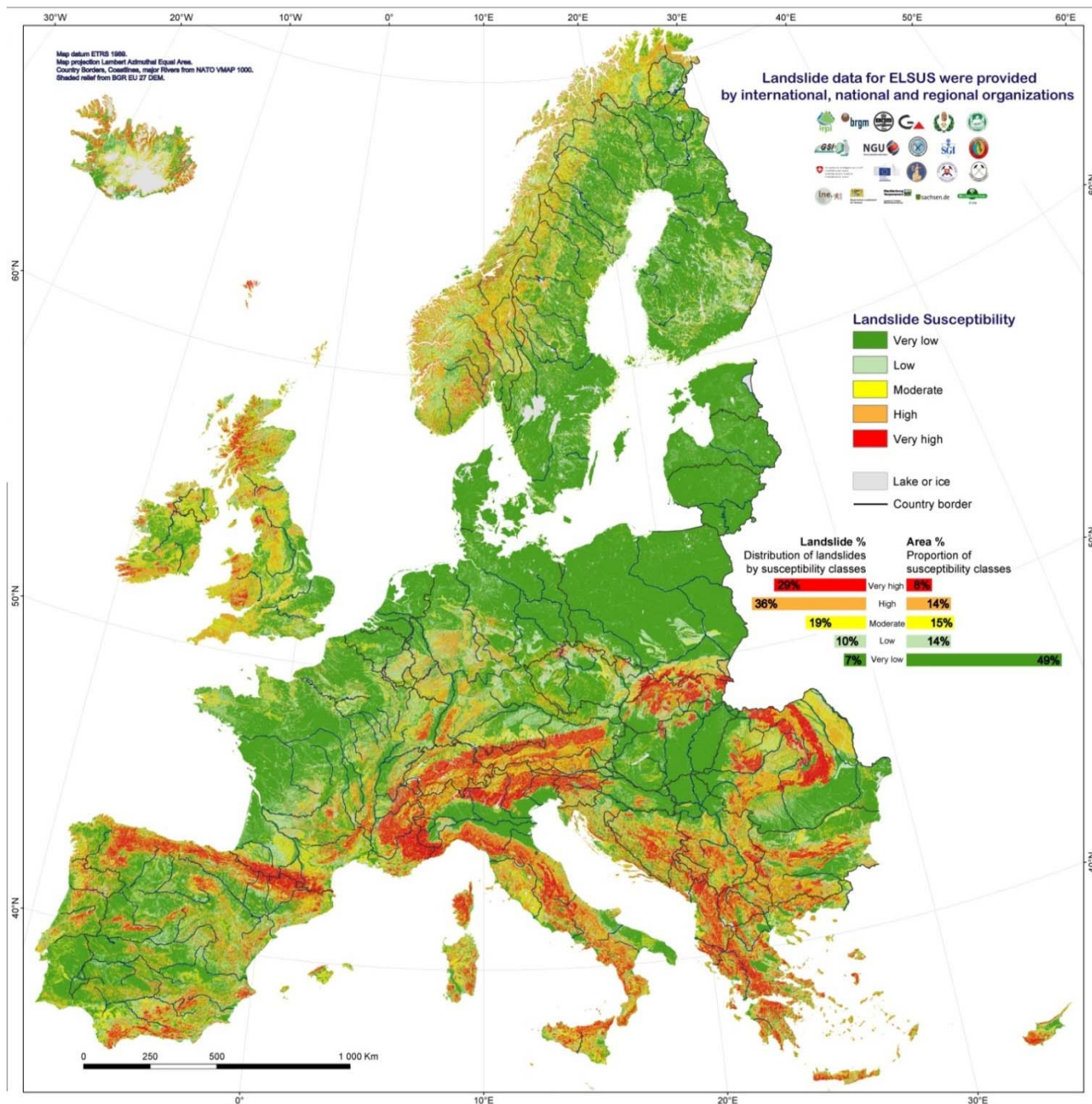
Scale Description	Indicative Range of Scales	Examples of Zoning Application	Typical Area of Zoning
Small	< 1:100,000	Landslide inventory and susceptibility to inform policy makers and the general public	>10,000 square kilometres
Medium	1:100,000 to 1:25,000	Landslide inventory and susceptibility zoning for regional and local development or very large scale engineering projects. Preliminary level hazard mapping for local areas	1000 – 10,000 square kilometres
Large	1:25,000 to 1:5,000	Landslide inventory, susceptibility and hazard zoning for local areas Preliminary level risk zoning for local areas and the advanced stages of planning for large engineering structures, roads and railways	10-1000 square kilometres
Detailed	> 5,000	Intermediate and advanced level hazard and risk zoning for local and site specific areas and for the design phase of large engineering structures, roads and railways	Several hectares to tens of square kilometres

In practical terms the scale of mapping may be controlled by the scale of the available topographic maps.

Σχήμα 40: Διαφορετικές κλίμακες κατολισθητικής ζωνοποίησης και διαφορετικά επίπεδα εφαρμογών της (AGS, 2007)

Από την κοινή εξέταση γεωγραφικών περιοχών ή τη σύνθεση εθνικών χαρτών μπορεί να προκύψουν και υπερεθνικοί κατολισθητικοί χάρτες (π.χ. Nadim et al., 2006). Σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχουν γίνει επίσης τέτοιες απόπειρες στο πλαίσιο διάφορων σχετικών προγραμμάτων, όπως η πρόσφατη, αναλυτική απόπειρα σύνταξης χάρτη κατολισθητικής

επιδεκτικότητα στο πλαίσιο του προγράμματος ELSUS (2η έκδοση, Wilde et al. 2018, Σχήμα 41 ή SafeLand, Deliverable D2.10, 2010), με χρήση στοιχείων των εθνικών γεωλογικών ινστιτούτων – υπηρεσιών.



Σχήμα 41: Ευρωπαϊκός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας από το πρόγραμμα ELSUS ver. 2 (Wilde et al. 2018, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>)

Με τη βελτίωση των διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων υπάρχουν και αντίστοιχες απόπειρες σύνταξης παγκοσμίων χαρτών, με ικανοποιητική / μεγάλη γεωγραφική ανάλυση και διαφορετικές μεθοδολογίες (π.χ. Stanley & Kirschbaum, 2017 από όπου και το Σχήμα 42, ή Dandridge et. al., 2023). Είναι αντιληπτό ότι η κλίμακα στη σύνταξη αυτών των

ηπειρωτικών ή παγκόσμιων χαρτών είναι γενικής στόχευσης, για ενημέρωση αναφορικά με τις πιο επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές, τη διακρατική ανάπτυξη υποστηρικτικών συστημάτων και την προτεραιοποίηση περιοχών για ερευνητική εξειδίκευση (Stanley & Kirschbaum, 2017) και δεν μπορούν να ενταχθεί σε αυτούς η πληροφορία και η ανάλυση των τοπικών χαρτών, των οποίων η στόχευση διαφέρει (Σχήμα 40). Παράλληλα είναι αντιληπτό ότι κάθε χάρτης συντάσσεται με κάποια εισαγωγικά δεδομένα, μια μεθοδολογία και έναν υπολογιστικό αλγόριθμο, που στοχεύουν στην κατά το δυνατόν αντικειμενική αντιπροσώπευση κάθε βασικού παράγοντα στην εκδήλωση των φαινομένων. Τα παραπάνω βελτιώνονται συνεχώς, ωστόσο τα τοπικά χαρακτηριστικά και μοτίβα, που εντάσσονται στους πιο τοπικούς ή εξειδικευμένους χάρτες εξακολουθούν να είναι καθοριστικά.

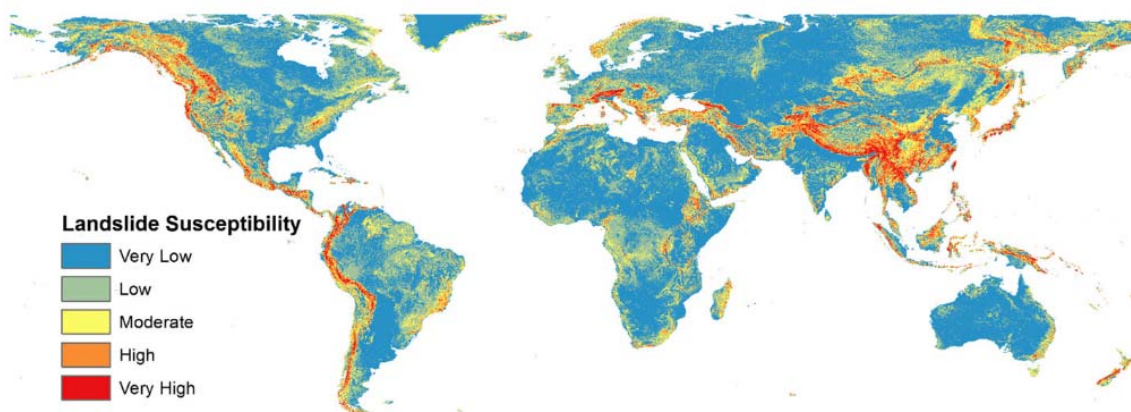


Fig. 4 Global susceptibility map developed using a fuzzy overlay model

Σχήμα 42: Παγκόσμιος χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Stanley & Kirschbaum, 2017)

Οι δυνατότητες της διαδικασίας σύνταξης χαρτών κάθε είδους και κλίμακας αυξάνονται και εν πολλοίς καθορίζονται πλέον από τα όλο και περισσότερο διαθέσιμα μέσα και ψηφιακά εργαλεία χωρικών δεδομένων (Κεφ. 5, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, δορυφορική γεωδαισία, μέθοδοι τηλεπισκόπησης) και τις δυνατότητές τους (van Westen et al., 2008). Σημειώνεται επίσης ότι στο Κεφ. 6 παρουσιάζονται διάφοροι κατολισθητικοί χάρτες από τον ελληνικό χώρο διαφορετικών τύπων σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

4 Επιπτώσεις Κατολισθητικών Φαινομένων

4.1 Περιβαλλοντικές και Κοινωνικο-οικονομικές Επιπτώσεις

Κατολισθήσεων

4.1.1 Εισαγωγή

Η εξέταση των περιβαλλοντικών, πολεοδομικών και κοινωνικοοικονομικών συνεπειών των κατολισθητικών φαινομένων, που χαρακτηρίζονται δυνητικά σημαντικές έως πολύ σημαντικές, ανάλογα με τα κατά περίπτωση τα χαρακτηριστικά του φαινομένου και της περιοχής / του συστήματος, αποτελεί διεπιστημονικό πεδίο διερεύνησης με διαφορετικές αφετηρίες και μεθοδολογίες. Μια έμμεση πρόταση κατηγοριών ταξινόμησης της «έντασης» των κατολισθητικών φαινομένων βάσει της ταχύτητας κίνησης (Σχήμα 6) είχε δοθεί από τους Cruden & Varnes (1996), στην Ειδική Έκθεση 247, βασιζόμενη (σε κάποια αναλογία με τη γνωστή κλίμακα σεισμικής έντασης Mercalli) σε περιγραφική αναφορά των συνεπειών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον (Σχήμα 43, Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Σχήμα 43 - Μετάφραση

Table 3-5
Definition of Probable Destructive Significance of Landslides of Different Velocity Classes

LANDSLIDE VELOCITY CLASS	PROBABLE DESTRUCTIVE SIGNIFICANCE
7	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Escape evacuation possible; structures, possessions, and equipment destroyed
4	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Some permanent structures undamaged by movement
1	Imperceptible without instruments; construction possible with precautions

Σχήμα 43: Ταξινόμηση Πιθανών Καταστροφών από Κατολισθήσεις βάσει κατηγορίας Ταχύτητας, Cruden & Varnes (1996)

Κατηγορία Ταχύτητας	Πιθανή Ένταση Καταστροφών
7 ($v \geq 5\text{m/sec}$)	Βίαιες καταστροφές, καταστροφή κτιρίων από πρόσκρουση εκτοπιζόμενων υλικών, πολλοί θάνατοι, αδυναμία διαφυγής
6 ($5\text{m/sec} > v \geq 3\text{m/min}$)	Μερικές ανθρώπινες απώλειες, μεγάλη ταχύτητα για δυνατότητα διαφυγής όλων των πληττόμενων
5 ($3\text{m/min} > v \geq 1,8\text{m/hr}$)	Δυνατότητα διαφυγής, καταστροφή κατασκευών, ιδιοκτησιών, εξοπλισμού
4 ($1,8\text{m/hr} > v \geq 13\text{m/month}$)	Δυνατότητα διατήρησης μερικών προσωρινών, μη ευαίσθητων κατασκευών κατά την κίνηση
3 ($13\text{m/month} > v \geq 1,6\text{m/yr}$)	Δυνατότητα εκτέλεσης μέτρων αποκατάστασης κατά την κίνηση, δυνατότητα διατήρησης μη ευαίσθητων κατασκευών με τακτική συντήρηση
2 ($1,6\text{m/yr} > v \geq 16\text{mm/yr}$)	Κάποιες μόνιμες κατασκευές ανεπηρέαστες από την κίνηση
1 ($v < 16\text{mm/yr}$)	Μη αντιληπτή χωρίς όργανα, δυνατότητα κατασκευών με μέτρα

4.1.2 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Κατολισθήσεων

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατολισθητικών φαινομένων ταξινομούνται σε τέσσερις κύριες ομάδες (Schuster & Highland, 2001), αναφορικά με την επίδραση:

- Στη χερσαία ή και υποθαλάσσια μορφολογία και το φυσικό ανάγλυφο
- Στα φυσικά δάση, τις καλλιεργήσιμες γαίες και τα βοσκοτόπια.
- Στη γεωμετρία της κοίτης και την ποιότητα υδάτων των ποταμών και των λοιπών υδάτινων στοιχείων.
- Στη βιοποικιλότητα και τα ενδιαίτηματα της ιθαγενούς πανίδας, στο χερσαίο και υδάτινο περιβάλλον.

Επιπτώσεις στη Μορφολογία

Τα κατολισθητικά φαινόμενα προκαλούν μετακινήσεις στο επιφανειακό κατά βάση τμήμα του φυσικού εδάφους και του μορφολογικού αναγλύφου, με αφαίρεση υλικού από το ανάντη και κεντρικό τμήμα της περιοχής εκδήλωσης του φαινομένου και συσσώρευση υλικού έως και κατάληψη του χώρου στον πόδα της μετακίνησης, με μεγαλύτερη ένταση κατά τη κύρια διεύθυνση της κίνησης και μικρότερη πλευρικά αυτής. Κατά την εκδήλωση σύγχρονων κατολισθήσεων μεγάλης κλίμακας με αξιόλογη μεταφορά μάζας, ενδεικτικά τύπου ολίσθησης, ροής ή στοιβάδας κορημάτων ή λασπορροής, προκαλείται αναμόχλευση - απογύμνωση του εδαφικού μανδύα στα ανάντη, με μεταβολή του μορφολογικού αναγλύφου και αλλοίωση έως και καταστροφή των συστημάτων που έχουν αναπτυχθεί, που μπορεί να αφορούν φυσικά οικοσυστήματα, χώρους ανάπτυξης αγροτο-κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, υποδομές, περιαστικό ή αστικό χώρο.

Τα μορφολογικά υπολείμματα παλαιών έως προϊστορικών κατολισθήσεων πολύ μεγάλης κλίμακας μπορούν να αναγνωριστούν σε κάποιες περιπτώσεις και στο σημερινό φυσικό ανάγλυφο, ενώ η εκδήλωση κατολισθήσεων πολύ μεγάλης κλίμακας εντός του 20ο αιώνα, μετά από σεισμικά γεγονότα μεγάλου μεγέθους ή και ηφαιστειακές εκρήξεις, προκάλεσαν σημαντικές και ευδιάκριτες μορφολογικές αλλαγές (Schuster & Highland, 2007). Ωστόσο, μορφολογικές αλλαγές προκαλούνται και σε περιπτώσεις εκδήλωσης πολυάριθμων, μικρότερης κλίμακας, κατολισθητικών κινήσεων, κυρίως σε ευαίσθητες περιοχές με απότομο ανάγλυφο και κλιματικές συνθήκες που ευνοούν την εκδήλωση εποχιακών, έντονων βροχοπτώσεων, μέσω συνολικής απογύμνωσης του επιφανειακού μανδύα και μακροπρόθεσμης υποχώρησης της στάθμης του φυσικού εδάφους στα ανάντη και εμπλουτισμό του φυσικού εδάφους με νέα υλικά στα κατόντη. Οι μορφολογικές μεταβολές

γίνονται συχνά πιο ευδιάκριτες σε περιπτώσεις ροής υλικών με εποχιακό χαρακτήρα κατά την περίοδο αυξημένων βροχοπτώσεων, αλλά και ερπυστικών παραμορφώσεων.

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται και ποσοτικά στοιχεία από μακροπρόθεσμες μετρήσεις της υποχώρησης του φυσικού αναγλύφου (π.χ. Schuster & Highland, 2007), στο βαθμό που αυτές είναι σχετικά ακριβείς και με τις δεδομένες αβεβαιότητες διάκρισης μεταξύ των κατολισθητικών φαινομένων και φαινομένων διάβρωσης, και οι οποίες μπορεί να ανέρχονται σε μέσες τιμές υποχώρησης μικρού σχετικά μεγέθους, της τάξης του $<0,1\text{mm}/\text{έτος}$, κυρίως σε δασωμένες περιοχές με εύκρατο κλίμα, ενώ σε περιοχές με τροπικό κλίμα και σε ευπαθείς σχηματισμούς με απότομες φυσικές κλίσεις οι μορφολογικές αλλοιώσεις γενικά συναντώνται με μεγαλύτερη ένταση και μέγεθος $>1\text{mm}/\text{έτος}$ (ενδεικτικά Schuster & Highland, 2001 & 2007, Geertsema et al., 2009). Ομοίως σε περιοχές με πολύ ψυχρό κλίμα παρατηρείται υποχώρηση του φυσικού εδάφους, με σταθερό ετήσιο ρυθμό της τάξης των λίγων χιλιοστών, από την εποχιακή δράση παγετώνων. Επιπρόσθετα, σημαντικές και ταχέως εκδηλωνόμενες μορφολογικές αλλοιώσεις μπορεί να παρατηρηθούν σε περιοχές με ιδιαίτερους γεωλογικούς σχηματισμούς ή εδάφη με ιδιάζουσα γεωτεχνική συμπεριφορά (π.χ. εξαιρετικά ευαίσθητες, μαλακές άργιλοι, ή περιπαγετικοί ή αιολικοί σχηματισμοί Loess).

Χαρακτηριστικές είναι και οι περιπτώσεις ολισθήσεων παράκτιων υψηλών απότομων πρανών (cliffs), που η ευστάθειά τους υπονομεύεται από τη διαβρωτική δράση των κυματισμών στη βάση των πρανών. Και εδώ υπάρχουν διαθέσιμα ποσοτικά στοιχεία της μορφολογικής μεταβολής, που κυμαίνονται από $<1\text{cm}$ έως $>100\text{cm}$ οριζόντιας μετατόπισης του μετώπου των πρανών ανά έτος (Schuster & Highland, 2007), ανάλογα με τους συναντούμενους σχηματισμούς, με πολλές χαρακτηριστικές περιπτώσεις να εντοπίζονται σε περισσότερο αναπτυγμένες χώρες (Βόρεια Αμερική, Σκανδιναβία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιαπωνία κτλ.), με αποτέλεσμα τη διαθεσιμότητα παλαιών αποτυπώσεων και καταγραφών, που επιτρέπουν τις σχετικές συγκρίσεις σε βάθος χρόνου.

Σημειώνεται επίσης ότι η αλλοίωση της μορφολογίας μπορεί να αναφέρεται και στον πυθμένα των θαλασσών και κυρίως των ωκεανών, όπου δυνητικά λαμβάνουν χώρα κατολισθήσεις πολύ μεγάλων διαστάσεων, είτε σε σχετικά ήπια πρανή οριακής ισορροπίας αποτελούμενα από πολύ μαλακές, αργλικές κατά βάση στρώσεις ή και σε πιο απότομα πρανή σε ζώνες τάφρων ή τεκτονικά ενεργές περιοχές, μεταβάλλοντας το υποθαλάσσιο ανάγλυφο. Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορεί να προκαλέσουν δυνητικά έως και

τσουνάμι, ενώ συχνά εκδηλώνονται μετά από ισχυρούς σεισμούς (π.χ. Αλάσκα 1964, $M=9,2$, όπου από την υποθαλάσσια κατολίσθηση και την πλευρική εξάπλωση καταστράφηκαν λιμενικές και λοιπές παράκτιες υποδομές σε μεγάλη έκταση, με πολύ αυξημένο κόστος βλαβών).

Επιπτώσεις στις Καλλιεργήσιμες Γαίες και τα Δάση

Τα κατολισθητικά φαινόμενα επηρεάζουν έως καταστρέφουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις που βρίσκονται εντός της πληττόμενης περιοχής, λόγω της μετακίνησης εδαφικού υλικού επί των πρανών, σε βαθμό που εξαρτάται από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του κάθε συμβάντος. Ωστόσο, δυνητικά και ανάλογα με την περίπτωση, οι πληττόμενες, απογυμνωμένες ή καλυπτόμενες εκτάσεις μπορούν να αποτελέσουν εκ νέου καλλιεργήσιμες εκτάσεις (με προφανή κίνδυνο εκδήλωσης παραμενουσών / ερπυστικών παραμορφώσεων ή επανενεργοποίησης της μετακίνησης), δυνητικά και με βελτιωμένα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, καθώς στον πόδα της μετακίνησης, σε χαμηλότερες υψομετρικά και περισσότερο προσβάσιμες εκτάσεις, μπορεί να διαμορφωθούν σχετικά επίπεδες επιφάνειες κωνοειδούς διάταξης, με εμπλουτισμένα, εύφορα, κορεσμένα εδάφη.

Η καταστροφή δασών λόγω κατολισθήσεων εντοπίζεται με μεγαλύτερη συχνότητα και ένταση σε τροπικά κλίματα, συχνά συνδυαστικά με την εκδήλωση παρατεταμένων εποχιακών βροχοπτώσεων που οδηγούν σε συστηματική εκδήλωση πολλαπλών κατολισθήσεων σε μια περιοχή. Ενδεικτικά, στα τροπικά δάση του Πουέρτο Ρίκο που είναι ευαίσθητα σε κατολισθήσεις λόγω έντονων βροχοπτώσεων, έως το 1% των δασικών εκτάσεων απογυμνώνεται κάθε 100 έτη λόγω αυτών (Schuster & Highland, 2007). Η καταστροφή των δασών

μπορεί να οφείλεται και σε ροή κορημάτων που καταστρέφει μια ολόκληρη δασωμένη πλαγιά (ενδεικτικά Σχήμα 44).



Fig. 31.1 Debris avalanches strip forests from the hillslope in coastal British Columbia

Σχήμα 44: Παράδειγμα καταστροφής δάσους λόγω ροής κορημάτων (Geertsema et al., 2009)

Η αποκατάσταση ενός δάσους μετά από κατολίσθηση είναι γενικά πιο αργή σε σχέση με την αποκατάσταση μετά από υλοτόμηση (Geertsema et al., 2009), λόγω της μεγαλύτερης αναμόχλευσης που προκαλείται, ενώ μειώνεται και η παραγωγικότητα του. Ωστόσο, όπως σημειώνεται και παρακάτω, ένα αναζωογονημένο δάσος μετά από κατολίσθηση και

παρέλευση πολλών δεκαετιών, ενδέχεται να είναι εμπλουτισμένο σε σχέση με το αρχικό από πλευράς βιοποικιλότητας.

Επιπτώσεις σε Υδάτινα Στοιχεία

Οι πιθανές επιπτώσεις κατολισθητικών φαινομένων σε υδάτινα στοιχεία είναι ποικίλες, εξαρτώμενες από τον τύπο, τη γεωμετρία μετακίνησης και τα υλικά του φαινομένου και τα χαρακτηριστικά του υδάτινου στοιχείου. Οι κυριότερες περιπτώσεις αφορούν (Geertsema et al., 2009 και Schuster & Highland, 2007):

- Τη διατάραξη της γεωμετρίας της κοίτης και της ροής του νερού των ποταμών ή / και τη μεταβολή στο υδρολογικό καθεστώς μιας περιοχής ή στη διαπερατότητα του υπεδάφους. Δυνητικά θα μπορούσε να προκληθεί πλήρης αποκοπή της ροής / έμφραξη του ποταμού και σχηματισμός βραχύβιων ή και μόνιμων πρόχειρων φραγμάτων και λιμνών, με την ανάντη του φράγματος περιοχή να κατακλύζεται και την κατάντη περιοχή να στερείται των υδάτινων πόρων και να διατρέχει κίνδυνο έναντι του ενδεχομένου απότομης θραύσης του πρόχειρου φράγματος. Λόγω και της πρώτης μελέτης περίπτωσης (Κεφ. 7), το θεωρητικό πλαίσιο αυτών των περιπτώσεων εξετάζεται πιο αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.
- Σε περιπτώσεις αποκοπής ή περιορισμού της ροής των ποταμών, οι προκαλούμενες μεταβολές στο οικοσύστημα ανάντη και κατάντη του πρόχειρου φυσικού φράγματος είναι δυνητικά σημαντικές (διαφοροποίηση της χλωρίδας και επηρεασμός της πανίδας, ειδικά των ψαριών και θαλάσσιων οργανισμών, διαφοροποίηση στην ποσότητα και ποιότητα υδάτων κ.α.).
- Την ταχεία μεταφορά των κατολισθημένων υλικών μέσω της ροής των ποταμών προς τα κατάντη και την επιλεκτική απόθεση αδρόκοκκων ή λεπτόκοκκων κορμημάτων σε χαμηλότερες στάθμες. Σε περίπτωση οριοθετημένης ή περιορισμένης διατομής του ποταμού, τα κατολισθημένα υλικά, σε συνδυασμό με παρασυρόμενους κορμούς και κλαδιά δέντρων, ενδέχεται να προκαλέσουν υπερχειλίση του ποταμού και πλημμύρες, δομικές αστοχίες ή υποσκαφή των υδραυλικών έργων κ.α.
- Τη δυνητική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, ειδικά σε ταμιευτήρες που αξιοποιούνται για υδροδότηση, σε περίπτωση που τα κατολισθημένα υλικά που καταλήγουν στον ταμιευτήρα περιέχουν ρυπασμένα ιζήματα ή επικίνδυνα μέταλλα.
- Την πρόκληση ισχυρού κυματισμού – τσουνάμι, σε θάλασσες και λίμνες που καταλήγει μεγάλος όγκος ολισθημένων υλικών κινούμενος με μεγάλη ταχύτητα.

- Σημειώνεται επίσης (Turner, 2018) η περίπτωση χωροθέτησης τεχνητών φραγμάτων σε περιοχές όπου φαινομενικά είναι ιδανικές λόγω της παρατηρούμενης μορφολογικής στένωσης της κοιλάδας, με τη στένωση να αποτελεί αποτέλεσμα παλαιών κατολισθήσεων, εν γνώσει ή εν αγνοία των μηχανικών του έργου, με ότι αυτό συνεπάγεται από πλευράς επικινδυνότητας.

Επιπτώσεις από Πρόχειρα Φράγματα σε Κοιλάδες

Τα πρόχειρα υδάτινα φράγματα, όπως είναι και η πρώτη περίπτωση μελέτης, αποτελούν συχνή απόρροια κατολισθήσεων κυρίως σε ορεινές περιοχές, όπου λαμβάνει χώρα μετακίνηση υλικών πολύ αυξημένου όγκου και μεγάλης ταχύτητας λόγω του απότομου αναγλύφου, τα οποία τελικώς καταλήγουν στη βάση της κοιλάδας, αποκόπτοντας τη ροή ποταμών. Η δημιουργία πρόχειρων φραγμάτων και ο σχηματισμός βραχύβιων ή μόνιμων λιμνών έχει καταγραφεί σε πολλές περιοχές, με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σε περιοχές των Άλπεων, των Άνδεων και των ορεινών περιοχών του Καυκάσου και της Ασίας. Τα σεισμικά γεγονότα αποτελούν έναν από τους κύριους εναυσματικούς παράγοντες τέτοιων φαινομένων, ιδιαίτερα στις πιο σεισμογενείς ορεινές ζώνες της Λατινικής και Βόρειας Αμερικής και της Ασίας.

Πολλά από τα πρόχειρα φράγματα που δημιουργούνται αστοχούν μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, σε πολλές δε περιπτώσεις εντός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος (Σχήμα 45), με αποτέλεσμα να μην είναι πρακτικά εφικτή η όποια τεχνική επέμβαση στην περιοχή του φράγματος ή στην κατάντη επισφαλή περιοχή. Ωστόσο άλλα φράγματα διατηρούνται για αιώνες και εντάσσονται πλήρως στο φυσικό περιβάλλον.

Οι τυπικές μορφές αστοχίας σε πρόχειρα φράγματα σε κοιλάδες περιλαμβάνουν (Evans et al., 2011):

- Υπερχείλιση του φράγματος από το νερό που συσσωρεύεται και σταδιακή διάβρωση του φράγματος στα ανάντη, με διεύρυνση της διατομής ροής.
- Αστοχία λόγω επίλεκτης ροής διαμέσου του φράγματος / διασωλήνωσης (piping).

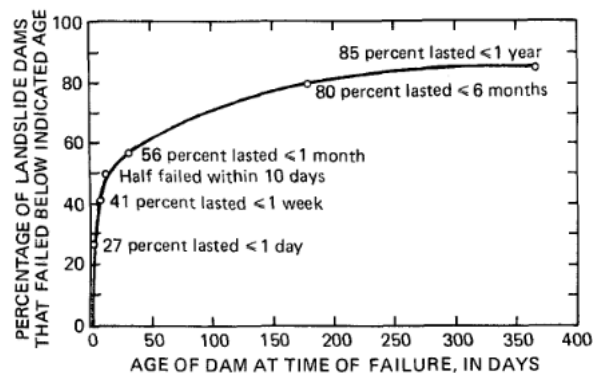


Figure 6. Length of time before failure of landslide dams, based on 73 cases from the literature and the authors' experience.

Σχήμα 45: Χρόνος Αστοχίας Πρόχειρων Φραγμάτων που αστοχούν (Costa & Schuster, 1988)

- Αστοχία του κατάντη πρσανούς του φράγματος, λόγω και της αναπτυσσόμενης πίεσης πόρων εντός αυτού.
- Αστοχία λόγω σεισμικού γεγονότος (ή μετασεισμού, αν η κατολίσθηση προκλήθηκε από τον κύριο σεισμό) ή νέας κατολίσθησης εντός της σχηματισθείσας λίμνης και δημιουργία κύματος.
- Αστοχία κατά την απόπειρα ανθρωπογενούς επέμβασης για κατασκευή υπερχειλιστή ή υδραυλικού αγωγού, για την αποτροπή αστοχίας και έλεγχο της στάθμης της λίμνης.

Αντίστοιχα, ευνοϊκές συνθήκες για τη μακροημέρευση των πρόχειρων φραγμάτων αποτελούν (Costa & Schuster, 1988):

- Ο σχετικά χαμηλός ρυθμός τροφοδότησης της λίμνης με νερό και η συγκρίσιμη σχέση των νέων εισροών νερού στη λίμνη σε σχέση με τις απώλειες νερού από τη λίμνη, λόγω διήθησης και διαρροών στο υπέδαφος ή εξάτμισης.
- Το μέγεθος και το σχήμα του πρόχειρου φράγματος. Λόγω της χαλαρής δομής των πρόχειρα αποτιθεμένων υλικών, το μέγεθος του φράγματος θα πρέπει να είναι εκ των πραγμάτων σημαντικό.
- Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος. Τα φράγματα από λεπτόκοκκα υλικά σε χαλαρή απόθεση είναι ευάλωτα σε διάβρωση και με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά λόγω της φύσης και του κορεσμού των υλικών, σε αντιδιαστολή με αδρόκοκκα υλικά, ιδίως όταν είναι και με καλή κοκκομετρική διαβάθμιση, για αποφυγή διασωλήνωσης.

Επιπτώσεις στη Βιοποικιλότητα και στο Φυσικό Περιβάλλον

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, η εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων έχει επιπτώσεις στην χλωρίδα και την πανίδα των πληττόμενων περιοχών, και αποτελεί ένα φυσικό «αβιοτικό» παράγοντα διαταραχής ενός φυσικού συστήματος (όπως π.χ. οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, πλημμύρες ή οι πυρκαγιές, ενώ οι βιοτικοί παράγοντες διαταραχής μπορεί να αφορούν την προσβολή από έντομα ή μικροοργανισμούς), ο οποίος συνεισφέρει στην ανατροφοδότηση του φυσικού κύκλου εξέλιξης του συστήματος (Geertsema et al., 2009). Ο κύκλος της επίδρασης των κατολισθητικών φαινομένων στη βιοποικιλότητα αφορά τρία κύρια επίπεδα:

- Την εκδήλωση αλλαγών στο φυσικό ανάγλυφο και τη μετακίνηση των εδαφικών υλικών. Συχνά η μετακίνηση υλικών και η αναμόχλευση τους διαχωρίζει σε μία

περιοχή ζώνες με διαφορετική διαπερατότητα και διαφορετικό δυναμικό ανάπτυξης νέας χλωρίδας, όπως ζώνες με ξηρά, βραχώδη ή αδρόκοκκα υλικά ή με κορεσμένα, λεπτόκοκκα, υδαρά υλικά, που θα αποτελέσουν και το υπόβαθρο των επερχόμενων συνθηκών ανάπτυξης και εξέλιξης του φυσικού συστήματος.

- Την πρόκληση αλλαγών στα χαρακτηριστικά του εδαφικού μανδύα. Η απομάκρυνση του επιφανειακού υλικού λόγω κατολισθητικών φαινομένων αποκαλύπτει τους υποκείμενους, μητρικούς σχηματισμούς, δυνητικά πλούσιους σε διαφορετικά συστατικά από τον παλιό μανδύα. Τα κατολισθημένα υλικά επιφέρουν στρωματογραφικές αλλαγές έως χαοτική μίξη διαφορετικών υλικών, με αποτέλεσμα αλλαγές στη σύσταση και τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η πυκνότητα, στο ποσοστό οργανικών υλικών, στην οξύτητα του εδάφους και στα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και τα χημικά συστατικά του, που καθορίζουν τις συνθήκες ανάπτυξης της χλωρίδας και εμμέσως και της πανίδας.
- Την πρόκληση αλλαγών στην ποικιλότητα ενδιαιτημάτων. Οι προαναφερθείσες αλλαγές στην περιοχή και τον εδαφικό μανδύα συνεπάγονται σύνθετες μεταβολές που είτε ευνοούν είτε απομειώνουν την ποικιλότητα των ενδιαιτημάτων. Οι αλλαγές είναι άμεσες, λόγω του φαινομένου (π.χ. ψάρια και υδρόβιοι οργανισμοί σε περιπτώσεις σχηματισμού πρόχειρων φραγμάτων και αποκοπής ροής ποταμού ή πανίδα του δάσους μετά από ταχεία ολίσθηση πλαγιάς) ή μακροπρόθεσμες, λόγω των συνθηκών που δημιουργούνται μετά την εκδήλωση του κατολισθητικού συμβάντος.

4.1.3 Κοινωνικο-Οικονομικές Επιπτώσεις Κατολισθήσεων

Ιστορικό Πλαίσιο

Οι ιστορικές αναφορές σε κατολισθήσεις πριν από τη βιομηχανική επανάσταση είναι περιορισμένες, καθώς αντιμετωπίζονταν εν πολλοίς ως μη ελεγχόμενες, φυσικές καταστροφές, που εκδηλώνονταν κυρίως σε ορεινές ή / και ευάλωτες σε κατολισθήσεις περιοχές, ενώ αναφέρονται προφανώς μόνο σε συμβάντα με μεγάλο αριθμό ανθρώπινων απωλειών (Schuster, 1996) πλησίον πόλεων και οικισμών. Με τη σταδιακή ανάπτυξη των δικτύων ύδρευσης και εν συνεχεία των σιδηροδρόμων, την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, την εντατικοποίηση της υλοτομίας, των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων και τη σταδιακή εκβιομηχάνιση της γεωργίας, αλλά και αργότερα την τουριστικοποίηση ορεινών περιοχών (Turner, 2018), οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αφενός

υπαισέρχονται πιο δυναμικά σε περιοχές συχνής εκδήλωσης κατολισθήσεων, αφετέρου επιδεινώνουν τις συνθήκες ευστάθειας των φυσικών πρανών ή διαμορφώνουν το βασικό αίτιο εκδήλωσης τους (π.χ. τεχνητά πρανή), χωρίς να υπάρχει συχνά η αντίληψη από την κοινότητα της αύξησης της κατολισθητικής διακινδύνευσης λόγω των ανθρωπογενών ενεργειών ή η κατανόηση των δυνητικών μηχανισμών αστοχίας από τη διαθέσιμη επιστημονική γνώση. Σταδιακά, οι συνέπειες των κατολισθητικών φαινομένων επί σημαντικών υποδομών και η διατάραξη της ομαλής λειτουργίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, αύξησαν το επιστημονικό ενδιαφέρον για την κατανόηση των φαινομένων και την αντιμετώπισή τους και τις τελευταίες δεκαετίες και για την έγκαιρη αναγνώριση και πρόληψη των επιπτώσεων τους. Πλέον στη σύγχρονη εποχή από τη μία πλευρά τα διατιθέμενα μέσα και εργαλεία αναγνώρισης, αξιολόγησης, παρακολούθησης και προειδοποίησης (Κεφ. 5) των φαινομένων έχουν διευρύνει κατά πολύ τις δυνατότητες περιορισμού των κοινωνικο-οικονομικών επιπτώσεων των κατολισθήσεων (π.χ. χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων κρίσιμων θέσεων σε πραγματικό χρόνο) και θα βελτιωθούν και επεκταθούν περαιτέρω, αποτελώντας βασικό πεδίο της σύγχρονης και μελλοντικής επιστημονικής έρευνας, ενώ από την άλλη πλευρά αυξάνεται η έκθεση των κοινοτήτων και των υποδομών στην κατολισθητική επικινδυνότητα, και αντίστοιχα το ύψος του κόστους των βλαβών από κατολισθήσεις (Κεφ. 2.2.2 και Nadim et al., 2006), αλλά και η ένταση και δράση των εγγενών και ενανυσματικών παραγόντων που προκαλούν τα φαινόμενα (Κεφ. 4.2).

Επιπτώσεις επί Οικισμών – Πόλεων

Η μετακίνηση μάζας βράχων, εδάφους ή κορημάτων κατά μήκος πρανούς προς τα κατάντη, βάσει του γενικού ορισμού του Κεφ. 2.1, προκαλεί βλάβες στα φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα κατά μήκος της μετακίνησης, που εξαρτώνται από την ταχύτητα και τα λοιπά χαρακτηριστικά της κίνησης και τον όγκο των μετακινούμενων υλικών. Η συχνή εγκατάσταση οικισμών στους πρόποδες ορεινών περιοχών τους καθιστά ευάλωτους έναντι των μετακινήσεων μάζας στα ανάντη τους, και ιδιαίτερα όταν η διαδρομή της μετακίνησης διέρχεται από αυτούς ή τμήμα αυτών ή τον περιβάλλοντα χώρο τους, με δυνητικές επιπτώσεις που κυμαίνονται από πλήρη αφανισμό των οικισμών και ολικές ανθρώπινες απώλειες, έως κυμαινόμενης έντασης (πολύ σοβαρές έως πολύ ελαφρές) κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις και βλάβες. Όπως αναφέρεται και στο Κεφ. 6.3, το παραπάνω σχήμα των ορεινών οικισμών που είναι ευάλωτοι από κατολισθητικά φαινόμενα λόγω του μορφολογικού αναγλύφου και των επικρατουσών τεχνικογεωλογικών

και λιθολογικών συνθηκών και τελικώς πλήττονται από ένα συμβάν μετά από τη δράση κάποιου εναυσματικού παράγοντα. αποτελεί την τυπικότερη μορφή των πιο καταστροφικών κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο.

Αντίστοιχη είναι και η περίπτωση επιπτώσεων κατολισθητικών φαινομένων σε αστικές περιοχές, που ομοίως έχουν αναπτυχθεί στους πρόποδες ορεινού ή λοφώδους, συνήθως απότομου αναγλύφου. Οι επιπτώσεις σε αυτές τις περιπτώσεις διευρύνονται σημαντικά, λόγω της αυξημένης «έκθεσης στον κίνδυνο», εξαιτίας της ποσότητας των «στοιχείων σε διακινδύνευση» (Κεφ. 3.2), που αναφέρεται στον πολύ μεγαλύτερο πληττόμενο πληθυσμό και την πυκνότητα του, στις ιδιωτικές περιουσίες και τις δημόσιες υποδομές στον αστικό χώρο. Συνεπώς οι αστικές κατολισθήσεις είναι εν γένει αυτές με τις μεγαλύτερες ανθρώπινες απώλειες, το μεγαλύτερο αριθμό πληττόμενων ατόμων και τις υψηλότερες κοινωνικές και οικονομικές βλάβες.

Το θέμα εξετάζεται και στο Κεφ. 4.2.4 υπό το πρίσμα των σύγχρονων εξελίξεων, που φαίνεται να οδηγούν αφενός στη διαχείριση και μείωση της διακινδύνευσης στις αναπτυγμένες χώρες και αφετέρου στη στασιμότητα ή την αύξηση του επιπέδου διακινδύνευσης και των επιπτώσεων των φαινομένων στις αναπτυσσόμενες χώρες, κυρίως της Ασίας και της Κεντρικής και Λατινικής Αμερικής.

Επιπτώσεις επί Δικτύων και Υποδομών

Η αυξανόμενη παρουσία και διαρκής επέκταση γραμμικών δικτύων μεγάλου μήκους κάθε είδους (οδικά, σιδηροδρομικά, ηλεκτρικά, τηλεπικοινωνιακά, υδραυλικά κανάλια, αγωγοί κτλ.) συνεπάγεται την αντίστοιχη διέλευση τους από περιοχές με συχνή εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, π.χ. ορεινές περιοχές με απότομο ανάγλυφο. Οι επιπτώσεις επί των δικτύων εξαρτώνται κατά περίπτωση από την ταχύτητα της εδαφικής μετακίνησης και την ευαισθησία των στοιχείων του δικτύου σε αυτή, ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει το ενδεχόμενο βραχυχρόνιας ή μακροχρόνιας διακοπής της λειτουργίας του δικτύου και την ανάγκη επισκευής και συντήρησής του, αλλά και την απαίτηση αντιμετώπισης του κατολισθητικού συμβάντος και την αποτροπή επανενεργοποίησής του ή εκδήλωσης μελλοντικού, ανάλογου συμβάντος. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η εκδήλωση κατολισθήσεων σε ορεινά οδικά δίκτυα πρόσβασης απομακρυσμένων οικισμών χωρίς εναλλακτικές προσβάσεις, που συνεπάγεται τη δυνητική απομόνωση των απομακρυσμένων οικισμών για μεγάλο διάστημα.

Χαρακτηριστικές γνωστές περιπτώσεις είναι τα κατολισθητικά φαινόμενα που τέμνουν τη διώρυγα του Παναμά, με τη σημασία που έχει για την παγκόσμια ναυσιπλοΐα και οικονομία, τα οποία εκδηλώνονται περιοδικά και παρακολουθούνται επί 100 και πλέον έτη, χωρίς πρακτικά δυνατότητα πλήρους ανάσχεσης λόγω της ιδιαίτερης γεωτεχνικής συμπεριφοράς των σχηματισμών. Στον ελληνικό χώρο κατολισθητικά φαινόμενα επηρεάζουν τους κύριους οδικούς και σιδηροδρομικούς άξονες της χώρας, σε ευάλωτες περιοχές, όπου διαμορφώνονται τεχνητά πρηνή μεγάλου ύψους, λόγω και των σύγχρονων απαιτήσεων και προδιαγραφών χάραξης και διέλευσης των αξόνων (Κεφ. 6.3). Στις πιο γνωστές περιπτώσεις έχει διακοπεί η διέλευση από τους κύριους οδικούς άξονες της χώρας για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα (κατολίσθηση Παναγοπούλας 1971, κατολίσθηση Μαλακάσας 1995, καταπτώσεις στα Τέμπη 2009 ή πρόσφατες βραχοκαταπτώσεις στην Κακιά Σκάλα 2022), ενώ σε πολλές άλλες θέσεις διέλευσης δικτύων σε ευάλωτες περιοχές (π.χ. Εγνατία Οδός, λοιποί αυτοκινητόδρομοι και σιδηροδρομικό δίκτυο ηπειρωτικής Ελλάδας, υδραγωγείο Μόρνου-Ευήνου) είτε εκδηλώθηκαν κατολισθήσεις κατά την κατασκευή των έργων και αποκαταστάθηκαν ή έχουν επισημανθεί κρίσιμες θέσεις με οριακή ευστάθεια, οι οποίες παρακολουθούνται κατά τη λειτουργία των δικτύων.

Κατά αναλογία, τα κατολισθητικά φαινόμενα μπορεί να πλήξουν και κρίσιμες υποδομές, με σημαντικές κοινωνικές (συμπεριλαμβανόμενων και των υγειονομικών) και οικονομικές συνέπειες. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των φραγμάτων, που συχνά χωροθετούνται και κατασκευάζονται σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές, ο ταμιευτήρας τους καλύπτει μεγάλη έκταση, ενώ είναι από τα πιο σύνθετα έργα πολιτικού μηχανικού και οι συνέπειες έναντι ενδεχόμενης αστοχίας είναι πολύ μεγάλες. Οι συνέπειες από τις κατολισθήσεις μπορεί να αφορούν από αστοχία του φορέα του φράγματος και δημιουργία πλημμυρικού κύματος προς τα κατάντη με καταστροφικές συνέπειες, μετακίνηση υλικών εντός του ταμιευτήρα και πρόκληση κυματισμού που υπερπηδάει το φράγμα (περίπτωση φράγματος Vajont), μεταβολές στη χωρητικότητα ή τη διαπερατότητα ή το καθεστώς των υπόγειων υδάτων στο φράγμα έως ρύπανση του νερού του ταμιευτήρα, προοριζόμενου για ύδρευση, από τα κατολισθημένα υλικά,. Άλλες περιπτώσεις κρίσιμων υποδομών που πλήττονται από κατολισθητικά φαινόμενα είναι οι λιμενικές υποδομές, που σε πολλές περιπτώσεις υποφέρουν από ρευστοποίηση των χαλαρών αμμοδών στρώσεων που εντοπίζονται στις θέσεις κατασκευής τους, μετά από σεισμικό συμβάν μεγάλης έντασης.

Επιπτώσεις επί Αγροτικού Εισοδήματος

Στο προηγούμενο Κεφ. 4.1.2 αναφέρθηκε η δυνητική επίπτωση κατολισθητικών φαινομένων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Σε τέτοιες επιπτώσεις προκύπτει μείωση του εισοδημάτων των αγροτικών πληθυσμών. Ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες, η απώλεια του αγροτικού εισοδήματος από μικροϊδιοκτήτες είναι κρίσιμο και τους καθιστά οικονομικά και κοινωνικά ευάλωτους (Mertens et al., 2016). Αντίστοιχες είναι και οι περιπτώσεις επιπτώσεων των κατολισθήσεων επί κτηνοτροφικών μονάδων και δραστηριοτήτων ή δασοκομικών δραστηριοτήτων.

Άμεσο και Έμμεσο Οικονομικό Κόστος

Το ύψος των οικονομικών επιπτώσεων των κατολισθητικών φαινομένων αναφέρεται συνήθως κατά προσέγγιση, με την εκτίμηση να υπολείπεται του πραγματικού κόστους. Συχνά οι οικονομικές επιπτώσεις αναφέρονται στο άμεσο κόστος, που περιλαμβάνει στα κόστη επισκευής, αντικατάστασης ή συντήρησης των περιουσιακών στοιχείων ή υποδομών που πλήττονται από το συμβάν. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις τα έμμεσα κόστη, που είτε υποεκτιμούνται ή παραλείπονται, είναι αρκετά υψηλότερα. Σε αυτά περιλαμβάνονται ευρύτερα κόστη, όπως η διακοπή ή διαταραχή λειτουργίας των μεταφορικών δικτύων ή οι μεταβολές των συνθηκών σε μια περιοχή που ενδέχεται να συνεπάγονται αλλαγές στις οικονομικές δραστηριότητες και τις παραγωγικές διαδικασίες, αυξημένα κόστη παραγωγής ή μείωση της παραγωγικότητας στον πρωτογενή (αγροτοκτηνοτροφική δραστηριότητα ή δασοκομία) και δευτερογενή τομέα (επιρροή επί της βιομηχανικής παραγωγής έως απώλεια εργατοωρών), μείωση της τουριστικής ελκυστικότητας ή αξίας μιας περιοχής, μείωση της αξίας γης, μείωση φορολογικών εσόδων, το κόστος μέτρων πρόληψης ή μετριασμού μελλοντικών κατολισθήσεων, το κόστος λόγω απομείωσης της παραγωγικότητας ανθρώπων και ζώων λόγω τραυματισμών, θανάτων ή ψυχολογικών τραυμάτων, καθώς και το κόστος συνεπαγόμενων ή δευτερευόντων γεγονότων όπως π.χ. πλημμυρών. Σε κάθε περίπτωση το οικονομικό κόστος αυξάνεται ανάλογα με το βαθμό στον οποίον έχουν αναπτυχθεί ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην πληττόμενη περιοχή.

4.2 Σύγχρονο Πλαίσιο Συνθηκών Εκδήλωσης, Επιπτώσεων και Αντιμετώπισης Κατολισθήσεων

4.2.1 Επέκταση Ανθρωπογενών Δραστηριοτήτων και Αναζήτησης Πόρων

Οι κοινωνικές, οικονομικές, πληθυσμιακές και τεχνολογικές μεταβολές κατά τις τελευταίες δεκαετίες είναι ραγδαίες και εκ των πραγμάτων επηρεάζουν τόσο τα αίτια εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων, όσο και τα χαρακτηριστικά και την ένταση των συνεπειών τους. Μια πρώτη ομαδοποίηση των αλλαγών που επηρεάζουν το πλαίσιο των αιτιών εκδήλωσης και συνεπειών των κατολισθήσεων αφορά στη διαρκή και εντατική επέκταση ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε σχετικά παρθένες, φυσικές περιοχές, για την εκμετάλλευση και αναζήτηση πόρων κάθε είδους. Συγκεκριμένα, η παγκόσμια αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, που παρατηρείται με μεγαλύτερη ένταση σε αναπτυσσόμενες χώρες του πλανήτη που περιλαμβάνουν περιοχές επιδεκτικές σε κατολισθητικά φαινόμενα (Ασία, Κεντρική και Λατινική Αμερική), υπό το πρίσμα της παγκοσμιοποιημένης οικονομίας της αγοράς και των σύγχρονων τεχνικών και τεχνολογικών εξελίξεων, έχει οδηγήσει στη διαρκή εντατικοποίηση της αναζήτησης πόρων.

Σε αυτούς περιλαμβάνεται καταρχάς το νερό, με κατασκευή τεχνητών ταμιευτήρων και καναλιών και προτεραιοποίηση της ύδρευσης αστικών κέντρων και της άρδευσης σε βάρος της φυσικής απορροής, με αποτέλεσμα αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς μιας περιοχής και τα διατροφικά προϊόντα, με διαρκή αύξηση των απαιτούμενων εκτάσεων για αγροτοκτηνοτροφικές δραστηριότητες και των αναγκών άρδευσης τους, ενώ σε πολλές χώρες λαμβάνει χώρα αποψίλωση δασικών εκτάσεων και μετατροπή τους σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις με αλλοίωση του αναγλύφου. Η αυξημένη αναζήτηση πόρων περιλαμβάνει ακόμα τα προϊόντα υλοτομίας, τους υδρογονάνθρακες, τα μεταλλεύματα (με σύγχρονες αλλαγές στις προτεραιότητες των εξορύξεων, π.χ. σπάνιες γαίες) κ.α. Παράλληλα επεκτείνονται τα δίκτυα κάθε τύπου προς κάθε ορεινό οικισμό, ενώ ακόμα και πολύ ορεινές, δυσπρόσιτες περιοχές αποτελούν πλέον προνομιακό χώρο χωροθέτησης κυρίως αιολικών πάρκων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι παραπάνω αλλαγές επιφέρουν μεταβολές στη μορφολογία, στις χρήσεις γης, στην στο καθεστώς των επιφανειακών και υπογείων υδάτων και την αντιδιαβρωτική προστασία του φυσικού εδάφους και, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, αφενός δρουν επιβαρυντικά στην πρόκληση κατολισθήσεων σε κάποια περιοχή που ήδη χαρακτηρίζεται επιδεκτική (αύξηση επικινδυνότητας / πιθανότητας εκδήλωσης συμβάντος ή χαρακτηριστικά αυτού, Κεφ. 3.2.2), και αφετέρου εισάγουν ανθρωπογενείς δραστηριότητες στο φυσικό περιβάλλον, ώστε αυτές να υπάγονται στην ούτως ή άλλως υφιστάμενη κατολισθητική επικινδυνότητα μιας περιοχής (αύξηση στοιχείων σε διακινδύνευση ή / και σχετικής πιθανότητας παρουσίας του στοιχείου κατά την εκδήλωση του κατολισθητικού συμβάντος), ενώ

παράλληλα, συνεπάγονται ενδεχόμενη αύξηση της φυσικής ή κοινωνικο-οικονομικής τρωτότητας των κοινοτήτων που επηρεάζουν.

Οι παραπάνω εξελίξεις εντοπίζονται με μεγαλύτερη ένταση σε αναπτυσσόμενες χώρες και εν πολλοίς σχηματίζουν έναν ανατροφοδοτούμενο κύκλο, όσο δεν λαμβάνονται δράσεις. Η περιβαλλοντική υποβάθμιση, είτε αφορά καταστροφή δασών από παράνομη υλοτομία, μετατροπή φυσικών οικοσυστημάτων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, υπερεκμετάλλευση φυσικών πόρων, εξορυκτική δραστηριότητα ή μη οργανωμένη και αυθαίρετη αλλαγή στις χρήσεις γης, απομειώνει τις συνθήκες ευστάθειας έναντι κατολισθήσεων. Η εκδήλωσή τους, συνήθως σε μελλοντικό χρόνο και με παράγοντα ενεργοποίησης συχνά τις εντατικές βροχοπτώσεις επί απογυμνωμένων, διαβρωμένων, ευάλωτων επιφανειών του φυσικού εδάφους, προκαλεί περαιτέρω περιβαλλοντική υποβάθμιση.

4.2.2 Κατολισθήσεις και Ταχεία Αστικοποίηση

Η ταχεία αστικοποίηση εντάσσεται στο παραπάνω πλαίσιο της εντατικής επέκτασης της ανθρωπογενούς δραστηριότητας σε φυσικά περιβάλλοντα, ωστόσο εστιάζεται, ως προς τα κατολισθητικά φαινόμενα, κυρίως στις επικλινείς, λοφώδεις περιαστικές περιοχές, οι οποίες στο παρελθόν αποτελούσαν φυσικό όριο στην αστική επέκταση λόγω του αναγλύφου. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αστικοποίηση και σε αυτά τα τμήματα, είτε σε αναπτυσσόμενες και φτωχές χώρες λόγω των αυξημένων πληθυσμιακών πιέσεων, που αφορά συχνά αυθαίρετη ή χωρίς σχεδιασμό οίκηση σε κατοικίες χαμηλής ποιότητας (παραγκουπόλεις Λατινικής και Κεντρικής Αμερικής και Ασίας, σε μερικές περιπτώσεις και Αφρικής, κυρίως σε τροπικές περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις), είτε και σε αναπτυγμένες χώρες, λόγω των συνθηκών που διαμορφώνονται στην αγορά ακινήτων και στο πλαίσιο αναζήτησης νέων, προνομιούχων περιοχών κατοικίας με ελεύθερο χώρο και θέα. Συχνά η οίκηση σε αυτές τις περιοχές γίνεται χωρίς επίγνωση της διακινδύνευσης έναντι δυνητικών κατολισθητικών φαινομένων και χωρίς μέτρα προστασίας, υποστήριξης και ανάσχεσης της διακινδύνευσης. Υπό αυτές τις συνθήκες οι συνέπειες ενός κατολισθητικού συμβάντος μεγάλης κλίμακας με ταχεία μετακίνηση μάζας μεγιστοποιούνται και περιλαμβάνουν δυνητικά εκατοντάδες ή χιλιάδες ανθρώπινες απώλειες, κατατάσσοντας τις κατολισθήσεις σε αστικές - περιαστικές περιοχές στις πιο επικίνδυνες φυσικές καταστροφές. Με δεδομένο ότι η παραπάνω τάση αστικοποίησης σε λοφώδεις περιαστικές περιοχές αναμένεται να εντατικοποιηθεί τις επόμενες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο (Σχήμα 46) και με μεγαλύτερη ένταση στις πιο επιδεκτικές σε

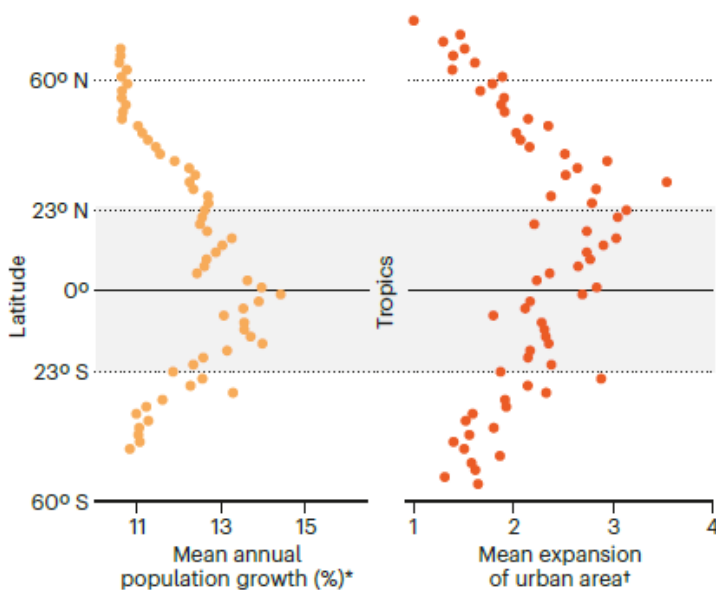
κατολισθήσεις τροπικές περιοχές, η λήψη μέτρων προστασίας και ανάσχεσης της διακινδύνευσης σε αστικές ή περιαστικές περιοχές αποτελεί κύρια προτεραιότητα.

URBANIZATION TRENDS

Large cities in the tropics are among the fastest-growing in the world. Settlements there are spreading to steeper land, which is prone to landslides.

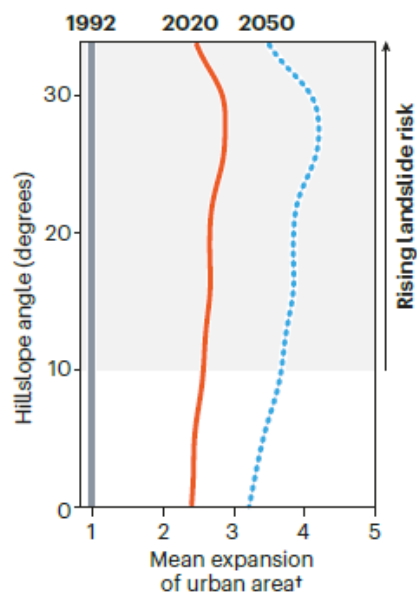
Rapid growth

Populations (left) and built-up areas (right) are growing quickest in the tropics.



Steeper sites

In tropical cities, the fastest-growing areas are on steep hills.



*Data from 1990 to 2020 for cities exceeding 300,000 people; *As a ratio for 2020/1992.

Σχήμα 46: Εκτίμηση μελλοντικής αστικοποίησης σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές με τροπικό κλίμα και απότομο ανάγλυφο (Ozturk et al., 2022)

Οι βασικοί παράγοντες ενεργοποίησης των κατολισθήσεων σε αστικές – περιαστικές περιοχές παραμένουν η βροχόπτωση και τα σεισμικά γεγονότα. Οι κατολισθήσεις πιθανόν να συνέβαιναν ούτως ή άλλως, δεδομένου του μορφολογικού αναγλύφου, του τεχνικογεωλογικού και λιθολογικού περιβάλλοντος, του καθεστώτος υπογείων υδάτων και των λοιπών αναφορών του Κεφ. 2.1.4, ωστόσο συνήθως οι συνθήκες ευστάθειας υπονομεύονται σε μεγάλο βαθμό από την αστικοποίηση της περιοχής. Ενδεικτικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Diaz, 1992) ότι τα κατολισθητικά φαινόμενα πέριξ της πόλης του Καρακάς της Βενεζουέλας συνδέονταν έως τη δεκαετία του 1960 κυρίως με σεισμικά γεγονότα, ενώ έκτοτε, και παράλληλα με την διαμόρφωση παραγκουπόλεων στην περιαστική ζώνη, ο αριθμός των φαινομένων και των απωλειών έχει αυξηθεί, ενώ αποδίδονται στην πλειονότητά τους σε βροχοπτώσεις, λόγω των χωροταξικών μεταβολών και υπό το πρίσμα της απομείωσης της ευστάθειας για μια σειρά από λόγους όπως:

- Στο πλαίσιο της αστικοποίησης λαμβάνουν χώρα χωματουργικές εργασίες όπως εκτέλεση απότομων εκσκαφών ή αφαίρεση μάζας από τον πόδα των φυσικών πρανών ή επιφόρτιση στη στέψη τους από τεχνητές επιχώσεις.
- Στο πλαίσιο διαμόρφωσης του χώρου και του τοπίου πέριξ νέων κατοικιών κόβονται ή απομειώνονται τα δέντρα και η επιφανειακή βλάστηση ή λαμβάνει χώρα συστηματική άρδευση της επικλινούς περιοχής.
- Η αστικοποίηση των περιαστικών περιοχών μειώνει τη φυσική κατείσδυση των υδάτων και συνεπάγεται αυξημένες επιφανειακές απορροές βρόχινων νερών μέσω πρόχειρων ή υποσχεδιασμένων καναλιών και αποδεκτών, συνθήκη που ευνοεί τις ολισθήσεις ή ροές εδάφους, αλλά και τις πλημμύρες στην κατάντη αστική ζώνη.

Υπό αυτές τις συνθήκες, απαιτείται ένα ευρύ και πολυεπίπεδο πλαίσιο δράσεων για την διαχείριση της κατολισθητικής διακινδύνευσης, στα πεδία της κρατικής χωροταξικής παρέμβασης (περιορισμοί στην επέκταση της αστικοποίησης σε ευάλωτες περιοχές και κανονιστικός έλεγχος του βαθμού αστικοποίησης στις περιαστικές περιοχές, σύνταξη σχετικών μελετών και σύνθεση χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας, μακροσκοπικός έλεγχος της επίδρασης των χωματουργικών διαμορφώσεων και έργων σε περιαστικές περιοχές με απότομο ανάγλυφο κ.α.), βελτίωσης των συνθηκών ευστάθειας (απομάκρυνση ή αναμόρφωση κατοικιών και βελτίωση υποδομών σε αυτές τις περιοχές, μέτρα ανάσχεσης κατολισθητικής διακινδύνευσης, μέτρα μεταβολής της γεωμετρίας των πρανών, μέτρα προστασίας ή υποστήριξης κτλ.) και της παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης έναντι επερχόμενου κατολισθητικού συμβάντος.

4.2.3 Κατολισθήσεις και Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή περικλείει, ως γενικός όρος, τις παρατηρούμενες και αναμενόμενες μεταβολές στα παγκόσμια μετεωρολογικά φαινόμενα και τις κλιματικές συνθήκες. Η συσχέτισή της με την εκδήλωση περισσότερων ή/και εντονότερων κατολισθητικών φαινομένων δεν είναι εύκολη ή προφανής και στην παρούσα φάση γίνεται αντιληπτή κυρίως ποιοτικά, υπό την έννοια κυρίως της επιδείνωσης των συνθηκών ευστάθειας των φυσικών πρανών και την αύξηση της έντασης ή της ποσότητας των κλιματικών παραγόντων που ενεργοποιούν κατολισθήσεις, κυρίως αναφορικά με:

- Την εκδήλωση ακραίων επεισοδίων βροχοπτώσεων σε ένταση ή και διάρκεια, συχνά μετά από περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας. Η παρατηρούμενη αύξηση της συχνότητας τέτοιων βροχοπτώσεων, ως χαρακτηριστικό της κλιματικής αλλαγής,

οδηγεί σε συχνότερη υπέρβαση του κρίσιμου ορίου (κατώφλι), πέραν του οποίου η βροχόπτωση αποτελεί παράγοντα ενεργοποίησης μιας ή πολλαπλών μετακινήσεων για μια περιοχή. Αντίστοιχα η εκδήλωση επεισοδίων πρωτόγνωρης έντασης για μια περιοχή μπορεί να προκαλέσουν αστάθειες πρώτης φοράς.

- Ομοίως την εκδήλωση ακραίων χιονοπτώσεων, που ομοίως ενδέχεται να έχουν πολυεπίπεδη επίδραση (κορεσμός υπεδάφους, καταστροφή δέντρων λόγω επιφόρτισης και απώλεια επιφανειακής αντιδιαβρωτικής προστασίας μέσω του ριζικού συστήματος, επιφόρτιση οριακά ευσταθών κλιτύων κτλ.). Επιπρόσθετα, η μεγάλη θερμοκρασιακή αύξηση, εκδηλωνόμενη μετά από χιονόπτωση, οδηγεί σε άμεσο λιώσιμο του χιονιού, διαμορφώνοντας δυσμενείς συνθήκη για εδαφική ροή. Παράλληλα, η συνολική ανατροπή του κλιματικού κύκλου σε ορεινές περιοχές παγετώνων αναμένεται σημαντικής κλίμακας, επηρεάζοντας αρνητικά τους παράγοντες συνοχής του εδάφους σε ψυχρά κλίματα, ενώ σε ορεινές περιοχές, που λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας δεν θα καλύπτονται μόνιμα από παγετώνες, αναμένεται αύξηση των ροών κορημάτων (Huggel et al., 2012).
- Την αποψίλωση δασικών εκτάσεων λόγω συχνότερης εκδήλωσης πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας ή και ακραίων θερμοκρασιών. Προκαλείται αλλαγή στην υδρολογία της περιοχής λόγω μεταβολών στο ποσοστό κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων και απώλεια της επιφανειακής αντιδιαβρωτικής προστασίας μέσω του ριζικού συστήματος.

Ο ακόλουθος Πίνακας 9 (από Gariano & Guzzetti, 2016) περιλαμβάνει αναλυτικότερη ποιοτική περιγραφή των ανωτέρω.

Πίνακας 9: Σύνοψη αναμενόμενης μεταβολής συνθηκών λόγω της κλιματικής αλλαγής και ποιοτική επιρροή στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων (μετάφραση από Gariano & Guzetti, 2016)

Αλλαγή Κλιματικής Παραμέτρου	Μεταβολή Συνθηκών	Επιρροή στην Εκδήλωση Κατολισθήσεων
Αύξηση συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης	<ul style="list-style-type: none"> - Διατήρηση αυξημένου κορεσμού εδάφους - Αυξημένη επιφόρτιση εδάφους - Υψηλότερη στάθμη υπογείου ορίζοντα για μεγαλύτερες περιόδους - Αυξημένη παροχή ποταμών 	<ul style="list-style-type: none"> - Απαιτούνται λιγότερο έντονες βροχοπτώσεις για την επίτευξη κρίσιμου ποσοστού υγρασίας - Απομείωση της συνοχής (ή και της αναρρόφησης του εδάφους) - Αύξηση διατμητικών τάσεων - Μείωση διατμητικής αντοχής λόγω υψηλού υδροφόρου ορίζοντα - Αύξηση φαινομένου βάρους εδαφών - Πιο συχνός κορεσμός στο κρίσιμο ποσοστό υγρασίας - Αύξηση διάβρωσης στις όχθες και απομάκρυνσης στήριξης στη βάση των πρανών. - Υψηλότερη στάθμη λιμνών - Υψηλότεροι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες - Ένταση φαινομένων απότομου καταβιβασμού στάθμης και ενίσχυση δυνάμεων παράσυρσης.
Αύξηση έντασης βροχόπτωσης	<ul style="list-style-type: none"> - Η διήθηση υπερβαίνει την υπόγεια αποστράγγιση - Αυξημένη διαμπερή ροή - Αυξημένη επιφαν. απορροή 	<ul style="list-style-type: none"> - Σχηματισμός επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων - Μείωση της ενεργού κατακόρυφης τάσης - Μείωση της διατμητικής αντοχής - Αύξηση των δυνάμεων διαρροής και παράσυρσης - Σωλήνωση εντός υπεδάφους - Αύξηση της επιφανειακής διάβρωσης
Αύξηση θερμοκρασίας αέρα	<ul style="list-style-type: none"> - Αύξηση εξατμισοδιαπνοής - Αύξηση βλάστησης - Υψηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα - Ταχύ λιώσιμο χιονιού - Απομείωση πάγου στο εδαφικό πορώδες, μεταβολές στο μον. παγωμένο υπέδαφος 	<ul style="list-style-type: none"> - Απομείωση των προκατολισθητικών συνθηκών υπογείων υδάτων - Απαίτηση αυξημένων βροχοπτώσεων για την εκδήλωση κατολισθήσεων. - Αυξημένη εξατμισοδιαπνοή - Μείωση διήθησης - Αυξημένη επιφανειακή συνοχή λόγω των ριζών - Αύξηση διήθησης - Σχηματισμός υπόγειων οριζόντων, μείωση της ενεργού κατακόρυφης τάσης - Αύξηση επιφανειακής ροής και διήθησης - Μείωση της διατμητικής αντοχής, μείωση της συνοχής σε κερματισμένες βραχομάζες. - Απομείωση αντοχής βραχομάζας
Μεταβολές στην ταχύτητα και διεύθυνση των ανέμων	<ul style="list-style-type: none"> - Ενισχυμένη εξατμισοδιαπνοή - Ξεριζώμα δέντρων - Αυξημένη δράση κυμάτων στις ακτές 	<ul style="list-style-type: none"> - Μείωση εδαφικής υγρασίας - Υποβοήθηση ρωγματώσεων, μείωση συνοχής και εδαφικής αντοχής - Μείωση συνοχής λόγω ριζικού συστήματος - Χαλάρωση και αποσταθεροποίηση βραχοτεμαχών - Απώλεια πλευρικής υποστήριξης πρανών
Μεταβολές στα	<ul style="list-style-type: none"> - Περιοχές μη ευάλωτες (ή και 	<ul style="list-style-type: none"> - Προσαρμογή πρανών στις μεταβαλλόμενες καιρικές

Αλλαγή Κλιματικής Παραμέτρου	Μεταβολή Συνθηκών	Επιρροή στην Εκδήλωση Κατολισθήσεων
καιρικά συστήματα	ευάλωτες) στο παρελθόν υποκείμενες σε περισσότερες (ή λιγότερες) βροχοπτώσεις	συνθήκες
Μεγαλύτερες μετεωρολογικές διακυμάνσεις	- Περισσότερο (ή και λιγότερο) συχνόι κύκλοι κορεσμού και ξήρανσης	- Αυξημένη ρηγμάτωση - Αύξηση εύρους ασυνεχειών - Μείωση συνοχής και γωνίας διατμητικής τριβής σε βραχομάζες

Πέραν των ποιοτικών συσχετίσεων, η ποσοτική τεκμηρίωση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα κατολισθητικά φαινόμενα είναι δυσχερής, καταρχάς διότι η ποσοτική σύνδεση του κάθε τύπου κατολισθητικού φαινομένου με τους υφιστάμενους, πόσο μάλλον τους προβλεπόμενους για το μέλλον κλιματικούς παράγοντες δεν είναι προφανής ή μονοσήμαντη, αλλά και λόγω των αβεβαιοτήτων από το μικρό χρονικό πλαίσιο σύγκρισης και τις ελλείψεις στην πληρότητα και ακρίβεια των μετεωρολογικών δεδομένων και των καταγραφών κατολισθήσεων των περασμένων δεκαετιών.

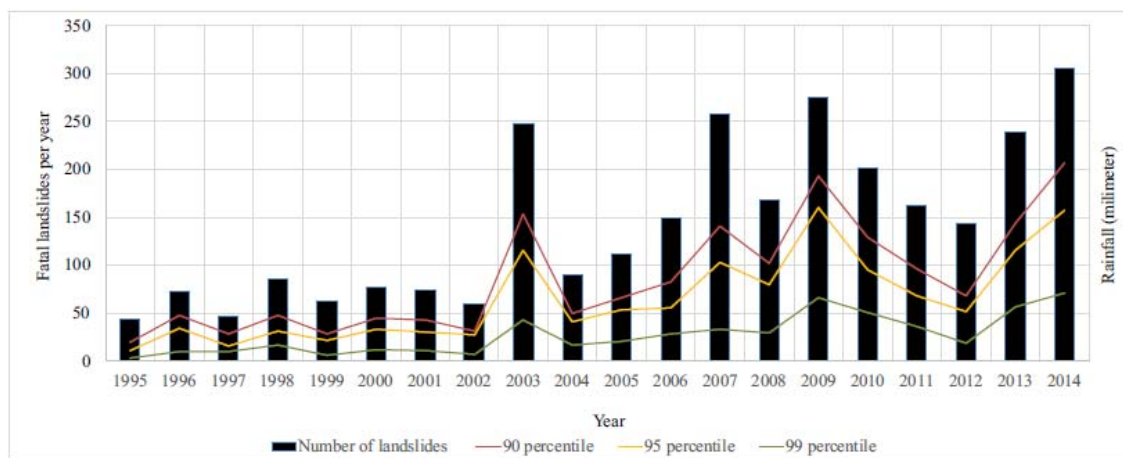


Fig. 4. Trend of yearly landslides and percentile of rainfall (millimeter).

Σχήμα 47: Σύγκριση αριθμού καταγραφόμενων κατολισθήσεων τις δεκαετίες 1995-2004 και 2005-2014 και συσχέτιση με ύψος ακραίων βροχοπτώσεων (Haque et al., 2019)

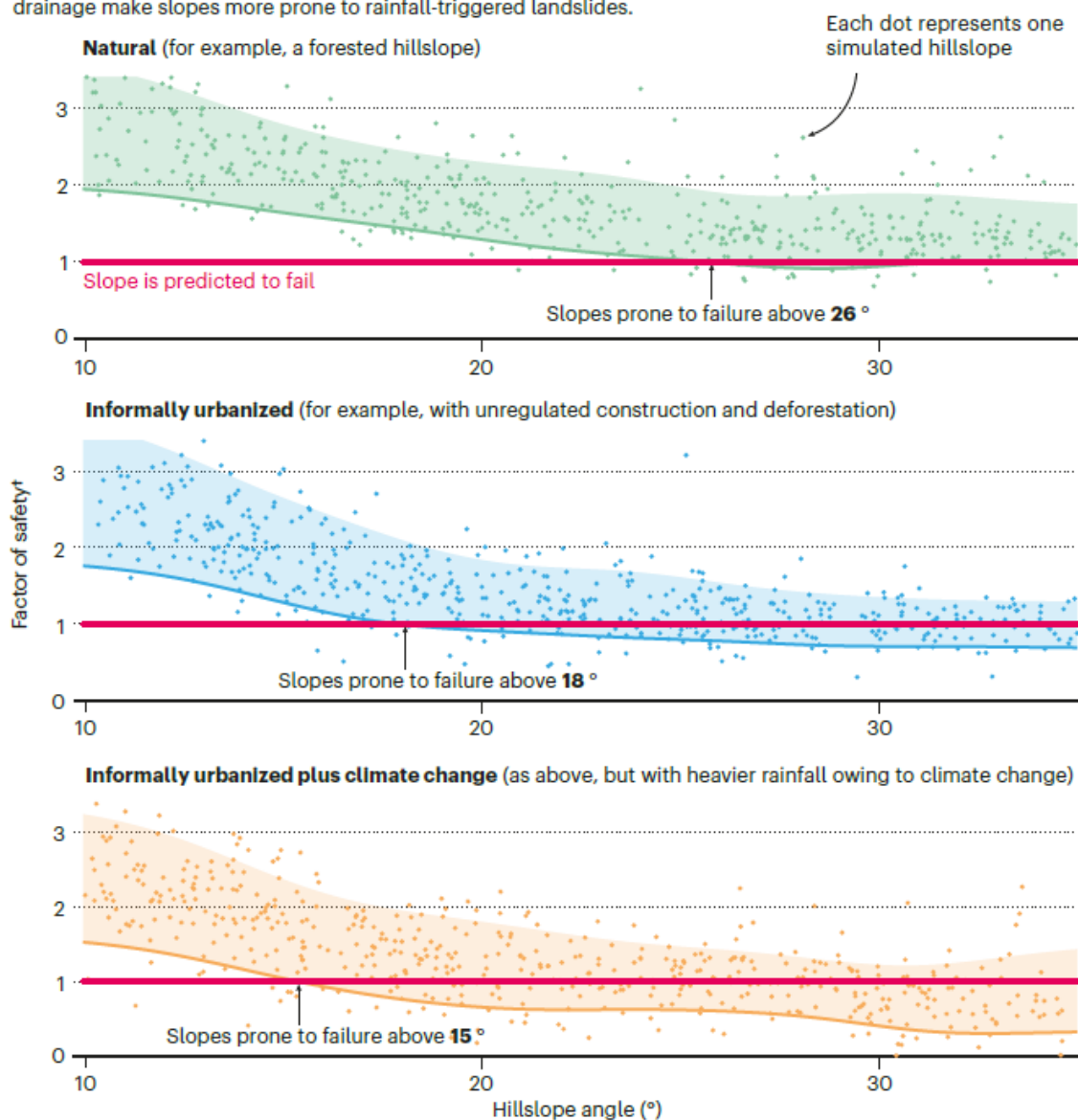
Από τις πολυάριθμες σχετικές απόπειρες (Gariano & Guzzetti, 2016) ενδεικτικά σημειώνεται ότι σχετική μελέτη (Haque et al., 2019) με χρήση των στοιχείων των καταγραφών της βάσης δεδομένων GLS-DAT (Κεφ. 2.2.2) και με περαιτέρω εμπλουτισμό της, ώστε να περιλαμβάνονται και προγενέστερα συμβάντα και οι καταγραφές να καλύπτουν μια περίοδο 20 ετών. Σε αυτή επιβεβαιώνεται η ευδιάκριτη αύξηση των κατολισθητικών συμβάντων στην δεύτερη δεκαετία κάλυψης σε σχέση με την πρώτη, σε

συμφωνία με την αντίστοιχη αύξηση στα ύψη και την ένταση των βροχοπτώσεων (Σχήμα 47, γενικά σε συμφωνία και με Σχήμα 23).

Επιπλέον, στη γεωγραφική απεικόνιση της πυκνότητας των κατολισθητικών συμβάντων σε παγκόσμιους χάρτες (hotspot) αναδεικνύονται και νέες περιοχές συχνής εκδήλωσης κατολισθήσεων. Τα παραπάνω ευρήματα έχουν τη σημασία τους, ωστόσο αφενός η περίοδος κάλυψης και σύγκρισης παραμένει μικρή, αφετέρου εμπεριέχονται τα μειονεκτήματα των παγκοσμίων βάσεων δεδομένων κατολισθήσεων (Κεφ. 2.2.2).

Chance of slope failure

Modelling shows that unregulated deforestation, slope cutting and unmanaged household water drainage make slopes more prone to rainfall-triggered landslides.



*Kernel density, see Supplementary Information; *Ratio between stabilizing and destabilizing forces acting on hillslope. If greater than 1, hillslope is considered stable.

Σχήμα 48: Απομείωση κλίσης ευστάθειας φυσικού πρανούς λόγω αστικοποίησης και λόγω συνδυαστικής θεώρησης κλιματικής αλλαγής, περίπτωση μελέτης για το Φρίταουν Σιέρα Λεόνε (Ozturk et al., 2022)

Σε κάθε περίπτωση, οι εκτιμήσεις του ρόλου της κλιματικής αλλαγής στην μεταβολή της παγκόσμιας κατολισθητικής επικινδυνότητας θα πρέπει να συνδυαστούν και με τις αναμενόμενες γεωγραφικές – κοινωνικές αλλαγές μετά από κάποιες δεκαετίες, όταν οι όποιες μεταβολές στα κλιματικά χαρακτηριστικά θα γίνουν πιο ευδιάκριτες. Σε αυτό το πλαίσιο, και λαμβάνοντας υπόψη τα αναφερόμενα στα Κεφ. 4.2.1 - 4.2.3, ο συνδυασμός της κλιματικής αλλαγής με την ταχεία αστικοποίηση, αναμένεται να δράσει πολλαπλασιαστικά ως προς τις συνέπειες, με δεδομένο ότι και οι δύο μεταβολές αναμένονται να εμφανιστούν με αιχμή τις τροπικές περιοχές. Σχετική σύνδεση και διερεύνηση των παραπάνω δίδεται σε μελέτη περίπτωσης για το Φρίταουν της Σιέρα Λεόνε (Σχήμα 48, Ozturk et al., 2022).

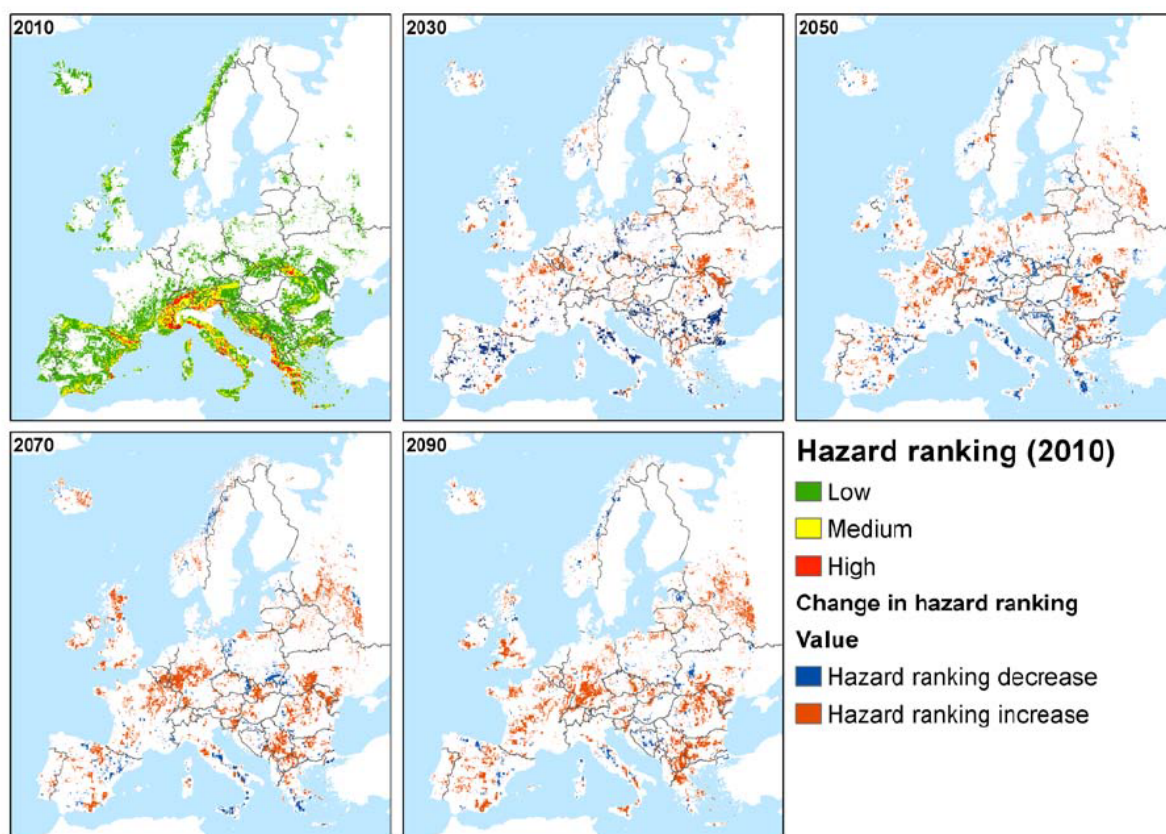


Figure 3-5: Changes in European landslide hazard 2010 until 2090. In total, landslide exposed areas increase by 1.5%. Most significant changes can be observed in areas with less dominant topography such as central Germany, the central part of Romania and western UK.

Σχήμα 49: Πρόβλεψη μεταβολής κατολισθητικής επικινδυνότητας στην Ευρώπη από το 2010 και ανά 20 έτη έως το 2090 (SafeLand, 2011, Deliverable 3.7)

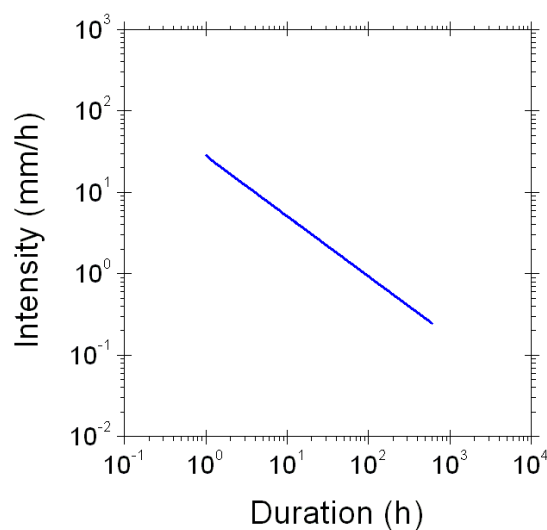
Στον ευρωπαϊκό χώρο σχετικές αναλύσεις και εκτιμήσεις διενεργήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος SafeLand (SafeLand, 2011, Deliverable 3.7). Στη βάση κλιματικών σεναρίων, που για την περιοχή της Μεσογείου καταλήγουν σε μείωση της μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης και σημαντική αύξηση του ύψους βροχόπτωσης των ακραίων

συμβάντων, σεναρίων αλλαγών στις χρήσεις γης κτλ., προκύπτει μεταβολή της κατολισθητικής επικινδυνότητας (Σχήμα 49) και συνολικά σχετικά μικρή μέση αύξηση των επιδεκτικών σε κατολισθήσεις περιοχών κατά 1,5%. Με σύνθεση της κατολισθητικής επικινδυνότητας με τα σενάρια μεταβολής των δημογραφικών στοιχείων ανά χώρα προκύπτουν και οι αντίστοιχες μεταβολές (γενικά αυξήσεις) στον πληθυσμό που θα είναι εκτεθειμένος στην κατολισθητική επικινδυνότητα.

Ειδικά για τον ελληνικό χώρο, η συσχέτιση είναι πιθανόν περαιτέρω δύσκολη, λόγω των ελλιπέστερων διαθέσιμων στοιχείων και τεκμηρίωσης σε σχέση με άλλες χώρες, καθώς αφενός στο μεσογειακό κλίμα τα ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα εκδηλώνονται γενικά ανά πιο αραιά διαστήματα, παρά την όποια αύξηση της συχνότητας τους, σε σχέση με περιοχές σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες, αφετέρου η πλειονότητα των κατολισθητικών φαινομένων εκδηλώνεται σε περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή κάλυψη και ημιορεινό – ορεινό ανάγλυφο, με τα διαθέσιμα στοιχεία ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, πχ μέσω των δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών, μελετών ή άλλων στοχαστικών μοντέλων να μην είναι συχνά επαρκή και ακριβή. Σημειώνεται ότι στην προαναφερθείσα μελέτη SafeLand (SafeLand, 2011, Deliverable 3.7) η πρόβλεψη για τον ελληνικό χώρο κατέληξε σε μεταβολή της έκτασης των εκτεθειμένων στην κατολισθητική επικινδυνότητα περιοχών, από το 24,1% της χώρας το 2010 στο 22,8% (μικρή μείωση) το 2050 και στο 29,4 (αύξηση 5%) το 2090, ενώ ο εκτιθέμενος στην επικινδυνότητα πληθυσμός μεταβάλλεται από ~1.000.000 το 2010 σε ~800.000 το 2050 και σε ~1.100.000 το 2090.

Οι Παπανικολάου και Διακάκης (2011) επιχείρησαν ομοίως να προσεγγίσουν ποσοτικά την αλλαγή της κατολισθητικής επικινδυνότητας λόγω της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα, με παραμετρική ανάλυση και χρήση εμπειρικών σχέσεων για το κατώφλι βροχόπτωσης (συνδυασμός έντασης και διάρκειας βροχόπτωσης, Σχήμα 50) ως προς την πρόκληση κατολισθητικών φαινομένων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι γενικώς στο ίδιο πλαίσιο με αυτά από το πρόγραμμα SafeLand. Χρησιμοποιήθηκαν δύο εμπειρικές σχέσεις, μία με παγκόσμια αναφορά και μία από την Ιταλία (Calcaterra et al., 2000) λόγω ανάλογων της Ελλάδας κλιματικών συνθηκών. Παράλληλα, εξετάστηκαν και εδώ διαφορετικά προγνωστικά μοντέλα της μεταβολής στο μέγεθος της βροχόπτωσης στο χρόνο λόγω των κλιματικών αλλαγών, τα οποία είναι κατανοητό ότι ενέχουν μεγάλες αβεβαιότητες και διαφορές μεταξύ τους.

Από την παραμετρική ανάλυση προκύπτουν γενικά αυξήσεις στην πιθανότητα υπέρβασης του κατωφλίου πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων, οι οποίες χαρακτηρίζονται κατά μέσο όρο οριακές για τη δεκαετία 2040-2049, μη μεταβάλλοντας ουσιαστικά τη σημερινή εικόνα επικινδυνότητας έναντι κατολισθήσεων. Ωστόσο σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου έως τα τέλη του 21^{ου} αιώνα, και με προφανώς αυξημένη αβεβαιότητα λόγω της μακράς χρονικής προβολής, προκύπτει υπολογιστικά σημαντική αύξηση στην πιθανότητα υπέρβασης του κατωφλίου πρόκλησης κατολισθήσεων.



Σχήμα 50: Εξίσωση Κατωφλίου πρόκλησης κατολίσθησης από βροχόπτωση - Calcaterra et al. (2000) για την Καμπανία.

Πηγή: http://www.db.gndci.cnr.it/php2/rainfall/thresholds/thresholds_type.php?typesigla=I-D

Σημειώνεται περαιτέρω ότι στον ελληνικό χώρο έχουν σημειωθεί δύο πρόσφατες περιπτώσεις εκτεταμένων κατολισθητικών φαινομένων σε μικρή περιοχή, μετά από πολύ έντονες βροχοπτώσεις (Νομός Χανίων 2019, Nefros et al., 2023 & Νομός Καρδίτσας, μεσογειακός κυκλώνας Ιανός, 2000, Zekkos et al., 2020). Τα παραπάνω φαινόμενα μπορεί να υποστηριχθεί ότι εντάσσονται σε μια φάση τακτικότερης εμφάνισης ακραίων βροχοπτώσεων και στον ελληνικό χώρο.

4.2.4 Ανισοκατανομή Συνεπειών και Κοινωνικο-οικονομικής Τρωτότητας

Οι συνέπειες οποιασδήποτε φυσικής καταστροφής, συμπεριλαμβανόμενων των κατολισθητικών φαινομένων, παρουσιάζουν σημαντική γεωγραφική ανισοκατανομή, η οποία δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο στη διαφοροποίηση των συνθηκών και των επιβαρυντικών παραγόντων (π.χ. στην περίπτωση των κατολισθήσεων μορφολογικών, λιθολογικών, τεχνικογεωλογικών, τεκτονικών, κλιματικών κ.α.) της κάθε περιοχής. Οι ανθρώπινες απώλειες είναι κατά πολύ υψηλότερες στις πιο φτωχές, αναπτυσσόμενες χώρες (Froude & Petley, 2012), όπως είναι και το αντίστοιχο κοινωνικό κόστος από τις βλάβες, ενώ το οικονομικό κόστος των βλαβών λόγω κατολισθήσεων είναι μεν πολύ υψηλότερο στις αναπτυγμένες χώρες σε απόλυτα μεγέθη, ωστόσο με αναγωγή στο ατομικό εισόδημα ή στο ΑΕΠ κάθε χώρας η σύγκριση αντιστρέφεται και σε αυτή την περίπτωση,

εις βάρος των αναπτυσσόμενων χωρών (Turner, 2018, Mertens et al., 2016, Petrucci, 2022).

Η συντριπτική πλειονότητα των ανθρώπινων απωλειών από κατολισθήσεις προκύπτει σε περιοχές που αναγνωρίζονται στους υφιστάμενους χάρτες ως μέτριας, υψηλής ή πολύ υψηλής επικινδυνότητας (Nadim et al., 2006), συνεπώς η λήψη στοχευμένων μέτρων πρόληψης και προστασίας για την απομείωση των ανθρώπινων και υλικών απωλειών υποστηρίζεται από την υφιστάμενη γνώση αναγνώρισης της επικινδυνότητας.

Πράγματι αυτό έχει επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό στις αναπτυγμένες χώρες. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η Ιταλία, όπου η γνώση και η εγκατάσταση συστημάτων προειδοποίησης έχει επιφέρει σταδιακή μείωση των πολύνεκρων συμβάντων (Gariano & Guzetti, 2016, Σχήμα 52), ενώ τα αντίστοιχα ευρήματα στην περίπτωση του Χονγκ Κονγκ συνηγορούν σε επίτευξη ακόμα δραστηρότερης μείωσης των θανάτων από κατολισθητικά φαινόμενα, πιθανόν λόγω της συγκριτικά περιορισμένης έκτασης και του πιο αστικού χαρακτήρα του. Στην περίπτωση του Χονγκ Κόνγκ η μείωση των θανάτων παρατηρήθηκε μετά την κεντρική εφαρμογή σχετικού προγράμματος αντιμετώπισης της κατολισθητικής επικινδυνότητας με πέντε άξονες (Kjekstad & Highland, 2009):

(i) Γεωτεχνικός έλεγχος στα νέα τεχνητά πρανή, (ii) βελτίωση ευστάθειας υφιστάμενων τεχνητών πρανών, (iii) θέσπιση κανονιστικού πλαισίου, (iv) έλεγχος χρήσεων γης στις υπό

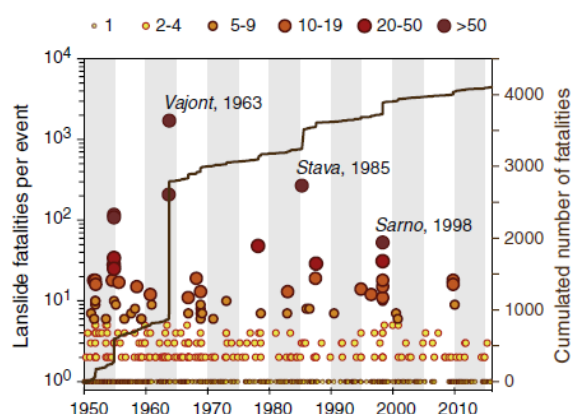


Fig. 10. Temporal distribution of fatal landslides in Italy between 1950 and 2015 with an indication of the magnitude of the events, measured by the number of fatalities (dead and missing persons), shown in six classes. The place and year of the three largest events is given.

Source: <http://polaris.irpi.cnr.it>.

Σχήμα 51: Επίτευξη σταδιακής απομείωσης θανατηφόρων κατολισθήσεων στην Ιταλία (Πηγή: Gariano & Guzetti, 2016)

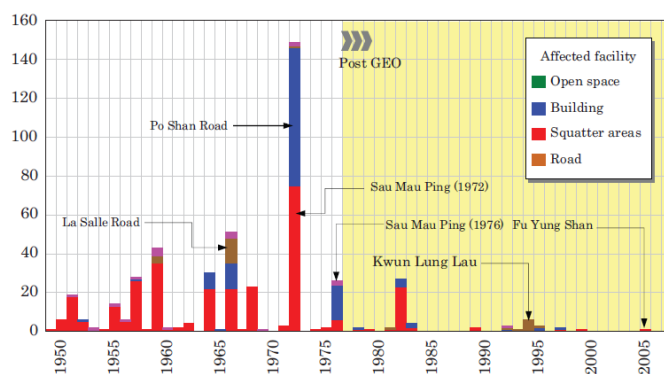


Fig. 30.6 Shows the gradual reduction of the fatality rate from landslides, in Hong Kong, tracked beginning in the 1950s and falling drastically by 2005

Σχήμα 52: Επίτευξη σταδιακής απομείωσης θανατηφόρων κατολισθήσεων στο Χόνγκ Κόνγκ (Πηγή: Kjekstad & Highland, 2009)

ανάπτυξη περιοχές και (v) υλοποίηση συστήματος προειδοποίησης και επέμβασης σε έκτακτες ανάγκες.

Σημειώνεται επίσης ότι λόγω του πολύ υψηλού κόστους των βλαβών στις αναπτυγμένες χώρες και της αντίστοιχης υψηλής οικονομικής αξίας των υποδομών και των επενδύσεων που τελούν υπό διακινδύνευση, οι οικονομικές δαπάνες για τη λήψη προληπτικών μέτρων ανάσχεσης της κατολισθητικής επικινδυνότητας (και έναντι των λοιπών φυσικών καταστροφών) και μείωσης του επιπέδου της διακινδύνευσης χαρακτηρίζονται και με οικονομικούς όρους αποδοτικές (Kjekstad & Highland, 2009).

Ωστόσο, τα διαθέσιμα στοιχεία σε παγκόσμιο επίπεδο επιδεικνύουν ότι η απομείωση των απωλειών φαίνεται να αποτελεί επίτευγμα – προνόμιο των αναπτυγμένων κρατών και συνολικά καταγράφεται σχετική σταθερότητα ή και σταδιακή αύξηση των ανθρώπινων απωλειών ανά έτος, όπως καταγράφεται στις βάσεις δεδομένων (και υπό την αίρεση μεγαλύτερης υποκαταγραφής τις περασμένες δεκαετίες – Κεφ. 2.2.2) ή όπως εκτιμάται στη βιβλιογραφία (π.χ. Nadim et al., 2006, Σχήμα 23 από Haque et al., 2016 κτλ.). Προκύπτει, δηλαδή ότι σε παγκόσμιο επίπεδο το μέσο ισοζύγιο μεταξύ των δράσεων προς τη μείωση των ανθρώπινων απωλειών (επιγραμματικά εμβάθυνση και διάχυση τεχνικής γνώσης για την κατανόηση των κατολισθητικών φαινομένων, δυνατότητες έγκαιρης αναγνώρισης των επισφαλών περιοχών και λήψης μέτρων επέμβασης, ανάπτυξη και θεσμοθέτηση κανονιστικού πλαισίου και μηχανισμών διαχείρισης της διακινδύνευσης, βελτίωση υποδομών και μέσων αντιμετώπισης, διαθεσιμότητα συστημάτων παρακολούθησης – έγκαιρης προειδοποίησης, τοπικές, εθνικές, υπερεθνικές ή παγκόσμιες πρωτοβουλίες και προγράμματα μείωσης των απωλειών) και των σύγχρονων όρων εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων, με την υπό συνθήκες αυξημένη καταστροφικότητα τους (Κεφ. 4.2.1 - Κεφ. 4.2.3), δεν μεταβάλλεται προς την κατεύθυνση της μείωσης των απωλειών, λόγω του μεγάλου αριθμού απωλειών στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σε αυτές τις χώρες παρατηρείται δε, λόγω της περιβαλλοντικής υποβάθμισης (Κεφ. 4.2.1, 4.2.2), μείωση στο επίπεδο των κρίσιμων κατωφλίων για την εκδήλωση κατολισθήσεων, αλλά και των κατωφλίων πρόκλησης θανάτων ή σοβαρών βλαβών (Turner, 2018).

Προς αυτή την κατεύθυνση σημειώνεται ότι τεκμηριώνεται στατιστικά η συσχέτιση του ύψους της διακινδύνευσης με κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες, εκφρασμένοι μέσω κάποιου ή κάποιων δεικτών (ΑΕΠ, ατομικό εισόδημα, επίπεδο ανάπτυξης, αλλά και έμμεσους δείκτες αναφορικά με τη νοσοκομειακή περίθαλψη, το προσδόκιμο ζωής, τις

χρήσεις γης ή το ποσοστό δασικών-καλλιεργήσιμων εκτάσεων) (π.χ. Nadim et al., 2006, Kahn, 2005, Petrucci, 2022). Με δεδομένο ότι η σύγκριση γίνεται για χώρες με ούτως ή άλλως υψηλό επίπεδο κατολισθητικής επιδεκτικότητας ή επικινδυνότητας, ένας βασικός λόγος της αποτυχίας απομείωσης των ανθρώπινων απωλειών στις αναπτυσσόμενες χώρες αποτελεί η διατήρηση των παραγόντων και σχημάτων που διαμορφώνουν την κοινωνικο-οικονομική τρωτότητα (Κεφ. 3.2.3) στις χώρες αυτές σε υψηλά επίπεδα.

Στο Σχήμα 53 αποτυπώνεται η διαφοροποίηση της φυσικής τρωτότητας μεταξύ κρατών, εκφρασμένη έμμεσα ως η πιθανότητα θανάτου του κανονικοποιημένου πληθυσμού που εκτίθεται στην κατολισθητική επικινδυνότητα. Παρατηρούνται διαφοροποιήσεις άνω της μιας τάξης μεγέθους μεταξύ χωρών με ορεινό ανάγλυφο και διαφορετικό επίπεδο ανάπτυξης. Συνεπώς τα περιθώρια για βελτιωμένη αντιμετώπιση της κατολισθητικής διακινδύνευσης και σημαντικό περιορισμό των ανθρώπινων απωλειών στις αναπτυσσόμενες χώρες παραμένουν μεγάλα.

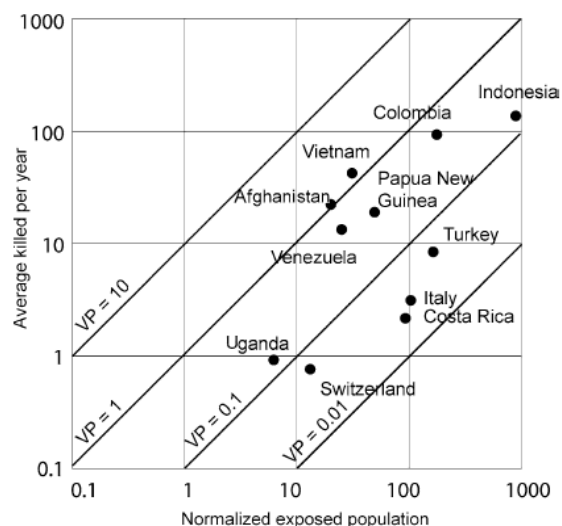


Fig. 12 Proxy of vulnerability expressed in killed versus exposed population in landslide fatalities

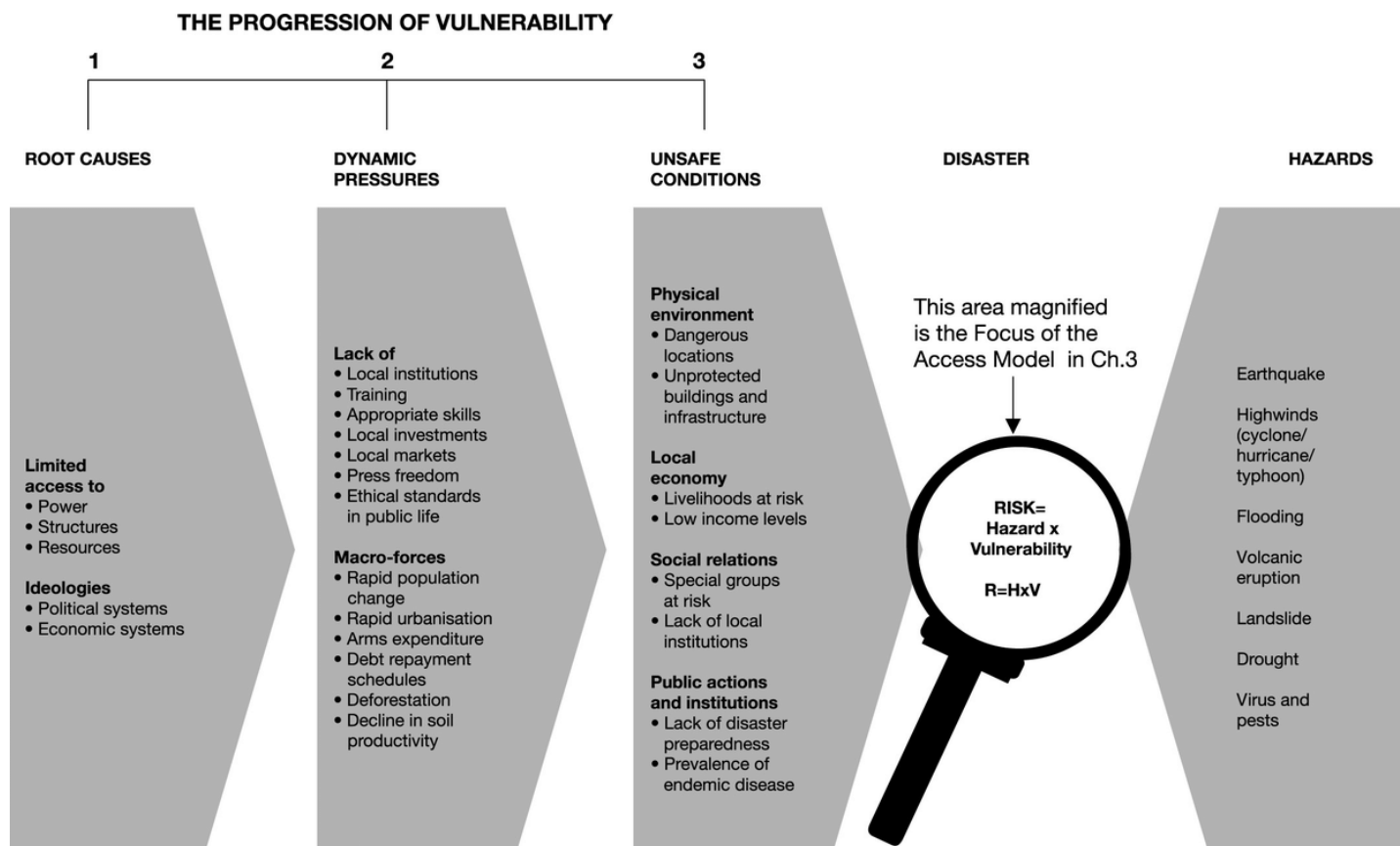
Σχήμα 53: Διαφοροποίηση Τρωτότητας ως λόγου θανάτων προς κανονικοποιημένο εκτιθέμενο πληθυσμό μεταξύ ορεινών κρατών.

Πηγή: Nadim et al., 2006.

Η μελέτη των δημογραφικών, κοινωνικών, οικονομικών, πολιτισμικών κ.α. παραγόντων που διαμορφώνουν και αναπαραγάγουν την αυξημένη κοινωνικο-οικονομική τρωτότητα στις αναπτυσσόμενες χώρες, με αποτέλεσμα την διατήρηση ή και ένταση των συνεπειών από τα φαινόμενα κατολισθήσεων και γενικά φυσικών καταστροφών, αποτελεί αντικείμενο πολλών ειδικοτήτων, όχι μόνο τεχνικών. Για την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών που καθηλώνουν την τρωτότητα στις αναπτυσσόμενες χώρες σε υψηλό επίπεδο έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχήματα. Ενδεικτικά αναφέρεται το σχήμα «πίεσης και εκτόνωσης» (PAR – pressure and release, Blaikie et al., 1994), όπου γίνεται διάκριση στα εγγενή αίτια και τις δυναμικές πιέσεις της τρωτότητας. Στα εγγενή αίτια περιλαμβάνονται οι πολιτικές, κοινωνικές, δημογραφικές και οικονομικές διεργασίες που συναρτώνται με τα οικονομικά συστήματα των χωρών, τις κοινωνικές σχέσεις, τις πρακτικές νομής και άσκησης της εξουσίας και τους φορείς αυτής, τα δημογραφικά στοιχεία, τα ιδεολογικά σχήματα, οι φυλετικές σχέσεις, το ιστορικό συχνών πολεμικών συγκρούσεων ή εμφύλιων

συγκρούσεων, την εμπιστοσύνη των πολιτών ή κάποιων μειονοτήτων προς την κεντρική εξουσία ή την εμπιστοσύνη στις γνώσεις και δυνάμεις τους.

Οι δυναμικές πιέσεις περιγράφουν τις ενδιάμεσες διαδικασίες και δράσεις που οδηγούν στη μετάβαση από τα εδραιωμένα, εγγενή αίτια σε ένα επικίνδυνο περιβάλλον, ως συμπτώματα και επακόλουθά τους σε ένα πιο βραχυχρόνιο πλαίσιο (π.χ. της μιας γενιάς). Αφορούν την έλλειψη γνώσης, κατάρτισης και εφοδίων, παραγωγικών δομών και επενδύσεων, την παγιωμένη ανισοκατανομή των πόρων, τη διαφθορά, την απουσία ελευθερίας έκφρασης, την έλλειψη υποδομών, αλλά και τις τρέχουσες κοινωνικο-οικονομικές επιλογές που ευνοούν ή αποθαρρύνουν την πληθυσμιακή αύξηση, την άναρχη και ταχεία αστικοποίηση, την αποψίλωση δασών για μετατροπή τους σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, την οικονομική εξάρτηση κ.α.



Σχήμα 54: Γραφική απεικόνιση σχήματος «πίεσης και εκτόνωσης» για την ανάλυση της αυξημένης τρωτότητας σε αναπτυσσόμενες χώρες (Πηγή: Blaikie et al., 1994)

Τα παραπάνω διαμορφώνουν ένα επικίνδυνο περιβάλλον διαβίωσης, που περιλαμβάνει ευάλωτες περιοχές, κακή ποιότητα κτιρίων και υποδομών, χαμηλά εισοδήματα ή υποσιτισμό που επηρεάζουν τη φυσική τρωτότητα, ανταγωνιστικές κοινωνικές σχέσεις,

αποκλεισμό μειονοτήτων, έλλειψη αντίληψης της επικινδυνότητας, πρόληψής της και ετοιμότητας στην αντιμετώπιση της κ.α. (Σχήμα 54).

4.2.5 Συνδυασμός Κατολισθήσεων και Λοιπών Γεωκινδύνων – Αλυσιδωτά γεγονότα

Σε γεωγραφικές ζώνες που είναι ευάλωτες σε σεισμικά και πλημμυρικά φαινόμενα και ταυτόχρονα επιδεκτικές σε κατολισθήσεις, η εκδήλωση ενός σεισμικού ή πλημμυρικού γεγονότος ενεργοποιεί πολύ συχνά κατολισθητικά φαινόμενα, συχνά πολυάριθμα και μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις ενεργοποιείται μια αλυσίδα εκδήλωσης πολλαπλών, διαδοχικών γεωκινδύνων, που είναι πολύ δύσκολο να αποκοπεί ή και να προβλεφθεί εκ των προτέρων. Η περίπτωση της πόλης Beichuan, που σήμερα έχει εγκαταλειφθεί, είναι χαρακτηριστική, καθώς βίωσε μια αλυσίδα επτά σημαντικών γεωκινδύνων ενός λίγων ετών, με αφετηρία του πολύ ισχυρό σεισμό του Sichuan $M=8,0$ του 2008. Το σεισμικό γεγονός προκάλεσε σε πρώτη φάση δεκάδες χιλιάδες ανθρώπινες απώλειες, αλλά και εκατοντάδες κατολισθήσεις, πολλές από τις οποίες οδήγησαν στο σχηματισμό πρόχειρων φραγμάτων και προσωρινών ταμιευτήρων σε κοιλάδες, ένας εκ των οποίων πολύ μεγάλων διαστάσεων και εξαιρετικά επισφαλής για τα πλήξει την κατάντη σεισμόπληκτη πόλη άλλα και άλλες πόλεις σε μεγαλύτερη απόσταση, με εκατομμύρια κατοίκους. Για προληπτικούς λόγους επιλέχθηκε η ταχεία, ελεγχόμενη διάρρηξη του επισφαλούς φράγματος, που προκάλεσε, αναμενόμενη σε ένα βαθμό, πλημμύρα σε τμήματα της εγκαταλελειμμένης πόλης. Εν συνεχεία έλαβαν χώρα νέα επεισόδια ροών κορημάτων και αλλαγών της κοίτης του ποταμού, αλλά και μεγάλης κλίμακας αποθέσεις φερτών υλικών που σταδιακά ανύψωσαν την κοίτη του ποταμού και προκάλεσαν νέες πλημμύρες (Zhang et al., 2014, Cui et al., 2012).

Πέραν της εκδήλωσης αλυσιδωτών γεωκινδύνων, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου παρατηρούνται αλλαγές στην πυκνότητα και την τυπολογία εμφάνισης των κατολισθητικών φαινομένων, αλλά και στο κατώφλι βροχόπτωσης για την εκδήλωσή τους, μετά από ισχυρό σεισμικό συμβάν. Μια τέτοια περίπτωση έχει καταγραφεί στην Ταιβάν μετά το σεισμό του Chi-Chi $M_w=7,7$ του 1999 (Lin et al., 2006). Σημειώθηκε αύξηση των συμβάντων και της κατολισθητικής επικινδυνότητας, μετά το σεισμό σε σχέση με πριν από αυτόν, και ανεξάρτητα των κατολισθήσεων που εκδηλώθηκαν κατά ή αμέσως μετά το σεισμικό γεγονός. Η μεταβολή στη συχνότητα των κατολισθήσεων αποδίδεται σε παράγοντες όπως η παραμονή αναμοχλευμένων και αποδομημένων από το σεισμό γεωολικών επί των πρανών και μετακίνησή τους προς τα κατάντη σε μεταγενέστερο

στάδιο και με εναυσματικό παράγοντα τη βροχόπτωση ή η πρόκληση ρηγματώσεων σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά, και άρα επιφανειών αδυναμίας και απομείωσης της αντοχής του εδάφους και της ευστάθειας των πρανών. Η αύξηση του αριθμού των κατολισθήσεων προκάλεσε αύξηση του όγκου των κατολισθημένων υλικών, με αποτέλεσμα αντίστοιχα αύξηση στα μεταφερόμενα ιζήματα από τα ποτάμια προς τη βάση της κοιλάδας της πλέον πληττόμενης περιοχής και αντίστοιχα μεταβολή στη μορφολογία της κοίτης των ποταμών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η αξιολόγηση και διαχείριση της διακινδύνευσης έναντι των αλυσιδωτών γεωκινδύνων θα πρέπει να συνεκτιμάει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γεωκινδύνων και των ενδεχομένων μεγάλης / εκθετικής αύξησης στην ένταση και την συχνότητα των φαινομένων ή / και την τρωτότητα των στοιχείων σε διακινδύνευση. Κάποια σχετικά βήματα / ερωτήματα προς αυτή την κατεύθυνση περιλαμβάνουν (αναφορές από Fan et al., 2019): (i) την αναγνώριση και τα χαρακτηριστικά του πιθανού αρχικού γεγονότος αναφοράς, (ii) τη διερεύνηση του δυναμικού χωρικής και χρονικής επέκτασης και την αλληλεπίδραση των επικινδυνοτήτων, (iii) τη διερεύνηση του κύκλου χρονικής και χωρικής εξέλιξης της επικινδυνότητας και πιθανών μηχανισμών ενίσχυσής τους, (iv) διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών παραγόντων τρωτότητας και των πρώιμων ενδείξεων κάθε επικινδυνότητας. Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας αξιολόγησης και διαχείρισης της διακινδύνευσης (Κεφ. 3) και την ημιποιοτική / ποσοτική εκτίμηση της διακινδύνευσης, θα απαιτηθεί σύνταξη διαγραμμάτων ροής / δένδρων διαγραμμάτων για κάθε ενδεχόμενη περίπτωση αλυσιδωτής εκδήλωσης γεωκινδύνων, με εκτίμηση της πιθανότητας στον κάθε κλάδο / ενδεχόμενο.

4.2.6 Σύγχρονο Πλαίσιο Αντιμετώπισης - η Έννοια της Ανθεκτικότητας

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα περιθώρια βελτιώσεων στη διαχείριση και αντιμετώπιση της κατολισθητικής διακινδύνευσης και περιορισμού των ανθρώπινων απωλειών είναι μεγάλα, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως προτεραιότητα η ενίσχυση της ανθεκτικότητας (resilience, στα ελληνικά αποδίδεται συχνά και ως προσαρμοστικότητα) σε επίπεδο κράτους, κοινωνίας ή κοινότητας, για τη μείωση της τρωτότητας και μέσω αυτής της μείωσης της διακινδύνευσης έναντι των φυσικών καταστροφών. Η έννοια της ανθεκτικότητας έχει πολλούς ορισμούς, με αυτόν που έχει υιοθετηθεί από τον ΟΗΕ να την περιγράφει ως την ικανότητα ενός συστήματος, κοινότητας ή κοινωνίας που έχει εκτεθεί σε μια επικινδυνότητα να ανθίσταται, να επωμίζεται, να ανταποκρίνεται, να

προσαρμόζεται, να μετασχηματίζεται και να ανακάμπτει από τις συνέπειες της επικινδυνότητας με έγκαιρο και αποτελεσματικό τρόπο, συμπεριλαμβάνοντας τη διατήρηση και αποκατάσταση των βασικών δομών και λειτουργιών του μέσω της διαχείρισης της διακινδύνευσης (<https://www.undrr.org/terminology/resilience>)⁶.

Η ανθεκτικότητα τέθηκε ως βασικό συστατικό στο Πλαίσιο Χιόγκο (Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters), μετά από αξιολόγηση των βελτιώσεων και των ελλείψεων από την εφαρμογή της προγενέστερης Στρατηγικής της Γιοκοχάμα, με τις πέντε προτεραιότητες του Πλαισίου να είναι (https://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf):

1. Η διασφάλιση της απομείωσης της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών αποτελεί εθνική και τοπική προτεραιότητα με ισχυρή θεσμική βάση προς εφαρμογή.⁷
2. Αναγνώριση, αξιολόγηση και παρακολούθηση της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών και ενίσχυση της έγκαιρης προειδοποίησης.⁸
3. Χρήση της γνώσης, της καινοτομίας και της εκπαίδευσης για την οικοδόμηση μιας κουλτούρας ασφάλειας και ανθεκτικότητας σε όλα τα επίπεδα.⁹
4. Απομείωση των υποκείμενων παραγόντων διακινδύνευσης.¹⁰

⁶ Στη βιβλιογραφία συχνά (πχ Lee & Jones, 2004) ο όρος ανθεκτικότητα ή προσαρμοστικότητα (resilience) εστιάζεται στη δυνατότητα του συστήματος να παραμένει λειτουργικό κατά την εκδήλωση της φυσικής καταστροφής και να ανακάμπτει μετά από αυτή, ενώ χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά οι διακριτοί όροι της ευρωστίας (robustness), ως η ικανότητα ενός συστήματος να αντεπεξέρχεται και να ανταποκρίνεται στην ένταση του συμβάντος φυσικής καταστροφής, και της ετοιμότητας (preparedness) του συστήματος, που αναφέρεται κυρίως στις υπηρεσίες και τις δράσεις επέμβασης και διάσωσης και στην ενεργό συμμετοχή της κοινότητας σε αυτές τις δράσεις. Σύμφωνα με τον ορισμό του ΟΗΕ που παρατίθεται, η έννοια της ανθεκτικότητας ενσωματώνει την ευρωστία και την ετοιμότητα του συστήματος.

⁷ Εξειδίκευση Ενεργειών: Θεσμικοί μηχανισμοί - εθνικές πλατφόρμες με καθορισμένες αρμοδιότητες, ένταξη της απομείωσης της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών στις αναπτυξιακές πολιτικές και το σχεδιασμό, ανά τομέα ή διατομεακά, νομοθεσία για υποστήριξη της απομείωσης της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών, αποκέντρωση των ευθυνών και πόρων, αξιολόγηση των ανθρώπινων πόρων και ικανοτήτων, προώθηση των πολιτικών δεσμεύσεων, συμμετοχή σε επίπεδο κοινότητας.

⁸ Εξειδίκευση Ενεργειών: Αξιολόγηση διακινδύνευσης και σύνθεση χαρτών, επεξεργασία και διάδοσης της πολλαπλής διακινδύνευσης, δείκτες για την απομείωση της διακινδύνευσης έναντι καταστροφών και την τρωτότητα.

⁹ Εξειδίκευση Ενεργειών: Ανταλλαγή πληροφοριών και συνεργασία, δίκτυα σε διάφορους κλάδους και διάλογος, χρήση τυποποιημένης ορολογίας για την απομείωση της διακινδύνευσης, ένταξης της απομείωσης της διακινδύνευσης στο σχολικό πρόγραμμα σπουδών, στην επίσημη και ανεπίσημη εκπαίδευση, εκπαίδευση και μάθηση σχετικά με την απομείωση της διακινδύνευσης σε επίπεδο κοινότητας, τοπικών αρχών, σε στοχευμένες ομάδες και με ισότιμη πρόσβαση, ενίσχυση έρευνας προς την πολλαπλή διακινδύνευση, το κοινωνικο-οικονομικό πλαίσιο και την εφαρμογή, ευαισθητοποίηση του κοινού και των ΜΜΕ.

5. Ενίσχυση της ετοιμότητας έναντι καταστροφών για αποτελεσματική αντιμετώπιση σε όλα τα επίπεδα.¹¹

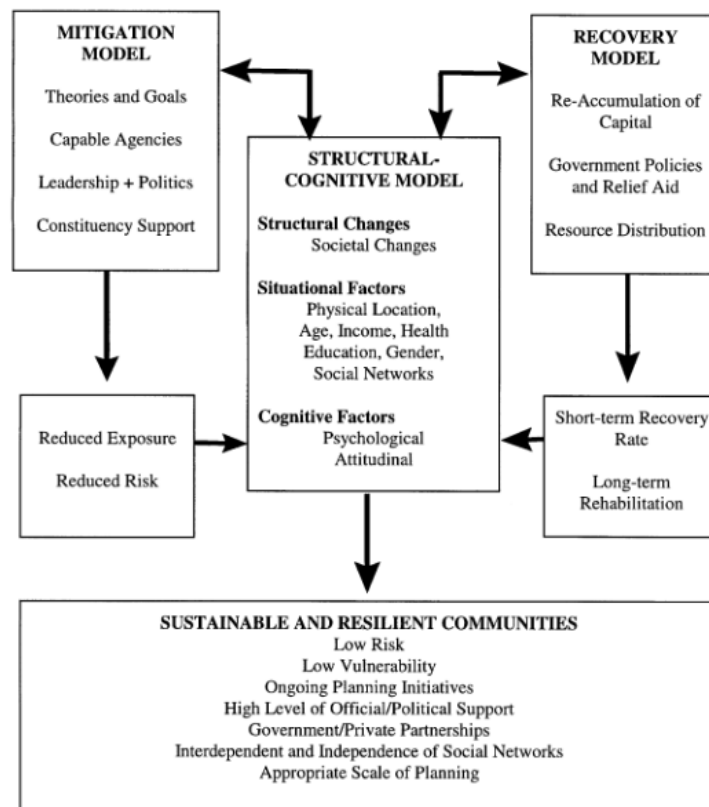
Βάσει των παραπάνω είναι κατανοητό ότι ο μετασχηματισμός των κοινοτήτων προς την αυξημένη ανθεκτικότητα περιλαμβάνει σε πρώτο πλάνο ευρείες και πολυεπίπεδες δράσεις και βελτιώσεις με τεχνικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό, οικονομικό ή θεσμικό περιεχόμενο, οι οποίες αναφέρονται όλες τις φάσεις διαχείρισης της διακινδύνευσης, πριν και μετά την εκδήλωση του συμβάντος, από την αναγνώριση της επικινδυνότητας έως τη διαχείριση των συνεπειών και την μεσοπρόθεσμη ανάκαμψη της κοινότητας, με ενεργή εμπλοκή τόσο των αρχών σε κεντρικό και τοπικό επίπεδο, όσο και των μελών της κοινότητας (Antronico et al., 2020). Σημαντικό μέρος των δράσεων θα πρέπει να κατευθύνεται προς την απομείωση της φυσικής και κοινωνικο-οικονομικής τρωτότητας μιας κοινότητας (Κεφ. 3.2.3) και τον περιορισμό ή έλεγχο της επικινδυνότητας, ενώ επιπλέον στις βασικές συνθήκες της ανθεκτικότητας συμπεριλαμβάνονται η οικονομική σταθερότητα, οι παραγωγικές δομές, οι ποιοτικές υποδομές και συνοχή της κοινωνίας. Σε αυτό το πλαίσιο είναι αντιληπτό ότι οι υφιστάμενες διαφορές μεταξύ των αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών είναι ευρύτατες και κάθε χώρα και κοινότητα ξεκινά από διαφορετική αφετηρία. Συνεπώς, στις αναπτυγμένες χώρες οι προτεραιότητες 1, 3 και 4 είναι λίγο έως πολύ εδραιωμένες, και η μεγαλύτερη της ήδη επιτευχθείσας μείωση της διακινδύνευσης έναντι φυσικών καταστροφών και ειδικότερα κατολισθήσεων εστιάζεται στις προτεραιότητες 2 και 5. Από την άλλη, στις αναπτυσσόμενες χώρες απαιτούνται σημαντικές βελτιώσεις και στους τομείς των προτεραιοτήτων 1, 3 και 4 (Turner 2018).

¹⁰ Εξειδίκευση Ενεργειών: Αειφόρα οικοσυστήματα και περιβαλλοντική διαχείριση, στρατηγικές απομείωση της διακινδύνευσης με ενσωμάτωση του πλαισίου της κλιματικής αλλαγής, επισιτιστική ασφάλεια για την ανθεκτικότητα, ένταξη της απομείωσης της διακινδύνευσης στον τομέα της υγείας με ασφαλή νοσοκομεία, προστασία κρίσιμων δημόσιων εγκαταστάσεων, σχέδια ανάκαμψης και δίκτυα κοινωνικής προστασίας, απομείωση της τρωτότητας με διαφοροποιημένες εναλλακτικές επιλογές εισοδήματος, μηχανισμοί επιμερισμού του χρηματοοικονομικού ρίσκου, σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, χωροταξικός σχεδιασμός και οικοδομικοί κανονισμοί, σύνθεση σχεδίων αγροτικής ανάπτυξης και απομείωση της διακινδύνευσης.

¹¹ Εξειδίκευση Ενεργειών: Δυνατότητες διαχείρισης καταστροφών: πολιτικές, τεχνικές και θεσμικές δυνατότητες, διάλογος, συντονισμός και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των υπευθύνων διαχείρισης της καταστροφής και των αναπτυξιακών τομέων, περιφερειακές-τοπικές προσεγγίσεις για ανταπόκριση στην καταστροφή με στόχευση στην απομείωση της διακινδύνευσης, έλεγχος, ασκήσεις ετοιμότητας και σχέδια έκτακτης ανάγκης και αντιμετώπισης απρόβλεπτων καταστάσεων, εθελοντισμός και συμμετοχή.

Για την εξειδίκευση του θεωρητικού πλαισίου της ανθεκτικότητας έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορα σχήματα. Σε ένα από αυτά (Tobin, 1999, Σχήμα 55) διαχωρίζονται τρία διακριτά πεδία αλλαγών και δράσεων προς το μετασχηματισμό των κοινοτήτων:

1. Το πεδίο του μετριασμού (mitigation model) των συνεπειών της επικινδυνότητας, μέσω απομείωσης της έκθεσης, της τρωτότητας και του επιπέδου διακινδύνευσης.



See text for details; feedback loops not shown.
Adapted from Peacock and Ragsdale (1997); Tobin and Montz (1997) and Waugh (1996).

Fig. 1. Sustainable and resilient communities in hazardous environments: a framework for analysis

Σχήμα 55: Εξειδίκευση επιμέρους πεδίων θεωρητικού πλαισίου ανθεκτικότητας (Tobin, 1999).

2. Το πεδίο της ανάκαμψης (recovery model) περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την επανασυσσώρευση του οικονομικού κεφαλαίου και την αποκατάσταση των υποδομών, τα κυβερνητικά και ιδιωτικά προγράμματα βοήθειας και ανάταξης, αλλά και τις μακροπρόθεσμες επιλογές μελλοντικής κατανομής πόρων και το κατά πόσο θα συμβάλλουν στη μείωση της τρωτότητας για τις πιο ευάλωτες ομάδες ή θα συμβάλλουν σε επαναφορά της πρότερης κατάστασης, αναπαράγοντας την υψηλή τρωτότητα για τους πιο ευάλωτους.
3. Το δομικό - αντιληπτικό πεδίο (structural - cognitive model) αλληλοσχετίζεται με τα πεδία μετριασμού και ανάκαμψης και αναφέρεται στις αλλαγές στη δομή, τις

αντιλήψεις και τον τρόπο σκέψης της κοινωνίας, που απαιτούνται για την υποστήριξη των προτεινόμενων δράσεων, με ανατροπή των περιοριστικών φυσικών, κοινωνικών, πολιτισμικών και οικονομικών παραγόντων (π.χ. αντιλήψεις μη συμμετοχής ή περιορισμού δράσεων λόγω φτώχειας, φύλου ή κοινωνικών περιορισμών).

Πιο αναλυτικά, στο πεδίο του μετριασμού της διακινδύνευσης, οι δομικές και πολιτικές συνθήκες για την επίτευξη μείωσης των συνεπειών περιλαμβάνουν (Tobin, 1999): (i) την ορθή τεχνική υποστήριξη των σχεδίων μετριασμού, (ii) την ανάθεση της υλοποίησής τους σε υπηρεσίες με επάρκεια πόρων, (iii) την παρουσία ηγεσίας με πολιτικές και διαχειριστικές ικανότητες, (iv) τις ξεκάθαρες στοχεύσεις ως προς τις πολιτικές και τις δράσεις, (v) την υποστήριξη του σχεδίου από το εκλογικό σώμα ή την κοινότητα και (vi) τη μη υπονόμηση του σχεδίου.

Πέραν των γενικών αρχών και συνθηκών της έννοιας της ανθεκτικότητας, και σε συνέχεια των αναφερόμενων στο Κεφ. 3.2.4, τα στάδια του κύκλου διαχείρισης συνοψίζονται στο Σχήμα 56, ενώ ο Πίνακας 10 συνοψίζει τις βασικότερες μεθόδους και δράσεις μετριασμού της κατολισθητικής διακινδύνευσης.

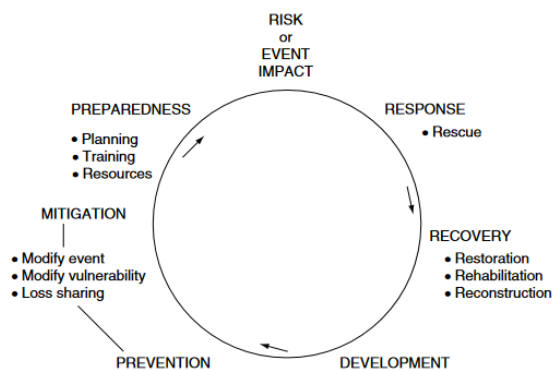


Figure 11.2 The hazard management cycle (based on Carter, 1991, reproduced by permission of Asian Development Bank)

Σχήμα 56: Κυκλικό Διάγραμμα διαχείρισης επικινδυνότητας (Crozier, 2005).

Οι δράσεις θα πρέπει να προσαρμόζονται στις συνθήκες (φυσικές, περιβαλλοντικές αλλά και κοινωνικές και οικονομικές) και το επίπεδο ανάπτυξης κάθε περιοχής. Σε αναπτυσσόμενες περιοχές θα πρέπει αυτές να βασίζονται σε οικονομικά και φιλικά στο φυσικό περιβάλλον υλικά, με λογική αειφορίας, συνεπώς θα πρέπει να προκρίνεται η χρήση τοπικών υλικών, πρακτικών και μεθόδων χαμηλού κόστους, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις συντήρησης (Santi et al., 2011). Αντίστοιχα, η εκπαίδευση της κοινότητας θα μπορούσε να περιλαμβάνει περιοδικές ενημερώσεις πριν την εποχή των βροχοπτώσεων για διατήρηση της εγρήγορσης της, μετάδοση μηνυμάτων στους προφανείς χώρους (σηματοδότηση επιδεκτικών περιοχών, ενημερωτικό υλικό σε σχολεία και υπηρεσίες) και σε άλλους, πολυσύχναστους χώρους κοινωνικότητας (π.χ. θρησκευτικούς) ή μαρτυρίες από πληττόμενα άτομα σε προγενέστερα συμβάντα.

Πίνακας 10: Σύνοψη Δράσεων Μετριασμού Κατολισθ. Διακινδύνευσης (στοιχεία από Crozier, 2005)

Γενική Εφαρμογή	
Μέθοδοι	Δράσεις Μετριασμού Κατολισθητικής Διακινδύνευσης
Φυσικές	<ul style="list-style-type: none"> Μέτρα ενίσχυσης πρανών (στήριξη στον πόδα των πρανών, υποστήριξη πρανών με αγκυρώσεις, πασσάλους ή άλλη μέθοδο, άλλες μέθοδοι ενίσχυση – βελτίωση υπεδάφους κτλ.) Μέτρα μεταβολής, διευθέτησης ή επιβράδυνσης της μετακίνησης (διαμόρφωση επιλεκτικών διαδρομών για τα ρέοντα υλικά, διαμόρφωση λεκανών απόθεσης, κ.α.) Κατάλληλες φυτεύσεις και διαμορφώσεις προστασίας πρανών (bioengineering)
Υδραυλικές – Υδρολογικές	<ul style="list-style-type: none"> Απορροή επιφανειακών υδάτων, έλεγχος υπόγειων υδάτων, στράγγιση γεωυλικών, κάλυψη ευάλωτων γεωυλικών με αδιαπέρατα γεωσυνθετικά κ.α.
Διαμόρφωση Τοπίου	<ul style="list-style-type: none"> Απομάκρυνση κλαδιών ή κορημάτων, σφράγιση ρωγματώσεων και ασυνεχειών, απομάκρυνση ευαίσθητων υλικών, κατάλληλες φυτεύσεις
Συστήματα Παρακολούθησης	<ul style="list-style-type: none"> Περιοδικές αποτυπώσεις και έλεγχοι, συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο Συστήματα συναγερμού βάσει ενausματικών παραγόντων (έντονη βροχόπτωση ή σεισμικό συμβάν) ή βάσει καταγραφής μετακίνησης
Κανονισμοί	<ul style="list-style-type: none"> Κανονισμοί Κτιρίων, Χωματουργικών Έργων, Υδραυλικών Έργων Κανόνες Ασφαλείας Περιορισμός ή οριοθέτηση δραστηριοτήτων σε ευαίσθητες περιοχές
Οικονομικά Κίνητρα	<ul style="list-style-type: none"> Κίνητρα μη επέκτασης ή αντικίνητρα δανειοδότησης σε ευαίσθητες περιοχές
Χρήσεις Γης και Πολεοδομικός Σχεδιασμός	<ul style="list-style-type: none"> Ζωνοποίηση χρήσεων γης και με κριτήρια κατολισθητικής επιδεκτικότητας Επαρκής χωροθέτηση για σωστικά μέσα και υπηρεσίες
Εκπαίδευση	<ul style="list-style-type: none"> Επικοινωνία, Εκπαίδευση και Συμβουλευτικές Προωθήσεις Ενημέρωση για ασφαλείς διόδους διαφυγής
Επιμερισμός Κόστους	<ul style="list-style-type: none"> Ασφαλιστικά προγράμματα
Δράσεις μετά την Αξιολόγηση της Διακινδύνευσης	
<ul style="list-style-type: none"> Χαρακτηρισμός Επιπέδου Διακινδύνευσης (Αποδεκτό, Ανεκτό ή μη Ανεκτό) (Κεφ. 3.2.4) Ανάλογη προσαρμογή του τύπου, της έντασης και του χαρακτήρα των δράσεων (μετατροπή μη ανεκτής διακινδύνευσης σε ανεκτή ή ανεκτής σε αποδεκτή) Ενημέρωση και Συμμετοχικές Διαδικασίες των μελών της κοινότητας 	
Ετοιμότητα Επέμβασης	
<ul style="list-style-type: none"> Αναλυτικά Σχέδια Πολιτικής Προστασίας (ετοιμότητα, εξειδίκευση και εκπαίδευση σωστικών συνεργείων, συντονισμός κεντρικών και τοπικών αρχών και υπηρεσιών κ.α.) Προεργασία για ετοιμότητα γεωεπιστημόνων που θα αξιολογήσουν τις συνθήκες ευστάθειας των πρανών μετά το αρχικό συμβάν και την πιθανή διατήρηση της διακινδύνευσης. 	

5 Σύγχρονα Μέσα Διερεύνησης, Παρακολούθησης και Προειδοποίησης Κατολισθητικών Φαινομένων

5.1 Εισαγωγή – Γενική Περιγραφή

Στο προηγούμενο Κεφ. 4 διερευνήθηκαν οι συνέπειες των κατολισθητικών φαινομένων στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και αναδείχθηκε ότι οι συνθήκες που επικρατούν τις τελευταίες δεκαετίες διαμορφώνουν ένα δυσμενέστερο πλαίσιο, αναφορικά με τον αριθμό και την ένταση των κατολισθητικών εκδηλώσεων και το μέγεθος των συνεπειών τους. Ωστόσο, ήδη αναφέρθηκε (Κεφ. 4.2.4) ότι σε περιοχές όπου σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης της κατολισθητικής διακινδύνευσης, με αξιοποίηση των διαθέσιμων τεχνολογικών μέσων κάθε εποχής, επιτεύχθηκαν άμεσα θετικά αποτελέσματα, τουλάχιστον αναφορικά με τον περιορισμό των ανθρώπινων απωλειών.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα καινοτόμα, σύγχρονα μέσα για τη διερεύνηση και παρακολούθηση των κατολισθητικών φαινομένων, καθώς και οι δυνατότητες που προσφέρονται για προειδοποίηση έναντι της εκδήλωσής τους. Διαπιστώνεται ότι παράλληλα με τη διαμόρφωση ενός πιο δυσμενούς πλαισίου εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων, διερευνώνται και οι αντίστοιχες δυνατότητες έγκαιρης αναγνώρισης, ανάλυσης, παρακολούθησης και γενικά διαχείρισης της κατολισθητικής διακινδύνευσης με τα σύγχρονα εργαλεία και όργανα, συχνά τηλεσκοπικού χαρακτήρα.

Αυτά τα σύγχρονα εργαλεία και όργανα, με ήδη ευρεία ή σταδιακά αυξανόμενη εφαρμογή στις κατολισθητικές μελέτες, παρουσιάζονται συνοπτικά ακολούθως, ενώ για κάποια από αυτά, με μεγαλύτερη εφαρμογή στην παρακολούθηση των κατολισθητικών μετακινήσεων, ακολουθεί περαιτέρω επεξήγηση στα επόμενα κεφάλαια:

- Τοπογραφικές Αποτυπώσεις. Οι σύγχρονες τοπογραφικές μέθοδοι παραγωγής τοπογραφικών αποτυπώσεων με μεγάλη, συνεχώς βελτιούμενη ακρίβεια και ταχύτητα και η σύνταξη τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM: digital terrain model) για μια εξεταζόμενη περιοχή, είναι πλέον καθιερωμένες. Πέραν της βελτίωσης της ακρίβειας και της ταχύτητας τοπογράφησης στο πεδίο και το γραφείο με χρήση των πιο εξελιγμένων τοπογραφικών οργάνων, αναφέρονται οι σύγχρονες μέθοδοι αξιοποίησης της δορυφορικής γεωδαισίας μέσω των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS), των τοπογραφικών εφαρμογών της

συμβολομετρίας ραντάρ (InSAR) ή της ταχείας τρισδιάστατης αποτύπωσης της εδαφικής επιφάνειας μέσω καμερών σάρωσης LiDAR (Light Detection and Ranging) από επίγεια ή εναέρια μέσα, που μπορεί να καλύπτουν είτε μια εστιασμένη περιοχή μελέτης με μεγάλη ακρίβεια ή μια πολύ ευρύτερη περιοχή, ομοίως με ικανοποιητική ακρίβεια. Παράλληλα, οι δυνατότητες και η ευελιξία στην συχνή αποτύπωση μιας περιοχής, ακόμα και ιδιαίτερα δυσπρόσιτης, διευκολύνεται και επιταχύνεται περαιτέρω με τη χρήση μεθόδων φωτογραμμετρίας από ψηφιακές αεροφωτογραφίες ή / και ορθοφωτογραφίες, από ειδικά αεροπλάνα ή από UAVs.

Η αυξημένη ακρίβεια και οι δυνατότητες αποτύπωσης μιας ευρύτερης περιοχής ή τακτικότερων αποτυπώσεων μιας εστιασμένης περιοχής με τηλεσκοπικά ή ευέλικτα μέσα αξιοποιούνται σε κάθε φάση των κατολισθητικών αναλύσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μακροσκοπικές μελέτες επιδεκτικότητας – διακινδύνευσης, όπου η ψηφιοποίηση και ακριβέστερη αποτύπωση της μορφολογίας αυξάνει την αξιοπιστία τους και το βάθος της ανάλυσης και η αναγνώριση και διερεύνηση ενός συγκεκριμένου συμβάντος. Υπό συνθήκες και σε φαινόμενα με βραδεία εξέλιξη, οι επαναλαμβανόμενες τοπογραφικές αποτυπώσεις μπορούν να αξιοποιηθούν στην παρακολούθηση της εξέλιξής εντός φαινομένου έως και την έγκαιρη αναγνώριση και προειδοποίηση σε περιπτώσεις επιτάχυνσης του χαμηλού ρυθμού των μετακινήσεων, αλλά και στην εκτίμηση της διαφοράς στον όγκο επί του πρανούς και έως την εκπόνηση γεωχωρικών αναλύσεων εκτίμησης της δυνητικής ή αναμενόμενης εδαφικής μετακίνησης και των συνεπειών της σε μια ευάλωτη κατάντη περιοχή.

- Τηλεπισκοπική Αναγνώριση και Παρακολούθηση Κατολισθητικών Συμβάντων.
Τηλεπισκοπικές μεθοδολογίες όπως η (διαφορική) συμβολομετρία ραντάρ (D)InSAR, που βασίζεται στις απεικονίσεις από τα ραντάρ SAR (που έχουν προσαρτηθεί σε δορυφόρους σε τροχιά, όπως οι δορυφόροι Sentinel του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος / ESA: European Space Agency του προγράμματος Copernicus, <https://www.copernicus.eu/en>) αναπτύσσονται και βελτιώνονται διαρκώς, με μεγαλύτερη διαθεσιμότητα διαδοχικών δορυφορικών απεικονίσεων αυξημένης ακρίβειας με μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους. Με τη μέθοδο παρέχονται στοιχεία ικανοποιητικής και σταδιακά βελτιούμενης ακρίβειας αναφορικά με τον εντοπισμό διαφορικής υποχώρησης στην επιφάνεια της γης και την παρακολούθηση της εξέλιξής της. Παράλληλα αναπτύσσονται μεθοδολογίες αναγνώρισης παλαιών κατολισθητικών φαινομένων από τη σύγκριση δορυφορικών

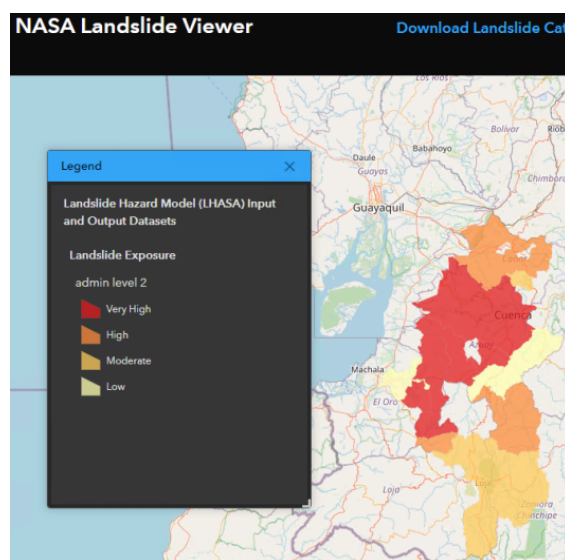
απεικονίσεων με μεγάλη χρονική διαφορά ετών ή παρακολούθησης της μακροσκοπικής αλλαγής στη μορφολογία. Τα παραπάνω, και παρά τους περιορισμούς που συνεπάγεται η τηλεπισκοπική, δορυφορική παρατήρηση, συνιστούν σημαντική καινοτομία αναφορικά με τις κατολισθητικές αναλύσεις, με ευρύτατο εύρος εφαρμογών, από τον εντοπισμό παλαιότερων συμβάντων προς εμπλουτισμό των διαθέσιμων καταγραφών σε μια ευρύτερη περιοχή, έως την επισήμανση επισφαλών περιοχών και την υπό συνθήκες παρακολούθηση της τρέχουσας ενεργότητας - κατάστασης σύγχρονων φαινομένων με ποσοτικά στοιχεία.

- Χρήση UAVs / drones (UAV: unmanned aerial vehicle, ελληνική απόδοση: αυτόνομα αεροχήματα, ή ΣμηΕΑ: Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών). Προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, αναφορικά με τη δυνατότητα άμεσης επισκόπησης μιας περιοχής, συμπεριλαμβανόμενων των μη προσβάσιμων τμημάτων της, λήψης αεροφωτογραφιών πολύ καλής ανάλυσης και την παραγωγή αποτυπώσεων / τοπογραφήσεων σε ευρεία κλίμακα με τις μεθόδους φωτογραμμετρίας, με χρήση φορητού και ευέλικτου, προσιτού οικονομικά και τεχνικά, εξοπλισμού. Οι καινοτομίες που εισάγονται στις κατολισθητικές μελέτες από τη χρήση των UAVs είναι ευρύτατες, και ολοένα και επεκτεινόμενες παράλληλα με την αύξηση των δυνατοτήτων τους, καλύπτοντας το πλήρες φάσμα από τις προκατολισθητικές αναλύσεις έως την άμεση αναγνώριση – επισκόπηση ενός συμβάντος και την παρακολούθησή του.
- Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Αναφέρονται κυρίως στις προκατολισθητικές αναλύσεις επιδεκτικότητας, επικινδυνότητας ή εκτίμησης διακινδύνευσης σε μια ευρύτερη περιοχή, καθώς αποτελούν συστήματα συλλογής, αποθήκευσης, ανάλυσης, διαχείρισης και απόδοσης χωρικών δεδομένων, που επιταχύνουν και διευκολύνουν την επεξεργασία και αξιολόγηση της σχετικής ποιοτικής και ποσοτικής πληροφορίας. Η εφαρμογή τους στις κατολισθητικές μελέτες έχει εδραιωθεί, καθώς προσφέρουν την υπολογιστική βάση για τη χωρική σύνθεση των επιμέρους κατολισθητικών παραγόντων και παραμέτρων (χωρική πληροφορία μορφολογίας, λιθολογίας, τεκτονικών συνθηκών, χρήσεων γης, φυτο-δεντροκάλυψης εναυσματικών παραγόντων, αλλά και δημογραφικών ή πολεοδομικών δεδομένων κ.α.), ενώ μπορούν να αξιοποιηθούν και για την χωρική ανάλυση ενός συγκεκριμένου συμβάντος. Με την καθιέρωσή τους τα ευρήματα των κατολισθητικών αναλύσεων είναι αναλυτικότερα, αντικειμενικότερα,

παραστατικότερα και ευχερέστερα στην κατανόηση, βελτιώνοντας τα δεδομένα για τη διαχείριση του κατολισθητικού κινδύνου.

- Σε αντίστοιχο πλαίσιο, και προς την πλευρά της Δυνατότητας σχετικής «Πρόγνωσης» της εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων λόγω βροχόπτωσης, σημειώνεται τα τελευταία χρόνια πρόοδος προς τη δυνατότητα γεωχωρικής συσχέτισης των κατολισθητικών παραγόντων μιας περιοχής, που καθορίζουν την κατολισθητική επιδεκτικότητα / επικινδυνότητα της, με τα ημερήσια στοιχεία των μετεωρολογικών προγνώσεων, λαμβάνοντας μακροσκοπικά υπόψη και τη λογική των κατωφλίων βροχόπτωσης για την ενεργοποίηση κατολισθήσεων.

Προς αυτή την κατεύθυνση αναφέρεται η σχετική υπηρεσία εκτίμησης της κατολισθητικής επικινδυνότητας της NASA σε πραγματικό χρόνο LHASA (Landslide Hazard Assessment Model, <https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html>, Kirschbaum & Stanley, 2018), με σύνθεση των βασικών κατολισθητικών παραγόντων σε παγκόσμιο επίπεδο με δορυφορικές μετρήσεις της υγρασίας πλησίον της εδαφικής επιφάνειας (ή της μάζας χιονιού), της βροχόπτωσης των προηγούμενων ημερών καθώς και της τρέχουσας βροχόπτωσης (Σχήμα 57).



Σχήμα 57: «Πρόγνωση» Πιθανότητας Εκδήλωσης Κατολισθήσεων (περιοχή Ισημερινού, 16/07/2023) (<https://landslides.nasa.gov/viewer>).

Είναι αντιληπτό ότι η παραπάνω υπηρεσία κατά μια έννοια «πρόγνωσης» κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο με μακροσκοπικό χαρακτήρα για μια ευρύτερη περιοχή, κυρίως προς γενική ενημέρωση των αρχών και των πολιτών της, και αποτυπώνεται με όρους χαμηλή – μέση – υψηλή – πολύ υψηλή έκθεση στην κατολισθητική επικινδυνότητα. Ωστόσο είναι ενδεικτική των σύγχρονων δυνατοτήτων σύνθεσης της πληροφορίας από διαφορετικά επιστημονικά πεδία προς την κατεύθυνση της έγκαιρης αναγνώρισης της διακινδύνευσης.

- Γεωτεχνικά Όργανα Παρακολούθησης. Επιπρόσθετα αναφέρονται και οι σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των γεωτεχνικών (και όχι αποκλειστικά) οργάνων παρακολούθησης, με εφαρμογή κυρίως σε βραδέως εξελισσόμενες κατολισθήσεις,

προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης αυτονομίας τους και της ασύρματης μετάδοσης των μετρήσεων. Πρόκειται για όργανα και συστήματα πολλών τύπων και χαρακτηριστικών, για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του εδάφους ή άλλου σχετικού μεγέθους απόστασης ή πίεσης ή φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους (αποκλισιόμετρα, μηκινσιόμετρα, ρωγμόμετρα, κλισιόμετρα, πιεζόμετρα ή και κυψέλες μέτρησης τάσης, μετρητές της υγρασίας του εδάφους, καθώς και μικροί μετεωρολογικοί σταθμοί). Εγκαθίστανται σε μια επισφαλή περιοχή υπό διερεύνηση ή παρακολούθηση, στη βάση του σχεδιασμού ενός εξειδικευμένου γεωτεχνικού προγράμματος παρακολούθησης και με κριτήριο τα χαρακτηριστικά της κάθε κατολισθητικής περίπτωσης.

Τα πλέον σύγχρονα όργανα και συστήματα έχουν υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και λειτουργία παρακολούθησης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, με συνεχή ή προγραμματιζόμενη ανά τακτά διαστήματα λήψη μετρήσεων. Οι μετρήσεις καταχωρούνται και αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό σύστημα συλλογής και αποστέλλονται και διατίθενται άμεσα στους επιβλέποντες, συχνά μέσω ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας χαμηλού κόστους ή τοπικού δικτύου ή καταχωρούνται σε ειδικό λογισμικό παρακολούθησης από απόσταση. Παράλληλα, υπάρχουν οι δυνατότητες αποστολής σημάτων άμεσου συναγερμού σε περίπτωση μη ομαλών, ανησυχητικών τιμών ή υπέρβασης κάποιων προκαθορισμένων ορίων μετακίνησης ή παραμόρφωσης (ή ακόμα και πολύ έντονης βροχόπτωσης), προς ενημέρωση και προειδοποίηση των επιβλεπόντων ή / και των αρχών πολιτικής προστασίας.

- Συστήματα Άμεσης Προειδοποίησης Αντίστοιχες είναι και οι σύγχρονες εξελίξεις στα συστήματα άμεσης προειδοποίησης έναντι ενός ταχέως εκδηλωνόμενου κατολισθητικού φαινομένου. Εκ των πραγμάτων τα συγκεκριμένα συστήματα δεν μπορεί παρά να είναι επίγεια, προ-εγκατεστημένα σε ένα κρίσιμο, πλήρως αποτυπωμένο και μελετημένο, επισφαλές πρυνές και να έχουν συνεχή λειτουργία. Συνήθως αφορούν απότομα πρυνή (και) με βραχύδη υλικά, σε θέσεις με δυνητικά μεγάλες συνέπειες από την ενδεχόμενη εκδήλωση απότομων κατολισθητικών φαινομένων με μεγάλη ταχύτητα. Τα προσφερόμενα σύγχρονα όργανα για αυτό το σκοπό είναι τα επίγεια ραντάρ SAR, που ανιχνεύουν άμεσα τις πρόδρομες μικροπαραμορφώσεις των γεωυλικών πριν από εκδήλωση του συμβάντος, καθώς και τα ραντάρ Doppler, που ανιχνεύουν μεγαλύτερης μάζας κινήσεις κατά την εκδήλωσή του συμβάντος.

Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί μεγαλύτερη εξειδίκευση στα πιο βασικά από τα παραπάνω όργανα και εργαλεία που αναφέρονται στην επισκόπηση και παρακολούθηση των κατολισθητικών μετακινήσεων. Ήδη από τα προαναφερθέντα στοιχεία έχει αναδειχθεί ότι τα παραπάνω σύγχρονα μέσα εφαρμόζονται μεμονωμένα ή συνδυαζόμενα μεταξύ τους και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, αλλά και τα ζητούμενα για κάθε περίπτωση και θέση. Η καταλληλότητα και εφαρμοσιμότητά τους καθορίζεται ανάλογα με την κλίμακα της περιοχής μελέτης (μεμονωμένη κατολίσθηση ή ευρύτερη περιοχή), το στάδιο της ανάλυσης (προ-κατολισθητικές αναλύσεις επιδεκτικότητας – επικινδυνότητας ή κατολισθητική επισκόπηση και παρακολούθηση συγκεκριμένου συμβάντος ή μετα-κατολισθητική ανάλυση αποκατάστασης και πρόληψης μελλοντικών συνεπειών σε επανενεργοποίηση των φαινομένων), τον τύπο και την ταχύτητα της κατολισθητικής μετακίνησης, το χρονικό πλαίσιο παρακολούθησης κτλ. Προφανώς κανένα από αυτά τα εργαλεία δεν είναι γενικής χρήσης, ωστόσο η επιλογή και χρήση των κατά περίπτωση κατάλληλων, βελτιώνει σημαντικά τις δυνατότητες ανάλυσης, επισκόπησης και ενεργής παρακολούθησης, ενώ η εξέλιξη τόσο των μεθοδολογιών όσο και των εργαλείων είναι συνεχής, επιτυγχάνοντας όλο και βελτιούμενα αποτελέσματα (ενδεικτικά Casagli et al., 2017, Papoutsis et al., 2020, Amatya et al., 2021).

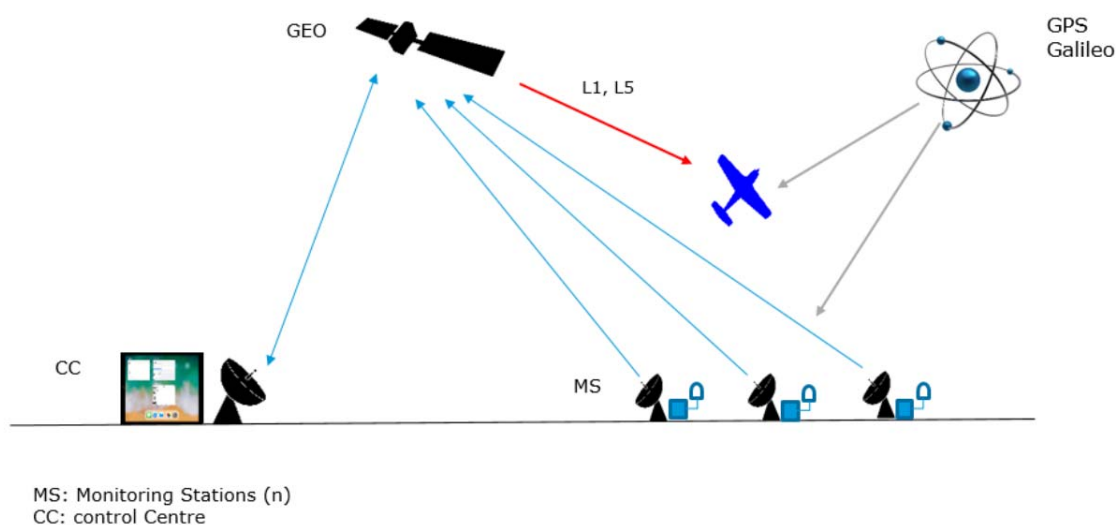
5.2 Χρήση Δεκτών GNSS σε Κατολισθήσεις

Η μεγάλη ανάπτυξη κατά τις τελευταίες δεκαετίες στους τομείς της παρατήρησης της γης (Earth Observation)¹² από το διάστημα, της διαστημικής γεωδαισίας και των παγκόσμιων

¹² Παρατίθενται σχετικοί ορισμοί, από την ιστοσελίδα του Οργανισμού Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Διαστημικό Πρόγραμμα:

Η Παρατήρηση της Γης (Earth Observation) αναφέρεται στη χρήση τεχνολογιών τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της ξηράς, των υδάτινων στοιχείων (θάλασσες, ποταμοί, λίμνες) και της ατμόσφαιρας και βασίζεται στη χρήση του ωφέλιμου εξοπλισμού που έχει προσαρτηθεί στους δορυφόρους για τη συλλογή δεδομένων απεικόνισης σχετικά με τα χαρακτηριστικά της Γης. Η επεξεργασία και ανάλυση των εικόνων οδηγεί στην άντληση πληροφοριών διαφορετικών τύπων, που μπορούν να εξυπηρετήσουν ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών και τομέων. Οι τεχνολογίες Παρατήρησης της Γης αξιοποιούν διαφορετικούς τύπους αισθητήρων του ωφέλιμου εξοπλισμού των δορυφόρων. Οι οπτικοί ή θερμικοί αισθητήρες είναι εξοπλισμός για την παρακολούθηση της ενέργειας που λαμβάνεται από τη γη λόγω ανάκλασης και επανεκπομπής της ενέργειας του Ήλιου από την επιφάνεια ή την ατμόσφαιρα της γης, που λειτουργούν μεταξύ του ορατού και του υπέρυθρου μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι αισθητήρες ραντάρ είναι εξοπλισμός που λειτουργεί στο κατώτερο τμήμα του φάσματος (μεγαλύτερα μήκη κύματος), με τους περισσότερους από τους αισθητήρες να στέλνουν ενέργεια στη γη και να παρακολουθούν την ενέργεια που επιστρέφει πίσω από την επιφάνεια ή την ατμόσφαιρα της γης, επιτρέποντας την παρακολούθηση, κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και σε όλες τις καιρικές συνθήκες. (<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-earth-observation>).

δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS) έχει ως αποτέλεσμα την ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού σχετικών εφαρμογών στη μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων. Το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) αναφέρεται σε ένα σχηματισμό δορυφόρων σε τροχιά, από τους οποίους μεταδίδονται δεδομένα χωροθέτησης και χρόνου προς τους επίγειους δέκτες GNSS, και οι οποίοι χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα για τον προσδιορισμό της δικής τους θέσης. Εξ ορισμού, τα συστήματα GNSS, όπως το ευρωπαϊκό Galileo, το NAVSTAR GPS των ΗΠΑ, το ρωσικό GLONASS και το κινεζικό BeiDou, παρέχουν παγκόσμια κάλυψη με πολλαπλούς δορυφόρους (Σχήμα 58). Η αναγνώριση των σημάτων από τους δέκτες GNSS έχει καταρχάς σχετικά χαμηλή ακρίβεια της τάξης των ~2m, ωστόσο η ακρίβεια, όπως και η συνέπεια, η συνέχεια και η διαθεσιμότητα των καταγραφών βελτιώνεται μέσω σημάτων από επίγειους σταθμούς γνωστής τοποθεσίας (SBAS: Satellite-based Augmentation Systems), όπως η ευρωπαϊκή υπηρεσία επικάλυψης γεωστατικής πλοήγησης (EGNOS).



— Overall Space-Based Architecture for GNSS Augmentation Systems

Σχήμα 58: Σκαρίφημα Δομής Παγκόσμιου Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) (πηγή: https://www.esa.int/Applications/Technology_Transfer/Space-Based_Architecture_for_GNSS_Augmentation_Systems)

Η εισαγωγή της διάδοσης των εφαρμογών τεχνολογίας GNSS στην ανάλυση και παρακολούθηση των κατολισθήσεων έχει ξεκινήσει από τη δεκαετία του 2000 και έκτοτε επεκτείνεται και αυτοματοποιείται, προς τις κατευθύνσεις (Gili et al., 2000):

- Της επέκτασης της μεθοδολογίας τοπογραφικών και γεωδαιτικών αποτυπώσεων, με δυνατότητες ταχύτατης λήψης μετρήσεων ακριβείας μέσω των σύγχρονων τοπογραφικών οργάνων GNSS. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνονται οι δυνατότητες

τακτικών, γρήγορων αποτυπώσεων ακριβείας σε μια περιοχή κατολίσθησης, με το χρονικό όφελος να είναι μεγαλύτερο σε περιπτώσεις περιοχών μεγάλης επιφάνειας.

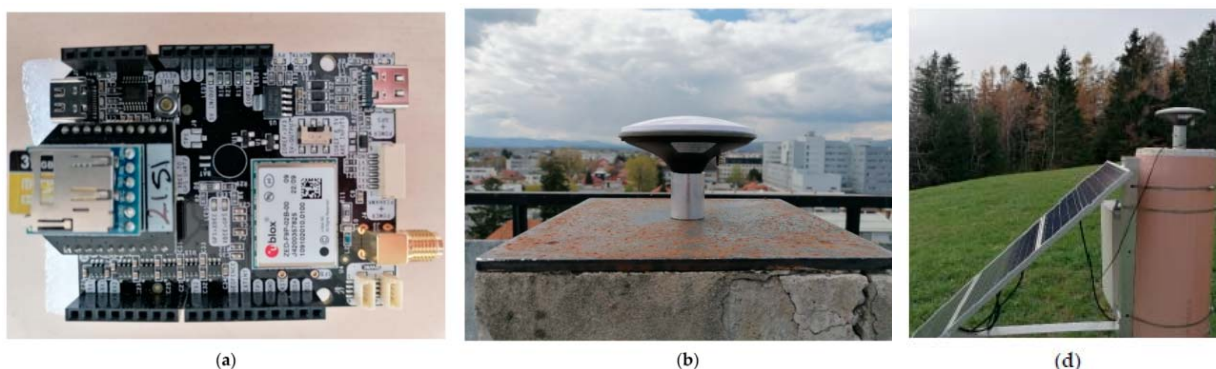
- Της υποβοήθησης της παρατήρησης και διερεύνησης στο πεδίο με τη χρήση απλών συσκευών που χρησιμοποιούν την σχετική τεχνολογία. Ενδεικτικά αναφέρεται η δυνατότητα επισημάνσης και αποτύπωσης της θέσης εργασίας ή σημείων ενδιαφέροντος στο πεδίο με σχετικά ικανοποιητική, για το ζητούμενο σκοπό ακρίβεια, ή η αυτόματη γεωαναφορά μέσω GNSS επίγειων ή εναέριων φωτογραφιών ή λοιπών εργασιών στο πεδίο.
- Της διασύνδεσης της τεχνολογίας με άλλες σύγχρονες μεθόδους και όργανα, ώστε να παρέχεται γεωαναφορά στα αντίστοιχα ευρήματά τους και να αυξάνεται η χρησιμότητά τους (π.χ. με κάποια αποτύπωση LiDAR ή μέσω φωτογραμμετρίας).
- Της εγκατάστασης αυτόνομων συστημάτων παρακολούθησης της κατολισθητικής μετακίνησης σε πραγματικό χρόνο.

Εστιάζοντας στο τέταρτο πεδίο εφαρμογής αναφορικά με τη χρήση δεκτών GNSS ως μέσο παρακολούθησης και άμεσης προειδοποίησης της κατολισθητικής μετακίνησης, σημειώνονται τα ακόλουθα, ως προς τις παραμέτρους εφαρμογής, την τρέχουσα πρακτική που ακολουθείται, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της:

- Τυπικά γίνεται εγκατάσταση ενός αριθμού δεκτών GNSS σε χαρακτηριστικά σημεία εντός της ολισθαίνουσας περιοχής της κατολίσθησης (π.χ. σημεία αντιπροσωπευτικά της γενικής μετακίνησης ή σε δύσκολα προσβάσιμες θέσεις για τακτική λήψη τοπογραφικών μετρήσεων ή σε ιδιαίτερα σημεία ενδιαφέροντος) και ενός ή δύο δεκτών GNSS εκτός αυτής, σε σταθερά σημεία, για αναφορά. Καθώς ο εξοπλισμός GNSS είναι σχετικά ακριβός, ο αριθμός των δεκτών δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλος (τυπικά εγκατάσταση σε έως 10 θέσεις), και ανάλογα με την έκταση και τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης.
- Η τρέχουσα πρακτική κινείται, με ελπιδοφόρα αποτελέσματα, προς τη χρήση εξοπλισμού σχετικά χαμηλού κόστους, προκειμένου η μέθοδος να είναι προσιτή (σε ερευνητικό επίπεδο της τάξης των 200ευρώ / δέκτη, με συνδυασμούς οικονομικού, σύγχρονου εξοπλισμού και λογισμικού ανοικτού κώδικα, ενδεικτικά Šegina et al., 2020 και Hamza et al., 2023). Περιλαμβάνει δέκτες GNSS διπλής συχνότητας, των οποίων η ακρίβεια των μετρήσεων υπολείπεται λίγα mm του αντίστοιχου εξοπλισμού ακριβείας πολλαπλών συχνοτήτων αρκετά μεγαλύτερου κόστους,

ωστόσο παραμένει ικανοποιητική για το ζητούμενο σκοπό, ενώ παρέχεται η δυνατότητα αυτοματοποίησης των μετρήσεων.

- Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται η αυτοματοποιημένη λήψη και αποστολή μετρήσεων ανά πολύ πυκνά χρονικά διαστήματα (πρακτικά σε πραγματικό χρόνο), που μπορούν να λειτουργήσουν ως σύστημα άμεσης προειδοποίησης ή συναγερμού. Επίσης στα πλεονεκτήματα τους περιλαμβάνεται η δυνατότητα εγκατάστασής τους και σε δυσπρόσιτες θέσεις, προτιμητέες λόγω της δυσκολίας τακτικής τοπογραφικής αποτύπωσης, καθώς και η ικανοποιητική ακρίβεια των μετρήσεων, τόσο για τις οριζόντιες, όσο και τις κατακόρυφες μετακινήσεις.



Σχήμα 59: Εικόνες δεκτών GNSS (α): δέκτης τύπου SimpleRTK2B, (β): κεραία δέκτη αναφοράς, (δ): σημείο παρακολούθησης κατολίσθησης με δέκτη GNSS (πηγή: Hamza et al., 2023)

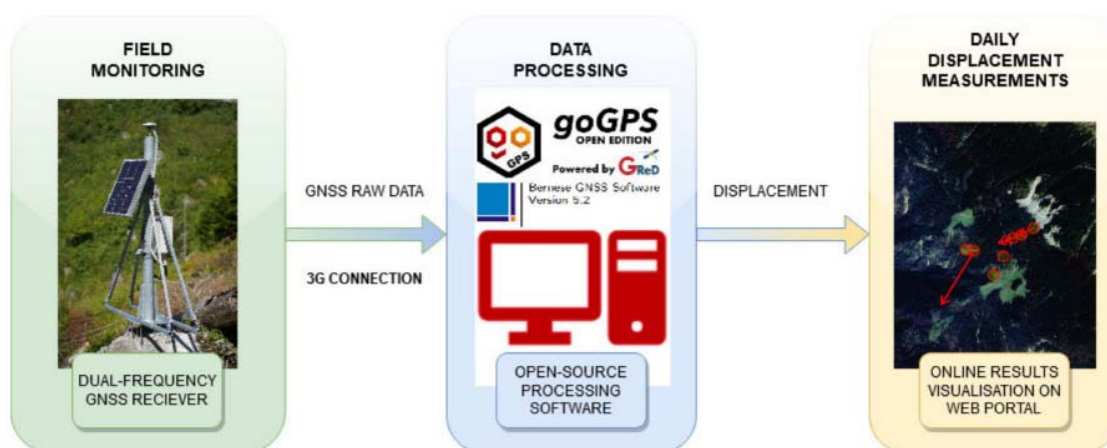


Figure 3. Workflow of the GNSS (Global Navigation Satellite System) component of GIMS (Geodetic Integrated Monitoring System) units.

Σχήμα 60: Σκαριφηματική ροή μετρήσεων από μόνιμους δέκτες GNSS (πηγή: Šegina et al., 2020)

- Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η σημειακή παρακολούθηση των μετακινήσεων σε εκ των πραγμάτων περιορισμένες θέσεις, πιθανόν μη αντιπροσωπευτικές της γενικής τάσης εξέλιξης της μετακίνησης στην

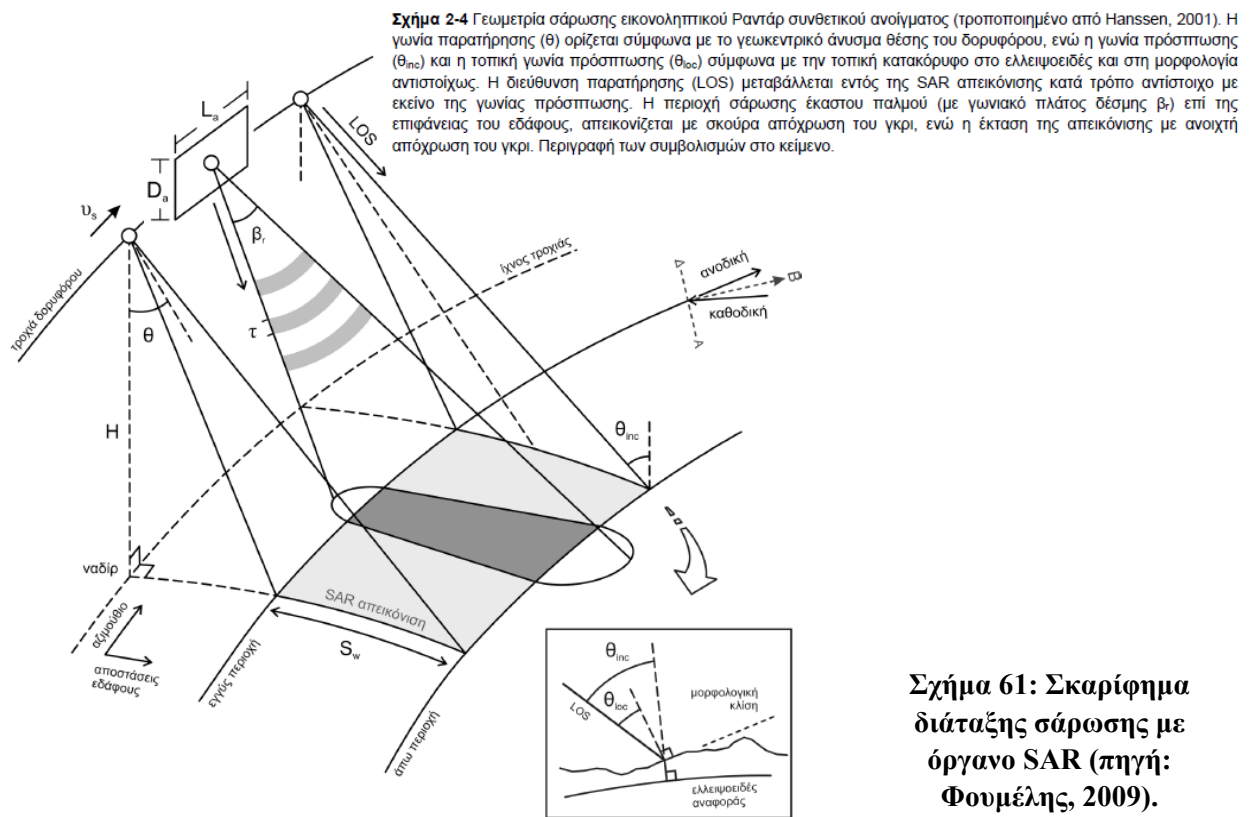
παρακολουθούμενη περιοχή, και σε αντιδιαστολή με άλλες τηλεπισκοπικές μεθόδους που καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή, όπως επίσης το σχετικά υψηλό κόστος του εξοπλισμού και η έκθεσή του στο πεδίο, με κίνδυνο καταστροφής ή βανδαλισμού. Η ακρίβεια των μετρήσεων, παρότι ικανοποιητική, υπολείπεται αυτής των γεωδαιτικών οργάνων ακριβείας GNSS.

5.3 Συμβολομετρία Ραντάρ (InSAR)

5.3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία Δορυφορικής Συμβολομετρίας

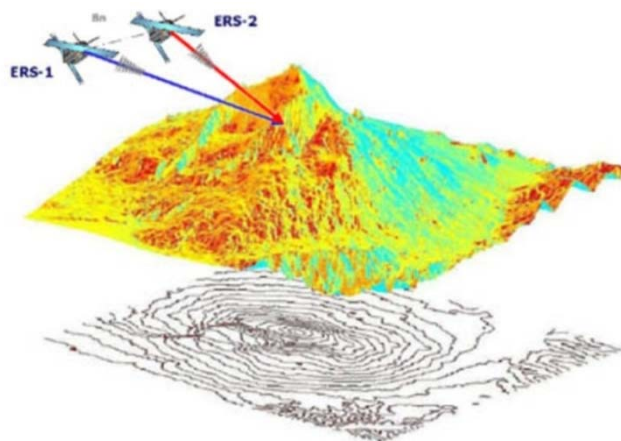
Τα συστήματα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, όπως αποδίδεται στα ελληνικά ο όρος Synthetic Aperture Radar (SAR), αποτελούν όργανα, κατά βάση προσαρμοσμένα στους δορυφόρους των παγκοσμίων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, αλλά και επίγεια, από τα οποία γίνεται συνεχής αποστολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προς την επιφάνεια της γης, με πλευρική διεύθυνση παρατήρησης (LOS: Line of Sight). Κάθε παλμός που αποστέλλεται αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας της γης (μικρών σχετικά διαστάσεων, π.χ. της τάξης των 20m, που σταδιακά μειώνεται με την εξέλιξη των οργάνων), που ορίζεται από δύο μεγέθη, το αζιμούθιο, παράλληλα στην τροχιά του δορυφόρου και το εύρος της απεικόνισης, κάθετα στην τροχιά. Από τη λήψη των επιστρεφόμενων κυμάτων από το ραντάρ, και με μέτρηση του χρόνου που μεσολάβησε, της φάσης και της έντασης των κυμάτων, προκύπτει ακριβής ένδειξη της σχετικής απόστασης του οργάνου από την εστιαζόμενη περιοχή (Σχήμα 61, Φουμέλης, 2009, επίσης https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_GR/SEM521D6UQH_0.html, Alatza, 2020).

Η σχετική πληροφορία της φάσης (αλλά και της έντασης) των επιστρεφόμενων κυμάτων για κάθε περιοχή παρατήρησης, που μπορεί να συσχετιστεί με την απόσταση μεταξύ του οργάνου SAR και της εδαφικής επιφάνειας, καταχωρείται σε ένα εικονοστοιχείο (pixel) της απεικόνισης SAR. Καθώς ο ίδιος δορυφόρος, ευρισκόμενος σε τροχιά, επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία από την ίδια θέση μετά από κάποιες ημέρες ή άλλος δορυφόρος αποτυπώνει την ίδια περιοχή, ακλουθώντας τη δική του τροχιά, παράγεται μια νέα απεικόνιση SAR. Η μέθοδος συμβολομετρίας (Interferometry) ραντάρ (InSAR) συγκρίνει δύο ή περισσότερες απεικονίσεις SAR στο επίπεδο του κάθε εικονοστοιχείου, παράγοντας το σχετικό συμβολογράφημα, αποτελούμενο από χρωματικούς κύκλους που δηλώνουν για κάθε σημείο παρατήρησης τη διαφορά στη φάση μεταξύ των απεικονίσεων.

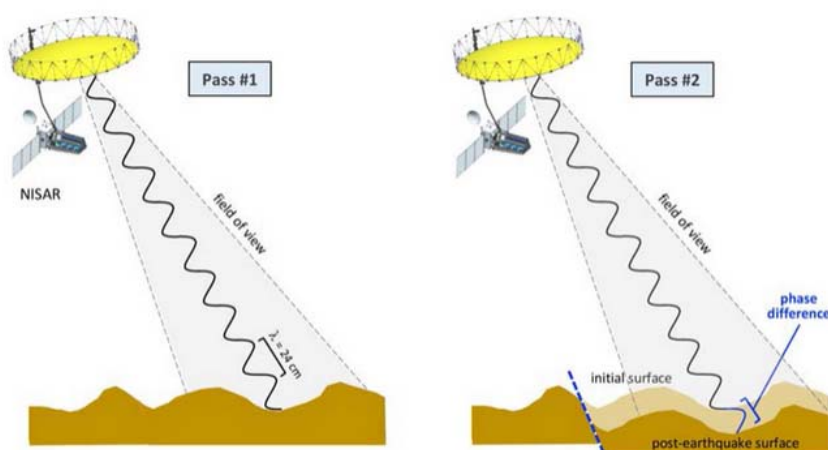


Σχήμα 61: Σκαρίφημα διάταξης σάρωσης με όργανο SAR (πηγή: Φουμέλης, 2009).

Η συμβολομετρία αξιοποιείται προς την κατεύθυνση της τοπογραφικής αποτύπωσης μιας ευρείας περιοχής και τη σύνταξη ψηφιακού μοντέλου εδάφους (σύνθεση δύο πρακτικά ταυτόχρονα λαμβανόμενων απεικονίσεων SAR από διαφορετικές θέσεις, Σχήμα 62), ή για την εκτίμηση των αλλαγών στο εδαφικό ανάγλυφο, όταν το σχετικό συμβολογράφημα (Σχήμα 64) συντίθεται από απεικονίσεις SAR από την ίδια θέση με κάποια χρονική απόσταση (Σχήμα 63). Η διαφορική συμβολομετρία ραντάρ (Differential Interferometry, DInSAR) αναφέρεται στη σύνθεση συμβολογραφημάτων με απάλειψη του τοπογραφικού περιεχομένου τους, ώστε να αποτυπώνονται σε αυτά μόνον τα στοιχεία των εδαφικών μετακινήσεων που έλαβαν χώρα κατά το χρόνο μεταξύ των δύο αποτυπώσεων.



Σχήμα 62: Σύνταξη τρισδιάστατου Μοντέλου Εδάφους από τις ενδείξεις οργάνου SAR (πηγή: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work/).



InSAR measures surface deformation by measuring the difference in the phase of the radar wave between two passes if a point on the ground moves and the spacecraft is in the same position for both passes (zero baseline). InSAR deformation geometry is demonstrated in these figures at the left and right. On Pass 1, a surface of interest is imaged and the radar satellite measures the phase between the satellite and the ground along the line-of-sight (LOS) direction. Later at Pass 2, the satellite makes another measurement between the satellite and the ground. If the ground moves between passes, the phase difference is proportional to the ground deformation between passes along the LOS direction.

Σχήμα 63: Αρχή Προσδιορισμού Εδαφικής Μετακίνησης από τις ενδείξεις οργάνου SAR (πηγή: <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/ge-t-to-know-sar/interferometry/>).

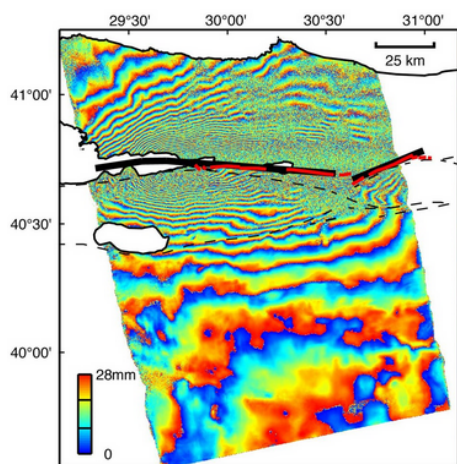


Figure 19: Principle of phase unwrapping

Σχήμα 64: Παράδειγμα Συμβολογραφήματος InSAR (Σεισμός Izmit, 1999, πηγή: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work/).

Σχήμα 65: Αποκατάσταση Φάσης Συμβολογραφημάτων (πηγή: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf).

Στην πράξη στην καταγραφή της φάσης για κάθε περιοχή (δηλωτική της απόστασης μεταξύ του οργάνου SAR και της εδαφικής επιφάνειας) ή της διαφορικής φάσης που έχει προκληθεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (δηλωτική της εδαφικής μετακίνησης στο μεσοδιάστημα) υπεισέρχονται και παράγοντες αποκλίσεων και θορύβου από πολλές πηγές, όπως είναι οι μικροδιαφοροποιήσεις λόγω της κίνησης του δορυφόρου επί τροχιάς μεταξύ του χρόνου αποστολής και της λήψης των κυμάτων, η απόκλιση στην ακριβή θέση του δορυφόρου κατά την επόμενη ή τις επόμενες χρονικά αποτυπώσεις, οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες και η διαφοροποίησή τους μεταξύ των διαδοχικών διελεύσεων του δορυφόρου

ή οι μικρές μεταβολές στην παρατηρούμενη περιοχή και τις επιφάνειες πρόσπτωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (και άρα και στη γεωμετρία ανάκλασης τους) μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων, λόγω και τροποποιήσεων στις χρήσεις γης (π.χ. γεωργία) ή αλλαγών σχετιζόμενων με την εποχή του έτους (π.χ. της παρουσίας ή μη επιφανειακού νερού) ή της βλάστησης ή η παρουσία άλλων πηγών σφαλμάτων ή θορύβου.

Ένα βασικό ζήτημα της ορθής χρήσης της μεθόδου συμβολομετρίας έγκειται συνεπώς στην ορθή επεξεργασία των δεδομένων, κυρίως αναφορικά με την αποτροπή του ενδεχομένου αποσυσχέτισης (decorrelation) μεταξύ διαδοχικών απεικονίσεων, λόγω των παραπάνω μικροδιαφορών από την κίνηση του δορυφόρου, τη μετάδοση των κυμάτων στην ατμόσφαιρα ή τις συνθήκες επί του εδάφους. Κάποιες από αυτές τις μικροδιαφορές αντιμετωπίζονται με βελτιώσεις στην ακρίβεια ή προσαρμογές της μεθόδου, π.χ. με αύξηση του μήκους των κυμάτων ή εμπλουτισμό της συχνότητάς τους. Ωστόσο η βασική μέθοδος αντιμετώπισης αφορά την εφαρμογή σχετικών τεχνικών / αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί προς αυτή την κατεύθυνση, όπως η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry – PS-InSAR, όπου αναζητούνται σταθερά σημεία αναφοράς, που ενδεικτικά μπορεί να αφορούν ακίνητες ανθρώπινες κατασκευές ή γυμνά, βραχώδη πρανή, ή η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Baseline Subset - SBAS method) ή άλλες μέθοδοι (για περαιτέρω περιγραφή και ανάλυση των αλγορίθμων, ενδεικτικά Alatza, 2020).

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κάθε συμβολογράφημα περιλαμβάνει χρωματικές ζώνες που αντιστοιχούν στη φάση κάθε περιοχής παρατήρησης (το εύρος 0-28mm στο σχετικό υπόμνημα στο Σχήμα 64 αντιστοιχεί για το συγκεκριμένο παράδειγμα στο μισό μήκος των κυμάτων 56mm / band C, που αποτελούν τυπικά εκπεμπόμενα κύματα από όργανα SAR). Για τη μετατροπή της φάσης σε πραγματική τιμή της απόστασης, θα πρέπει να προστεθεί και ο ακέραιος αριθμός των μηκών κυμάτων (ημιτονοειδούς μορφής 2π) που έχουν προηγηθεί, επεξεργασία που γίνεται με υπολογιστικούς αλγορίθμους, που αναφέρονται ως αποκατάσταση φάσης (phase unwrapping, Σχήμα 65). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 64 το κάτω μέρος του συμβολογραφήματος με αραιές χρωματικές εναλλαγές αντιστοιχεί σε περιοχή με ήπιες υποχώρηση του εδάφους, ενώ άνω μέρος του συμβολογραφήματος με πολύ πυκνές χρωματικές βάσεις, σε περιοχή, εκατέρωθεν του ρήγματος, με έντονη υποχώρηση.

5.3.2 Εφαρμογές Δορυφορικής Συμβολομετρίας σε Κατολισθήσεις

Η δυνητική χρησιμότητα της συμβολομετρίας ραντάρ είναι ευρύτατη σε μια σειρά από κλάδους που αναφέρονται άμεσα ή έμμεσα στη γεωμορφολογία και όχι μόνο. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι κατολισθητικές αναλύσεις, καθώς η δυνατότητα συγκρίσεων του γήινου αναγλύφου με σχετικά μεγάλη ακρίβεια της τάξης των χιλιοστών έως λίγων εκατοστών, για χρονικές περιόδους που μπορεί να αναφέρονται στην παρελθούσα εικοσαετία, σε περίπτωση αξιοποίησης και ανασύνταξης απεικονίσεων από τις πρώτες δορυφορικές εικόνες της δεκαετίας του 2000 (Alatza, 2020), έως τη μακροσκοπική παρακολούθηση των σύγχρονων μεταβολών, με νέες απεικονίσεις να προστίθενται πλέον κάθε λίγες ημέρες, αποτελεί σε κάθε περίπτωση καινοτομία.

Η αξία χρήσης της μεθόδου μεγιστοποιείται για την παρατήρηση ολόκληρων περιοχών ή μεγάλης έκτασης κατολισθητικών συμβάντων. Τα σχετικά πεδία εφαρμογής της συμβολομετρίας ραντάρ σε κατολισθητικές αναλύσεις αναφέρονται στα ακόλουθα σημεία (Solari et al., 2020), όπως έχουν προκύψει από πραγματικές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου στην Ιταλία κατά τη δεκαετία του 2000 και κυρίως σε αυτή του 2010:

- Ανάστροφες αναλύσεις σε περιπτώσεις σημαντικών κατολισθήσεων, για την αναπαράσταση της χρονικής εξέλιξης των γεγονότων.
- Διερεύνηση και χαρακτηρισμός μεμονωμένης κατολίσθησης, για εμπλουτισμό της διαθέσιμης τοπογραφικής πληροφορίας, εκτίμηση της τρέχουσας επικινδυνότητας της και της πιθανότητας μελλοντικής αστοχίας.
- Παροχή δεδομένων για αναλύσεις και προσομοιώσεις, αναφορικά με την εκτίμηση ή την τεκμηρίωση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας / επικινδυνότητας μιας περιοχής ή την ποσοτικοποίηση της διακινδύνευσης (Σχήμα 66), με δεδομένη τη δυνατότητα ένταξης των συμβατών, γεωαναφερμένων δεδομένων από την εφαρμογή της μεθοδολογίας InSAR στις σχετικές γεωχωρικές αναλύσεις.
- Επικαιροποίηση των καταλόγων καταγραφών κατολισθήσεων σε μια περιοχή, με συμπερίληψη άγνωστων γεγονότων που τεκμηριώνονται από τα ευρήματα της μεθοδολογίας InSAR, και αντίστοιχα εμπλουτισμός των αντίστοιχων αναλύσεων διαχείρισης της κατολισθητικής διακινδύνευσης, των πολιτικών χωροταξίας κτλ.
- Χαρτογράφηση των ζωνών με ενεργές, εξελισσόμενες εδαφικές μετακίνησης σε μια ευρύτερη περιοχή.
- Ενεργή παρακολούθηση της κατολισθητικής δραστηριότητας μιας περιοχής, με δεδομένη τη σταδιακή μείωση του χρόνου μεταξύ της λήψης διαδοχικών

απεικονίσεων SAR στις λίγες ημέρες. Η παρακολούθηση δεν μπορεί αντικειμενικά να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ωστόσο είναι εφικτή σε «σχεδόν πραγματικό χρόνο» (near real time monitoring), της τάξης του δεκαπενθημέρου, που για πολλές περιπτώσεις κατολισθήσεων αποτελεί πολύ ικανοποιητικό διάστημα.

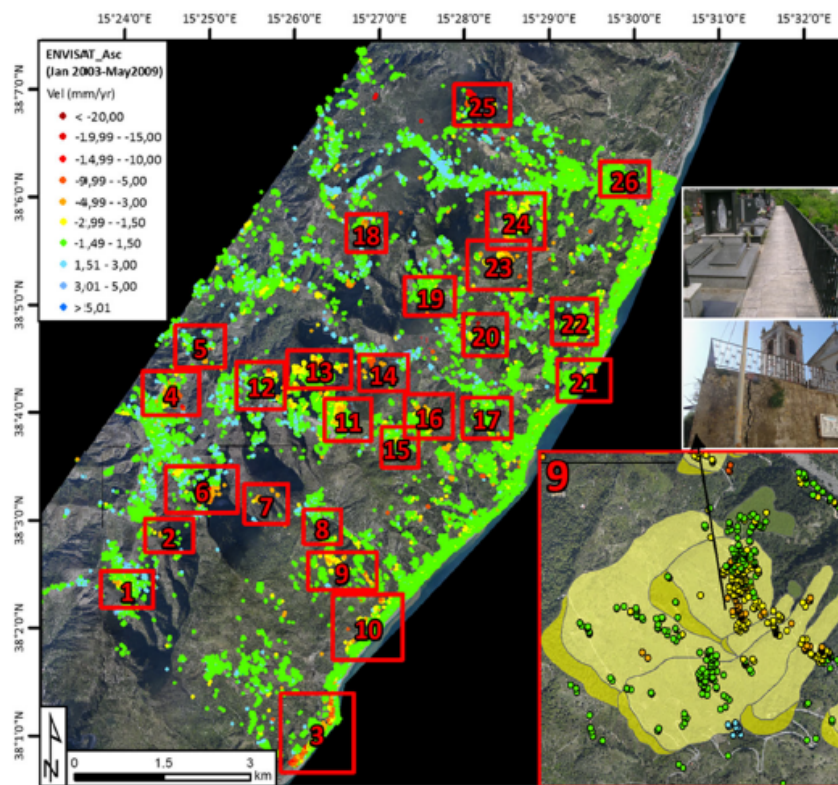


Fig. 4 Location of the twenty-six sites in the Nebrodi area which are characterized by high hydro-geological risk (hotspot mapping) according to the D-InSAR analysis. In the inset the landslide mapping of the village of Croce is reported

Σχήμα 66: Παράδειγμα Εφαρμογής μεθοδολογίας D-InSAR για τον εντοπισμό θέσεων υψηλής κατολισθητικής διακινδύνευσης (πηγή: Casagli et al., 2017).

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται (Colesanti & Wasowski, 2006, Casagli et al., 2023) η πολύ καλή σχέση μεταξύ κόστους – αποτελέσματος για κατολισθητικές αναλύσεις σε περιοχές μεγάλης έκτασης, η υψηλή ανάλυση των περιοχών παρατήρησης, με «εικονικά σημεία» αποτύπωσης που δεν απαιτούν επιτόπου παρουσία, εγκατάσταση ή συντήρηση, με ολοένα και βελτιούμενη ακρίβεια, η μηδενική (έως αμελητέα με τη μορφή θορύβου λόγω ατμοσφαιρικών διαταραχών) επιρροή των καιρικών συνθηκών κατά την παρατήρηση, η δυνατότητα συσχέτισης με παλαιότερες δορυφορικές παρατηρήσεις που καλύπτουν περίοδο της τάξης της εικοσαετίας και η τακτική, περιοδική επανάληψη της παρατήρησης, πλέον κάθε λίγες ημέρες (οι δορυφόροι SENTINEL-1A και SENTINEL-1B του ESA ακολουθούν κοινή τροχιά με διαφορά φάσης 180° με περίοδο επανάληψης 12 ημέρες έκαστος ή 6 ημέρες και για τους δύο, με την περίοδο επανάληψης της παρατήρησης κάθε σημείου στη γη να είναι

ακόμα μικρότερη, της τάξης των 2-3 ημερών, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/revisit-and-coverage>).

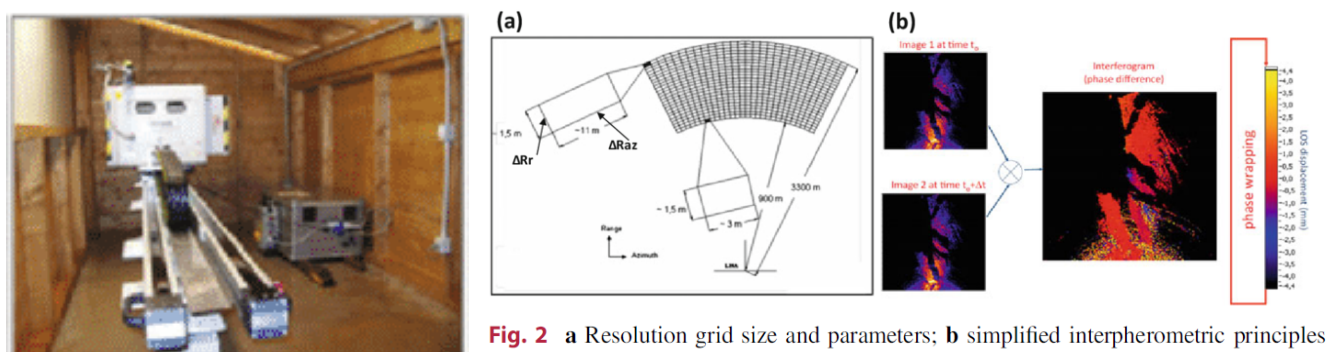
Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται (ομοίως Colesanti & Wasowski, 2006, Casagli et al., 2023) ο εκ των πραγμάτων, λόγω της δορυφορικής προέλευσης, περιορισμένος έλεγχος επί των δεδομένων και της χρονικής τους διαθεσιμότητας, κάποιιοι γεωμετρικοί περιορισμοί ως προς την κλίση και τη διεύθυνση του εξεταζόμενου πρανούς, σε σχέση και με τη φορά της τροχιάς του δορυφόρου και την γωνία της πλευρικής διεύθυνσης παρατήρησης, καθώς και ο δισδιάστατος χαρακτήρας των αποτελεσμάτων. Τα προαναφερθέντα ζητήματα της ανάγκης φιλτραρίσματος και επεξεργασίας των δεδομένων και εφαρμογής περίπλοκων αλγορίθμων μέσω εξειδικευμένων λογισμικών, αλλά και οι εν πολλοίς άγνωστες πηγές σφαλμάτων και θορύβου, αποτελούν επίσης μειονεκτήματα, καθώς απαιτούνται πόροι και χρόνος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και υπεισέρχεται και ένας βαθμός αβεβαιότητας σε αυτά, ιδιαίτερα σε περιοχές με φυτοκάλυψη. Επιπρόσθετα, η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για την επισκόπηση κατολισθητικών φαινομένων πολύ μικρών διαστάσεων, συγκρίσιμων με την επιφάνεια της κάθε περιοχής παρατήρησης επί του γήινου αναγλύφου, όπως και για ταχέως εκδηλωνόμενες κατολισθητικές μετακινήσεις, καθώς κατά την απαιτούμενη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης καθίσταται άγνωστος ο ακέραιος αριθμός των μηκών κυμάτων που θα πρέπει να προστεθεί στην καταγραφόμενη φάση.

5.3.3 Επίγεια Συμβολομετρία και Εφαρμογές σε Κατολισθήσεις

Η τεχνολογία ραντάρ και η μέθοδος συμβολομετρίας μπορούν να εφαρμοστούν και από επίγειες θέσεις (GB-InSAR: Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar), ακολουθώντας τις ίδιες γενικές αρχές (Σχήμα 67), είτε από σταθερή, περιστρεφόμενη θέση που στοχεύει στο εύρος του αντιδιαμετρικού πρανούς υπό παρατήρηση, είτε κινούμενο επί ράγας που έχει κατασκευαστεί σε ευθεία, με προνομιακή θέαση στο πρανές.

Η εφαρμογή της μεθόδου από επίγειο εξοπλισμό συνεπάγεται την άρση κάποιων από τους περιορισμούς της διαστημικής παρακολούθησης, καθώς προσφέρει μεγαλύτερη διαθεσιμότητα και αμεσότητα δεδομένων, πολύ μικρότερη περίοδο επανάληψης της παρατήρησης, εξάλειψη κάποιων πηγών αβεβαιοτήτων και θορύβου της διαστημικής παρακολούθησης και μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Η επίγεια μέθοδος παραμένει μεν τηλεπισκοπικού χαρακτήρα, ωστόσο αφορά την παρακολούθηση ενός συγκεκριμένου πρανούς με τη χρήση πολύ ακριβούς και εξειδικευμένου εξοπλισμού, ενώ αίρεται ο γενικός,

εποπτικός και μακροσκοπικός χαρακτήρας της παρακολούθησης από το διάστημα. Εκ των πραγμάτων η μέθοδος καθίσταται εφαρμόσιμη για την συνεχή παρακολούθηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ιδιαίτερων πρυνών ή άλλων στοιχείων της γεωμορφολογίας, είτε υψηλής επικινδυνότητας, είτε με ιδιαίτερο κοινωνικό ή οικονομικό περιεχόμενο, όπως σε επισφαλή πρυνή πλησίον ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, πρυνή μεταλλείων, παρακολούθηση ηφαιστειών, παγετώνων, εγκοίλων ή μνημείων της πολιτιστικής κληρονομιάς (Casagli et al., 2018).



Σχήμα 67: Επίγειο Ραντάρ (αριστερά) και Διάταξη Εφαρμογής Μεθόδου Επίγειας Συμβολομετρίας (δεξιά) (πηγή: Casagli et al., 2018)

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, η χρήση του ραντάρ GB-InSAR μπορεί να αξιοποιηθεί και ως βασική μέθοδος παρακολούθησης σε ένα σύστημα προειδοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση επιτυχούς λειτουργίας του για έγκαιρη προειδοποίηση επερχόμενης βραχώδους κατάρπτωσης αξιόλογου όγκου σε περιοχή των ιταλικών Άλπεων, στα ανάντη πολιτιστικού μνημείου, κτιρίων και επαρχιακής οδού (Κεφ. 10.4).

5.4 Αεροφωτογραφίες, Ψηφιακή Φωτογραμμετρία και Χρήση UAVs

5.4.1 Εισαγωγή – Καθιερωμένη Χρήση Αεροφωτογραφιών

Η λήψη φωτογραφιών από το έδαφος ή τον αέρα αποτελεί βασικό συστατικό κάθε κατολισθητικής ανάλυσης εδώ και πολλές δεκαετίες και εξακολουθεί να αποτελεί αυτονόητο μέσο καταγραφής, κατανόησης, ερμηνείας και σχεδιασμού των μέτρων αντικατάστασης. Οι σύγχρονες τεχνολογικές καινοτομίες επιβεβαιώνουν και διευρύνουν τη χρήση των (αερο)φωτογραφιών στις κατολισθητικές αναλύσεις, καθώς:

- Προσφέρονται οι δυνατότητες λήψης πολλαπλών ψηφιακών φωτογραφιών πολύ υψηλής ανάλυσης από κάμερες αυξημένων δυνατοτήτων και μικρού μεγέθους και βάρους.

- Έχει καθιερωθεί η χρήση των UAVs, με συνεχώς βελτιούμενα πτητικά χαρακτηριστικά και αυτονομία, επί των οποίων προσαρμόζονται κάμερες αυξημένων δυνατοτήτων, παρέχοντας μεγάλη ευελιξία στη λήψη συχνών, εποπτικών ή εστιασμένων φωτογραφιών από αέρος, προσεγγίζοντας με ευκολία απρόσιτες περιοχές (ενδεικτικά Kyriou, 2021).

Table 8-5

Morphologic, Vegetation, and Drainage Features Characteristic of Slope Instability Processes and Their Photographic Characteristics

TERRAIN FEATURES	RELATION TO SLOPE INSTABILITY	PHOTOGRAPHIC CHARACTERISTICS
MORPHOLOGY		
Concave/convex slope features	Landslide niche and associated deposit	Concave/convex anomalies in stereo model
Steplike morphology	Retrogressive sliding	Steplike appearance of slope
Semicircular backscarp and steps	Head part of slide with outcrop of failure plane	Light-toned scarp, associated with small, slightly curved lineaments
Back-tilting of slope facets	Rotational movement of slide blocks	Oval or elongated depressions with imperfect drainage conditions
Hummocky and irregular slope morphology	Microrelief associated with shallow movements or small retrogressive slide blocks	Coarse surface texture, contrasting with smooth surroundings
Infilled valleys with slight convex bottom, where V-shaped valleys are normal	Mass movement deposit of flow-type form	Anomaly in valley morphology, often with lobate form and flow pattern on body
VEGETATION		
Vegetational clearances on steep scarps, coinciding with morphological steps	Absence of vegetation on headscarp or on steps in slide body	Light-toned elongated areas at crown of mass movement or on body
Irregular linear clearances along slope	Slip surface of translational slides and track of flows and avalanches	Denuded areas showing light tones, often with linear pattern in direction of movement
Disrupted, disordered, and partly dead vegetation	Slide blocks and differential movements in body	Irregular, sometimes mottled grey tones
Differential vegetation associated with changing drainage conditions	Stagnated drainage on back-tilting blocks, seepage at frontal lobe, and differential conditions on body	Tonal differences displayed in pattern associated with morphological anomalies in stereo model

Σχήμα 68: Τυποποίηση Χαρακτηριστικών Μοτίβων Κατολισθητικών Φαινομένων και αντίστοιχα φωτογραφικά χαρακτηριστικά (πηγή: Soeters & Van Westen, 1996)

- Οι ψηφιακές αεροφωτογραφίες μπορούν να αποτελέσουν τη βάση, με εφαρμογή μεθόδων φωτογραμμετρίας και τη χρήση εξειδικευμένων, ωστόσο σχετικά προσιτών λογισμικών, για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε μια περιοχή.

Πριν την περιγραφή των μεθόδων ψηφιακής φωτογραμμετρίας που παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφ. 5.4.2, αξίζει αναφοράς η «παραδοσιακή» φωτοερμηνεία των αεροφωτογραφιών. Αφορά την αναλυτική κατανόηση και αξιολόγηση κάποιων χαρακτηριστικών των αεροφωτογραφιών, σε σχέση με τις παραμέτρους φωτογραφικής αποτύπωσης ή του εξοπλισμού ή τους επικρατούντες φυσικούς παράγοντες κατά τη λήψη, που καθορίζουν τον τόνο, την υφή, τα σχήματα ή την κλίμακα μιας αεροφωτογραφίας, παλιάς ή σύγχρονης. Η φωτοερμηνεία αποτελεί έναν ιδιαίτερο κλάδο, από τον οποίον μπορούν να εξαχθούν πολύ χρήσιμα, ποιοτικά κατά βάση, συμπεράσματα και αναφορικά με τις κατολισθητικές αναλύσεις. Ιδιαίτερα η αναγνώριση κάποιων χαρακτηριστικών

μορφών ή σχηματισμών της μορφολογίας, η παρουσία τοπικών ανωμαλιών ή ασυνεχειών, η παρατήρηση της διαχρονικής εξέλιξης και έντασης της βλάστησης ή της κάλυψης ή γεωμετρίας των επιφανειακών υδάτων, καθώς και η αναγνώριση των μορφών και της γεωμετρίας των κατολισθητικών κινήσεων αποτελούν παράγοντες που εφαρμόζονται και έχουν εν πολλοίς τυποποιηθεί στις κατολισθητικές αναλύσεις εδώ και αρκετές δεκαετίες (Soeters & Van Westen, 1996, Σχήμα 68). Ιδιαίτερη σημασία έχει, όπως είναι εύκολα αντιληπτό, η σύγκριση των διαθέσιμων αεροφωτογραφιών μιας περιοχής που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές περιόδους, πριν ή μετά ενός κατολισθητικού συμβάντος (π.χ. Κεφ. 7.3 & 8.3) ή κατά την εξέλιξή του.

5.4.2 Ψηφιακή Φωτογραμμετρία και Παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους από UAVs

Η φωτογραμμετρία αποτελεί την επιστήμη και τεχνική λήψης αξιόλογης πληροφορίας για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω της διαδικασίας αποτύπωσης, μέτρησης και ερμηνείας των φωτογραφικών εικόνων, των απεικονίσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή άλλων αποτυπώσεων, αποτελεί δε κλάδο που αναπτύσσεται και εξελίσσεται διαρκώς από τον 19^ο αιώνα (<https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>). Η φωτογραμμετρία μέσω UAVs αποτελεί ιδιαίτερο κλάδο, με επιγραμματικά τις ακόλουθες ιδιαιτερότητες (ενδεικτικά Karantanellis, 2021):

- Οι συντεταγμένες κίνησης του UAV ελέγχονται και καθορίζονται μέσω ενσωματωμένου οργάνου GNSS και ομοίως η διεύθυνση στόχευσης της κάμερας, μέσω καταγραφής της περιστροφής της περί τους τρεις άξονες (Σχήμα 69).
- Κατά την πτήση του UAV λαμβάνεται μεγάλος αριθμός γεωαναφερμένων φωτογραφιών. Μέσω εισαγωγής και επεξεργασίας τους με εξειδικευμένο λογισμικό φωτογραμμετρίας, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί μια απεικόνιση της περιοχής με τρίτη διάσταση, εντοπίζοντας κοινά σημεία αναφοράς μεταξύ των δισδιάστατων φωτογραφιών, παράγοντας ένα νέφος τρισδιάστατων γεωαναφερμένων σημείων, ως τη βάση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής.
- Η παραπάνω διαδικασία με χρήση ειδικών αλγορίθμων ονομάζεται τεχνική δομής από κίνηση (Structure from Motion), ενώ έπεται από αλγορίθμους βελτίωσης της απεικόνισης και εμπλουτισμού των τρισδιάστατων σημείων, με αναφορά στο

περιεχόμενο των δισδιάστατων φωτογραφιών, όπως η τεχνική Multi-View Stereopsis (MVS) (ενδεικτικά Javadnejad et al., 2021, Σχήμα 70, Σχήμα 71).

- Σημειώνεται επίσης ότι από τη σύνθεση των επιμέρους φωτογραφιών και της χαρτογραφικής πληροφορίας είναι δυνατόν να παραχθούν και ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες της περιοχής.

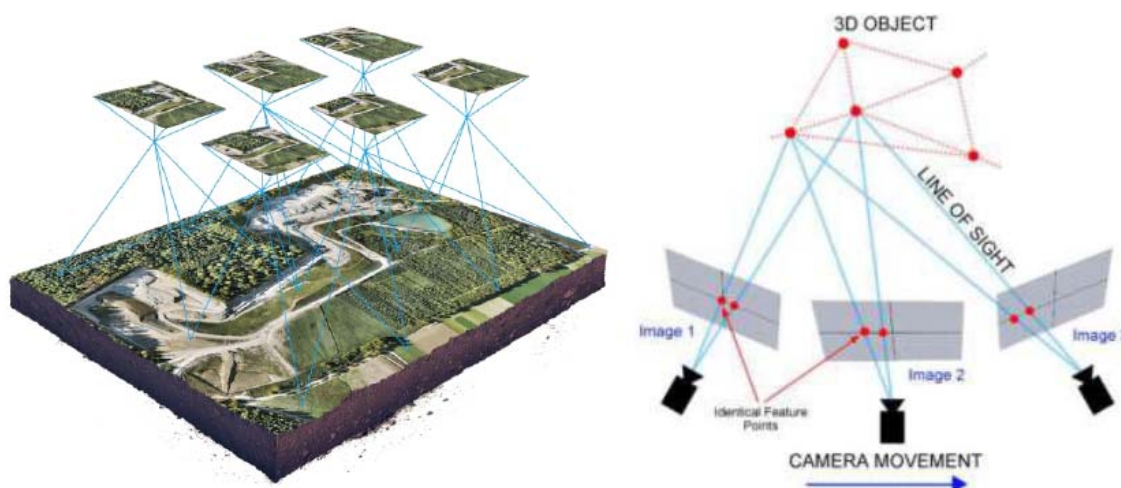


Figure 26. Basic principle of UAV photogrammetry (Clemson Institute, 2014)

Σχήμα 69: Σκαρίφημα Αρχών Φωτογραμμετρίας μέσω UAVs (πηγή: Karantanellis, 2021).

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η παραγωγή ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους DTM ικανοποιητικής ακρίβειας που επιτυγχάνεται μέσω της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο και τη βάση για όλους τους τύπους των σύγχρονων κατολισθητικών αναλύσεων. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, η ακρίβεια του γεωεντοπισμού της πορείας του UAV μέσω της τυπικής, ενσωματωμένης συσκευής GPS (GNSS), και συνεπώς η πληροφορία γεωαναφοράς των φωτογραφιών, είναι μειωμένη (ενδεικτικά της τάξης των 2m) και δεν προσφέρει επαρκή ακρίβεια στο μοντέλο εδάφους. Η ενσωμάτωση στα UAVs συσκευών γεωεντοπισμού μεγάλης ακρίβειας, με σχετική διόρθωση της θέσης από τους επίγειους σταθμούς (GNSS/RTK) αποτελεί μια εναλλακτική που έχει εφαρμοστεί για την ώρα διερευνητικά, παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες και αναιρεί το πλεονέκτημα της προσιτότητας και ευρύτητας χρήσης για τη μέθοδο.

Η τρέχουσα, σχετικά απλή πρακτική για τη βελτίωση της ακρίβειας της παραγόμενης αποτύπωσης περιλαμβάνει τη διασπορά κάποιων Σημείων Ελέγχου / Φωτοσταθερών (Ground Control Points) επί της περιοχής αποτύπωσης, η θέση των οποίων προσδιορίζεται με τοπογραφικό εξοπλισμό ακριβείας. Μέσω των Σημείων Ελέγχου γίνεται διόρθωση των συντεταγμένων του πρωτοπαραγόμενου τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους, με

πολύ μικρή απόκλιση της τάξης των λίγων εκατοστών από τις πραγματικές, ενώ έπεται η βελτιστοποίηση του μοντέλου (τεχνική SfM/MVS).

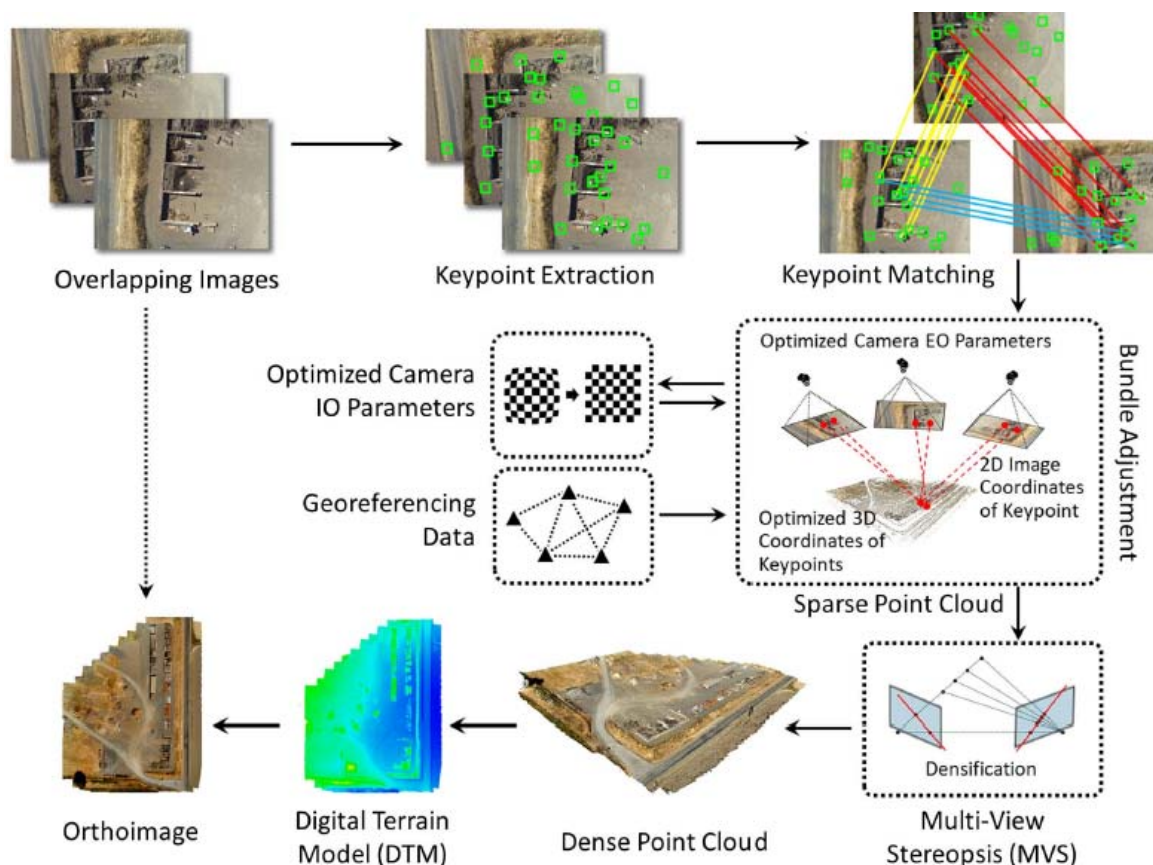


Fig. 1. Steps of SfM-MVS processing. (Reproduced with permission from Javadnejad 2018.)

Σχήμα 70: Διαδικασία Παραγωγής τρισδιάστατου νέφους σημείων, ψηφιακού μοντέλου εδάφους και ορθοφωτογραφιών μέσω φωτογραμμετρίας UAVs (πηγή: Javadnejad et al., 2021).

Οι βέλτιστες πρακτικές όσον αφορά τα Σημεία Ελέγχου επί του εδάφους δεν είναι προφανείς, αναφορικά με παράγοντες όπως οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων (η μεγάλη απόσταση συνεπάγεται ανεπαρκή ακρίβεια, η πολύ μικρή αυξάνει τις απαιτήσεις επεξεργασίας χωρίς ουσιαστικό κέρδος στην ακρίβεια), η βέλτιστη διάταξη τους στο χώρο ή το μέγεθος, το σχήμα, το υλικό και το χρώμα των στόχων (εξασφάλιση ορατότητας και ακρίβειας στην αποτύπωση, αντίθεση με τα γήινα χρώματα, ανθεκτικότητα), ενώ επηρεάζονται και από παράγοντες όπως η μορφολογία της περιοχής προς αποτύπωση, η προσβασιμότητα σε αυτή, το ύψος πτήσης και τα χαρακτηριστικά της κάμερας του UAV και άλλους παράγοντες (ενδεικτικά Zhang et al. 2022).

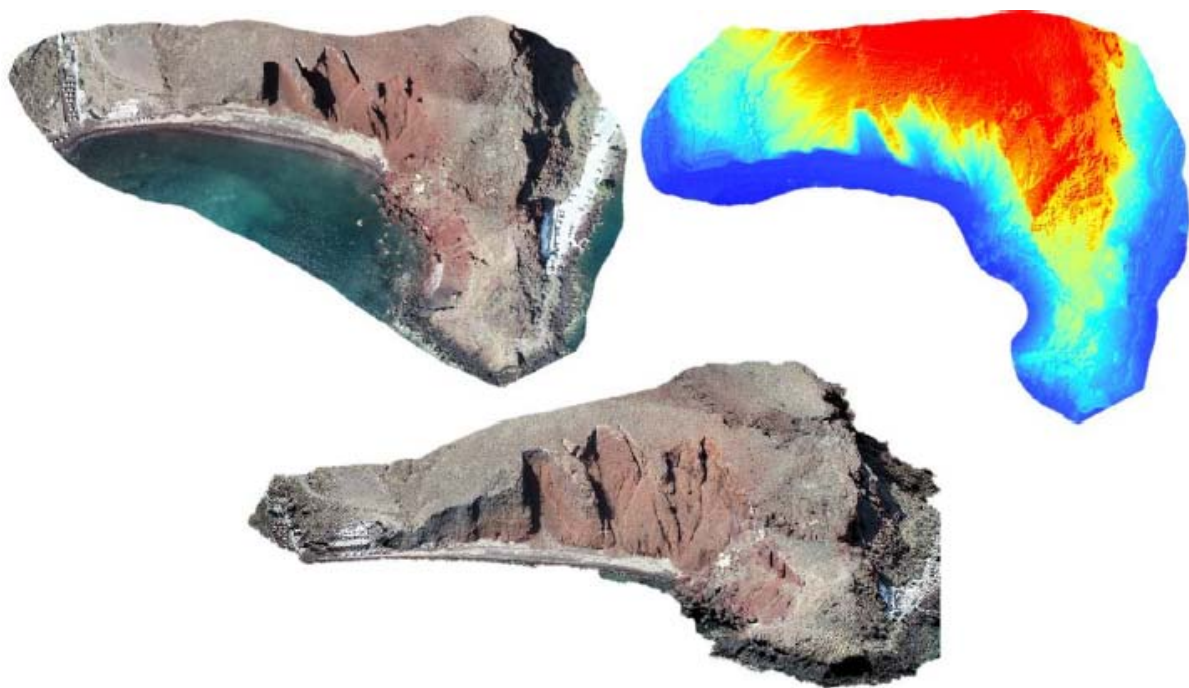


Figure 28. Indicative UAV products from the SfM procedure (Red Beach, Santorini).

Σχήμα 71: Παραδείγματα παραγώγων μέσω ψηφιακής φωτογραμμετρίας (τρισδιάσταση απεικόνιση, ψηφιακό μοντέλο εδάφους) (πηγή: Karantanellis, 2021).

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία έχει προφανείς εφαρμογές σε κατολισθητικές μελέτες, με τη δυνατότητα παραγωγής διαδοχικών αποτυπώσεων μιας περιοχής και σύγκριση των παραγόμενων ψηφιακών μοντέλων εδάφους για την παρακολούθηση της εξέλιξης των μετακινήσεων, με προσδιορισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων μεταβολών στην επιφάνεια, της απώλειας μάζας ή της κινηματικής της ολίσθησης. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα και ευελιξία του εξοπλισμού (Σχήμα 72) δίνει τη δυνατότητα άμεσης κινητοποίησης προς επισκόπηση και λήψη αεροφωτογραφιών αμέσως μετά την εκδήλωση της κατολίσθησης, κατά τη φάση αναγνώρισης (ενδεικτικά αναγνώριση κατολισθητικών φαινομένων κατά τον «Ιανό», Κεφ. 9, Zekkos et al., 2020).

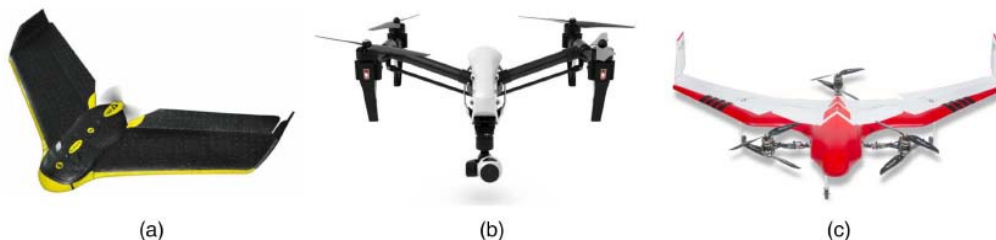


Fig. 1. Examples of some commercial UAVs: (a) fixed-wing senseFly eBee (reprinted from Sensefly 2015, with permission); (b) multirotor DJI Inspire 1 (reprinted from DJI 2016, with permission); and (c) VTOL FireFly 6 (reprinted from BirdsEyeView Aerobotics 2016, with permission).

Σχήμα 72: Ενδεικτικά Εμπορικά UAVs (πηγή: Greenwood et al., 2019).

Παράλληλα, η θέαση από αέρα όλης της περιοχής κατολίσθησης, συμπεριλαμβανομένων των συχνά μη προσβάσιμων ανάντη ή κατόντη σημείων της, προσφέρει τη δυνατότητα άμεσης εκτίμησης της γεωμετρίας, των χαρακτηριστικών της και του μηχανισμού της.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ψηφιακής φωτογραμμετρίας έχουν ήδη περιγραφεί και αφορούν κατά βάση τη δυνατότητα λήψης ενός πολύ ικανοποιητικής ακρίβειας τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους με γρήγορο, οικονομικά προσιτό, άμεσα διαθέσιμο και τεχνικά λιγότερο εξειδικευμένο τρόπο σε σχέση με άλλες μεθόδους, με χρήση μέσων και στοιχείων που είναι οπτικά άμεσα αντιληπτά. Επιπλέον, η παρεχόμενη μέσω των UAVs δυνατότητα τυποποίησης της από αέρος αναλυτικής επισκόπησης μιας περιοχής μελέτης συνιστά σε κάθε περίπτωση μια ιδιαίτερα χρήσιμη, σύγχρονη καινοτομία. Με δεδομένα τα παραπάνω πλεονεκτήματα και την παρεχόμενη ευελιξία, η χρήση UAVs σε όλους τους τομείς που σχετίζονται με τη γεωμορφολογία και στις κατολισθητικές μελέτες αποτελεί πλέον εδραιωμένη και τυπική πρακτική σε παγκόσμιο επίπεδο.

Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αφορά την αδυναμία αποτύπωσης περιοχών με δένδρο-φυτοκάλυψη, σε μεγαλύτερο / πλήρη βαθμό σε σχέση με άλλες μεθόδους (InSAR, LiDAR). Άλλα μειονεκτήματα αφορούν το μεγάλο όγκο δεδομένων προς επεξεργασία, την αδυναμία αποτύπωσης μέσω UAVs σε περίπτωση ισχυρών ανέμων ή χαμηλής ορατότητας, τους περιορισμούς στην πτήση του UAV πλησίον κάποιων υποδομών ή δραστηριοτήτων ή σε περιοχές με ασταθές ή αδύναμο σήμα GNSS και την πιθανότητα βλάβης ή απώλειας επαφής ή άλλης αστοχίας του UAV.

5.5 Χρήση Τεχνολογίας Αποτύπωσης LiDAR

5.5.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Η τεχνολογία ταχείας τρισδιάστατης αποτύπωσης της εδαφικής επιφάνειας μέσω συσκευών σάρωσης (καμερών) LiDAR (Light Detection and Ranging) μεγάλης ακρίβειας (Σχήμα 73) αποτελεί πολύ σημαντική και ομοίως επεκτεινόμενη μεθοδολογία για όλες τις επιστήμες με αναφορά στη γεωμορφολογία, την τοπογραφία και τις περιβαλλοντικές επιστήμες, συμπεριλαμβανομένων των κατολισθητικών μελετών. Η μέθοδος LiDAR βασίζεται στην εκπομπή πολλαπλών παλμών φωτός λέιζερ προς την παρατηρούμενη ζώνη (μικρότερου μήκους κύματος από τα κύματα των ραντάρ InSAR) και μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε μια σχετικά περιορισμένη περιοχή από σταθερή, επίγεια θέση (TLS: Terrestrial Laser Scanner), με ανάλυση αποτύπωσης σε κλίμακα χιλιοστού έως εκατοστού

ή σε μια ευρύτερη περιοχή, από κινούμενα εναέρια μέσα (ALS: Airborne Laser Scanner), με ανάλυση αποτύπωσης σε κλίμακα δεκατομέτρου έως μέτρου (Jaboyedoff et al., 2012).

Fig. 1 Terrestrial laser scanner investigated (f.l.t.r.): Leica BLK360, Leica RTC360, Z+F IMAGER 5010, Z+F IMAGER 5016, and Faro Focus^{3D} X330



Σχήμα 73: Ενδεικτικά Σύγχρονα Όργανα TLS LiDAR (πηγή: Kersten & Lindstaedt, 2022).

Η αποτύπωση είναι τριών διαστάσεων και παρέχεται σε μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους DTM, και με γεωαναφορά σε περίπτωση τοπογραφικής αποτύπωσης του επίγειου σημείου εκπομπής ή ενσωμάτωση δέκτη GNSS στην πορεία της εναέριας καταγραφής, διευκολύνοντας τη συνδυαστική χρήση της με πολλές άλλες εφαρμογές, Το αποτέλεσμα της αποτύπωσης με τη μέθοδο LiDAR δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες ή το ηλιακό φως.

Table 1 Classification of the different applications of LIDAR technologies in landslide studies

	Landslide	Rockfall	Debris-flow
(1) Landslide detection and characterization (In Sect. 4)	<ul style="list-style-type: none"> Mapping of geomorphic features 	<ul style="list-style-type: none"> Rock face imaging and characterization Calculate discontinuity orientation 	<ul style="list-style-type: none"> Detection of mobilizable volumes Hydromorphic characterization
(2) Hazard assessment and susceptibility mapping (In Sect. 5)	<ul style="list-style-type: none"> Mainly as support for mapping 	<ul style="list-style-type: none"> Some attempts for susceptibility and hazard mapping (not yet achieved) 	<ul style="list-style-type: none"> Input for mapping hazard based on geomorphologic approach
(3) Modelling (In Sect. 5)	<ul style="list-style-type: none"> Classical modelling tools are not able yet to handle huge 3D information density HRDEM allow more accurate landslide modelling by improving their geometrical characterization 	<ul style="list-style-type: none"> High-resolution DEM for trajectory modelling 	<ul style="list-style-type: none"> Input for spreading modelling
(4) Monitoring (In Sect. 6)	<ul style="list-style-type: none"> Monitoring of surface displacements Volume budget 	<ul style="list-style-type: none"> Monitoring of surface displacement Detection of pre-failure displacements (under development) Quantification of rockfall activity (volumes) 	<ul style="list-style-type: none"> Sediment budget Monitoring of morphologic changes in channel

Σχήμα 74: Εφαρμογές LiDAR σε κατολισθητικές αναλύσεις (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).

Η χρήση των αποτυπώσεων LiDAR στις κατολισθητικές μελέτες περιλαμβάνει δυνητικά όλους τους τύπους κατολισθήσεων, σε γαιώδη υλικά, στο βαθμό που οι παλμοί λέιζερ μπορούν να διαπεράσουν τη δενδρο-φυτοκάλυψη, καταπτώσεις σε βραχώδη πρηνή ή ροές κορημάτων και αφορά, ανάλογα με την περίπτωση, όλες τις φάσεις της κατολισθητικής ανάλυσης (αναγνώριση και χαρακτηρισμός φαινομένου, εκτίμηση επικινδυνότητας και χαρτογράφηση επιδεκτικότητας, προσομοίωση μετακίνησης και παρακολούθηση φαινομένων), κατά τα αναφερόμενα στο Σχήμα 74 (Jaboyedoff et al., 2012).

5.5.2 Επίγεια Σάρωση TLS

Η σάρωση LiDAR μιας επιφάνειας από ένα επίγειο, σταθερό σημείο ή σημεία διενεργείται μέσω της μαζικής αποστολής πολλαπλών, μονοχρωματικών και ευθύγραμμων παλμών φωτός λέιζερ, προς πολλαπλές, γνωστές μέσω πολικών συντεταγμένων, κατευθύνσεις. Από τη μέτρηση του χρόνου του κάθε παλμού έως την ανάκλασή του στην επιφάνεια, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόστασης μεταξύ του σημείου ανάκκλησης επί της επιφάνειας και του πομπού (ενδεικτικά Jaboyedoff et al., 2012, Σχήμα 75). Από τη χωρική σύνθεση των πολλαπλών σημείων που συλλέγονται από τις αντανάκλασεις στην επιφάνεια είναι δυνατή η τρισδιάστατη αποτύπωση της γεωμετρίας της, σε ένα ψηφιακό μοντέλο.

Η επαναληπτική σάρωση μιας επιφάνειας κατά τακτά χρονικά διαστήματα από το ίδιο σημείο, που μπορεί να αφορά το εξωτερικό κέλυφος ενός κτιρίου ή και έναν εσωτερικό χώρο (π.χ. για μέτρηση της μετακίνησης ή στροφής του κτιρίου ή του ανοίγματος μιας ρωγμής) επιτρέπει διαδοχικές αποτυπώσεις της και επισήμανση των διαφοροποιήσεων που λαμβάνουν χώρα στο χρονικό διάστημα μεταξύ των σαρώσεων.

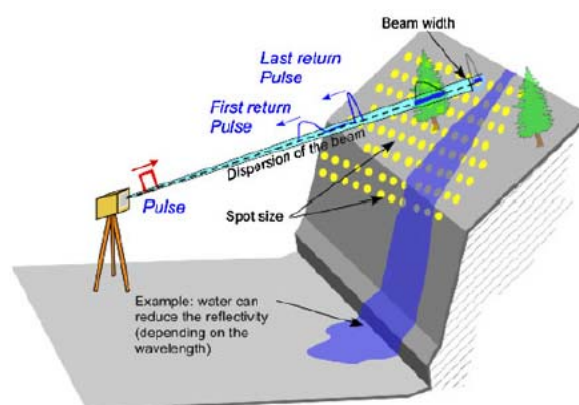


Fig. 1 Principles of laser scanner data acquisition, showing the example of TLS
Σχήμα 75: Αρχές Μέτρησης Απόστασης με τη μέθοδο LiDAR (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).

Στην περίπτωση πρηνών υπό παρακολούθηση, επισφαλών ή με βραδύ ρυθμό εξέλιξης της μετακίνησης, με τη μεθόδου επίγειου LiDAR ποσοτικοποιείται και αποτυπώνεται χωρικά σε τρεις διαστάσεις η κατολισθητική μετακίνηση και παραμόρφωση ή άλλη μορφολογική μεταβολή λόγω τυχόν ανθρωπογενούς (π.χ. εκσκαφή) δραστηριότητας ή φυσικής διεργασίας (π.χ. διάβρωση) μεταξύ δύο σαρώσεων. Η ποσοτικοποίηση αφορά το μέγεθος της μετακίνησης σε τρεις διαστάσεις, την εκτίμηση της γεωμετρίας της απώλειας μάζας

από το πρηνές και του όγκου των ολισθημένων υλικών, των μορφολογικών μεταβολών ή την πιθανή αναγνώριση πρόδρομων φαινομένων, ανάλογα και με τον τύπο και τα υλικά της κατολίσθησης (Σχήμα 74).

Η επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης και οι αλγόριθμοι αναγνώρισης της μετακίνησης είναι σύνθετοι, καθώς κάθε αποτύπωση έχει διαφορετικά, τυχαία σημεία από την επόμενη. Συνεπώς εφαρμόζονται ιδιαίτερες και σύνθετες μεθοδολογίες (π.χ. με συμπερίληψη στις αποτυπώσεις σταθερών σημείων στόχων ως κοινή αναφορά, ή επαναληπτικοί αλγόριθμοι συσχέτισης των κοντινότερων σημείων αποτύπωσης με τη μέθοδο ICP: iterative closest point ή άλλες μέθοδοι, ενδεικτικά Teza et al., 2007).

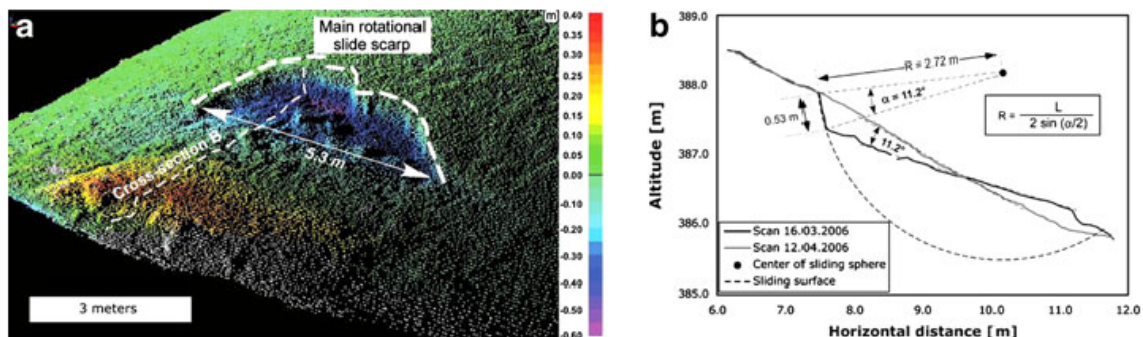


Fig. 7 Example of interpretation of landslide mechanism by using two successive TLS-DEMs performed on the 16 March and 12 April 2006 along the Sorge river (Switzerland). a Altitude difference between the scans and b interpretation of the cross-section showing a rotational landslide (modified after Jaboyedoff et al. 2009a)

Σχήμα 76: Παράδειγμα διαδοχικής σάρωσης κατολίσθησης με τη μέθοδο TLS LiDAR (πηγή: Jaboyedoff et al., 2012).

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επίγειας σάρωσης TLS είναι γενικά πολύ μεγαλύτερη αυτής της εναέριας σάρωσης ALS, ωστόσο η απόκλιση μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων επηρεάζεται κατά περίπτωση και από παράγοντες όπως η ποιότητα των μετρήσεων, η πυκνότητα των σημείων σάρωσης, η παρουσία δενδροκάλυψης, η τραχύτητα του αναγλύφου, οι θέσεις του πομπού TLS και η γεωμετρία της πραγματικής διαφοροποίησης στη μορφολογία κ.α.

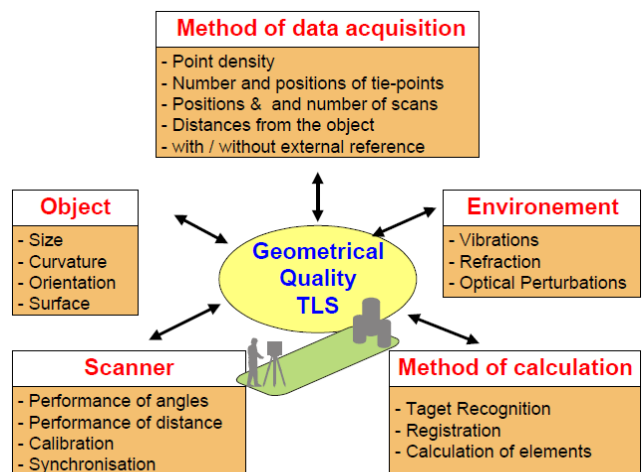


Figure 1. the dependence of the performance of TLS-measurements

Σχήμα 77: Πηγές Σφαλμάτων αποτυπώσεων από TLS LiDAR (πηγή: Staiger, 2005).

Στο Σχήμα 77 (Staiger, 2005) συνοψίζονται οι παράγοντες των συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων που αφορούν την κάμερα σάρωσης (διεύθυνση και απόσταση, βαθμονόμηση), τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (μέγεθος, καμπύλωση, υφή), περιβαλλοντικούς παράγοντες (δονήσεις, διαθλάσεις, παρεμβολές), την επάρκεια των μετρήσεων και τις μεθόδους υπολογισμού. Όπως προαναφέρθηκε, η αποτύπωση δεν επηρεάζεται θεωρητικά από την παρουσία νέφωσης ή ηλιακού φωτός, ενώ σε περίπτωση μη πλήρους δενδροκάλυψης και μεγάλη πυκνότητας παλμών, η επιφάνεια των δέντρων μπορεί να διαχωριστεί από αυτή του φυσικού εδάφους. Σημειώνεται επίσης ότι η μέθοδος δεν αποτυπώνει υδάτινα στοιχεία, λόγω μη αντανάκλασης των παλμών στο νερό.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται η ταχύτητα και η μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων επί σύνθετων, τρισδιάστατων, εκτεταμένων επιφανειών, καθώς και ο τηλεπισκοπικός χαρακτήρας της. Αντίθετα, στα μειονεκτήματα αναφέρεται το πολύ υψηλό κόστος του εξοπλισμού (και παλαιότερα και το βάρος του), που έχουν ως αποτέλεσμα οι αποτυπώσεις να είναι ακριβές και εκ των πραγμάτων αραιές, οι περιορισμοί ορατότητας από τη θέση λήψης με σχηματισμό «σκιών», η (μικρή ή μεγάλη) επιρροή στοιχείων επί του αναγλύφου (π.χ. δενδροκάλυψη) ή μικρών μορφολογικών ανωμαλιών επί του αποτελέσματος της σάρωσης λόγω σκιών, η περιπλοκότητα των δεδομένων και η διαχείρισή τους με ανάγκη φιλτραρίσματος και επεξεργασίας των δεδομένων.

Το υψηλό κόστος του εξοπλισμού αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα στην εδραίωση της μεθόδου στην τρέχουσα τυπική πρακτική κατολισθητικών αναλύσεων και η επίγεια μεθοδολογία TLS LiDAR χρησιμοποιείται κυρίως σε ειδικές αποτυπώσεις, π.χ. σε κτίρια ή σε ιδιαίτερες περιοχές ενδιαφέροντος, σε αντιδιαστολή με άλλες, πολύ πιο προσιτές οικονομικά, υπό εδραίωση μεθόδους, όπως οι αποτυπώσεις φωτογραμμετρίας μέσω UAVs. Οι τρέχουσες χρήσεις της επίγεια μεθοδολογίας TLS LiDAR αφορούν κυρίως βραχώδη, φυσικά ή τεχνητά πρηνή ή λατομεία και μεταλλεία, σε φάση διερεύνησης (αποτύπωση γεωμετρίας και χαρτογράφηση ασυνεχειών, εντοπισμός επιφανειών αδυναμίας), ανάλυσης (σύνθεση τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας πρηνούς) και παρακολούθησης (εντοπισμός ασταθών περιοχών, επιμέτρηση όγκων καταπτώσεων κτλ.). Ωστόσο, η επέκταση και γενίκευση χρησιμοποίησης της μεθόδου στις κατολισθητικές αναλύσεις ενδέχεται να επιτευχθεί με τις επερχόμενες βελτιώσεις στα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού (βάρος, ευελιξία, δυνατότητες, προσιτότητα) και στις μεθοδολογίες επεξεργασίας των δεδομένων.

5.5.3 Εναέρια Σάρωση ALS

Η εναέρια σάρωση (ALS) βασίζεται στις ίδιες αρχές με την επίγεια σάρωση, ωστόσο εκτελείται από εναέριο, κινούμενο μέσο, αεροπλάνο ή ελικόπτερο, επανδρωμένο ή μη, του οποίου η πορεία καταγράφεται μέσω δεκτών GNSS, όπως και η καταγραφόμενη περιοχή για σχετική γεωαναφορά. Αποτελεί μέθοδο αποτύπωσης πολύ μεγαλύτερης περιοχής σε σχέση με τις περιοχές εφαρμογής της επίγειας σάρωσης και αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο για μια σειρά από τεχνικούς και περιβαλλοντικούς τομείς με αναφορά στη γεωμορφολογία. Στο Σχήμα 78 παρουσιάζεται σκαρίφημα της γενικής αρχής της μεθόδου, ενώ στο Σχήμα 79 παρουσιάζεται η σταδιακή εξέλιξη στα χαρακτηριστικά της μεθόδου με το χρόνο, προς τη χρήση ελαφρύτερων, μη επανδρωμένων εναέριων μέσων, με εμπλουτισμό στις συχνότητες των εκπεμπόμενων παλμών και εξέλιξη στις μεθοδολογίες σάρωσης, καθιστώντας τα αποτελέσματά της ακριβέστερα και τη λήψη τους πιο προσιτή.

Στις κατολισθητικές μελέτες η χρήση της εναέριας σάρωσης LiDAR έχει ευρύτητα εφαρμογών, καταρχάς αναφορικά με την επισκόπηση μιας ευρύτερης περιοχής, συχνά και με δενδροκάλυψη, και την τηλεπισκοπική αναγνώριση παλαιών και πρόσφατων κατολισθήσεων. Η ακρίβεια της αποτύπωσης είναι σχετικά μειωμένη σε σχέση με άλλες μεθόδους, της τάξης των λίγων δεκάδων εκατοστών, ωστόσο αυξάνεται διαρκώς με τις βελτιώσεις που ενσωματώνονται στην τρέχουσα πρακτική (Σχήμα 79).

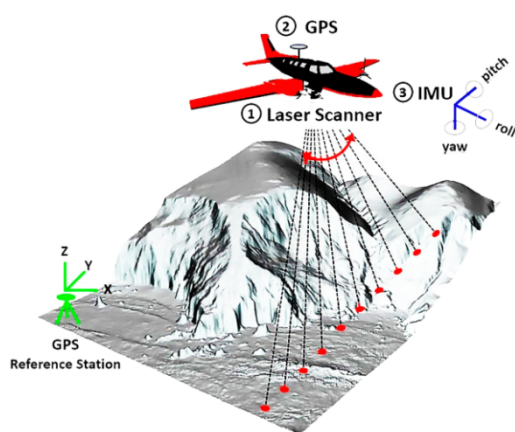


Figure 1. Basic principle of spatial positioning for ALS system (modified from [2]).

Σχήμα 78: Σκαρίφημα Αποτύπωσης με ALS LiDAR (πηγή: Tomljenovic et al., 2015).

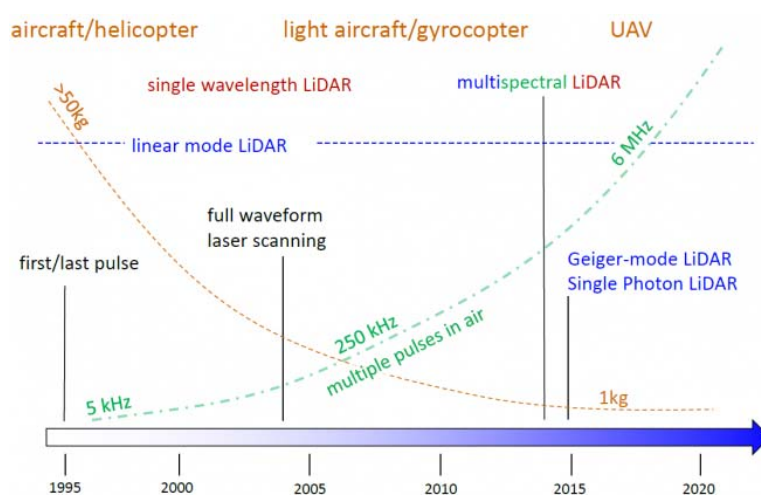


Figure 1: Airborne laser scanning timeline.

Σχήμα 79: Χρονική Εξέλιξη Εξοπλισμού, Χαρακτηριστικών Παλμών και Μεθόδων ALS LIDAR (πηγή: <https://www.gim-international.com/content/article/recent-developments-in-airborne-lidar-2>).

Βάσει της τρέχουσας πρακτικής η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για τη μακροσκοπική παρακολούθηση της εξέλιξης των κατολισθητικών μετακινήσεων, συνήθως σε περιπτώσεις ενός φαινομένου μεγάλης κλίμακας και έκτασης ή της συνολικής κατολισθητικής δραστηριότητας μιας ευρύτερης περιοχής, με δεδομένο και το τυπικά μεγάλο χρονικό διάστημα παρέλευσης μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων, ενώ δεν είναι κατάλληλη, δεδομένου αφενός του κόστους του εξοπλισμού της πτήσης και της σάρωσης και της παρεχόμενης ακρίβειας, για την αποτύπωση μιας μικρότερης περιοχής ή για την καταγραφή μικρομετακινήσεων ή πρόδρομων κατολισθητικών ενδείξεων ή της εδαφικής μετακίνησης σε στενό χρονικό πλαίσιο. Ωστόσο, στο άμεσο μέλλον η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου αναμένεται να επεκταθεί, με την τυποποίηση της προσαρμογής των καμερών LiDAR και την αναμενόμενη βελτίωση στα χαρακτηριστικά των καμερών, που θα τις καταστήσουν ευρύτερα προσιτές και πιο οικονομικές, ενώ ήδη οι εναέριες αποτυπώσεις LiDAR εδραιώνονται συγγενικούς τεχνικούς κλάδους, όπως σε τρισδιάστατες αποτυπώσεις κτιρίων και υποδομών (Greenwood et al., 2022).

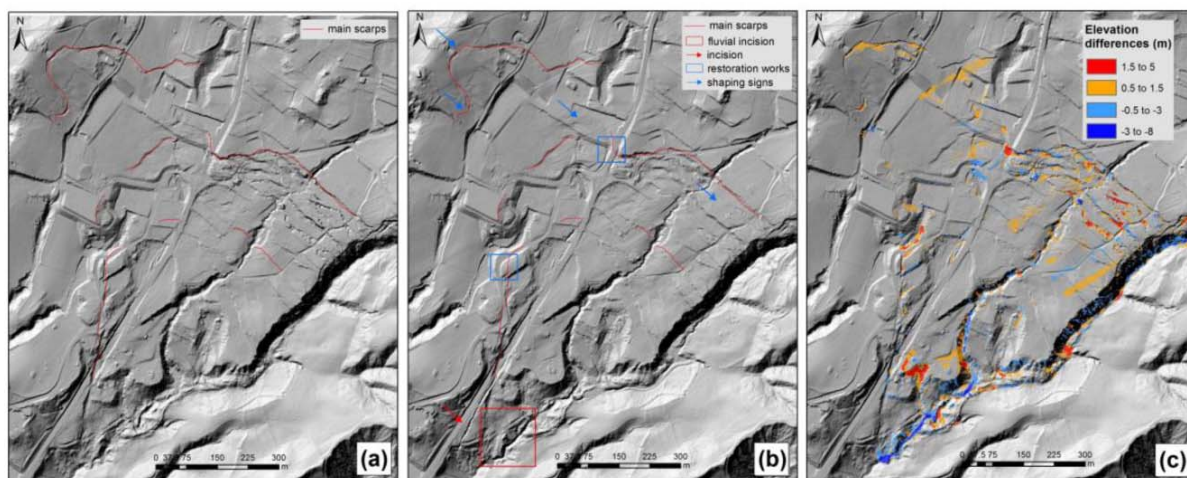


Figure 9. Comparison between two LiDAR DTMs performed post-event, in December 2013 (dec2013DTM) (a), and November 2016 (nov2016DTM), with the indication of the main morphological modifications within the landslide area (b), and elevation variations occurred in the landslide body until November 2016 (c).

Σχήμα 80: Παράδειγμα διαδοχικής σάρωσης κατολίσθησης με τη μέθοδο ALS LiDAR (πηγή: Pellicani et al., 2019).

Στο Σχήμα 80 (Pellicani et al., 2019) παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου, σε περιοχή κατολίσθησης μεγάλης έκτασης, με δύο μετακατολισθητικές σαρώσεις με σημαντική χρονική απόσταση μεταξύ τους. Καταγράφονται σημαντικού μεγέθους διαφοροποιήσεις στις στάθμες φυσικού εδάφους, ανυψωτικές ως αποτέλεσμα των έργων

αποκατάστασης της κατολίσθησης στο μεσοδιάστημα των δύο σαρώσεων, αλλά και βύθισης, λόγω της διάβρωσης του εδάφους στην παραποτάμια ζώνη.

5.6 Λοιπές Μέθοδοι – Συνδυαστική Εφαρμογή Μεθόδων

5.6.1 Λοιπές Σύγχρονες Μέθοδοι με Εφαρμογή σε Κατολισθητικές Αναλύσεις

Στα Κεφ. 5.2 – 5.5 παρουσιάστηκαν στοιχεία για τις πλέον εδραιωμένες, σύγχρονες μεθόδους αποτύπωσης, με ευρεία εφαρμογή στις κατολισθητικές μελέτες. Είναι αντιληπτό ότι οι διαθέσιμες σύγχρονες μέθοδοι με εφαρμογές στα κατολισθητικές αναλύσεις δεν περιορίζονται στις παραπάνω. Ενδεικτικά αναφέρονται επιπλέον οι αυτοματοποιήσεις στη λήψη μετρήσεων των γεωτεχνικών οργάνων (Κεφ. 5.1), αλλά και οι ακόλουθες, λιγότερο εδραιωμένες μέθοδοι (Casagli et al., 2017, Casagli et al., 2023):

- Μακροσκοπική αναγνώριση κατολισθητικών κινήσεων από τις πολυφασματικές, δορυφορικές εικόνες (multispectral satellite sensors & images).
- Τα ραντάρ Doppler, μικρής ακρίβειας, ωστόσο άμεσης απόκρισης στην αναγνώριση μιας μετακίνησης μεγάλης κλίμακας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα άμεσης προειδοποίησης, π.χ. με δυνατότητα άμεσης αναγνώρισης μιας απότομης βραχοκατάπτωσης στα ανάντη μιας οδού και άμεση ενεργοποίηση φαναριού ή μπάρας λίγα δευτερόλεπτα αργότερα, για έγκαιρο αποκλεισμό της οδού και προστασία των διερχόμενων οχημάτων.
- Εγκατάσταση Ρομποτικών Γεωδαιτικών Σταθμών που καταγράφουν συνεχώς και με μεγάλη ακρίβεια τη θέση κάποιων στόχων επί ενός πρανούς.
- Θερμικές Κάμερες, που μπορούν να αναγνωρίσουν θερμικές ανωμαλίες επί ενός πρανούς, π.χ. λόγω τοπικής υγρασίας ή ροής, ως ένδειξη σχηματισμού μιας επιφάνειας αδυναμίας.

5.6.2 Σύγκριση και Συνδυαστική Χρήση Μεθόδων

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Οι σύγχρονες μέθοδοι, εργαλεία και όργανα αποτελούν πολύ σημαντικές καινοτομίες στις κατολισθητικές αναλύσεις. Ωστόσο, κάθε περίπτωση έχει διαφορετικό, βέλτιστο έως αποδεκτό, πεδίο εφαρμογής και η καταλληλότητά της εξαρτάται από το είδος και την έκταση της κατολισθητικής ανάλυσης, τη στόχευσή της, το γεωτεχνικό και τεχνικογεωλογικό περιβάλλον, θέματα προσβασιμότητας,

διαθεσιμότητας πόρων, το εξεταζόμενο χρονικό πλαίσιο κτλ. (ενδεικτικά Casagli et al., 2017, Casagli et al., 2023, Σχήμα 81, Σχήμα 82).

- Οι διαστημικές μέθοδοι (InSAR, αλλά και δέκτες GNSS) είναι πολλά υποσχόμενες και με βελτιούμενη ακρίβεια, ωστόσο ενδείκνυνται κυρίως για ευρύτερες περιοχές ή μεγάλης έκτασης ολισθήσεις, ενώ υπεισέρχονται σε αυτές αβεβαιότητες και ζητήματα με τον έλεγχο των δεδομένων.

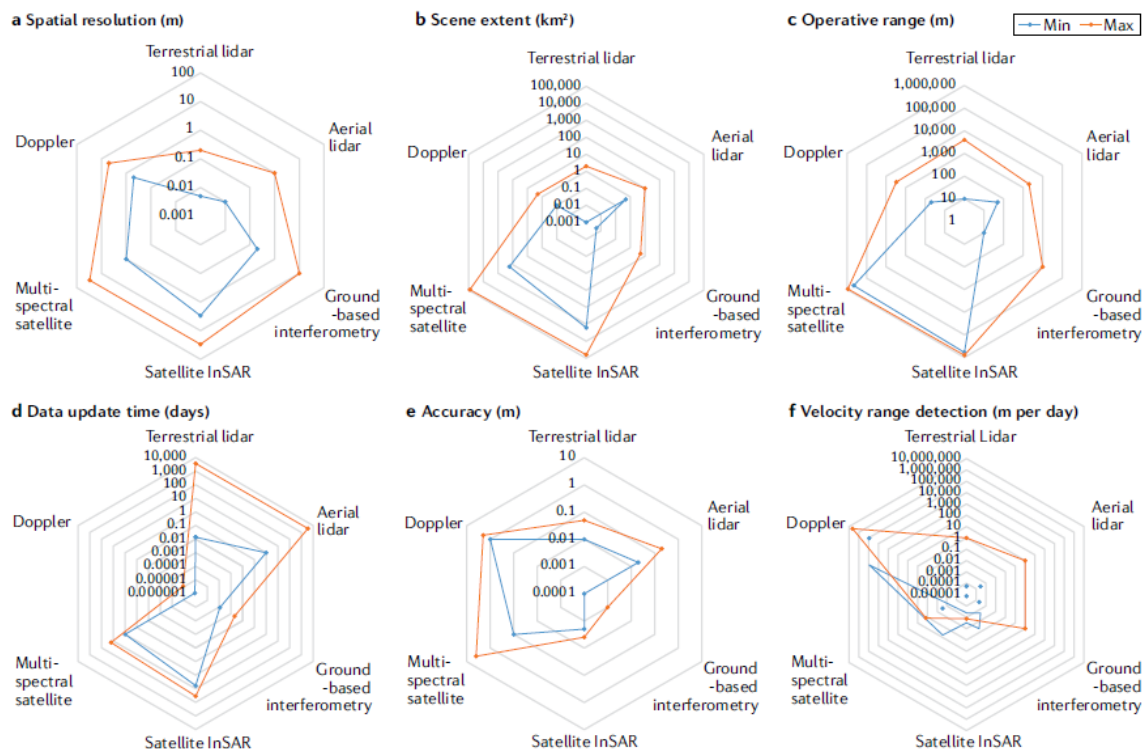


Fig. 2 | Technical comparison between different remote-sensing techniques. Every described technique has a range of operability. **a**, Spatial resolution. **b**, Extent of the area that can be surveyed. **c**, Distance from the target. **d**, Frequency

of the acquisitions. **e**, Accuracy. **f**, Velocity of the target. Each technique has its own strong and weak points, which means that none is suitable for every application and type of landslide. InSAR, interferometric synthetic aperture radar.

Σχήμα 81: Σύγκριση διάφορων μεθόδων ως προς τη (α) διάσταση της περιοχής αποτύπωσης, (β) την περιοχή κάλυψης, (γ) το μήκος της σάρωσης, (δ) το χρόνο επανάλληψης της σάρωσης, (ε) την ακρίβεια των μετρήσεων και (ς) τη δυνατότητα αντίληψης της ταχύτητας μετακίνησης (πηγή: Casagli et al., 2023).

- Στις εναέριες μεθόδους (ψηφιακή φωτογραμμετρία) έχει δοθεί μεγάλη ώθηση από την εδραίωση της χρήσης και τη βελτίωση των πτητικών χαρακτηριστικών, της αυτονομίας και το προσιτό κόστος των UAVs. Αποτελούν ήδη βασικό στοιχείο στη διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων, λόγω και της δυνατότητας άμεσης επόπτευσης μη προσβάσιμων περιοχών και επαναλαμβανόμενων πτήσεων σε μικρό χρονικό διάστημα, με μικρό κόστος και ικανοποιητική ακρίβεια (ενδεικτικά Kyriou, 2021). Παράλληλα με την επέκταση των δυνατοτήτων των UAVs, αυξάνονται και οι δυνατότητες προσαρμογής σε αυτά και άλλων οργάνων πέραν των οπτικών καμερών, όπως καμερών LiDAR, επεκτείνοντας τη δυναμική τους χρήση.

- Οι σύγχρονες επίγειες μέθοδοι κινούνται κυρίως προς την κατεύθυνση της αυτοματοποίησης και συνεχούς λειτουργίας, είτε αφορούν την λήψη μετρήσεων σε γεωτεχνικά όργανα, είτε τη συνεχή σάρωση ενός πρανούς, για την παρακολούθησή του, συχνά στο πλαίσιο σχεδιασμού ενός συστήματος άμεσης προειδοποίησης, σε ιδιαίτερα, επισφαλή πρανή.
- Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται συνδυαστική εφαρμογή περισσότερων της μίας μεθόδου, ή επιβεβαίωση των αποτυπώσεων με κλασσικές τοπογραφικές μεθόδους, για την καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε μεθόδου, έλεγχο επί των μειονεκτημάτων της και άρση των αβεβαιοτήτων.

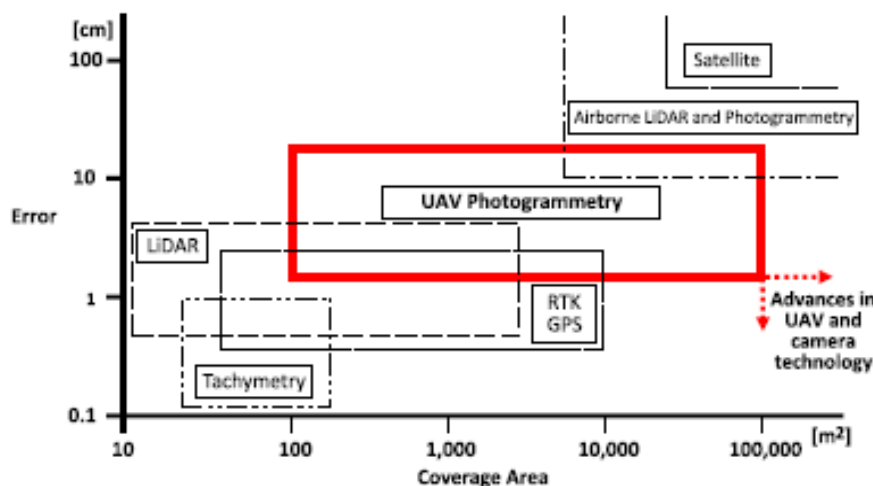


Fig. 5. UAV application to surveying tasks. (Adapted from Siebert and Teizer 2014.)

Σχήμα 82: Ενδεικτική ακρίβεια και έκταση πεδίου εφαρμογής σύγχρονων μεθόδων παρακολούθησης (πηγή: Greenwood et al., 2019).

6 Κατολισθητικά Φαινόμενα στον Ελληνικό Χώρο

6.1 Εισαγωγικά Στοιχεία Συνθηκών Εκδήλωσης Κατολισθήσεων

Ο ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονες γεωφυσικές διεργασίες κατά την περίοδο της αλπικής ορογένεσης, που οδήγησαν σε ποικιλία γεωτεκτονικών ζωνών, με λιθολογική ποικιλομορφία, σύνθετες γεωλογικές – τεκτονικές δομές και διαφοροποιήσεις αναφορικά με την τεκτονική καταπόνηση, τη γεωμορφολογία και την τοπογραφία. Τα κατολισθητικά φαινόμενα στον ελληνικό χώρο είναι συχνά, λόγω του συνδυασμού της λιθολογικής σύστασης, των τεκτονικών-νεοτεκτονικών δυνάμεων και των μορφολογικών συνθηκών (εγγενή αίτια κατολισθήσεων, Σχήμα 9), επί των οποίων δρουν οι παράγοντες ενεργοποίησης, εφήμερου (σεισμικά συμβάντα, βροχοπτώσεις) ή μόνιμου (αλλαγή συνθηκών ευστάθειας λόγω ανθρωπογενούς, συχνά κατασκευαστικής δραστηριότητας) χαρακτήρα (ενδεικτικά Koukis, 1982, Sabatakakis et al., 2013, Koukis & Koutsoyiannis, 1997, Γκουρνέλλος κ.α. 2006). Οι κατολισθήσεις εκδηλώνονται τυπικά σε ευαίσθητες, δυνητικά ασταθείς τεχνικογεωλογικά, περιοχές, ενεργές και κατά το γεωλογικό παρελθόν, και με απότομο ανάγλυφο, οι οποίες ενεργοποιούνται κατά περίπτωση, μετά από κάποιο σεισμικό συμβάν, εκτεταμένες βροχοπτώσεις ή την ανθρωπογενή δραστηριότητα (Koukis, 1982), ενώ οι περιπτώσεις συνολικής ενεργοποίησης εδαφικών μαζών σε μεγάλη κλίμακα ή / και πολλών εποχιακών εδαφικών μετακινήσεων, τυπική περίπτωση σε τροπικές κατά βάση περιοχές της γης κατά τις περιόδους των βροχών (Νότια και Νοτιοανατολική Ασία, Νότια και Κεντρική Αμερική, Κεφ.2.2.2) είναι σπάνιες, λόγω και των επικρατουσών κλιματικών συνθηκών¹³.

Στη βάση των παραπάνω, είναι χαρακτηριστική η γεωγραφική διαφοροποίηση εντός του ελληνικού χώρου, στην συχνότητα και την τυπολογία των κατολισθητικών φαινομένων, που αποδίδεται στον μορφολογικό και τεχνικογεωλογικό διαχωρισμό της χώρας σε τρεις κύριες ζώνες, τη δυτική, κεντρική και ανατολική (Σχήμα 83, Koukis, 1982, 1988). Στη δυτική και κεντρική Ελλάδα το μορφολογικό ανάγλυφο είναι απότομο και συνδέεται με επάλληλες, πτυχωσιγενείς οροσειρές και κοιλάδες με γενική διεύθυνση B-N (BBD-NNA)

13 Εξαίρεση στην παραπάνω διαπίστωση ενδεχομένως αποτελούν τα εκτεταμένα κατολισθητικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν πρακτικά ταυτόχρονα, σε πολυάριθμες θέσεις και σε μεγάλη κλίμακα κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά το πέρασμα του μεσογειακού κυκλώνα «Ιανός» κυρίως στο νομό Καρδίτσας (~1700 φαινόμενα βάσει δορυφορικών καταγραφών, Valkaniotis et al., 2022, Κεφ. 8) το Σεπτέμβριο του 2020 ή στο Νομό Χανίων το 2019 (Nefros et al., 2023).

που διακόπτονται από την τάφρο του Κορινθιακού κόλπου και συνεχίζουν με την ίδια διεύθυνση στην Πελοπόννησο, ενώ στην Κρήτη εμφανίζονται με διεύθυνση Δ-Α.

Στη δυτική Ελλάδα παρατηρείται επικράτηση σχηματισμών ασβεστολίθων, δολομιτών, σχιστολίθων, κερατολίθων και φλύσχη, με έντονο και πολυποίκιλο κερματισμό και καρστικοποίησης στους ασβεστιτικούς σχηματισμούς. Το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής περιλαμβάνει πτυχώσεις σύγκλισης και απόκλισης μεγάλου μήκους, συνήθως σε διεύθυνση Β-Ν, και δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ και ΒΕ-ΝΔ διεύθυνσης, με διαφοροποίηση σε Β-Ν και Α-Ν διεύθυνση στο νότιο τμήμα της ζώνης. Τα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονται στη δυτική Ελλάδα κυρίως σε χαλαρές αποθέσεις του Τεταρτογενούς στις πιο πεδινές περιοχές, σε ημισυνεκτικές ιζηματογενείς, νεογενείς στρώσεις και στους φλυσχικούς σχηματισμούς στις ημιορεινές περιοχές, ενώ πολλοί οικισμοί έχουν διαμορφωθεί σε σύγχρονες, χαλαρές και δυνητικά ασταθείς αποθέσεις και κορήματα, λόγω της παρουσίας νερού σε μικρά βάθη σε αυτές τις περιοχές. Στις πιο ορεινές περιοχές η τυπολογία των κατολισθητικών φαινομένων περιλαμβάνει κυρίως βραχοκαταπτώσεις, εκδήλωση ολισθήσεων σε περιοχές επωθήσεων και αστάθειες εντός των φλυσχικών σχηματισμών (Koukis, 1982).

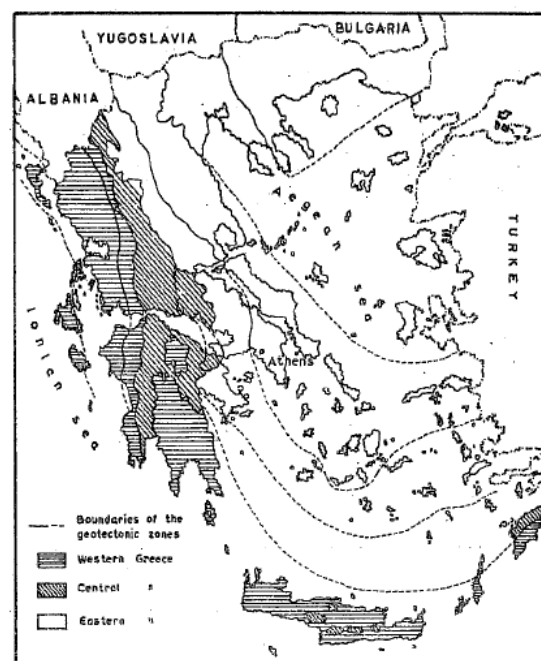
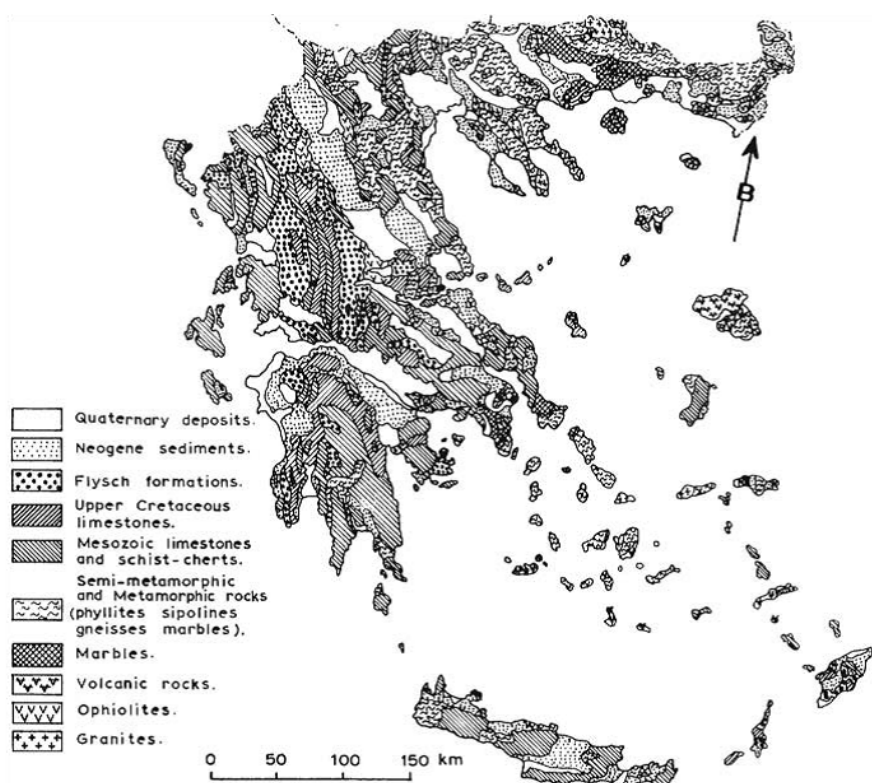


Fig.1 Indicative map of the broad division of the country on engineering geological terms.

Σχήμα 83: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης Ελλάδας (αριστερά, Koukis, 1988, έχει ληφθεί από Koukis et al., 2005) και διαχωρισμός χώρας σε τρεις ζώνες (δεξιά, Koukis, 1982)

Στην κεντρική Ελλάδα ομοίως παρατηρείται απότομο μορφολογικό ανάγλυφο και επικράτηση σχηματισμών ασβεστολίθων, λεπτοστρωματωδών κατά θέσεις και ανάλογα με την ηλικία, δολομιτών, κερατολίθων, αργιλικών σχιστολίθων, φλύσχη, μαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Παρατηρούνται εσωτερικές εφίππευσεις με διεύθυνση πτύχωσης B-N και επωθήσεις από A προς Δ, και κύριο σύστημα ρηγμάτων με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Τα κατολισθητικά φαινόμενα είναι παρόμοιας φύσης με αυτά στη δυτική Ελλάδα, αλλά γενικά μεγαλύτερης έντασης, λόγω του πιο απότομου αναγλύφου και της τεκτονικής ιστορίας, που σε συνδυασμό με τη λιθολογία, τις πολυπτυχωμένες δομές και τη συσσώρευση τάσεων στις βραχομάζες καθιστούν ευρύτερες περιοχές δυνητικά προβληματικές, ειδικά όπου επικρατούν οι σχηματισμοί του φλύσχη, της μεταβατικής ζώνης μεταξύ ασβεστολίθων και φλύσχη, νεογενείς σχηματισμοί και χαλαρά κορήματα του Τεταρτογενούς σε ζώνες εφίππευσης. Σε αυτή τη ζώνη εντάσσεται και η ιδιαίτερη, γεωδυναμικά ενεργή, περιοχή του Κορινθιακού κόλπου (Koukis, 1982).

Στην ανατολική Ελλάδα το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται ορεινό – ημιορεινό, με παρουσία παλαιότερων, προαλπικών, πιο σταθερών, μεταμορφωμένων σχηματισμών υποβάθρου (μάρμαρα, γρανίτες, σχιστόλιθοι), που χαρακτηρίζονται συμπαγείς και ομοιόμορφοι, και ιζηματογενών σχηματισμών με μεγάλη ποικιλία (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κερατόλιθοι, ψαμμίτες, φλυσχικοί και μολασσικοί σχηματισμοί, αποθέσεις του Νεογενούς και Τεταρτογενούς). Τα κατολισθητικά φαινόμενα εντοπίζονται στους χαλαρούς σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς και σε φλυσχικούς σχηματισμούς, ενώ οι εκδηλώσεις φαινομένων στους συμπαγείς βραχώδεις σχηματισμούς είναι πιο σπάνιες.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω προκύπτει ότι στη δυτική και κεντρική χώρα συνυπάρχουν πολλοί επιβαρυντικοί εγγενείς παράγοντες (απότομο ανάγλυφο, λιθολογία, νεοτεκτονικές δυνάμεις και δομές) και εναυσματικοί παράγοντες (σεισμικότητα και πιο έντονες βροχοπτώσεις) και τα κατολισθητικά φαινόμενα είναι συχνότερα, μεγαλύτερης έντασης και κλίμακας, ενώ στην ανατολική χώρα οι συνθήκες χαρακτηρίζονται ως γενική εικόνα πιο σταθερές, λόγω την τακτικής παρουσίας συμπαγών και συνεκτικών, μεταμορφωμένων βραχωδών σχηματισμών, των ηπιότερων τεκτονικών δομών και των χαμηλότερων υψών βροχόπτωσης αλλά και της μειωμένης σεισμικότητας (Koukis, 1982).

Σε αυτό το πλαίσιο, τα κύρια αίτια των κατολισθήσεων στην Ελλάδα συνοψίζονται ως ακολούθως (Λέκκας, 2000, Ζιούρκας, 1989):

- Η απότομη μορφολογία και το ορεινό ανάγλυφο.

- Οι χαμηλές γεωτεχνικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών.
- Η έντονη τεκτονική παραμόρφωση, ο κατακερματισμός των σχηματισμών και η διαμόρφωση επιφανειών αδυναμίας στις εκτενείς ζώνες ρηγμάτων, τις τεκτονικές επαφές και ασυνέχειες.
- Οι λιθοστρωματικές διαφοροποιήσεις με στρωματογραφική αλληλουχία σχηματισμών με διαφορετικά γεωτεχνικά μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά και διαφοροποίηση στη διαπερατότητα ή την αντίσταση στη διάβρωση. Ενδεικτικά είναι συχνή και χαρακτηριστική η επιφανειακή παρουσία ανθεκτικών, διαπερατών σχηματισμών (π.χ. ασβεστολίθων) επί ασθενών, διατμημένων και ευαίσθητων στον κορεσμό φλυσικών σχηματισμών, λόγω και επωθήσεων, με αποτέλεσμα την επιφόρτιση και τον υδροεμποτισμό των τελευταίων και απομείωση των συνθηκών ευστάθειας τους.
- Οι κλιματολογικές διαφοροποιήσεις, με τα φαινόμενα μεγαλύτερης έντασης να εκδηλώνονται σε ορεινές περιοχές της δυτικής και κεντρικής χώρας, όπου και εμφανίζονται και οι προαναφερόμενες δυσμενείς συνθήκες.
- Η υψηλή σεισμικότητα.
- Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις.
- Άλλοι παράγοντες όπως η διαβρωτική δράση λόγω ροής ρεμάτων και ποταμών, κυματισμών, ατμοσφαιρικών παραγόντων ή κύκλων κορεσμού - ξηρασίας ή παγετού ή λόγω διαλυτοποίησης - απομάκρυνσης παράκτιων γεωυλικών. Επίσης η παρουσία ιδιαίτερων γεωτεχνικών συνθηκών, όπως υδατοδιαλυτών γύψων, προδιατμημένων αργιλικών υλικών των οποίων η αντοχή μειώνεται με τη εκσκαφή τεχνητών πρανών και τη μακροχρόνια έκθεση σε διαβρωτικούς παράγοντες ή αποδομήσιμων βραχωδών σχηματισμών.

6.2 Καταγραφή και Ταξινόμηση Κατολισθήσεων στον Ελληνικό Χώρο

6.2.1 Ιστορικό Αντιμετώπισης Κατολισθητικών Φαινομένων

Ακολουθώντας και τις διεθνείς εξελίξεις, σταδιακά εντός του 20^{ου} αιώνα συντελείται αλλαγή στη θεώρηση των κατολισθητικών φαινομένων, από αναπόφευκτη φυσική καταστροφή με κυρίως τοπική αναφορά και αντιμετώπιση, προς την κατεύθυνση της επιστημονική κατανόησης του πλαισίου εκδήλωσης, των αιτιών και μηχανισμών πρόκλησης τους, αλλά και της πιο κεντρικής αντιμετώπισης τους, με λήψη μέτρων

αποκατάστασης βάσει της διαθέσιμης γνώσης της κάθε εποχής, και διαχείρισης των επιπτώσεών τους. Η καταγραφή, διερεύνηση και αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων στην ελληνικό χώρο λαμβάνει πιο επίσημο χαρακτήρα με την ίδρυση της Γεωλογικής Υπηρεσίας (1919), υπαγόμενης στο Υπουργείο Συγκοινωνιών, και του Γεωλογικού Γραφείου (1920), υπαγόμενο στο Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας, και συστηματικοποιείται με την ίδρυση του ΙΓΕΥ (Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους) το 1952, που μετονομάστηκε και εξελίχθηκε στο γνωστό ΙΓΜΕ το 1976, και πρόσφατα μετονομάστηκε σε ΕΑΓΜΕ, αποτελώντας τον επίσημο επιστημονικό φορέα της Ελλάδας, που βάσει του ιδρυτικού του νόμου εκπονεί μεταξύ άλλων μελέτες για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων και την αντιμετώπιση φυσικών κινδύνων, όπως των κατολισθητικών φαινομένων (ΙΓΜΕ, 2010).

Η τυπική, θεωρούμενη ως πιο αποτελεσματική με τα μέτρα της εποχής, πρακτική του ελληνικού κράτους μέχρι και τη δεκαετία του 1960 σε περιπτώσεις κατολισθητικών φαινομένων που επηρέαζαν τη βιωσιμότητα ολόκληρων οικισμών, ήταν η μεταφορά τους (αποφυγή και όχι ανάσχεση της διακινδύνευσης), και με δεδομένο ότι η επιστημονική γνώση στην τεχνικογεωλογική αναγνώριση των αιτιών και μηχανισμών των φαινομένων και στις μεθοδολογίες ανάσχεσης και σταθεροποίησης τους ήταν πιο περιορισμένη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 1946 επιτροπή του Υπουργείου Ανοικοδόμησης με επικεφαλής τον Γ. Μαρίνο εξέτασε 102 οικισμούς και πρότεινε την μεταφορά των 51, πρόταση που δεν υλοποιήθηκε εξαιτίας του εμφυλίου πολέμου (Τσαγκάς, 2011), ενώ εκτιμάται ότι κυρίως κατά τις δεκαετίες του 1950-1960 οι περιπτώσεις μετακίνησης οικισμών ανέρχονται σε ~500! (Koukis et al., 2015), συμπεριλαμβάνοντας την δεύτερη περίπτωση μελέτης του Μικρού Χωριού Ευρυτανίας και πολλούς οικισμούς των νομών Αχαΐας (στην περίπτωση του οικισμού Συλίβαινας στην πρώτη περίπτωση μελέτης η κατολίπηση και η μετακίνηση είχαν γίνει τη δεκαετία του 1910), Ηλείας, Καρδίτσας και Ιωαννίνων. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Λέκκα (2000), η πρακτική μετακίνησης των οικισμών τα μεταπολεμικά χρόνια ήταν σε πολλές περιπτώσεις καταχρηστική, και έμμεσα στόχευε στην αντιμετώπιση της μειονεκτικής θέσης των ορεινών οικισμών της χώρας λόγω της απομόνωσης και των φτωχών αναπτυξιακών δυνατοτήτων τους, με τη μετοίκηση σε πιο πεδινές περιοχές να προσφέρει περισσότερες δυνατότητες οικονομικής δραστηριότητας και ανάπτυξης.

Ωστόσο έκτοτε, αφενός με την πρόοδο και συστηματοποίηση της επιστημονικής γνώσης, και με την ώθηση από την ίδρυση της Διεύθυνσης Τεχνικής Γεωλογίας στο ΙΓΜΕ το 1974

(Τσαγγαράτος, 2012), αλλά και με το επιστημονικό έργο στις γεωλογικές και πολυτεχνικές σχολές της χώρας, και αφετέρου λόγω της απροθυμίας των κατοίκων των οικισμών μετά το 1975 να τους εγκαταλείψουν, με δεδομένη και τη σταδιακή άρση της απομόνωσης τους μέσω τεχνικών / οδικών έργων, αλλά και τη μεταγενέστερη ανάπτυξη του ορεινού – χειμερινού τουρισμού σε κάποιους από τους ορεινούς οικισμούς, που εξάλειψαν σταδιακά και έως ένα βαθμό την μειονεκτική θέση τους, η λύση της μεταφοράς των οικισμών γενικά αποφεύγεται όπου είναι δυνατόν (Τσαγκάς, 2011). Πλέον σε πρώτο πλάνο είναι η αναλυτική διερεύνηση του φαινομένου και η αναζήτηση και κατασκευή των κατάλληλων μέτρων ανάσχεσης (υδραυλικά έργα ελέγχου επιφανειακών απορροών και καθεστώτος υπογείων υδάτων, προστασία πρηνών, τεχνικά έργα αντιστήριξης κ.α.), με παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας τους. Προφανώς σε περιπτώσεις φαινομένων μεγάλης έντασης και κλίμακας, όπως η πρόσφατη περίπτωση του Ροπωτού ή των Αναργύρων Αμυνταίου πλησίον των λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ, η εγκατάλειψη των πληττόμενων οικισμών παραμένει πρακτικά αναπόφευκτη. Σημειώνεται ότι έχει αναφερθεί και σχετική ανάλογη πρόταση μεταφοράς για ορεινούς οικισμούς της Αργιθέας Καρδίτσας, μετά την εκδήλωση των φαινομένων που σχετίζονται με την πρόσφατη (2020) κακοκαιρία τύπου μεσογειακού κυκλώνα «Ιανός» (<https://www.kathimerini.gr/society/561221164/metakinisi-oikismon-logo-katolisthiseon/>).

6.2.2 Καταγραφές και Ταξινομήσεις, Εθνικοί Χάρτες Επιδεκτικότητας

Η σύνταξη της πρώτης βάσης δεδομένων ελληνικών κατολισθήσεων σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική (Κεφ. 2.2.2) έγινε στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής (Ζιούρκας, 1989), με άντληση στοιχείων κυρίως από τις καταγραφές του ΙΓΜΕ και του ΚΕΔΕ (Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων), καθώς και από λοιπές περιπτώσεις όπου υπήρξε κινητοποίηση κρατικών υπηρεσιών, κάλυπτε δε την περίοδο 1946 έως 1986 και περιελάμβανε 802 συμβάντα, περί τα 700 σε ή πλησίον οικισμών και περί τα 100 στο οδικό δίκτυο. Η καταγραφή κάθε συμβάντος περιελάμβανε και στοιχεία αναφορικά με τη λιθολογία, τη δομή, τη γεωμετρία του πρηνούς, το μηχανισμό, τα αίτια και τις επιπτώσεις τους κ.α., συνεπώς κατέστη δυνατή η σχετική ταξινόμηση, από την οποία προκύπτει (Σχήμα 84) η μεγαλύτερη συχνότητα φαινομένων σε εδαφικούς σχηματισμούς του Τεταρτογενούς, σε σχηματισμούς του Τριτογενούς (Νεογενή, Μολάσσεις) και κυρίως σε φλυσχικούς σχηματισμούς, που η αναλογία τους αυξάνεται περαιτέρω μετά από αναγωγή στην (συγκριτικά περιορισμένη) έκταση εμφάνισής τους.

Άλλα συμπεράσματα αφορούν μεταξύ άλλων τη συχνότερη εκδήλωση φαινομένων σε ημιορεινές (υψόμετρο 601m-1000m) και δευτερευόντως λοφώδεις (υψόμετρο 201m-600m) και ορεινές περιοχές (υψόμετρο >1001m), την εν πολλοίς προφανή σημασία της κλίσης των πρανών και των βροχοπτώσεων, που συνεπάγεται την εκδήλωση πολύ μεγαλύτερου αριθμού συμβάντων κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ οι πλέον συχνοί τύποι μετακίνησης περιλαμβάνουν κυκλικές ολισθήσεις, ερπυσμούς και ροές εδαφικών υλικών (Ζιούρκας, 1989, Koukis & Ziourkas, 1991, Koukis et al., 1994). Αντίστοιχα, τεκμηριώνεται στατιστικά η πολύ συχνότερη εμφάνιση ρηχών κατολισθήσεων (1,5m-5m βάθος) έναντι των επιφανειακών, αλλά και των βαθιών ή πολύ βαθιών ολισθήσεων. Αναφορικά με τους κρίσιμους εγγενείς και εναυσματικούς παράγοντες πρόκλησης των φαινομένων, πέραν της μεγάλης σημασίας των βροχόπτωσης αναδεικνύεται η σημασία της εγγενούς παθολογίας λόγω τεχνικογεωλογικού περιβάλλοντος, καθώς οι παράγοντες της λιθολογίας και δομής, της δυσμενούς στρωματογραφικής κλίσης, του καθεστώτος υπογείων υδάτων, της αποσάθρωσης και διάβρωσης καταγράφονται ως παρόντες στις περισσότερες περιπτώσεις (Koukis et al., 1997).

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται γενικά και στις μεταγενέστερες στατιστικές επεξεργασίες (π.χ. Sabatakakis et al., 2013), με εμπλουτισμό των συμβάντων και της πληροφορίας, επιβεβαιώνοντας τη βασική τυπολογία των κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο. Αντίστοιχα ο εναυσματικός ρόλος των σεισμικών γεγονότων, της καταστροφής δασών ή των ανθρώπινων επεμβάσεων είχαν βρεθεί στην αρχική βάση δεδομένων μικρότερης σημασίας, ωστόσο ο ρόλος των ανθρώπινων επεμβάσεων είναι δεδομένο ότι έχει έκτοτε αυξηθεί.

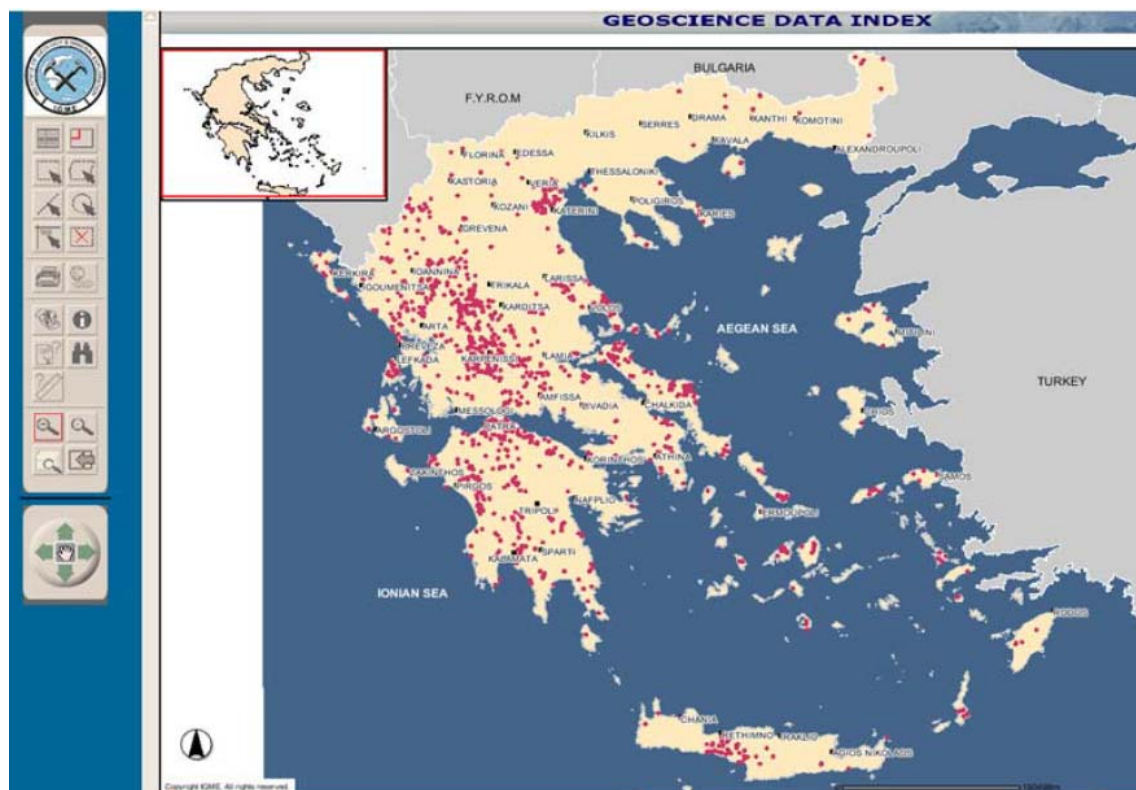
Τις επόμενες δεκαετίες οι καταγραφές και ταξινομήσεις των κατολισθήσεων συστηματικοποιήθηκαν περαιτέρω, ακολουθώντας τις πρακτικές και τα διαθέσιμα εργαλεία κάθε εποχής. Η βάση δεδομένων του ΙΓΜΕ παραμένει η πλέον επίσημη και

Table 2 : Frequency distribution of landslides in different lithological formations

Formations	A1. Frequency of landslides %	A2. Area %	A1/A2	Relative frequency of landslides
Quaternary	16.229	15.87	1.022	0.104
Tertiary (Neogene-Molassic)	30.212	24.00	1.258	0.128
Flysch	35.581	8.48	4.196	0.428
Transition zone to the Flysch, Cherts, Schist-cherts etc.	2.996	1.22	2.456	0.250
Limestones	3.621	19.50	0.186	0.019
Phyllites-Shists	8.614	18.35	0.469	0.048
Volcanic rocks	2.746	12.58	0.218	0.022
Total	99.999	100.00	9.805	0.999

Σχήμα 84: Κατανομή Κατολισθήσεων ανά Σχηματισμό (Koukis & Ziourkas, 1991).

πλήρης, τα στοιχεία της οποίας παραχωρήθηκαν και αξιολογήθηκαν στο πλαίσιο των σχετικών διακρατικών – ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων (π.χ. SafeLand, ELSUS, Κεφ. 2.2.2, 3.3), και η οποία περιελάμβανε έως τη αρχή της δεκαετίας του 2010 περί τα 2200 συμβάντα (Σχήμα 85: Χάρτης Κατολισθητικών Συμβάντων από Βάση Δεδομένων ΙΓΜΕ, 2011 (από SafeLand, Deliverable D2.3, 2011, η σημερινή (2023) γεωπύλη του ΕΑΓΜΕ <https://gaia.igme.gr/portal/home/> δεν περιλαμβάνει τα σχετικά στοιχεία).



Σχήμα 85: Χάρτης Κατολισθητικών Συμβάντων από Βάση Δεδομένων ΙΓΜΕ, 2011 (από SafeLand, Deliverable D2.3, 2011, η σημερινή (2023) γεωπύλη του ΕΑΓΜΕ <https://gaia.igme.gr/portal/home/> δεν περιλαμβάνει τα σχετικά στοιχεία)

Πέραν της βάσης δεδομένων του ΙΓΜΕ, και της περιοδικής διεύρυνσης των καταγραφών της (π.χ. Μπλιώνα, 2008, επεξεργασία 397 κατολισθήσεων από καταγραφές του ΙΓΜΕ κατά την περίοδο 1998-2003), πολλές τοπικές (σε επίπεδο περιφέρειας, νομού ή άλλου γεωγραφικού διαχωρισμού επιδεκτικών σε κατολισθήσεις περιοχών, όπως η Πελοπόννησος, η Κεντρική και Δυτική Ελλάδα, η Αττική, η Εύβοια, η ορεινή Κρήτη κ.α.) βάσεις δεδομένων έχουν συνταχθεί στο πλαίσιο μεταπτυχιακών και κυρίως διδακτορικών διατριβών (ενδεικτικά για την περιοχή της Αχαΐας – Βόρειας Πελοποννήσου Κάβουρα, 2013, Κάβουρα, 2017, Τσαγκάς, 2011 κ.α.) ή ερευνητικών προγραμμάτων, με συνεχή εμπλουτισμό των καταγραφών από επιτόπου παρατηρήσεις, σύγκριση αεροφωτογραφιών ή τηλεπισκοπικά δεδομένα. Η χρήση των σύγχρονων εργαλείων τηλεπισκόπισης και

φωτογραμμετρίας επιτρέπει την καταγραφή πολύ μεγαλύτερου αριθμού μετακινήσεων σε δυσπρόσιτες περιοχές, και με δεδομένο ότι το πολύ υψηλό ποσοστό >60% των κατολισθήσεων σε αστικές περιοχές (Koukis et al., 1994) που περιλαμβάνονταν στην αρχική βάση δεδομένων των 800 καταγραφών υποδηλώνει σημαντική υποκαταγραφή συμβάντων σε δυσπρόσιτες περιοχές κατά τα παλαιότερα χρόνια. Ο εμπλουτισμός των καταγραφών στοχεύει στις πληρέστερες και αντιπροσωπευτικότερες καταγραφές των συμβάντων, με μερική άρση υποκαταγραφής τους μακριά από οικισμούς ή το οδικό δίκτυο, και συνεπώς στην ορθότερη συσχέτιση της εκδήλωσής τους με τις κατά περίπτωση συνθήκες και εγγενείς και εναυσματικούς παράγοντες. Μέσω των πληρέστερων καταγραφών υποβοηθείται η αναλυτική διερεύνηση, και σε συνδυασμό με τις δυνατότητες επεξεργασίας χωρικών δεδομένων μέσω των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, βελτιώνεται η τεκμηρίωση των κρίσιμων αιτιών και μηχανισμών κατολισθήσεων, η αξιολόγηση της επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας σε ευρύτερες περιοχές και η ακριβέστερη σύνθεση αντίστοιχων χαρτών σε περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο.

Με τη σύνταξη των εθνικών χαρτών επιδεκτικότητας (και επικινδυνότητας) συμπυκνώνονται τα ευρήματα των σχετικών αναλύσεων με διαφορετικές ποσοτικές μεθοδολογίες, προς την κατά το δυνατόν αντικειμενικοποίηση του ρόλου των εγγενών και εναυσματικών παραγόντων πρόκλησής τους. Αναφέρονται ακολούθως σχετικές εργασίες με αναφορά σε εθνικό επίπεδο:

- Koukis et al. (2005) (Σχήμα 86), εφαρμογή ζωνοποίησης προβληματικών περιοχών βάσει της πυκνότητας καταγεγραμμένων κατολισθήσεων.
- Γκουρνέλλος κ.α. (2006) (Σχήμα 87), χρησιμοποίηση >400 καταγραφών με εισαγωγή χωρικής και χρονικής πληροφορίας σε εφαρμογή γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και διαβάθμιση των σχετικών μεταβλητών λιθολογίας, τοπογραφίας, σεισμικής έντασης, βροχόπτωσης και πυκνότητας οδικού δικτύου σε ασαφή σύνολα (fuzzy logic).
- Βασιλειάδης (2010) (Σχήμα 89), ζωνοποίηση της επικινδυνότητας κατολισθήσεων με χρήση δέκα μεταβλητών – παραγόντων, με υπολογισμό της σχετικής συχνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων έναντι κάθε μεταβλητής βάσει της διαθέσιμης βάσης δεδομένων (>1200 καταγραφές) και χρήση συντελεστών βαρύτητας σπουδαιότητας, όπως προκύπτουν μετά από παραγοντική ανάλυση

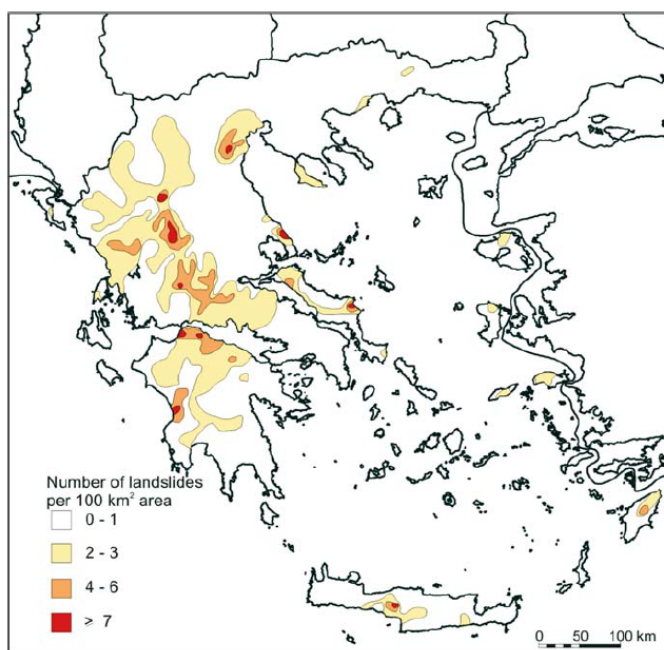
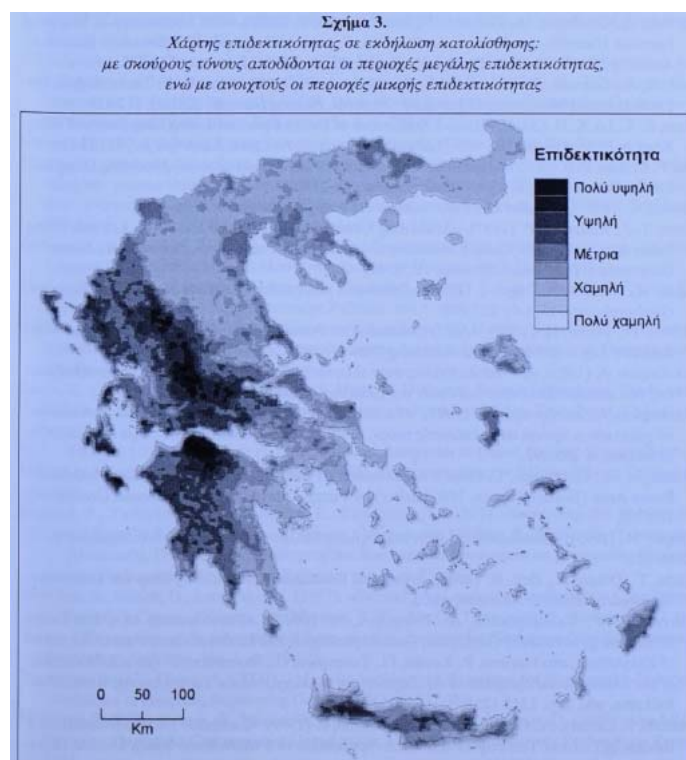


Fig. 37.9.
Landslide hazard zonation map
of Greece

Σχήμα 86: Χάρτης Κατολισθητικής πυκνότητας
(από Koukis et al., 2005)



Σχήμα 87: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής
επιδεκτικότητας (Γκουρνέλλος κ.α., 2006)

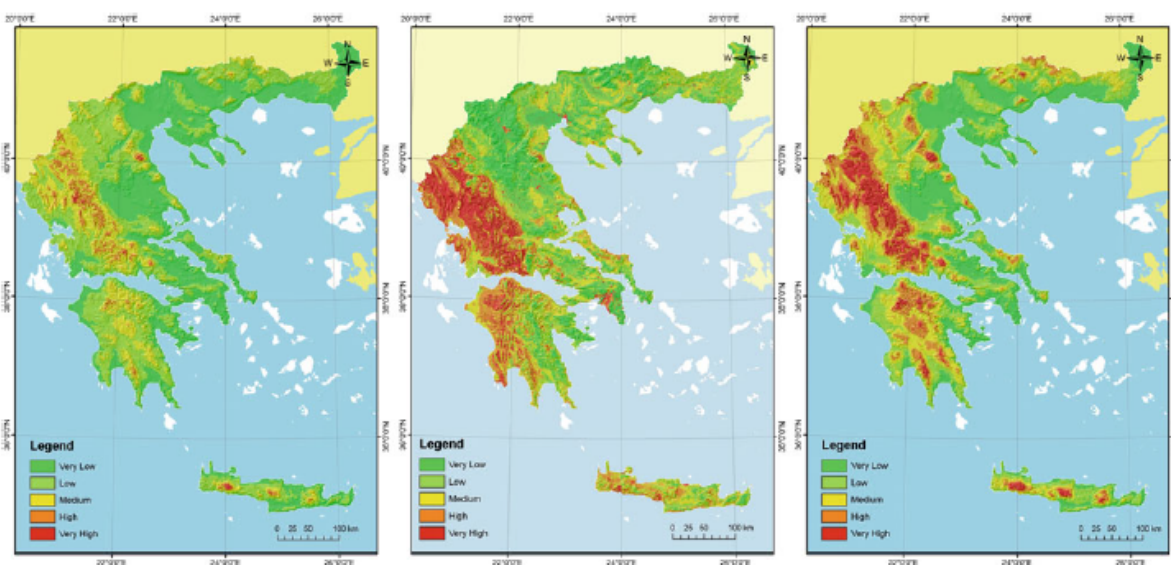
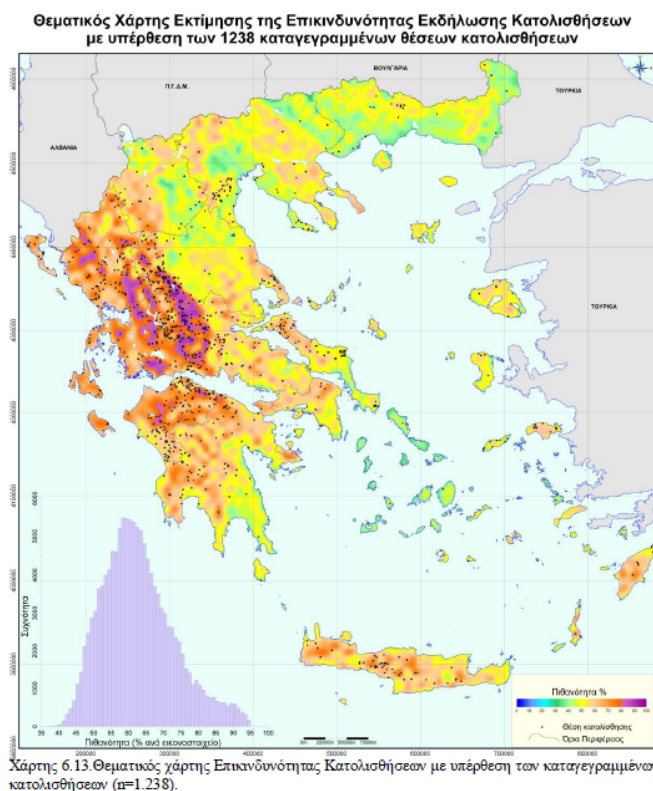


Fig. 2 Mass movement susceptibility mapping based on FR, LR and ANN

Σχήμα 88: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής επιδεκτικότητας με 3 διαφορετικές στατιστικές μεθοδολογίες (Ferentinou & Chalkias, 2013).

- Ferentinou & Chalkias (2013) (Σχήμα 88), με διερεύνηση 16 δυνητικών παραγόντων επιρροής και επιλογή των 7 επικρατέστερων, εφαρμογή τριών στατιστικών μεθοδολογιών για τη διαβάθμιση σε πέντε κατηγορίες επιδεκτικότητας. Ο αριστερός χάρτης στο Σχήμα 88, βάσει μεθοδολογίας FR/Frequency ratio, με μικρότερη

αναλογία περιοχών υψηλής επιδεκτικότητας, είναι πιο αντιπροσωπευτικός, με καλύτερη συμφωνία με τα πραγματικά (~1200) περιστατικά.



Σχήμα 89: Χάρτης Εκτίμησης Επικινδυνότητας (Βασιλειάδης, 2010)

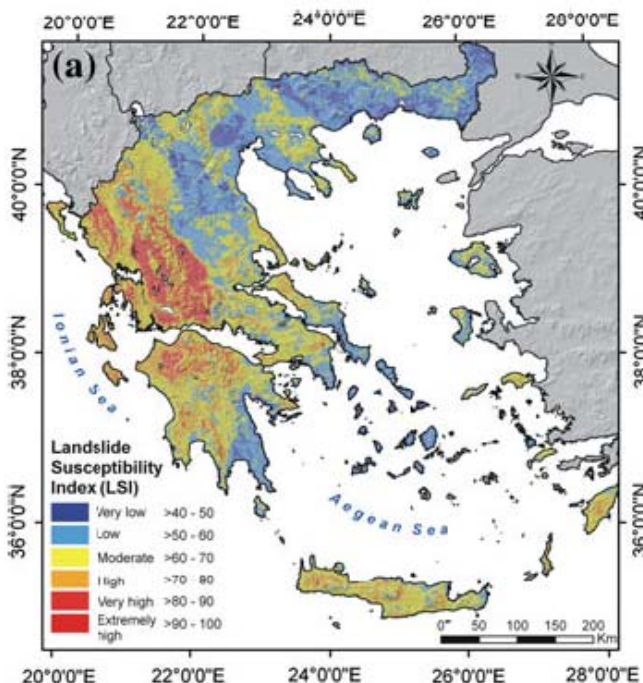


Fig. 8 a Zoning map showing the distribution of Landslide susceptibility index (LSI) in Greece.

Σχήμα 90: Εθνικός Χάρτης Κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Sabatakakis et al., 2013).

- Sabatakakis et al. (2013) με αντίστοιχη στατιστική μεθοδολογία διερεύνησης 10 δυνητικών παραγόντων επιρροής και στατιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους με ανάλυση πολλών μεταβλητών. Επιβεβαιώνεται ο βασικός ρόλος παραγόντων όπως οι βροχοπτώσεις, οι κλιματικές συνθήκες, το υψόμετρο, οι χρήσεις γης και η λιθολογία, ενώ, προκύπτει στατιστικά μικρότερη σημασία για την κλίση του αναγλύφου, όπως είχε αναδειχθεί και στη διδακτορική διατριβή του συν-συγγραφέα (Βασιλειάδης, 2010).
- Sakkas et al. (2016), με χρήση συντελεστών στάθμισης τεσσάρων παραγόντων (εδαφικές συνθήκες, γεωμορφολογικές διεργασίες, φυσικές διεργασίες, ανθρωπογενείς διεργασίες) μέσω της στατιστικής μεθοδολογίας ANN.

Όπως έχει σημειωθεί και στο Κεφ. 3.3, η σύνταξη χαρτών σε εθνική κλίμακα έχει κυρίως συμβουλευτικό χαρακτήρα, στοχεύοντας πρωτίστως στην προτεραιοποίηση των δράσεων της κεντρικής και αποκεντρωμένης διοίκησης και των υπηρεσιών πολιτικής προστασίας και διάσωσης και στην ενημέρωση του κοινού. Υπό αυτή την έννοια η μετάβαση από τους

χάρτες επιδεκτικότητας στους πιο σύνθετους χάρτες επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έχει μικρότερη πρακτική σημασία σε εθνική κλίμακα και μεγαλύτερη σε τοπική κλίμακα. Η σύνταξη πιο αναλυτικών, εστιασμένων χαρτών σε συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να ενσωματώσει τους παράγοντες συχνότητας, τρωτότητας και έκθεσης, ώστε να αποτελέσει εργαλείο για τον χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό, το σχεδιασμό μεγάλων έργων υποδομής ή μέτρων ανάσχεσης, αντιμετώπισης ή μετριασμού της επικινδυνότητας, την εγκατάσταση συστημάτων προειδοποίησης και λοιπές δράσεις.

6.3 Συνέπειες Κατολισθητικών Φαινομένων στον Ελληνικό Χώρο

Άνω του 65% των καταγραφών της πρώτης εθνικής βάσης δεδομένων αφορούσαν οικιστικές περιοχές (Koukis et al., 1997), στοιχείο που δηλώνει ότι οι καταγραφές κατά τις μεταπολεμικές δεκαετίες επικεντρώνονταν σε συμβάντα που επηρέαζαν την ευστάθεια του υπεδάφους σε ημιορεινούς έως ορεινούς οικισμούς, σε όλη την έκταση τους ή σε τμήμα τους, στις παρακείμενες υποδομές τους και στις περιφερειακές των οικισμών περιοχές ανάπτυξης δραστηριοτήτων του πρωτογενούς τομέα. Αντίστοιχα, ο πολύ μικρός αριθμός αρχικών καταγραφών περιοχές με απόλυτα υψόμετρα άνω των 1000m και κατά κανόνα απότομο ανάγλυφο επιβεβαιώνει την πιο σπάνια καταγραφή συμβάντων σε πιο δυσπρόσιτες περιοχές.

Στη βιβλιογραφία (Koukis et al., 2015) έχει επισημανθεί ότι η χωροθέτηση πολλών ορεινών – ημιορεινών οικισμών σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές στη δυτική και κεντρική χώρα δεν ήταν τυχαία, αλλά επιλεκτική, υπαγορευόμενη από το σχετικά ήπιο ανάγλυφο ή από την παρουσία ή την εγγύτητα των υδάτινων πόρων (επιφανειακών ή υπόγειων) στις περιοχές εγκατάστασης. Αυτό συνεπαγόταν εν πολλοίς την εγκατάσταση των οικισμών σε θέσεις επικράτησης πιο ευάλωτων σε κατολισθήσεις σχηματισμών, όπως, στην περίπτωση του ήπιου αναγλύφου, περιοχές επικράτησης τεχνικογεωλογικά προβληματικών σχηματισμών (δυτική χώρα), ή στην περίπτωση της εξασφάλισης των υδάτινων πόρων (κεντρική χώρα), στην εγγύτητα σε ζώνες με σύνθετο νεοτεκτονικό καθεστώς και πιέσεις ή λιθολογικές εναλλαγές, όπως είναι οι ζώνες επωθήσεων που καλύπτονται από χαλαρά κορήματα, οι φλυσχικοί σχηματισμοί ή οι λεπτόκοκκοι νεογενείς σχηματισμοί. Όπως αναφέρεται στο Κεφ. 6.1, οι παραπάνω συνθήκες συνδυάζονται στην κεντρική και δυτική χώρα με εποχικά έντονες βροχοπτώσεις και σεισμικότητα, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη παρουσία και δράση πολλαπλών, εγγενών και εναυσματικών, επιβαρυντικών παραγόντων.

Μερικές από τις πιο γνωστές περιπτώσεις πληττόμενων από κατολισθήσεις οικισμών στον ελληνικό χώρο εντάσσονται, λιγότερο ή περισσότερο, στο παραπάνω πλαίσιο. Αναφέρονται ενδεικτικά οι περιπτώσεις του Μικρού Χωριού Ευρυτανίας (1963) και του Τριπόταμου Ευρυτανίας (ομοίως 1963), των Θεοδωριανών Άρτας (1981), των Κλεπών Ναυπακτίας (2015 και παλαιότερα), του Ροπωτού Τρικάλων (2013 και παλαιότερα), της Καρυάς Αχαΐας (1961 και 2001), τις συνεχείς αστάθειες στην περιοχή του Πλατάνου Αχαΐας, του Οξύλιθου Ευβοίας (2020) και πολλές άλλες.

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση οδικών δικτύων σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές, αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα στην πρόκληση φαινομένων, μέσω κυρίως της διαμόρφωσης των τεχνητών πρανών ορυγμάτων και δευτερευόντως λόγω επιφόρτισης από επιχώματα ή μεταβολών στη φυσική απορροή των επιφανειακών υδάτων. Κατά τις παλαιότερες δεκαετίες τα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονταν κυρίως σε ορεινές οδοποιίες με μικρή διατομή και χωρίς ιδιαίτερο γεωτεχνικό σχεδιασμό των ορυγμάτων, με συχνό αποτέλεσμα τις εποχιακές καταπτώσεις ή εδαφικής μετακινήσεις, τον προσωρινό αποκλεισμό των ορεινών οικισμών και την πρόχειρη αποκατάσταση της οδού. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή σύγχρονων συγκοινωνιακών δικτύων στη χώρα με αυστηρές γεωμετρικές απαιτήσεις χάραξη, απαιτούν πολύ μεγαλύτερης κλίμακας χωματουργικά έργα και συνεπάγονται αντίστοιχη αύξηση στην κλίμακα ενδεχόμενων κατολισθήσεων, αλλά και τη κοινωνικο-οικονομική σημασία των συνεπειών τους.

Πράγματι στη χώρα έχουν σημειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες αρκετά κατολισθητικά συμβάντα, που είτε εκδηλώθηκαν και αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής των αξόνων (π.χ. πολλές περιπτώσεις στην Εγνατία Οδό) και ενδεχομένως παρακολουθούνται περιοδικά κατά τη λειτουργία τους, είτε διέκοψαν για μεγάλο ή μικρό διάστημα τη λειτουργία των αξόνων. Ενδεικτικά, μερικές από τις πιο γνωστές κατολισθήσεις στον ελληνικό χώρο είναι η κατολίσθηση Παναγοπούλας (1971) στην Ε.Ο. Αθήνας-Πάτρας, η κατολίσθηση Μαλακάσας (1995) στον άξονα ΠΑΘΕ και στη Σιδηροδρομική Γραμμή Αθήνας-Θεσσαλονίκης, οι βραχοκαταπτώσεις των Τεμπών (2009) στον ΠΑΘΕ, η βραχοκατάπτωση Κακιάς Σκάλας (2022) ομοίως στον ΠΑΘΕ, η κατολίσθηση Τσακώνας (2003) στην Ε.Ο. Τρίπολης-Καλαμάτας, η κατολίσθηση Νεμέας (2003) επίσης στην Ε.Ο. Κορίνθου-Τρίπολης, αλλά και περιπτώσεις σε μικρότερους οδικούς άξονες, όπως ενδεικτικά η κατολίσθηση Δέσπως στην Ε.Ο. Πρέβεζας-Ηγουμενίτσας (2006), η κατολίσθηση στην Ε.Ο. Σελλασίας-Σπάρτης (2010), στο οδικό δίκτυο Σκύρου (2004) κ.α. Οι παραπάνω περιπτώσεις είχαν σε κάποιες περιπτώσεις

ανθρώπινες απώλειες (Τέμπη, 2009), αλλά και σημαντικές κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις και βλάβες, με αύξηση του χρόνου και κόστους μεταφοράς λόγω παρακάμψεων και απαίτηση εφαρμογής εκτεταμένων, ακριβών και τεχνικά δύσκολων λύσεων μόνιμης αποκατάστασης και εξασφάλισης της χάραξης (γεωτεχνικά έργα παθητικής ή ενεργητικής υποστήριξης πρανών, τοίχοι ή βαριές κατασκευές αντιστήριξης, προστασία πρανών έναντι διάβρωσης ή βραχοκαταπτώσεων, διέλευση μέσω σιράγγων ή τεχνικών, εκτεταμένα υδραυλικά έργα επιφανειακών και υπόγειων απορροών, συστήματα παρακολούθησης κ.α.) ή έργα αποφυγής ασταθούς περιοχής (παραλλαγή χάραξης).

Πέραν αυτών των περιπτώσεων, άξιες αναφοράς είναι και οι περιπτώσεις καταπτώσεων στο υδραγωγείο Μόρνου-Ευήνου και των βραχοκαταπτώσεων στη Λευκάδα (μετά το σεισμό του 2003), Κεφαλονιά (μετά το σεισμό του 2014) και στη Ζάκυνθο (2018), που έπληξαν παραλίες εξαιρετικά πολυσύχναστες τους καλοκαιρινούς μήνες, με το αντίστοιχο κοινωνικο-οικονομικό κόστος. Άλλες αξιοσημείων περιπτώσεις αφορούν την καταστροφή – βύθιση της Αρχαίας Ελίκης μετά από ισχυρό σεισμό το 373 π.Χ., αλλά και τις πρόσφατες βραχοκαταπτώσεις στα υψηλά πρανή του Ισθμού της Κορίνθου, τα οποία βρίσκονται σε στάδιο προστασίας – αποκατάστασης, λόγω και της διάβρωσης και απώλειας στήριξης των σχηματισμών στο επίπεδο της θάλασσας. Ιδιαίτερες είναι και οι αστοχίες εντός ή πλησίον λιγνιτωρυχείων που δυνητικά επηρεάζουν και τους γειτονικούς οικισμούς (π.χ. οικισμοί Μαυροπηγής, 2010, Αναργύρων Αμυνταίου, 2017, αλλά και παλαιότερες περιπτώσεις κυρίως στη δυτική Μακεδονία.), όπου διαμορφώνονται τεχνητά πρανή μεγάλου ύψους σε σχηματισμούς με ιδιαίτερη γεωμηχανική συμπεριφορά.

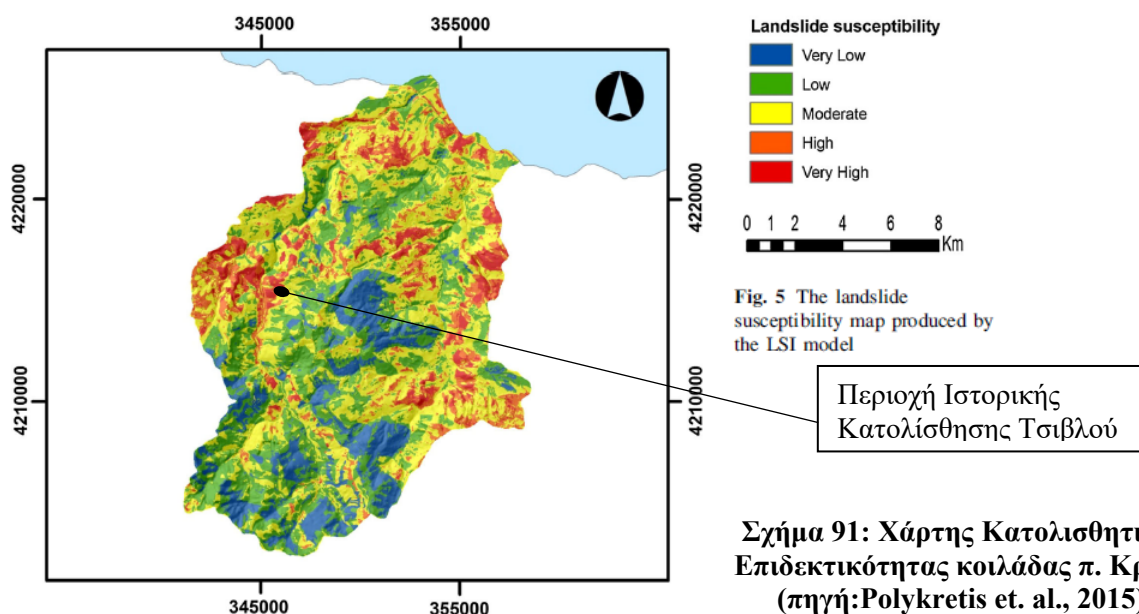
Μόνον από τις χρονολογίες εκδήλωσης των παραπάνω ενδεικτικών περιπτώσεων παρατηρείται μια διαφοροποίηση στα κατολισθητικά γεγονότα που καταγράφονται ως τα σημαντικότερα ανά εποχή. Κατά τις μεταπολεμικές δεκαετίες οι πιο γνωστές περιπτώσεις αφορούν τις περιπτώσεις ημιορεινών – ορεινών οικισμών της δυτικής και κεντρικής χώρας, με την προφανή εξαίρεση της περίπτωσης της Παναγοπούλας που επηρέασε για μήνες την οδική σύνδεση Αθήνας Πάτρας. Αντίθετα από τις δεκαετίες του 1990 έως τα τελευταία έτη, και χωρίς να έχουν εκλείψει οι περιπτώσεις κατολισθήσεων σε οικισμούς, οι περισσότερες από τις πλέον χαρακτηριστικές και γνωστές περιπτώσεις αφορούν πλέον δίκτυα, κυρίως οδικά, ή άλλες παραγωγικές υποδομές ή χώρους τουριστικής εκμετάλλευσης. Σε κάθε περίπτωση επιβεβαιώνεται και αυξάνεται η ήδη διαπιστωμένη (Sabatakakis et al., 2013) συσχέτιση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων ως επιβαρυντικός παράγοντας στην εκδήλωση κατολισθητικών γεγονότων.

Εικάζεται δε ότι οι αναφερόμενες και παραπάνω περιπτώσεις της ορεινής Καρδίτσας το 2020 (μεσογειακός κυκλώνας Ιανός) ή του νομού Χανίων (2018), με βροχοπτώσεις ασυνήθιστης έντασης, με ταυτόχρονη πρόκληση πολλαπλών κατολισθητικών φαινομένων σε μια ευρύτερη περιοχή με γνωστή, αυξημένη κατολισθητική επιδεκτικότητα, αποτελούν το προοίμιο του μελλοντικού πλαίσιο των πιο χαρακτηριστικών – επιβλαβών περιπτώσεων κατολισθήσεων και εδαφικών ασταθειών στο άμεσο ή απώτερο μέλλον.

7 Πρώτη Περίπτωση Μελέτης – Λίμνη Τσιβλού

7.1 Εισαγωγή

Η πρώτη περίπτωση μελέτης αφορά την πολύ γνωστή περίπτωση της κατολίσθησης στην βορειοανατολική Αχαΐα και στη κοιλάδα του ποταμού Κράθης, που οδήγησε στο σχηματισμό της Λίμνης Τσιβλού (1913). Η βορειοανατολική Αχαΐα εντάσσεται στις πιο επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές της χώρας, αλλά και στις περισσότερο μελετημένες ως προς τα κατολισθητικά φαινόμενα, λόγω του αριθμού, της συχνότητας και της σημασίας των συμβάντων που έχουν εκδηλωθεί στην περιοχή και λόγω του μακροχρόνιου ερευνητικού έργου διερεύνησης τους από τη Γεωλογική Σχολή του Παν. Πατρών και άλλους επιστημονικούς φορείς (ΙΓΜΕ, λοιπές πανεπιστημιακές και πολυτεχνικές σχολές), με εκπόνηση και πολλών σχετικών διδακτορικών διατριβών (ενδεικτικά Τσαγκάς, 2011, Κάβουρα, 2017, Κορδούλη, 2020, αλλά και Ρόζος, Λαϊνάς και αρκετές διατριβές που επικεντρώνονται στους φλυσχικούς σχηματισμούς). Παράλληλα, τα κατολισθητικά φαινόμενα στην κοιλάδα του π. Κράθης, όπου έλαβε χώρα και η εξεταζόμενη κατολίσθηση στον Τσιβλό, έχουν αποτελέσει εστιασμένο αντικείμενο διερεύνησης και έχουν συνταχθεί και χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Polykretis et al., 2015, Σχήμα 91, Strutynska, 2017, Σχήμα 92). Σε αυτή την εστιασμένη περιοχή η πλειονότητα των καταγεγραμμένων και αναγνωριζόμενων συμβάντων αφορά πλειο-πλειστοκαινικούς σχηματισμούς κροκαλοπαγών και μαργών, ενώ επιβεβαιώνεται η επιρροή των παραγόντων της εδαφικής κάλυψης, της λιθολογίας και της γειτνίασης με ρήγματα (Polykretis et al., 2015).





Εικόνα 7.6 Τοποθεσία του οικισμού Τσίβλος και της Λίμνης Τσιβλού σε σχέση με τις περιοχές κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Σχήμα 92: Σήμανση αναγνωριζόμενων περιοχών υψηλής και πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην εξεταζόμενη περιοχή (πηγή: Strutynska, 2017).

Η συγκεκριμένη περίπτωση κατολίσθησης, με διαφορετικά χαρακτηριστικά από την πλειονότητα των συμβάντων εντός κυρίως πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών που λαμβάνουν χώρα στο νομό Αχαΐας, επιλέγεται ως ιδιαίτερη και χαρακτηριστική, καθώς αφενός ο τύπος της (βροχοστιβάδα) και η έντασή της είναι σπάνια για τον ελληνικό χώρο, αφετέρου συνδυάζει ευδιάκριτες συνέπειες τόσο σε οικισμούς, με την καταστροφή των οικισμών Συλίβαινας και Τσιβλού, όσο και μεγάλης κλίμακας μεταβολές στο φυσικό περιβάλλον, με το σχηματισμό της γνωστής λίμνης από το πρόχειρο φράγμα των κατολισθημένων υλικών μεγάλου όγκου, η οποία έχει διατηρηθεί για πάνω από έναν αιώνα και σταδιακά διαμορφώνεται και εξελίσσεται ως οικοσύστημα και ως τόπος φυσικού και τουριστικού ενδιαφέροντος, προσελκύοντας και τις ανάλογες χρήσεις, αλλά και μιας δεύτερης, μεγαλύτερης, βραχύβιας λίμνης που διατηρήθηκε κάποιους μήνες.

7.2 Ιστορικό Κατολίσθησης

Η πολύ μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση στην περιοχή του πολύ υψηλού ανατολικού πρανούς κοιλάδα του π. Κράθης στη βορειοανατολική Αχαΐα έλαβε χώρα στις 24/03/1913 στα τέλη της χειμερινής περιόδου με συστηματικές βροχοπτώσεις και κατέστρεψε πλήρως τον οικισμό Συλίβαινα. Το ιστορικό της εδαφικής αστοχίας, όπως περιγράφεται στο σχετικό βιβλίο «Ο Υγροβιότοπος της λίμνης Τσιβλού» (ΚΠΕ Ακράτας, 2003) παρατίθεται αυτούσιο ακολούθως:

Παράρτημα 2: Το χρονικό της καταστροφής της Συλίβαινας:

- Συλίβαινα, αρχές 1913: ένα χωριό γεμάτο ζωή. Οι κάτοικοι έχουν συνηθίσει τις μικρές κατολισθήσεις. Ωστόσο, ο χειμώνας 1912 – 1913 είναι πολύ βροχερός.
- Φεβρουάριος 1913: γίνεται μια μικρή κατολίσθηση στην άκρη του χωριού που απογυμνώνει το στήριγμα ενός τμήματός του χωριού να προκαλέσει πάλι ανησυχία.
- 22 Μαρτίου 1913, ημέρα Παρασκευή: οι κάτοικοι της Συλίβαινας ακούν δυνατούς, υποχθόνιους κρότους, οι οποίοι τους φοβίζουν, αλλά δεν εγκαταλείπουν το χωριό. Οι θόρυβοι ακούστηκαν μέχρι την Ακράτα και τα Καλάβρυτα. Άλλοι τους απέδωσαν σε πτώση μετεωρίτη, άλλοι σε βομβαρδισμό των Πατρών ή της Κορίνθου από το τουρκικό καταδρομικό «Χαμιδιέ» και άλλοι υπέθεσαν ότι ο αεροπόρος Μουτούσης, ο όποιος καταγόταν από το γειτονικό χωριό Τσιβλός και “μετέφερε το λάβαρο της Αγίας Λαύρας”, πέρασε πάνω από το χωριό του και για να χαιρετίσει τους συμπατριώτες του έριξε μερικές χειροβομβίδες...
- 24 Μαρτίου 1913, ημέρα Κυριακή, πρωινές ώρες: τα φαινόμενα γίνονται πυκνότερα, οι κρότοι και οι δονήσεις του εδάφους επαναλαμβάνονται και οι κάτοικοι αρχίζουν να μεταφέρουν σε πιο ασφαλείς τοποθεσίες, εκτός του χωριού, ό,τι μπορούν από τις περιουσίες τους και τα ζώα τους.
- Κυριακή μεσημέρι: κατολίσθηση της πλαγιάς εκεί που είναι τα σπίτια του χωριού, προς την κοίτη του Κράθης ποταμού. Τα σπίτια παρασύρονται, τα χώματα σκεπάζουν το ποτάμι, περνούν απέναντι και καλύπτουν τα σπίτια της κάτω γειτονιάς του χωριού Τσιβλός μετακινώντας σε ψηλότερο σημείο την Αγία Βαρβάρα, την εκκλησία του χωριού.
- 2-3 ώρες μετά: Γίνεται η μεγάλη κατολίσθηση. Πέφτει όλη η βορειοδυτική πλευρά του βουνού Γερακάρια (εκεί που ήταν η Συλίβαινα) και τεράστιοι όγκοι χωμάτων καλύπτουν την κοίτη του Κράθης διακόπτοντας τη ροή των νερών. Στην αρχή η κατολίσθηση γίνεται αργά, αλλά μετά με μεγάλη ταχύτητα παρασύροντας ότι είχε απομείνει από σπίτια και δέντρα.
- Την επόμενη μέρα η περιοχή της Συλίβαινας παρουσίαζε όψη βιβλικής καταστροφής. Το μόνο που είχε απομείνει απ’ το χωριό ήταν μια καρδιά και ένα ερειπωμένο σπίτι με τον αχυρώνα του, τα οποία βρέθηκαν περίπου 150 μέτρα πιο ψηλά και πιο μακριά από την αρχική τους θέση, και διάφορα οικιακά σκεύη. (...)
- Θύματα: (4) Η Αντιόπη Πάκιου (σύζυγος του Γ. Πάκιου) με τον τεσσάρων ετών γιο της Δημήτριο, η χήρα Αικατερίνη Δημ. Νιάνιαρη και ένας οδοιπόρος αγνώστων στοιχείων.
- Ένας αυτόπτης μάρτυρας της δεύτερης, μεγάλης κατολίσθησης ανέφερε ότι, καθώς η πλαγιά κατρακυλούσε, είδε τα έλατα να κινούνται προς τα κάτω με πολύ μεγάλη ταχύτητα, «όπως βλέπουμε τα δέντρα να περνούν όταν είμαστε μέσα στο τρένο».

Κεφ. 3.2: Η γέννηση της λίμνης, Μάρτιος 1913. Η καταστροφή της Συλίβαινας

Ο αρχικός τροφοδότης της λίμνης ήταν ο ποταμός Κράθης. Ο Κράθης πηγάζει από το Χελμό. (...) Καθώς ο Κράθης συνεχίζει να ρέει πιο χαμηλά, συγκεντρώνει άφθονα νερά και σταδιακά γίνεται ένα «κανονικό» ποτάμι. Μέχρι το 1913, στο μέρος που βρίσκεται σήμερα η λίμνη, βρισκόταν μια ανοιχτή κοιλάδα που στη μέση της έρεε ήρεμα ο ποταμός. Στη δυτική πλευρά της κοιλάδας υπήρχε μια ρεματιά με ένα μικρό παραπόταμο του Κράθης. Στη συμβολή των δύο ποταμών υπήρχε ο μικρός γραφικός οικισμός του Τσιβλού. Στην ανατολική πλευρά της κοιλάδας και αρκετά ψηλά προς το βουνό Γερακάρι (ή Πηλαλίστρα), βρισκόταν το χωριό της Συλίβαινας. Οι κάτοικοι της Συλίβαινας γνώριζαν ότι το χωριό τους βρισκόταν σε επισφαλές σημείο. Κάθε τόσο πραγματοποιούνταν μικρές κατολισθήσεις και ακούγονταν παράξενοι υποχθόνιοι ήχοι (αρκετές ζημιές προκαλούσε το λεγόμενο “Κακό Λαγκάδι” που ήταν κοντά στο χωριό και κατέβαζε πολλά νερά όταν έβρεχε πολύ). Ο χειμώνας του 1912 – 13 ήταν βαρύς με πολλά χιόνια και βροχές – συνθήκες που ευνοούσαν μια μεγάλη κατολίσθηση. Το Μάρτιο του 1913, τα ύποπτα φαινόμενα (μικροσεισμοί, θόρυβοι) έγιναν εντονότερα και συχνότερα. Οι κάτοικοι της Συλίβαινας πήραν τη σοφή απόφαση να εγκαταλείψουν το χωριό. Την Κυριακή 24 Μαρτίου 1913 έγινε μια τεράστια κατολίσθηση όπου ολόκληρη η πλαγιά του βουνού κύλησε, μέσα σε ελάχιστα λεπτά, από τα 1650μ στα 600μ διανύοντας διαδρομή μήκους

πέντε χιλιομέτρων και πλάτους 1000μ. Τα χώματα κατέληξαν στο βάθος της κοιλάδας του Κράθης, στο σημείο που ήταν ο οικισμός του Τσιβλού. Ο όγκος των χωμάτων της κατολισθήσεως έφραζε τόσο τον Κράθη όσο και τον παραπόταμό του. Δημιουργήθηκε έτσι ένα φυσικό «φράγμα» και άρχισαν να σχηματίζονται δύο λίμνες: από τη μία μεριά συγκεντρώθηκαν τα νερά του Κράθης, δημιουργώντας τη Λίμνη του Κράθης και από την άλλη τα νερά του παραπόταμού του, δημιουργώντας τη Λίμνη του Τσιβλού. Τα νερά της Λίμνης του Τσιβλού άρχισαν να ανεβαίνουν και σιγά - σιγά κατέκλυσαν αρκετά σπίτια και την πολύπαθη εκκλησία της Αγίας Βαρβάρας. Τα νερά της Λίμνης του Κράθης επεκτάθηκαν προς τα πάνω φτάνοντας, όπως λέγεται, μέχρι το χωριό Αγρίδι σχεδόν δύο χιλιόμετρα ανηφορικά στο ποτάμι. Όσο για τη Συλίβαινα, αυτή σβήστηκε από το χάρτη. Ακόμη και σήμερα, αν κοιτάξει κανείς ψηλά στο σημείο όπου υπήρχε το χωριό, βλέπει ότι λείπει ένα μεγάλο τμήμα από το βουνό, αφού οι απότομες κλίσεις και το σαθρό έδαφος δεν άφησαν μέχρι σήμερα τη βλάστηση να αναπτυχθεί. Αρκετοί κάτοικοι της Συλίβαινας εγκαταστάθηκαν στο μέρος που μέχρι τότε διαχειμάζαν, κοντά στην Ακράτα, στο φερώνυμο χωριό Συλίβαινα. (...)

Κεφ. 3.3: Η Συνέχεια...

Το καλοκαίρι του 1913 όλη η παραλιακή περιοχή της Ακράτας υπέφερε από έλλειψη νερού αφού τα νερά του Κράθης, που χρησίμευαν για πότισμα, είχαν μείνει αποκλεισμένα στο βουνό. Το φθινόπωρο ήρθε πολύ βροχερό και η Λίμνη του Κράθης συνέχιζε να μεγαλώνει, συγκεντρώνοντας όλο και μεγαλύτερο όγκο νερού. Οι κάτοικοι των περιοχών κάτω από το «φράγμα» άρχισαν να διαισθάνονται ότι πάνω από τα κεφάλια τους υπήρχε μια «ωρολογιακή βόμβα». Τα χώματα της κατολισθήσεως ήταν πολύ χαλαρά για να αντέξουν την τεράστια πίεση από τα νερά της Λίμνης του Κράθης που ολοένα μεγάλωνε. Οι φόβοι τους επαληθεύτηκαν.

Τη νύχτα της 5ης Ιανουαρίου του 1914 το «φράγμα» υποχώρησε και η Λίμνη του Κράθης άδειασε μέσα σε λίγα λεπτά. Το τεράστιο υδάτινο ρεύμα παρέσυρε και κατέστρεψε τα πάντα στο πέρασμά του, συμπεριλαμβάνοντας και το παλιό, ιστορικό γεφύρι του Κράθης κοντά στην Ακράτα με τα επτά τόξα (Σχήμα 93). Οι κορμοί των ελάτων, τα δοκάρια και τα έπιπλα των σπιτιών της Συλίβαινας που μερικούς μήνες νωρίτερα βρίσκονταν ψηλά στο βουνό, τώρα βρέθηκαν να ταξιδεύουν στα νερά του Κορινθιακού και κατέκλυσαν τις γειτονικές παραλίες. Οι συνέπειες ήταν πολύ εμφανείς στις εκβολές, δίπλα στη σημερινή παραλιακή Ακράτα, όπου μεγάλες εκτάσεις καλύφθηκαν από ένα παχύ στρώμα αμμοχάλικου που μεταφέρθηκε εκεί από τα ορμητικά νερά. .



Σχήμα 93: Φωτογραφία Πέτρινης Γέφυρας π.

Κράθης, 1903, Frédéric Boissonnas, (πηγή:

<http://eliaserver.elia.org.gr:8080/Iselia/rec.aspx?id=540394>)

Στη θέση που για δέκα μήνες ήταν ο βυθός της Λίμνης του Κράθης, έμειναν μικρές λίμνες που σταδιακά γέμισαν με τα φερτά υλικά του ποταμού. Σήμερα υπάρχει ένα όμορφο ορεινό υγρό λιβάδι όπου στη μέση κυλάει δαντελωτά το ποτάμι. Λίγο πιο κάτω, στο σημείο όπου υπήρχε το «φράγμα», φαίνεται ακόμη καθαρά το φαράγγι που δημιούργησαν τα νερά της λίμνης, όταν βίαια άνοιξαν δίοδο τη νύχτα της 5ης Ιανουαρίου 1914 Αντίθετα από τη λίμνη του Κράθης, η Λίμνη του Τσιβλού παρέμεινε στη θέση της. Φαίνεται πως ο όγκος των νερών που μαζεύτηκαν ήταν μικρός, για να μπορέσει να σπάσει τον τεράστιο όγκο από τα υλικά της κατολισθήσεως – τα οποία εν τω μεταξύ έχουν δασωθεί και σταθεροποιηθεί.

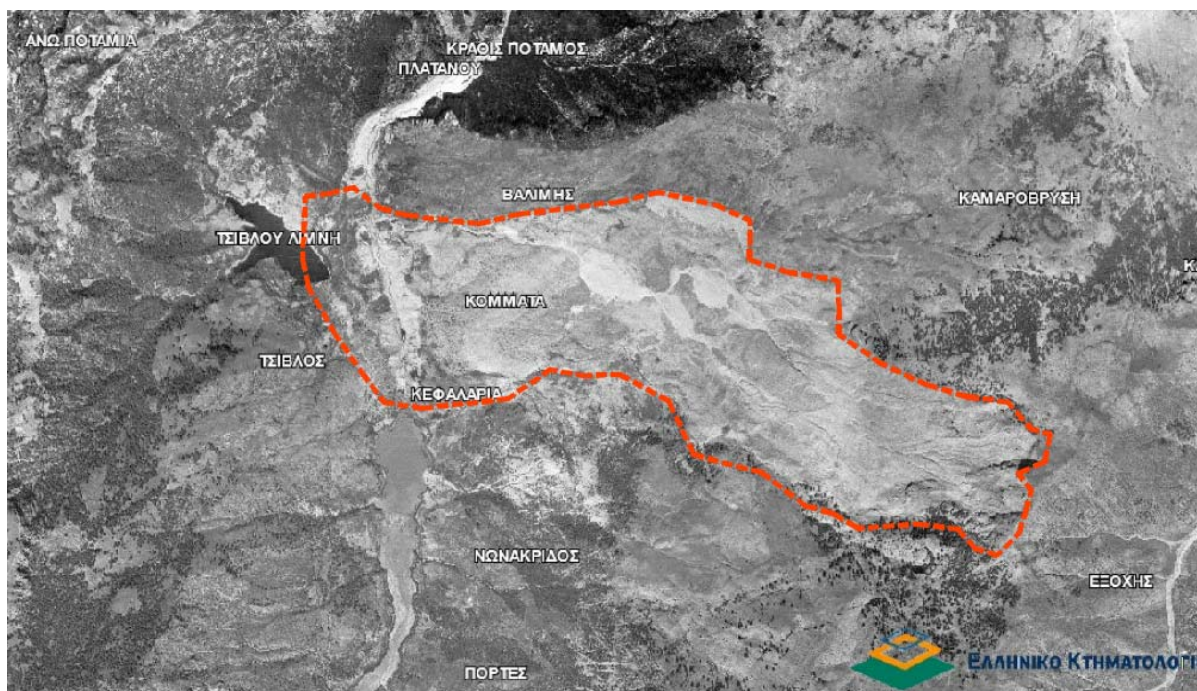
Έτσι, η Λίμνη του Τσιβλού παραμένει να μας θυμίζει ένα από τα εντυπωσιακότερα, μεγαλύτερα και πιο δραματικά φαινόμενα κατολισθήσεως που έγιναν στη σύγχρονη ελληνική ιστορία. Οι σκελετωμένοι κορμοί των πλατάνων και των μαυρόπευκων που αναδύονται από τα νερά της, είναι μία ακόμη απόδειξη ότι εκεί κάποτε υπήρχε μια βαθιά πυκνόφυτη ρεματιά.

Κεφ. 3.4: Ο Τσιβλός σήμερα

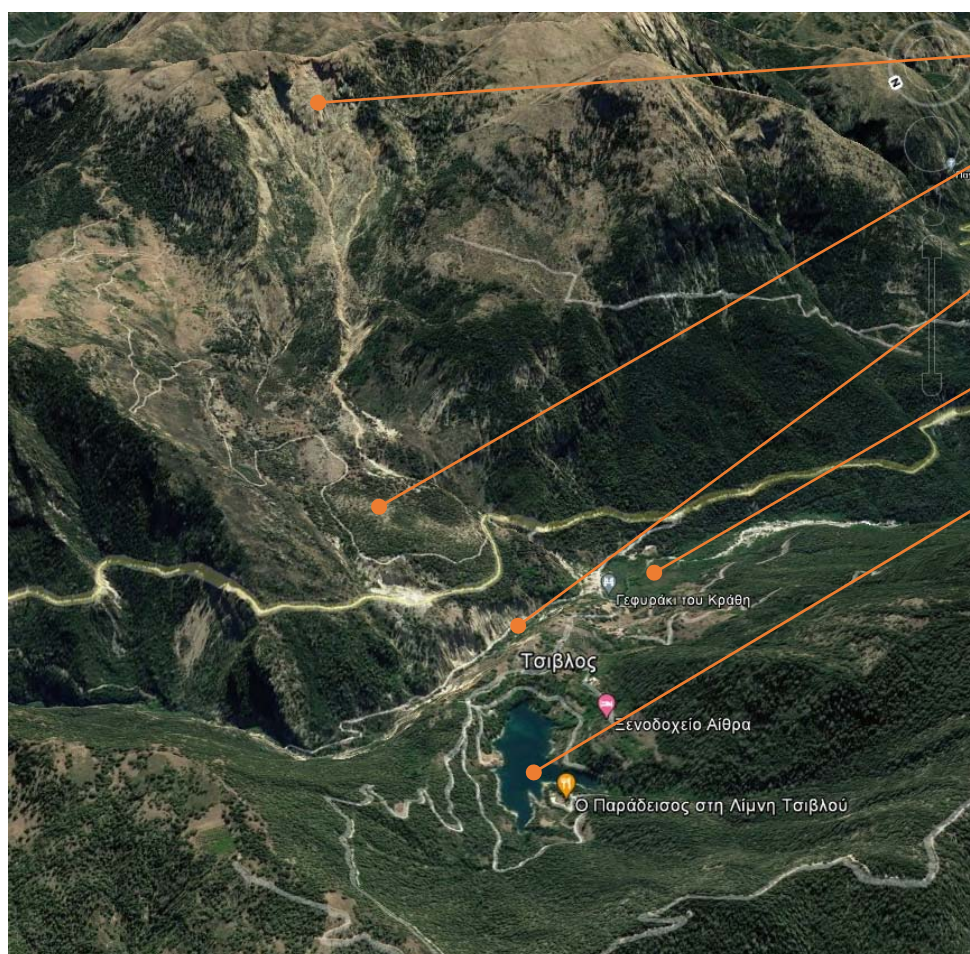
Το αρχικό βάθος της λίμνης έφτανε τα 77μ και, παρά τις προσχώσεις και την αυξομείωση της στάθμης ανάλογα με τη χρονιά, ο Τσιβλός παραμένει και σήμερα μια ιδιαίτερα βαθιά λίμνη με απότομες όχθες. Τα νερά της τροφοδοτούνται από τουλάχιστον δύο πηγές που υπάρχουν κάτω από την επιφάνεια και τρία ρέματα που έρχονται από τα γύρω δάση. Υπάρχουν υπόγειες εκροές προς τον Κράθη σε τουλάχιστον δύο σημεία. Η ακριβής γεωγραφική θέση της λίμνης είναι $38^{\circ}04'56''B$ $11^{\circ}14'56''A$. Το υψόμετρο είναι 780μ. Η έκταση της λίμνης είναι περίπου 83 στρέμματα και η ακτογραμμή της 1.800μ. Ωστόσο η έκταση και η ακτογραμμή συνεχώς αυξομειώνονται, καθώς η στάθμη της λίμνης ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την εποχή και το ύψος των βροχοπτώσεων κάθε χρονιά. Μερικές χρονιές την άνοιξη, η στάθμη είναι πολύ υψηλή και άλλες χρονιές (όπως το 2001), το καλοκαίρι, πέφτει τόσο χαμηλά που φαίνονται τα ερείπια και τα δοκάρια των σπιτιών του παλιού οικισμού. Το εύρος των μεταβολών της στάθμης της λίμνης μπορεί να ξεπεράσει τα 10μ, δημιουργώντας μια χαρακτηριστική ζώνη χωρίς βλάστηση κατά μήκος της όχθης. Είναι η ζώνη που άλλοτε είναι πλημμυρισμένη, εμποδίζοντας την ανάπτυξη στεριανών φυτών και άλλοτε είναι στεγνή, αποτρέποντας και τα υδρόβια φυτά από το να ριζώσουν. Χωρίς να έχει κλείσει τα εκατό της χρόνια, η λίμνη Τσιβλού είναι από τις νεαρότερες λίμνες της Ευρώπης. Έτσι δεν έχει ακόμη αναπτύξει πλούσια υδρόβια βλάστηση. Έχει μόνο μερικά καλάμια στα πιο ρηχά σημεία, ενώ στο βυθό της επικρατεί μόνο ένα ιδιόμορφο υδρόφυτο. (...) Καθώς περνούσαν τα χρόνια τα δάση άρχισαν να αναπτύσσονται και να καλύπτουν τα χώματα της κατολίσθησης. Σήμερα γύρω από τη λίμνη επικρατούν δάση με Μαυρόπευκα, Έλατα και Χαλέπια Πεύκα. Η λίμνη βρίσκεται σε τέτοιο υψόμετρο όπου συναντιούνται οι δύο διαφορετικές ζώνες δασικής βλάστησης: η πεδινή με το Χαλέπιο Πεύκο και η ορεινή με το Μαυρόπευκο. Καθώς το τοπίο γύρω από τη λίμνη σιγά – σιγά έβρισκε το φυσικό του χαρακτήρα, όλοι άρχισαν να διαπιστώνουν ότι η λίμνη, ανεξάρτητα από το βίαιο τρόπο με τον οποίο γεννήθηκε, ήταν πλέον ένα πολύ όμορφο μέρος και έγινε δημοφιλής χώρος για αναψυχή.»

7.3 Τεχνικογεωλογικό Πλαίσιο, Αίτια και Μηχανισμός Αστοχίας

Η περιοχή εκδήλωσης και μετακίνησης της κατολίσθησης είναι πολύ μεγάλη σε έκταση (το ενδεικτικό περίγραμμα στο Σχήμα 94 αντιστοιχεί σε περίπου 3.500 στρέμματα) και μήκος (άνω των 3χλμ), αλλά χαρακτηρίζεται και από μεγάλη υψομετρική διαφορά, της τάξης των 700m, από την ανάντη περιοχή του κυρίως μετώπου (υψόμετρο $\sim +1650m$) έως την ενδιάμεση ζώνη συσσώρευσης των υλικών (υψόμετρο $\sim +850 \div +950m$) και τον πόδα του πρανούς στη λεκάνη του π. Κράθη (υψόμετρο $\sim +680m$). Η γεωμετρία της μετακίνησης και η πληττόμενη περιοχή αναγνωρίζονται καθαρά στις σύγχρονες αεροφωτογραφίες (Σχήμα 95 με στρεβλή απεικόνιση του ύψους) ή επίγειες φωτογραφίες, από τη μορφολογική αλλοίωση και τη διαφοροποίηση στη δένδροκάλυψη, και ακόμα πιο ευδιάκριτα σε διαθέσιμες ιστορικές αεροφωτογραφίες λίγες δεκαετίες μετά το συμβάν (Σχήμα 94). Η πραγματική επιφάνεια της κατολίσθησης εκτιμάται στα 2.300 στρέμματα, ο όγκος των κατολισθημένων υλικών στα $\sim 5,4 \cdot 10^6 m^3$, ενώ η ταχύτητα της μετακίνησης εκτιμάται, από τις περιγραφές και την υψομετρική διαφορά, στα $\sim 60km/h$ (Zygouri & Koukouvelas, 2019), με κατάταξη στην υψηλότερη Κατηγορία 7 βάσει της σχετικής ταξινόμησης ταχύτητας (Σχήμα 6 και Σχήμα 43).



Σχήμα 94: Αεροφωτογραφία του 1939 της περιοχής της κατολίσθησης, με ενδεικτική επισήμανση των ορίων της (πηγή: <https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>)



- Στέψη Κατολίσθησης (υψόμετρο $>+1600\text{m}$)
- Ζώνη Συσσώρευσης - Παραμένοντα ολισθημένα υλικά κορημάτων
- Κοίτη Ποταμού Κράθη (υψόμετρο $\sim 670\text{m}-680\text{m}$)
- Περιοχή βραχύβιας Λίμνης στην κοίτη ποταμού Κράθη
- Λίμνη Τσιβλού που τροφοδοτείται από παραπόταμο του Κράθη και την περιβάλλουσα λεκάνη (υψόμετρο $\sim +700\text{m}$)

Σχήμα 95: Σύγχρονη τρισδιάστατη απεικόνιση της κατολίσθησης (πηγή: google earth)

Ο συνδυασμός του όγκου υλικών, της ταχύτητάς τους και της στενής και απότομης μορφολογίας της κατάντη κοιλάδας είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του φυσικού αναχώματος εντός της κοιλάδας. Η κατολίσθηση στον Τσιβλό αποτελεί γνωστή ιστορική κατολίσθηση του ελληνικού χώρου, ωστόσο δεν έχει μελετηθεί ιδιαίτερα ως προς το κατολισθητικό συμβάν, με την πληρέστερη διερεύνηση να είναι πολύ πρόσφατη (Zygouri & Koukouvelas, 2019), καθώς έλαβε χώρα πριν την εδραίωση των σχετικών κλάδων της τεχνικής γεωλογίας και γεωτεχνικής μηχανικής και δεν έχει υπάρξει έκτοτε κάποια επανενεργοποίηση ή επισφαλής συνθήκη που να προκαλέσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τεχνικούς επιστήμονες ή φορείς. Λόγω της φύσης των υλικών και της μεγάλης ταχύτητας μετακίνησης τους, η κατολίσθηση χαρακτηρίζεται ως ροή βραχομάζας ή βραχοστιβάδα.

Οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και οι βασικοί παράγοντες που προκάλεσαν την αστοχία συνοψίζονται ακολούθως (Zygouri & Koukouvelas, 2019):

- Η περιοχή της κατολίσθησης διακρίνεται στο σχετικό απόσπασμα του γεωλογικού φύλλου του ΙΓΜΕ «Δερβένι» και «Αίγιο». Στην περιοχή της κατολίσθησης επικρατούν αλπικοί σχηματισμού ασβεστολίθων της Ζώνης Ολωνού Πίνδου, ενώ στα ανώτερα υψομετρικά τμήματα έχουν επικαθήσει επί αυτών μεταλπηκοί σχηματισμοί μαργών, αμμούχων μαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών του Ανώτερου Πλειόκαινου – Κατώτερου Πλειστόκαινου (Σχήμα 96).



Σχήμα 96: Επικάλυψη Γεωλογικού Χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλου «Δερβένι» επί της περιοχής εκδήλωσης κατολίσθησης

- Η περιοχή της κοιλάδας του ποταμού Κράθης, όπως και όλη η περιοχή της βόρειας Πελοποννήσου, διατέμνεται κάθετα από πολλά ρήγματα με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ που εντάσσονται στο ιδιαίτερο, ενεργό τεκτονικό καθεστώς της Κορινθιακής Τάφρου. Το ρήγμα της Βαλιμής ουσιαστικά καθόρισε, λόγω της τεκτονικής καταπόνησης των βραχωδών υλικών, και οριοθέτησε την επιφάνεια της αστοχίας.

- Στη μελέτη των Zygouri & Koukouvelas (2019) διερευνήθηκαν οι εναυσματικοί παράγοντες της κατολίσθησης, με μελέτη των εφημερίδων της εποχής. Επιβεβαιώνονται οι πολύ έντονες βροχοπτώσεις στην περιοχή κατά το μήνα Φεβρουάριο, καθώς υπάρχει προγενέστερη του συμβάντος αναφορά για διακοπή των δικτύων επικοινωνίας και σιδηροδρόμου στην ευρύτερη περιοχή, ενώ η περιοχή Ακράτας – Καλαβρύτων δέχεται ούτως ή άλλως κατά μέσο όρο κατά το διάστημα Φεβρουαρίου – Μαρτίου το 30% της ετήσιας βροχόπτωσης.

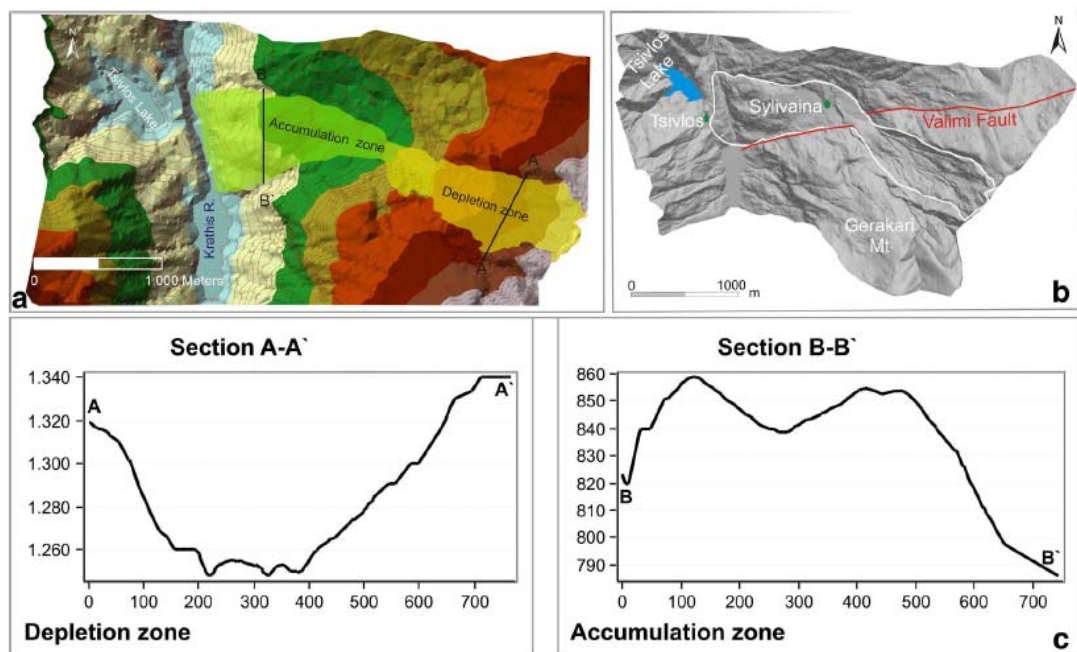


Fig. 3 a) Area affected from the 1913 Tzivlos landslide: the depletion and accumulation areas of the landslide are outlined. b) Detailed digital elevation model (DEM) of the landslide area. c) Topographic sections of the Tzivlos landslide. The sites of the sections are noted in Fig. 3a



Fig. 10 Other major landslides close to the 1913 Tzivlos landslide (solid line) and their correlation with the active normal Valimi Fault (VF). Background picture derived by Google Earth

Σχήμα 97: Τοπογραφικές αποτυπώσεις και εγκάρσιες τομές περιοχής κατολίσθησης (Fig. 3) και γεωμετρία ρήγματος Βαλιμής ως προς τη γεωμετρία μετακίνησης (Fig. 10) (Zygouri & Koukouvelas (2019))

- Επίσης οι «δυνατοί, υποχθόνιοι κρότοι» που ακούστηκαν στις 22/03/1913 αποδίδονται σε μέτριου μεγέθους σεισμικό γεγονός, συμβατό με τη σεισμικότητα της περιοχής, λόγω των μαρτυριών ότι ακούστηκαν σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις,

ενώ η ένταση και η πυροδότηση των φαινομένων κατά τις πρωινές ώρες της 24/03/1913 μπορεί να αποδοθεί στη μετασεισμική ακολουθία του παραπάνω γεγονότος.

- Από τις μαρτυρίες προκύπτει η εκδήλωση πρόδρομων κατολισθητικών φαινομένων σχετικά μικρής κλίμακας πλησίον της Συλίβαινας, πιθανώς κυκλικής μορφής σε κατακερματισμένα βραχώδη υλικά, που προηγήθηκαν και ενδεχομένως συνέτειναν στην εκδήλωση του κυρίως γεγονότος.
- Από τοπογραφική αποτύπωση στην περιοχή οριοθετούνται κατά προσέγγιση οι ζώνες απομείωσης και συσσώρευσης των υλικών, ενώ από σχετικές εγκάρσιες τομές προκύπτει σημαντικό ύψος, προσεγγιστικά άνω των 70m, τόσο της μορφολογικής πτώσης του φυσικού εδάφους στα ανάντη όσο και της αντίστοιχης αύξησης του στα κατόντη (Σχήμα 97).
- Συνεπώς τεκμαίρεται ότι η κατολίσθηση εκδηλώθηκε σε μία περιοχή συνδυασμού απότομου αναγλύφου, σε ασβεστολιθικά κατά βάση υλικά, τεκτονικά καταπονημένα, με την μετακίνηση να λαμβάνει χώρα εν πολλοίς κατά μήκος του ρήγματος της Βαλιμής, κατά το απόγειο της υγρής περιόδου του έτους και με πιθανολογούμενο επιπρόσθετο εναυσματικό παράγοντα κάποιο σεισμικό – μετασεισμικό γεγονός.

7.4 Συνέπειες Κατολίσθησης

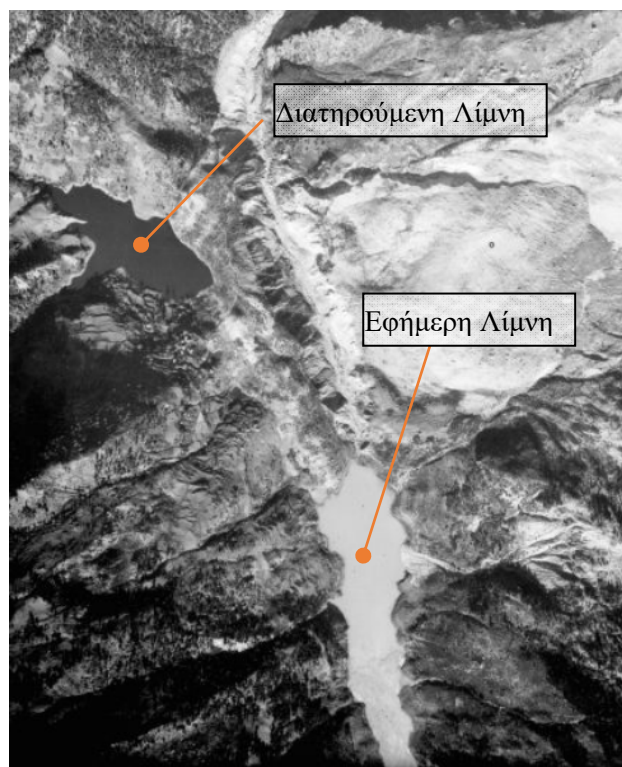
Στις συνέπειες της κατολίσθησης περιγράφονται πρακτικά στο σχετικό ιστορικό (Κεφ. 7.2, απόσπασμα από το βιβλίο «Ο Υγροβιότοπος της λίμνης Τσιβλού», ΚΠΕ Ακράτας, 2003) και περιλαμβάνουν την πλήρη καταστροφή - βύθιση του χωριού Συλίβαινα, ευρισκόμενο εντός της μετακίνησης της κατολίσθησης, και για τη θέση του οποίου υπάρχει σχετική εκτίμηση από τους Zygouri & Koukouvelas (2019) στο κεντρικό – βόρειο τμήμα της πληττόμενης περιοχής, καθώς και τμήματος του χωριού Τσιβλός, στο απέναντι πρανές της κοιλάδας του π. Κράθι. Οι καταγεγραμμένες ανθρώπινες απώλειες ήταν μόλις 4 λόγω της έγκαιρης εγκατάλειψης της Συλίβαινας. Από τα στοιχεία των εφημερίδων της εποχής αναφέρεται ότι ο αριθμός των κατοίκων της Συλίβαινας ήταν 109 και του Τσιβλού 57, με αθροιστικά 100 κατοικίες, ενώ τα πληττόμενα κτίρια στον Τσιβλό περιελάμβαναν 10 οικίες και την εκκλησία του χωριού (πηγή: <http://www.kolivas.de/archives/372418>).

Παράλληλα, τα υλικά της κατολισθήσεως που αποτέθηκαν με μεγάλη ταχύτητα στη βάση της κοιλάδας προκάλεσαν το σχηματισμό των δύο λιμνών, της εφήμερης στην κοιλάδα του ποταμού και τη διατηρούμενη στη δυτική πλευρά της κοιλάδας. Η διατήρηση της λίμνης αυτής για πάνω από έναν αιώνα οφείλεται στην αργή τροφοδότησή της από παραπόταμο του π. Κράθης, με ελεγχόμενη παροχέτευση, συγκρίσιμη με τις απώλειες λόγω διήθησης και εξάτμισης.

Η δημιουργία της λίμνης Τσιβλού δημιούργησε ένα νέο, εξελισσόμενο οικοσύστημα, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Κουσουρή, 2014, ΚΠΕ Ακράτας, 2003):

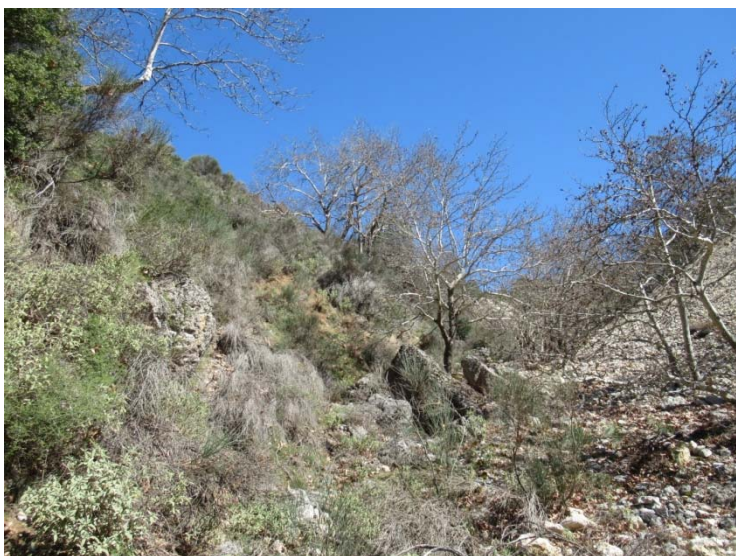
- Το μεγάλο βάθος, αρχικά 77m και πλέον μειωμένο στα ~50m λόγω των προσχώσεων και η αυξομειούμενη στάθμη της λίμνης, και άρα και η μεταβαλλόμενη γεωμετρία της ακτογραμμής, ανάλογα με τον ετήσιο κύκλο τροφοδότησης της από επιφανειακά ρυάκια μικρής δυναμικότητας και δύο υπόγειες πηγές.
- Ο συνδυασμός πεδινής δασικής βλάστησης (χαλέπιο πεύκο) και ορεινής δασικής βλάστησης (μαυροπεύκο και έλατο) στον περιβάλλοντα χώρο της λίμνης. Εντός της λίμνης υπάρχει παρουσία υδρόφιλων φυτών και ελόφυτων και πολύ πτωχή καθαρά υδάτινη βλάστηση.
- Μικρή ποικιλία από ψάρια του γλυκού νερού, κατά βάση εισαγόμενα.
- Ισχυρή παρουσία πουλιών του δάσους και μικρή παρουσία υδρόβιων ή παρυδάτινων πουλιών, λόγω της φτωχής υδρόβιας βλάστησης

Πέραν την λίμνης, ιδιαίτερη σημασία έχει και η εξέλιξη της περιοχής της βραχύβιας λίμνης εντός της κοίτης του π. Κράθης. Οι αεροφωτογραφίες λίγες δεκαετίες μετά την κατολισθήση αποτυπώνουν περιοδική συγκέντρωση υδάτων στην περιοχή, λόγω υπολειμματικής παρουσίας των υλικών του πρόχειρου φράγματος (Σχήμα 98). Από σχετική ιζηματολογική και μικροπαλαιοντολογική μελέτη (Groumpou et al., 2021)



Σχήμα 98: Δύο Λίμνες σε αεροφωτογραφία του 1939 (πηγή: <https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>)

επιβεβαιώνεται η σταδιακή μετάβαση της περιοχής της λίμνης σε έλος, οι συνεχιζόμενοι υψηλοί ρυθμοί αποθέσεων στην περιοχή, ενώ τεκμαίρεται η συσχέτιση της φυσικής εξέλιξης του οικοσυστήματος από λίμνη σε έλος και με τη δραστηριότητα και τις μικρομετακινήσεις του ενεργού ρήματος της Βαλιμής, η κατάληξη του οποίου στην κοιλάδα συμπίπτει με το κατάντη όριο του έλους.



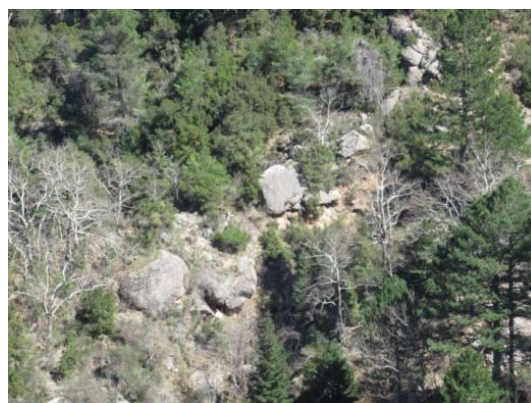
(α) Περιοχή ολίσθησης, κεντρικό τμήμα προς τα ανάντη. Επικράτηση αδρόκοκκων κορημάτων (Φωτ. 03/2023).



(β) Περιοχή ολίσθησης, κεντρικό τμήμα προς τα κατάντη (ζώνη συσσώρευσης υλικών, ανομοιογενές ανάγλυφο. Στο βάθος (απέναντι πρανές κοιλάδας π. Κράθη) διακρίνεται η λίμνη (Φωτ. 03/2023).



(γ) Περιοχή ολίσθησης, λήψη από απέναντι πρανές κοιλάδας. Αδρόκοκκα κορήματα, αποσπασματική δενδροκάλυψη (Φωτ. 03/2023)



(δ) Λεπτομέρεια περιοχής ολίσθησης, παρουσία επικρεμάμενων ογκολίθων (Φωτ. 03/2023)

Σχήμα 99: Πρόσφατες Φωτογραφίες περιοχής κατολίσθησης στον Τσιβλό



(α) Περιοχή σχηματισθείσας εφήμερης λίμνης εντός της κοίτης π. Κράθη (Φωτ. 03/2023)



(β) Απότομα Ανατολικά Πρανή Κοιλάδας π. Κράθη εκτός περιοχής κατολίσθησης 1913 (Φωτ. 03/2023)



(γ) Περιοχή λίμνης Τσιβλού, η εικόνα της παράκτιας περιοχής είναι ενδεικτική της διαφοροποίησης της στάθμης (Φωτ. 03/2023)

Σχήμα 100: Συμπληρωματικές Πρόσφατες Φωτογραφίες περιοχής κατολίσθησης στον Τσιβλό

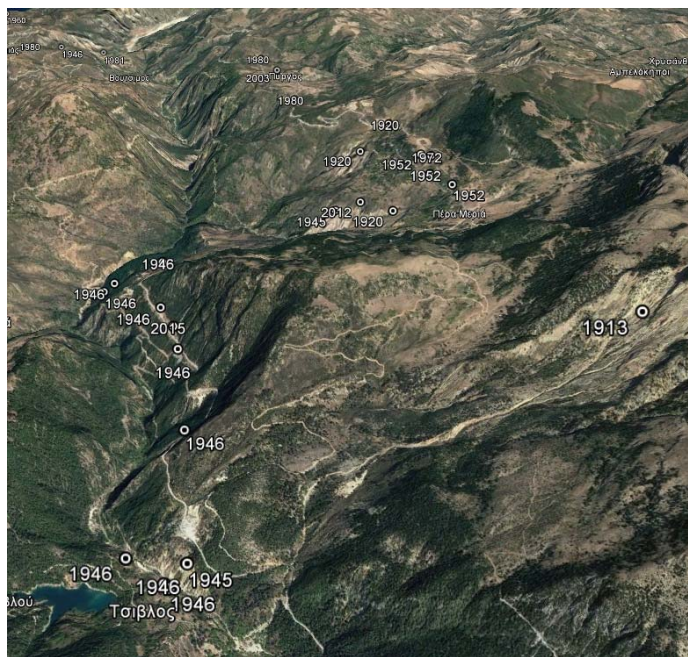
Πέραν των παραπάνω σημείων αναφορικά με τις συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον και τους πληττόμενους οικισμούς, από το σχηματισμό της λίμνης Τσιβλού από την κατολίσθηση του 1913 έχει δημιουργήσει ένα νέο φυσικό τοπόσημο στην περιοχή, το οποίο τελεί υπό καθεστώς προστασίας, εντασσόμενη στη Ζώνη Β3 Ειδικής Προστασίας Ορνιθοπανίδας GR2320013 του Εθνικού Πάρκου Χελμού – Βουραϊκού (πλέον της Μονάδας Διαχείρισης Εθνικού Πάρκου Χελμού – Βουραϊκού και Προστατευόμενων Περιοχών Βόρειας Πελοποννήσου). Επίσης αποτελεί ένα χώρο φυσιολατρικής αναψυχής,

άσκησης και ήπιου τουρισμού, και έχει αρχίσει σε μικρό βαθμό να προσελκύει και τις σχετικές λειτουργίες (π.χ. εστίαση, υπηρεσίες αναψυχής κ.α.).

7.5 Γενική Εκτίμηση Τρεχουσών Συνθηκών στην Περιοχή

Για την εκτίμηση των συνθηκών ευστάθειας στην περιοχή μελέτης μετά την εκδήλωση της μεγάλης κατολίσθησης του 1913, αναζητούνται καταρχάς στοιχεία από τις υφιστάμενες βάσεις δεδομένων κατολισθητικών συμβάντων για τυχόν μεταγενέστερα γεγονότα στην περιοχή. Στα διαθέσιμα στοιχεία για το νομό Αχαΐας (Κάβουρα, 2017), έχουν επισημανθεί κάποιες πρόσθετες αστοχίες στα εκατέρωθεν πρανή του π. Κράθη πλησίον της περιοχής μελέτης (Σχήμα 101), που αφορούν κυρίως ροές κορημάτων κατά μήκος των απότομων πρανών, αναγνωριζόμενες από παλιές αεροφωτογραφίες.

Στο συγκεκριμένο τεχνικογεωλογικό περιβάλλον της αστοχίας του 1913, που χαρακτηρίζεται από την επικράτηση ασβεστολιθικών σχηματισμών και έντονων ρηξιγενών δομών δεν προκύπτει συστηματική ή συχνή εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Αντίθετα, στα απότομα ανατολικά πρηνή στα κατάντη της κοιλάδας, καθώς και στη γειτονική περιοχή της Βαλιμής, όπου επικρατούν νεογενείς, μαργαϊκοί σχηματισμοί σε συνδυασμό με ρηξιγενείς δομές, οι καταγραφόμενες κατολισθήσεις είναι περισσότερες.



Σχήμα 101: Αποτύπωση Καταγεγραμμένων Κατολισθήσεων πλησίον της περιοχής μελέτης (στοιχεία από Κάβουρα, 2017).

Στα δυτικά πρηνή της κοιλάδας οι καταγραφές αφορούν μόνο παλιές ροές στα υλικά κορημάτων της κατολίσθησης.

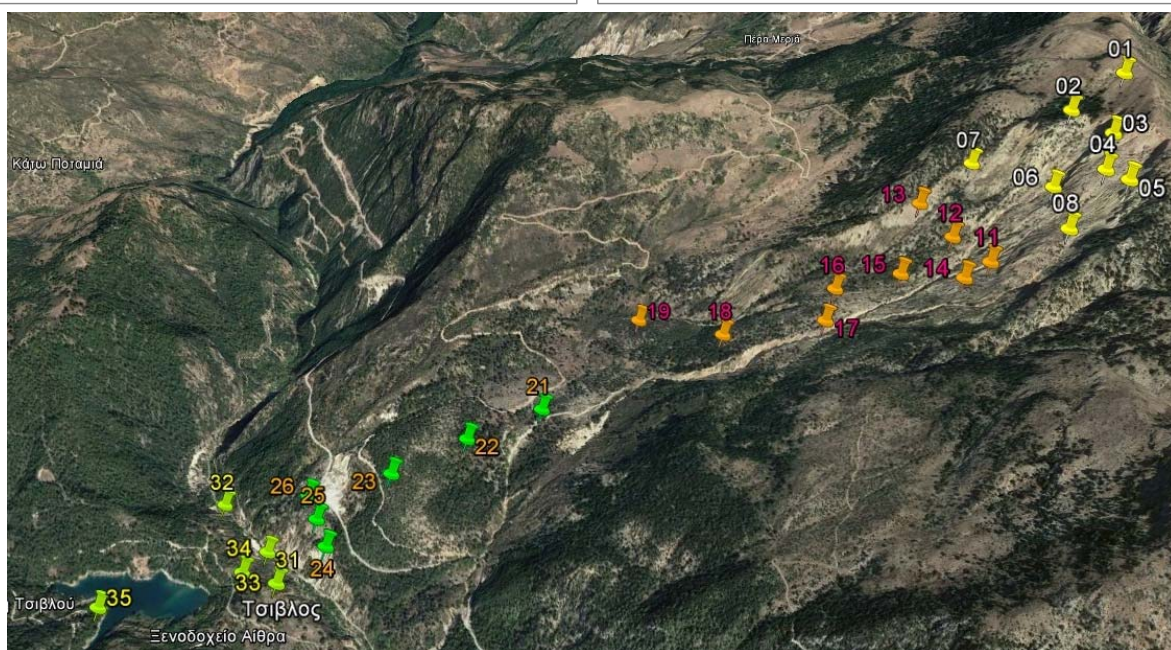
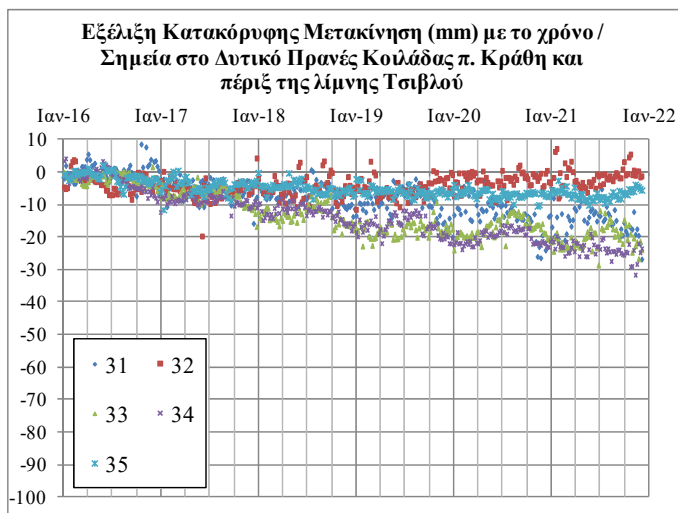
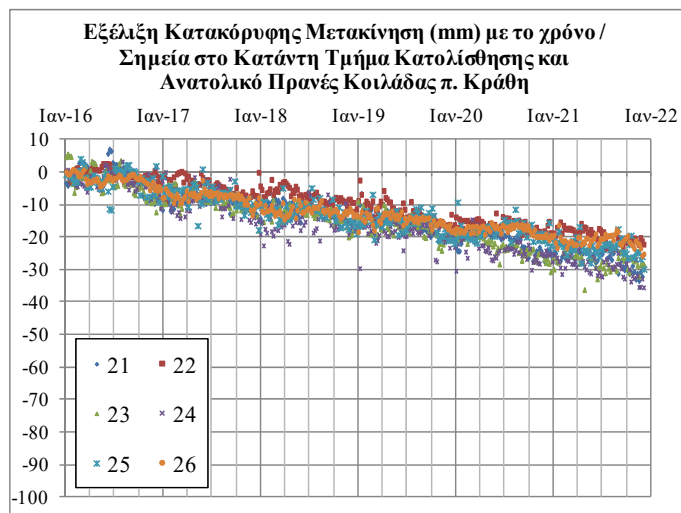
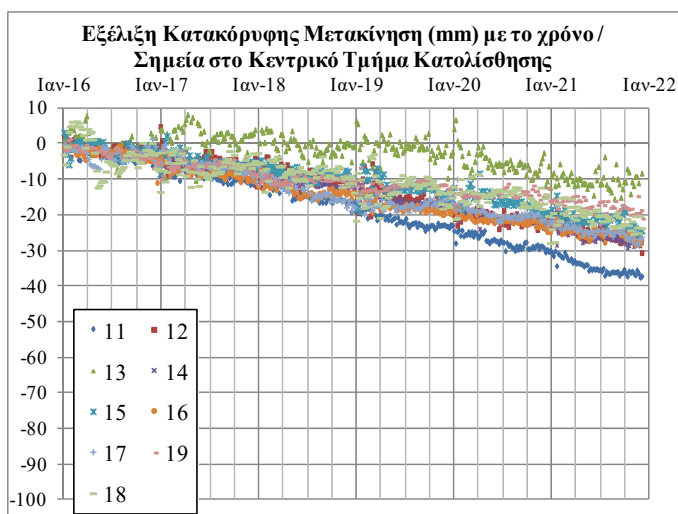
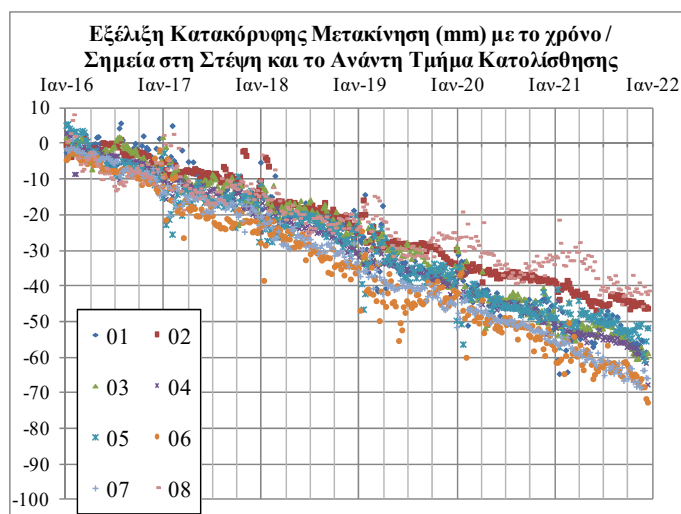
Αναφορικά με τα στοιχεία από τις σύγχρονες τηλεπισκοπικές μεθόδους, διερευνώνται τα στοιχεία από τη σχετική ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εδαφικών Μετακινήσεων (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>, Costantini et al., 2022), όπου παρέχεται ποσοτικοποίηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων μέσω των σύγχρονων δυνατοτήτων συμβολομετρίας από δορυφορικές εικόνες (InSAR). Η

περιοχή μελέτης καλύπτεται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία από τον πυκνό κάνναβο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 102, σε αποστάσεις καννάβου 50m.



Σχήμα 102: Κάνναβος Ποσοτικού Προσδιορισμού Εδαφικών Μετακινήσεων στην Περιοχή Μελέτης (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>).

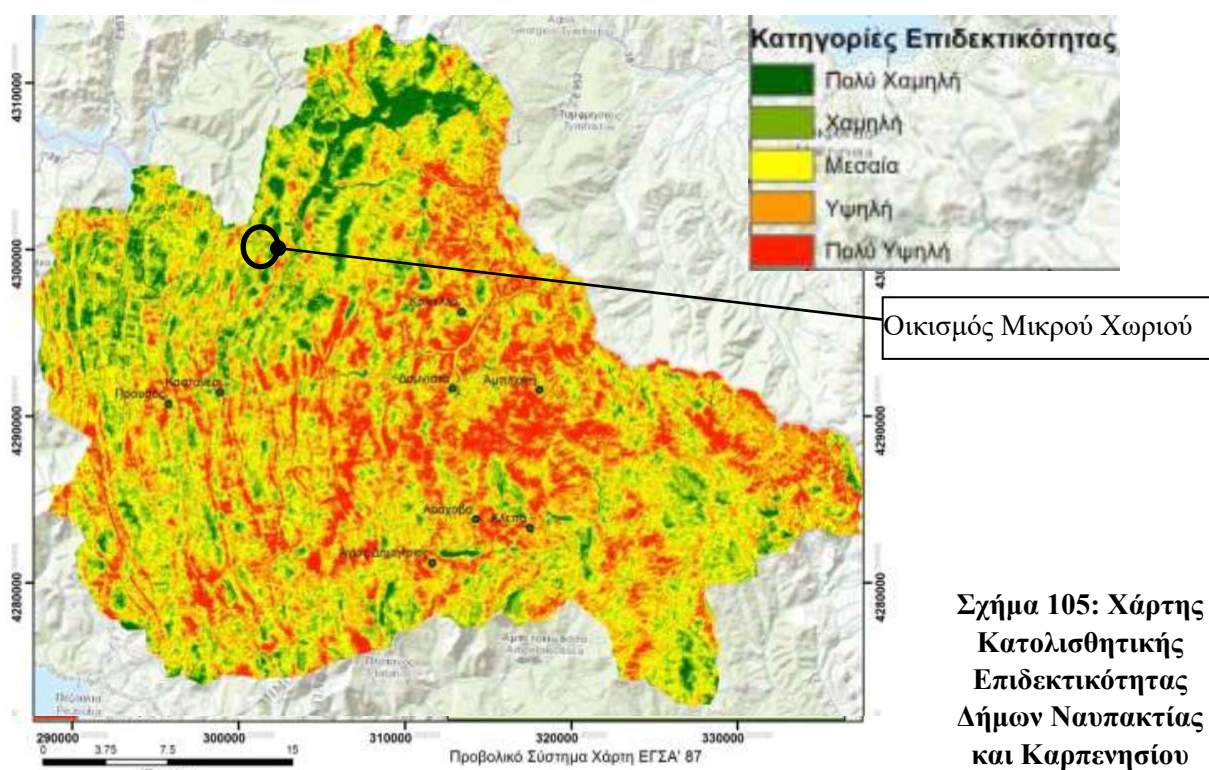
Από σχετική επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων για τα έτη 2016-2021 και την ομαδοποίηση ανά τμήμα κατολίσθησης, συντίθενται τα διαγράμματα στο Σχήμα 103. Στα πιο απότομα πρηνή στη στέψη της κατολίσθησης καταγράφονται οι μεγαλύτερες μετακινήσεις, με υποχώρηση της στάθμης εδάφους κατά $>1\text{cm}$ / έτος, με μέσο σφάλμα μετρήσεων $1,2\text{mm} \div 3,7\text{mm}$. Πρόκειται για τμήματα σε μεγάλο υψόμετρο 1400m-1650m, στα οποία δεν υπάρχει ανθρωπογενής δραστηριότητα, ενώ από τις αεροφωτογραφίες είναι ξεκάθαρο ότι αφορούν επιφανειακού χαρακτήρα ολισθήσεις κορημάτων. Στο κεντρικό και κατώτερο τμήμα της περιοχής της κατολίσθησης καταγράφονται μικρότερες μέσες υποχωρήσεις της στάθμης εδάφους, της τάξης του $0,3\text{-}0,6\text{cm}$ / έτος (μέσο σφάλμα μετρήσεων $1,0\text{mm} \div 3,3\text{mm}$), σταδιακά απομειούμενες προς τα κατώτερα υψομετρικά τμήματα, όπου και η μορφολογική κλίση γίνεται ηπιότερη. Παρόμοιες είναι και οι ενδείξεις στα ανατολικά πρηνή της κοιλάδας του π. Κράθη, εντός κορημάτων, ενώ στα δυτικά πρηνή της κοιλάδας και πέριξ της λίμνης οι καταγραφές είναι αρκετά χαμηλότερες έως πρακτικά μηδενικές με δεδομένο και το κατά περίπτωση σφάλμα μέτρησης ($1,3\text{mm} \div 3,0\text{mm}$ στα ανατολικά πρηνή του π. Κράθη και $1,5\text{mm} \div 2,3\text{mm}$ στα δυτικά πρηνή και πέριξ της λίμνης).



Σχήμα 103: Διαγράμματα εδαφικών υποχωρήσεων σε επιλεγμένα σημεία στην περιοχή μελέτης (στοιχεία από <https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ποσοτικοποίηση των μετακινήσεων, όπως προκύπτει από την τηλεσκοπική παρακολούθηση της περιοχής, θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένδειξη της μετακίνησης και να αξιολογείται με προσοχή και λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της μεθόδου (Κεφ. 5.3), τις τιμές των συστηματικών σφαλμάτων, τις πηγές αβεβαιότητας και θορύβου, ιδιαίτερα σε απότομα πρηνή όπως αυτά στη στέψη της κατολίσθησης και στα πρηνή της κοιλάδας του π. Κράθη, καθώς και τη δενδροκάλυψη, ιδιαίτερα πέριξ της λίμνης Τσιβλού. Η τηλεσκοπική παρακολούθηση με τη μέθοδο συμβολομετρίας InSAR προσφέρει μια μακροσκοπική επισκόπηση των μετακινήσεων στην περιοχή, ωστόσο για την ορθή διερεύνηση και αξιολόγηση των όποιων μετακινήσεων και των συνθηκών, αυτή θα πρέπει να συνδυαστεί με κάποιες επιτόπου μετρήσεις αναφοράς.

Σε κάθε περίπτωση, από τα διαγράμματα στο Σχήμα 103 δεν διαπιστώνονται πρόδρομες ενδείξεις ή υπόνοιες δυνητικά ασταθών συνθηκών στην περιοχή, ενώ οι καταγραφόμενες μετακινήσεις αφορούν εν πολλοίς επιδερμικές μετακινήσεις κυρίως σε κορήματα επί απότομων πρηνών, σε απρόσιτο υψόμετρο, είτε, μειωμένου μεγέθους ερπυστικές παραομορφώσεις, επί της επιφάνειας μετακίνησης της παλιάς κατολίσθησης και στα κορηματικά υλικά στα ανατολικά της κοιλάδας του π. Κράθη. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι εν πολλοίς αναμενόμενο, καθώς το πλαίσιο εκδήλωσης κατολισθήσεων σε απότομα πρηνή με διατμημένους ασβεστόλιθους και παρουσία ρηξιγενούς δομής τυπικά περιλαμβάνει τη μετακίνηση του μεγαλύτερου τμήματος των ασθενέστερων, δυνητικά ασταθών υλικών με την πρώτη μετακίνηση και επί της επιφάνειας του ρήγματος, με πολύ αργές διεργασίες υποβάθμισης της ποιότητας των παραμενόντων υλικών, ώστε να τροφοδοτήσουν άμεσα νέες αξιοσημείωτες αστάθειες. Ωστόσο, η παρουσία χαλαρά αποτεθημένων υλικών επί απότομων πρηνών ευνοεί τις επιδερμικές ροές, όπως οι παρατηρούμενες.



Εικόνα 114: Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας στα ορεινά τμήματα των Δήμων Ναυπακτίας και Καρπενησίου.

Η συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται ως μια από τις πλέον γνωστές στον ελληνικό χώρο και αυτή με το μεγαλύτερο καταγεγραμμένο αριθμό ανθρώπινων απωλειών. Παράλληλα, και παρά τη μετακίνηση του οικισμού σε νέα περιοχή, η περιοχή του παλαιού οικισμού μελετάται τεχνικογεωλογικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με εστίαση στο μη πληγέν τμήμα του παλαιού οικισμού, το οποίο έχει αξιολογηθεί τελικώς ως γενικά σταθερό, με διάκριση περιοχών κατάλληλων, κατάλληλων υπό προϋποθέσεις και ακατάλληλων για οικιστική καταλληλότητα. Επιπρόσθετα, έχει ενδιαφέρον η σταδιακή αναβίωση της κοινωνικής ζωής στον παλαιό οικισμό, έστω και εποχιακά, με ανάπτυξη δραστηριοτήτων κυρίως εστίασης και τουρισμού, αλλά και τη λειτουργία του τοπικού ιστορικού και λαογραφικού μουσείου, την τέλεση πολιτιστικών εκδηλώσεων, συνεδριάσεων του δημοτικού συμβουλίου, θείας λειτουργίας κ.τ.λ. σε αυτόν.

8.2 Ιστορικό Κατολίσθησης

Το ιστορικό της κατολίσθησης έχει καταγραφεί με ακρίβεια, στη βάση των μαρτυριών των επιζώντων κατοίκων του χωριού, των εμπλεκόμενων με την επιχείρηση διάσωσης (ενδεικτικά αναφέρεται η δημοσιογραφική καταγραφή των γεγονότων βάσει μαρτυριών στο βιβλίο του Ευ. Πλάκα (2016) και στο σχετικό ντοκιμαντέρ του ίδιου, καθώς και άρθρα στο τοπικό περιοδικό Μικροχωρίτικα Γράμματα, ιδιαίτερα στα τεύχη των ετών 2003,

2013), αλλά και της εκτενούς δημοσιογραφικής κάλυψης της εποχής για το, πρωτόγνωρο για τα ελληνικά δεδομένα, συμβάν. Τα κύρια σημεία από τις μαρτυρίες είναι:

- Τον προηγούμενο μήνα της εκδήλωσης της κατολίσθησης, που έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 1963, οι βροχοπτώσεις ήταν συνεχείς. Αναφέρεται αδυναμία προσέγγισης των κτηνοτρόφων στα βουστάσια των ζώων στο βουνό ανάντη του οικισμού λόγω λάσπης. Επιπλέον, τις προηγούμενες ημέρες έχει καταγραφεί έντονη ανησυχία στο χωριό («ξύλινες πόρτες στο χωριό είχαν φουσκώσει από την υγρασία και δεν λειτουργούσαν»), ενώ είχαν παρατηρηθεί και ρωγμές σε τοιχοποιίες.
- Από γενικότερες αναφορές (Οικονόμου, 2003) επιβεβαιώνεται ότι εκείνη τη χειμερινή περίοδο ο καιρός στο Νομό Ευρυτανίας ήταν βροχερός, με συνεχείς βροχές από το Σεπτέμβριο του 1962 και εκδήλωση κατολισθήσεων σε όλο το οδικό δίκτυο του νομού και σε διάφορα χωριά, με μικρές αλλά και πιο μεγάλες βλάβες. Επίσης σε ελαφρά μεταγενέστερο του συμβάντος χρόνο, το Φεβρουάριο του 1963 εκδηλώθηκε πολύ σημαντική κατολίσθηση στον Τριπόταμο Ευρυτανίας, χωρίς ανθρώπινες απώλειες, αλλά με καταστροφή 15 οικιών και της παλαιάς ιεράς μονής Τατάρνας (Χατζηνάκος κ.α., 1998).
- Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε στις 8:20 π.μ. της Κυριακής 13/01/1963. Ακολουθούν χαρακτηριστικά αποσπάσματα από κάποιες μαρτυρίες κατοίκων:

Μαρτυρία Σ. Ζαχαροπούλου (Πλάκας, 2016): «Έβρεχε όλη τη νύχτα και το πρωί ήρθαν από το χωριό όλοι οι υπεύθυνοι, όπως ο πρόεδρος, και μας είπαν να κατέβουμε προς την πλατεία, για να δούμε τι συμβαίνει, γιατί άρχισαν τα σπίτια να πέφτουν, ράγιζαν, άνοιγε ο δρόμος».

Μαρτυρία Ν. Καραγκούνη (Πλάκας, 2016) «Η γη έφευγε, καθόταν, κομμάτια έφευγαν τα σπίτια μονοκόμματα, από τη ρίζα τους. Και μετά καπνός, ήταν τα σπίτια με τζάκια, γελάδες να μουγκρίζουν, τα γίδια τα έβγαλε ο τσομπάνης και πάνε όλοι μαζί. Ένα αυτοκίνητο που τελευταία ερχόταν το πήρε και το πήγε απέναντι. Δεν έπαθε τίποτα ο οδηγός του αλλά λιποθύμησε. Μια κουνιάδα του τον πήρε με το αυτοκίνητο, πήγε στο Καρπενήσι και τους είπε: 'το Μικρό Χωριό έπεσε'».

Μαρτυρία Δ. Κοντογιάννη-Μπράβου (Πλάκας, 2016): «Την ώρα που έγινε το συμβάν ο πολύς ο κόσμος ήταν στην εκκλησία και εμείς τα παιδιά. Όταν άρχισε ο τόπος όλος να βοά και να κινείται, ο κόσμος τρομοκρατήθηκε και αναγκάστηκε να βγει προς τα έξω, προς την έξοδο της εκκλησίας. Η εκκλησία είναι ακριβώς απέναντι από το γεγονός, σαν να φωτογραφίζεις το συμβάν. Είδαμε λοιπόν ότι τα χώματα έφευγαν από την κορυφή του λόφου και κατέβαιναν με μεγάλη ορμή προς τα κάτω και ανακατενόntonταν. Έβλεπες λοιπόν καπνούς, φωτιές, τραπέζια και καρέκλες τα πόδια επάνω και να γυρίζουν και κάποιες στέγες και κομμάτια σπιτιών να κυλούν προς τα κάτω. Τρομοκρατήθηκα και προσπάθησα να τρέξω προς τη μεριά εκείνη, για να βρω τους γονείς μου. Τότε ο δάσκαλος, ο κύριος Μπετένιος (τιμήθηκε αργότερα από την Ακαδημία Αθηνών), μας είπε ότι πρέπει να πάμε οπωσδήποτε προς την αντίθετη κατεύθυνση, για να μην συμβεί κάποιο ατύχημα.»

- Η μαρτυρία του Σωτ. Οικονόμου, Πολ. Μηχανικού και Οικονομολόγου, Προϊστάμενου της Τ.Υ.Δ.Κ. Ευρυτανίας, που αποτέλεσε τον πρώτο εξωτερικό τεχνικό επιστήμονα που κατέφτασε στο χωριό, μετά από εντολή του Νομάρχη, έχει επίσης αξία (Οικονόμου, 2003):

«Την ημέρα εκείνη που ήταν Κυριακή οι άνθρωποι στα χωριά πήγαν από πολύ πρωί στην εκκλησία. Έτσι από τους 70-75 κατοίκους που κατοικούσαν σ' αυτό το τμήμα του χωριού, μόνον 13 είχαν μείνει εκεί. Άλλοι δεν πήγαν ακόμη στην εκκλησία, άλλοι δεν μπορούσαν να πάνε και άλλοι δεν είχαν ξυπνήσει ακόμη. Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές περιορίστηκε μόνο σ' αυτά τα 13 άτομα. Πρέπει να σημειωθεί ότι απ' αυτούς που βρέθηκαν στα σπίτια τους στη ζώνη κατολισθήσεως κανείς δεν επέζησε της καταστροφής. Ευτυχώς γιατί τα θύματα της καταστροφής θα μπορούσε να είναι 60-75 άτομα. Μετά το πρώτο σοκ που υπέστησαν όλοι οι υπηρεσιακοί παράγοντες και όλοι οι επισκέπτες και περιέργοι που κατέφθασαν στον τόπο της κατολισθήσεως, δεν μπορούσε να γίνει τίποτε άλλο από το να περιμένουμε. Εκεί μείναμε όλοι μέχρι τις 2.00 μ.μ. Το απόγευμα ξανάρθαμε, για να δούμε την εξέλιξη του φαινομένου. Η επικοινωνία προς το Μικρό Χωριό από την κυρία είσοδο του ήταν πλέον αδύνατη. Ήταν μόνον δυνατή από την άλλη έξοδο του χωριού προς το συνοικισμό Γαύρος του Μεγάλου Χωριού Ευρυτανίας. Το απόγευμα επιβεβαιώθηκε και ο ακριβής αριθμός των θυμάτων που ουσιαστικά ήταν όσοι δεν είχαν πάει στην εκκλησία του χωριού, η οποία βρισκόταν στο απέναντι μέρος του χωριού, το οποίο ήταν ασφαλές. Η κατολίσθηση εκινείτο προς τα κάτω, σαν βραδύσυρτη λάβα για πολλές μέρες. Αλλά τώρα αυτό ήταν αδιάφορο. Η μεγάλη ζημιά είχε γίνει.

Μετά τις πρώτες εντυπώσεις ακολούθησε στη Νομαρχία η ουσιαστική αντιμετώπιση του προβλήματος και έπρεπε να δοθεί απάντηση στα εξής ερωτήματα: α) Μπορούσαν να παραμείνουν και οι υπόλοιποι κάτοικοι στα σπίτια τους ή όχι; β) Τι θα γίνει με το Μικρό Χωριό; θα μεταστεγαστεί και πού, για να είναι πλέον ασφαλείς οι κάτοικοι του; γ) Πότε μπορεί να γίνει η μεταστέγασή των και πολλά άλλα παραπλήσια ερωτήματα. Για το πρώτο ερώτημα η Νομαρχία κάλεσε το Ι.Γ.Μ.Ε. (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), αρμόδιο για θέματα κατολισθήσεων. Αυτό απεφάνθη, ότι όλο το Μικρό Χωριό είναι στην ευρύτερη ζώνη κατολισθήσεως. Επομένως το χωριό όλο πρέπει να εκκενωθεί από τους κατοίκους του, οι οποίοι πρέπει να το εγκαταλείψουν το ταχύτερο δυνατόν. Είναι επικίνδυνο οι κάτοικοί του να παραμείνουν σ' αυτό, γιατί αν συνεχισθεί η κακοκαιρία μπορεί να κατολισθήσει και άλλο τμήμα του χωριού με απρόβλεπτες συνέπειες. Πρέπει να το εγκαταλείψουν και να στεγαστούν προσωρινά οπουδήποτε αλλού.»

Μετά την εκδήλωση του συμβάντος, οι μαρτυρίες επικεντρώνονται στα μέτρα ανακούφισης των πληγέντων (περίθαλψη τραυματιών, στέγαση και φροντίδα αστέγων, μετακίνηση όλων των κατοίκων σε γειτονικούς οικισμούς κ.α.).

8.3 Τεχνικογεωλογικό Πλαίσιο, Αίτια και Μηχανισμός Αστοχίας

Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε στο ανάντη (νότιο) πρανές στο δυτικού τμήματος του οικισμού. Η στέψη της κατολίσθησης οριοθετείται περί το μέσο ύψος του ανάντη (προς νότο) πρανούς του οικισμού, στο μορφολογικό ορεινό ύβωμα Κρι, στο ανατολικό τμήμα του όρους Χελιδώνα (σε υψόμετρο κατά προσέγγιση +1100m), ενώ η ζώνη απόθεσης των υλικών εκτείνεται στις παρυφές του ορεινού όγκου, με ηπιότερη μορφολογία (σε

υψόμετρο κατά προσέγγιση +850-900m), και έως την κοίτη του Μικροχωρίτικου χειμάρρου, παραποτάμου του π. Καρπενησιώτη.

Η περιοχή έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών τεχνικογεωλογικών μελετών από το ΙΓΜΕ, από την περίοδο αμέσως μετά την εκδήλωση της αστοχίας έως σχετικά πρόσφατα, με στόχευση τη διερεύνηση της οικιστικής καταλληλότητας του μη πληττόμενου τμήματος του οικισμού,. Η πληρέστερη, σχετικά πρόσφατη μελέτη (Χατζηνάκος κ.α., 1998) συνοψίζει τα ευρήματα των προγενέστερων μελετών, ενώ περιγράφει αναλυτικά το τεχνικογεωλογικό πλαίσιο της περιοχής.

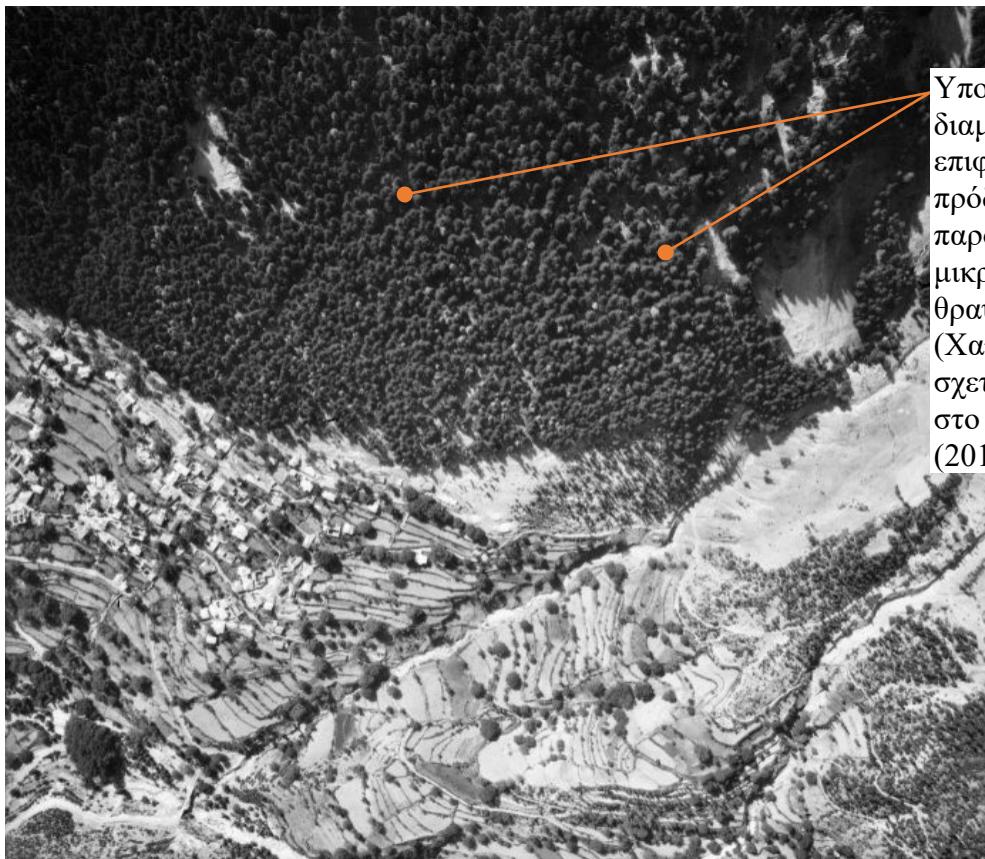


Εικόνες 50,51 : Το Μικρό Χωριό πριν και μετά την κατολίσθηση. Πηγή: Ιστορικό και Λαογραφικό Μουσείο Μικρού Χωριού

Σχήμα 106: Μικρό Χωριό πριν και μετά την Κατολίσθηση (πηγή: Κοντογιώργος, 2018)



Σχήμα 107: Περιοχή Κατολίσθησης στο Μικρό Χωριό αμέσως μετά την εκδήλωσή της (πηγή: Πλάκας, 2016, Μικροχωρίτικα Γράμματα, 2013).



Υποψία Σταδιακής
διαμόρφωσης μελλοντικής
επιφάνειας αστοχίας,
πρόδρομα φαινόμενα με
παρουσία ρωγμών και
μικρών εδαφικών
θραύσεων στο πρηνές
(Χατζηνάκος κ.α., 1998,
σχετική συζήτηση με Ρόζο
στο βιβλίο του Β. Πλάκα
(2016).

Σχήμα 108: Αεροφωτογραφία του 1946 της περιοχής πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης
(πηγή: <https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>)



Σχήμα 109: Αεροφωτογραφία του 1965 της περιοχής μετά την εκδήλωση της κατολίσθησης
(πηγή: <https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>)

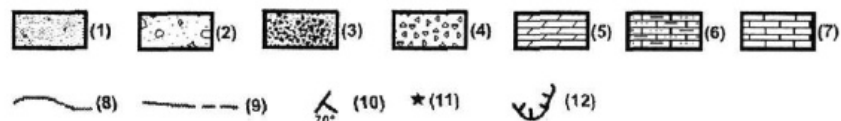
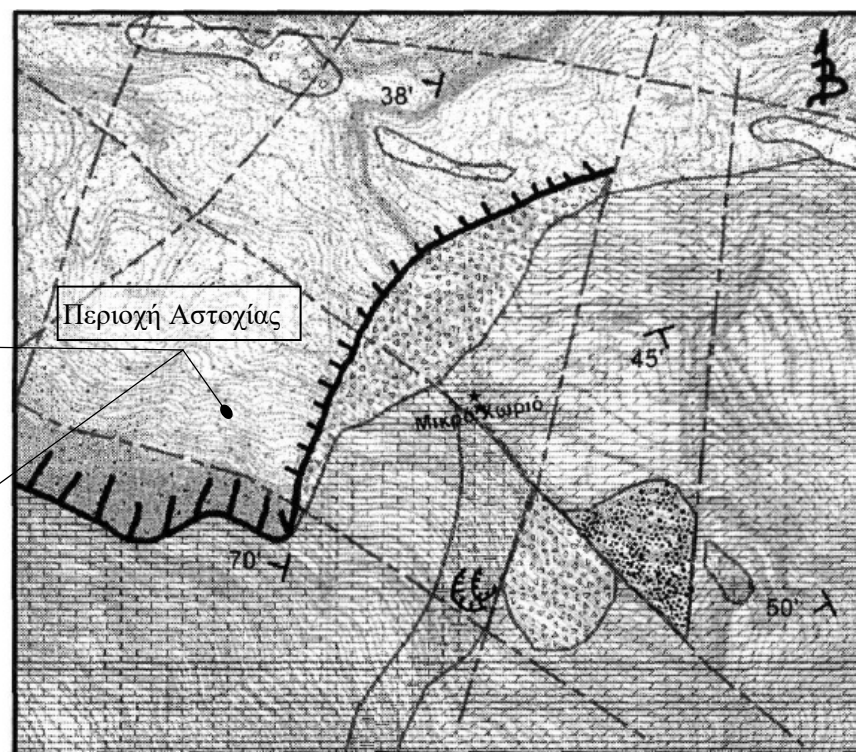
Η ευρύτερη περιοχή του Μικρού Χωριού / νότιου τμήματος νομού Ευρυτανίας δομείται από τους σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου, που περιλαμβάνουν τους ακόλουθους σχηματισμούς (από τους παλαιότερους στους νεώτερους) (Χατζηνάκος κ.α., 1998):

- Τριαδικοί Κλαστικοί Σχηματισμοί, που αφορούν ιζηματογενή πετρώματα βαθιάς θάλασσας, αποτελούμενα κυρίως από ψαμμίτες, πηλίτες, κλαστικοί ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές με ασβεστόλιθους, κερατόλιθους και τοπικές παρεμβολές κροκαλολατυποπαγών.
- Ασβεστόλιθοι Δρυμού, πρόκειται για πελαγικούς ασβεστολίθους με ενστρώσεις κερατόλιθων και τοπικά πηλιτών, αποτελούμενοι από τρία τμήματα (κατώτεροι ασβεστόλιθοι Δρυμού με ενστρώσεις κερατόλιθων, ενδιάμεσος ορίζοντας πυριτικών στρωμάτων με ενστρώσεις ασβεστολίθων και ανώτεροι ασβεστόλιθοι Δρυμού.
- Ραδιολαρίτες: Χαρακτηριστικός ορίζοντας ερυθρού ή πράσινου ή ιώδους της χρώματος, με τοπικές παρεμβολές ενστρώσεων πηλιτών και ασβεστόλιθων. Οι ενστρώσεις των πηλιτών συχνά επικρατούν στα κατώτερα τμήματα.
- Πρώτος φλύσχη, αποτελούμενος από στρώματα ψαμμιτών με παρεμβολές ενστρώσεων ασβεστόλιθων και πηλιτών.
- Ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, βιομικριτικοί, μεσοστρωματώδεις με διαστρώσεις και κονδύλους πυριτολίθων.
- Μεταβατικά στρώματα ασβεστολίθων προς το φλύσχη, αποτελούμενα από εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ασβεστόλιθων, μαργών, μαργαϊκών ασβεστόλιθων, κλαστικών ασβεστόλιθων, ασβεστολιθικών ψηφιδοπαγών και ψαμμούχων μαργών, με προοδευτική αύξηση των κλαστικών υλικών από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη.
- Φλύσχη, αποτελούμενος από ψαμμιτοπηλιτικά στρώματα με κροκαλοπαγή στο ανατολικό τμήμα της πινδικής αύλακας.
- Τεταρτογενείς σχηματισμοί, οι οποίοι διακρίνονται σε παλαιά και νέα πλευρικά κορήματα και συνιστούν χαλαρούς έως ημισυνεκτικούς, αδρομερείς σχηματισμούς, καθώς και τις αποθέσεις κοίτης, χαρακτηριζόμενες χαλαρές και αδρομερείς, μικρού γενικά εύρους και πάχους.

Στην εγγύς περιοχή του οικισμού και του ανάντη πρανούς συναντώνται οι σχηματισμοί του Ηωκαινικού φλύσχη, τα μεταβατικά στρώματα των ασβεστόλιθων προς φλύσχη και των πλακωδών ανωκρητιδικών ασβεστολίθων, που έχουν επιπτευθεί επί του φλύσχη,

καθώς και, σε χαμηλότερες στάθμες, τεταρτογενείς σχηματισμοί από παλαιά και νέα πλευρικά κορήματα, καθώς και σε ποτάμιες αποθέσεις κοίτης (Σχήμα 110). Οι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί στην περιοχή είναι λεπτοστρωματώδεις και χαρακτηρίζονται από ισχυρή τεκτονική καταπόνηση από δύο κύρια συστήματα διάρρηξης, με αποτέλεσμα την έντονη πτύχωση και ισχυρή διάρρηξη, με αποτέλεσμα τη χαλαρή δομή τους και τη δημιουργία μεγάλους πάχους πλευρικών κορημάτων. Η σύνθετη και εναλλασσόμενη λιθολογία και στρωματογραφία και η τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών συνθέτουν ένα πολύπλοκο υδρογεωλογικό περιβάλλον, καθοριζόμενο από τις εναλλαγές διαπερατών (κορήματα, ασβεστόλιθοι και κατώτερα μεταβατικά στρώματα, κυρίως λόγω τεκτονικής καταπόνησης και επικράτησης των μαργαϊκών ασβεστόλιθων) και αδιαπέρατων σχηματισμών (ανώτερα μεταβατικά στρώματα, όπου επικρατεί η αργιλοσαμμιτική έναντι της ασβεστομαργαϊκής φάσης, φλύσχης), με αποτέλεσμα το σχηματισμό πηγών αξιόλογης παροχής στις επαφές των στρωμάτων, όπως στην πλατεία του οικισμού.

Η παλαιά κατολίσθηση του 1963 περιελάμβανε κυρίως υλικά κορημάτων, τα οποία θεωρείται ότι πρέπει να είχαν τοπικά σημαντικό πάχος, αλλά και τμήμα του ασβεστολιθικού υποβάθρου, το οποίο στη συγκεκριμένη θέση ήταν έντονα τεκτονισμένο από ασυνέχειες, διατασσόμενες τόσο παράλληλα όσο και κάθετα προς το μέτωπο του πρानούς. Οι εκτεταμένες βροχοπτώσεις κατά το προηγούμενο του κατολισθητικού γεγονότος διάστημα αποτέλεσαν τον εναυσματικό παράγοντα για την ενεργοποίηση της ολίσθησης. Ωστόσο, το πρανές βρισκόταν ήταν ήδη σε συνθήκη επισφαλούς ισορροπίας, δεδομένης της παθολογίας των υλικών και της πολύ απότομης κλίσης του, με σαφή ένδειξη να αποτελούν τα πρόδρομα φαινόμενα ρωγμών και μικρών εδαφικών ασταθειών που έχουν διαπιστωθεί από τους ερευνητές ήδη από τις ιστορικές αεροφωτογραφίες του 1945 (Σχήμα 108), αλλά και σε αυτές του 1960 και με επέκτασή τους, στοιχεία που συνηγορούν προς την προοδευτική με το χρόνο μείωση του συντελεστή ασφαλείας του φυσικού πρανούς. Συνεπώς η επιφάνεια της αστοχίας φαίνεται ότι είχε αρχίσει να ορίζεται κατά τα προηγούμενα έτη. Παράλληλα, στην πρώτη σχετική έκθεση του ΙΓΜΕ (Αδημοσίευτη Έκθεση ΙΓΜΕ, T-195, Βετούλης Ι., τα βασικά σημεία συνοψίζονται από τους Χατζηνάκο κ.α., 1998), αναφέρονται ρητές πρόδρομες ενδείξεις της αστοχίας, με την εμφάνιση τοξοειδούς ρωγμής στο μέτωπο της, μήκους 300m περίπου και πλάτους 0,2m, η οποία παρατηρήθηκε για πρώτη φορά 20 ώρες περίπου πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης.



Σχήμα 2. Τεχνικογεωλογικός χάρτης περιοχής Παλαιού Μικρού Χωριού Ν. Ευρυτανίας.

(1) αναμοχλευμένες μάζες λόγω παλαιών ολισθήσεων, (2) αποθέσεις κοίτης, (3) υλικά μανδύα αποσάθρωσης, (4) πλευρικά κορήματα, (5) ιζηματα φλύσχη με επικράτηση των ψαμμικών φάσεων, (6) υλικά ζώνης μετάβασης, (7) λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι με πυριτόλιθους, (8) όριο τεχνικογεωλογικών ενότητων, (9) μείζονες διαρρήξεις (ρήγματα), (10) κλίση και παράταξη στρωμάτων, (11) πηγές-εκροές νερού και (12) κατολισθητικά φαινόμενα.

Σχήμα 110: Αποσπάσματα από Φύλλο ΙΓΜΕ «Φραγκίστα» και εγγύς τεχνικογεωλογικός χάρτης Μικρού Χωριού (Ρόζος και Αποστολίδης, 2004)

Η παραπάνω παρατήρηση υποδηλώνει ότι με τις συνεχείς βροχοπτώσεις η επισφαλής ισορροπία είχε καταστεί οριακή με σταδιακά μειούμενο συντελεστή ασφαλείας, ενώ συνδυάζεται με τις μαρτυρίες πρόδρομης εμφάνισης ρωγμών σε τοιχοποιίες των κατοικιών. Παράλληλα, υπάρχει και σημείωση από τον συγγραφέα Ι. Βετούλη ότι πιθανόν να υπήρχαν και άλλες ρωγμές στα ανάντη του οικισμού, οι οποίες δεν είχαν γίνει αντιληπτές λόγω της χιονοκάλυψης.

Η αστοχία του πρανούς ήταν απότομη, όπως επιβεβαιώνεται από τις μαρτυρίες, ενώ λόγω της αυξημένης κλίσης και της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ της στέψης της ολίσθησης και του οικισμού, η ταχύτητα των μετακινούμενων υλικών που έπληξαν τον οικισμό πρέπει ήταν μεγάλη (πιθανότατα Κατηγορία 6 βάσει της σχετικής ταξινόμησης - Σχήμα 6 και Σχήμα 43). Τα ολισθημένα υλικά τελικά αποτέθηκαν, και εν πολλοίς παραμένουν έως σήμερα, στα μορφολογικά χαμηλότερα τμήματα ήπιου αναγλύφου. Ένα τμήμα των υλικών κάλυψε πρόσκαιρα και την κοίτη του Μικροχωρίτικου χειμάρρου, ενώ η παρουσία υπολειμματικών, ολισθημένων υλικών εντός της κοίτης έχει ως αποτέλεσμα την εποχική συγκράτηση υδάτων και το σχηματισμό μικρής λίμνης.

8.4 Συνέπειες Κατολίσθησης

Οι συνέπειες της κατολίσθησης στο Μικρό Χωριό ήταν πολυεπίπεδες, κυρίως σε κοινωνικό, τοπικό και υπερτοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα:

- Επλήγη σφοδρά ένας ιστορικός οικισμός (συμμετοχή στη μάχη Κεφαλόβρυσου 1823, μάχη του Μικρού Χωριού 1942), με ολοκληρωτική καταστροφή του δυτικού του τμήματος και με 13 ανθρώπινες απώλειες. Πρόκειται για το πλέον πολύνεκρο κατολισθητικό συμβάν που έχει καταγραφεί στον ελληνικό χώρο. Πέραν των ανθρώπινων απωλειών και των τραυματιών, το συμβάν είχε ως αποτέλεσμα τη μετοίκηση των επιζησάντων κατοίκων στο νέο οικισμό του Μικρού Χωριού, σε απόσταση ~2km και προς τα βορειοανατολικά του παλαιού οικισμού και τα κατάντη, πλησίον του π. Καρπενησιώτη, αλλά παράλληλα με διατήρηση της σύνδεσής τους με τον παλαιό οικισμό.
- Το βίωμα της καταστροφής από τους επιζήσαντες κατοίκους του χωριού ήταν και παραμένει εξαιρετικά έντονο, όπως αποτυπώνεται στις μαρτυρίες και τα συγκριτικά πολλά ιστορικά βιβλία με επίκεντρο το Μικρό Χωριό από τους επιζήσαντες, συχνά με όρους ατομικού ή / και συλλογικού τραύματος. Το βίωμα της καταστροφής

πέρασε από διάφορα στάδια, ενδεικτικά αναφέρονται: τα προειδοποιητικά σήματα και ανησυχία προ του γεγονότος, η σημειολογία εκδήλωσης της καταστροφής την ώρα συμμετοχής της κοινότητας στη θεία λειτουργία, η συνειδητοποίηση της αδυναμίας επέμβασης στο πληττόμενο τμήμα προς διάσωση των συγχωριανών, η άμεση απομάκρυνση παιδιών προς την αντίθετη κατεύθυνση, η έντονη ανησυχία για ευστάθεια εναπομείναντος οικισμού, τα συναισθήματα κατά την άφιξη των σωστικών συνεργείων, η μεταφορά των τραυματιών στα νοσοκομεία, η πρόχειρη φιλοξενία κατοίκων σε γειτονικά χωριά, η απόφαση για μεταστέγαση του οικισμού το 1964 σε κοντινή, ευσταθή θέση πλησίον του π. Καρπενησιώτη σύμφωνα με πολεοδομικό σχέδιο του γραφείου Δοξιάδη, ο μεγάλος πανελλήνιος έρανος ενίσχυσης, οι δωρεές και δανειοδοτήσεις για την οικοδόμηση του νέου οικισμού, αλλά και σε μεταγενέστερο χρόνο η σχετική τοιχογράφηση στην εκκλησία και ανέγερση σχετικού μνημείου στην είσοδο του χωριού το 1986 ως διαρκής υπόμνηση της καταστροφής (Σχήμα 111, Σχήμα 112), η έκθεση πολλών τεκμηρίων από την κατολίσθηση στο Ιστορικό και Λαογραφικό Μουσείο Μικρού Χωριού, αλλά και επιθυμία και υλοποίηση διατήρησης της σύνδεσης και του ρόλου του παλαιού οικισμού, και επανοίκησης του, μέσω αιτημάτων για τεχνική τεκμηρίωση της ευστάθειας του υπόλοιπου τμήματος και τεκμηρίωση της οικιστικής καταλληλότητας του, που σε ένα βαθμό έχει επιτευχθεί, με την εποχική αποκατάσταση κοινωνικών δραστηριοτήτων σε αυτόν.

- Η ένταση του συμβάντος και η παρουσία ανθρώπινων απωλειών είχε ως αποτέλεσμα την ενεργό εμπλοκή του κεντρικού κρατικού μηχανισμού, εν πολλοίς πρωτόγνωρη για κατολισθητικό συμβάν, τόσο στο πεδίο του μετριασμού των συνεπειών (στήριξη στους πληγέντες, επίσκεψη αρμόδιου υπουργού Πρόνοιας την επόμενη ημέρα, μεταφορά επιζώντων σε ασφαλή σημεία για μείωση της έκθεσης), όσο και στο σχεδιασμό ή την εποπτεία των μέτρων ανάκαμψης (κεντρική παροχή τεχνικών υπηρεσιών μέσω του ΙΓΜΕ, αναδεικνύοντας το σημαντικό ρόλο του σχετικού επιστημονικού προσωπικού της χώρας, εποπτεία και κεντρική υλοποίηση της μετοίκησης, δανειοδοτήσεις για νέες οικίες κ.α.).
- Παράλληλα το κατολισθητικό συμβάν αποτέλεσε πρωτόγνωρο και βασικό ειδησεογραφικό θέμα του τύπου της εποχής, ως γεγονός υπερτοπικής - πανελλήνιας εμβέλειας, έναντι του συνήθους τοπικού χαρακτήρα των αναφορών των

κατολισθητικών φαινομένων, ενημερώνοντας για τις δυνητικά πολύ καταστροφικές συνέπειες των κατολισθητικών φαινομένων.



(α) Μνημείο Νεκρών Κατολίσθησης (Φωτ. 08/2022)



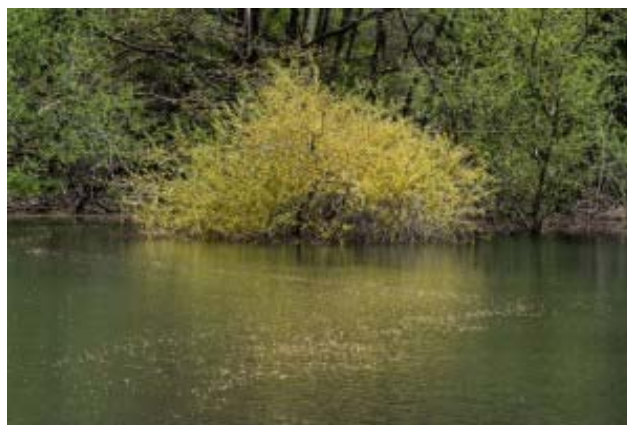
(β) Περιοχή κατολίσθησης, στο βάθος το γυμνό μέτωπο και σε πρώτο πλάνο τα ολισθημένα υλικά (Φωτ. 08/2022)



(γ) Συμπερίληψη τεκμηρίων της κατολίσθησης στην τοπική ιστορία (Εκθεση Ιστορικού και Λαογραφικού Μουσείου Μικρού Χωριού, Φωτ. 08/2022)



(δ) Ολισθημένα, αναμοχλευμένα υλικά (Φωτ. 08/2022)



(ε) Λίμνη Μικρού Χωριού λόγω πρόχειρου αναχώματος στην κοίτη του Μικροχωρίτικου χειμάρρου από τα ολισθημένα υλικά (Πηγή: mikrohorio.gr)

Σχήμα 111: Φωτογραφίες σχετικές με την κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό

- Αν και σε δεύτερο πλάνο, η κατολίσθηση είχε και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή. Προκλήθηκε σημαντική μορφολογική αλλαγή στην περιοχή, απογύμνωση

του ανάντη πρανούς και μεταφορά και μόνιμη απόθεση αναμοχλευμένων υλικών σε υψομετρικά κατώτερα και μορφολογικά ηπιότερα τμήματα, καθώς και μερική έμφραξη του Μικροχωρίτικου χειμάρρου από τα ολισθημένα υλικά, τα οποία, λειτουργώντας ως πρόχειρο φράγμα, έχουν δημιουργήσει μικρή λίμνη (Σχήμα 111).

- Η λίμνη έχει μόνιμο χαρακτήρα (αναγνωρίζεται ευδιάκριτα στις περισσότερες μετακατολισθητικές αεροφωτογραφίες), ωστόσο με κυμαινόμενη στάθμη και χρήση του νερού της κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και για άρδευση καλλιεργειών.



Εικόνα 99: «Η Κιβωτός του Νώε» και η καταστροφική κατολίσθηση του Παλαιού Μικρού Χωριού. Πηγή: Αρχείο συγγραφέα

Σχήμα 112: Αγιογράφηση της κατολίσθησης και η σύνδεση της εκδήλωσης της κατολίσθησης την ώρα της θείας λειτουργίας με την Κιβωτό του Νώε (Πηγή: Κοντογιώργης, 2018).

8.5 Γενική Εκτίμηση Τρεχουσών Συνθηκών στην Περιοχή

Η ευστάθεια της περιοχής του οικισμού έχει διερευνηθεί συστηματικά κατά το διάστημα μετά την εκδήλωση της και έως σχετικά πρόσφατα, κυρίως υπό το πρίσμα της ανάκλησης της απαγόρευσης δόμησης εντός του παλαιού οικισμού και τη χωροθέτηση περιοχών κατάλληλων για ανοικοδόμηση και οίκηση. Οι Χατζηνάκος κ.α. (1998) συνοψίζουν όλες τις παλαιότερες σχετικές μελέτες του ΙΓΜΕ επί του θέματος και αποφαινόμενοι επί της οικιστικής καταλληλότητας του παλαιού οικισμού, ενώ τα σχετικά πορίσματα της ίδιας διερεύνησης συνοψίζονται και από τους Ρόζο και Αποστολίδη (2004). Τα κύρια σημεία της διερεύνησης είναι:

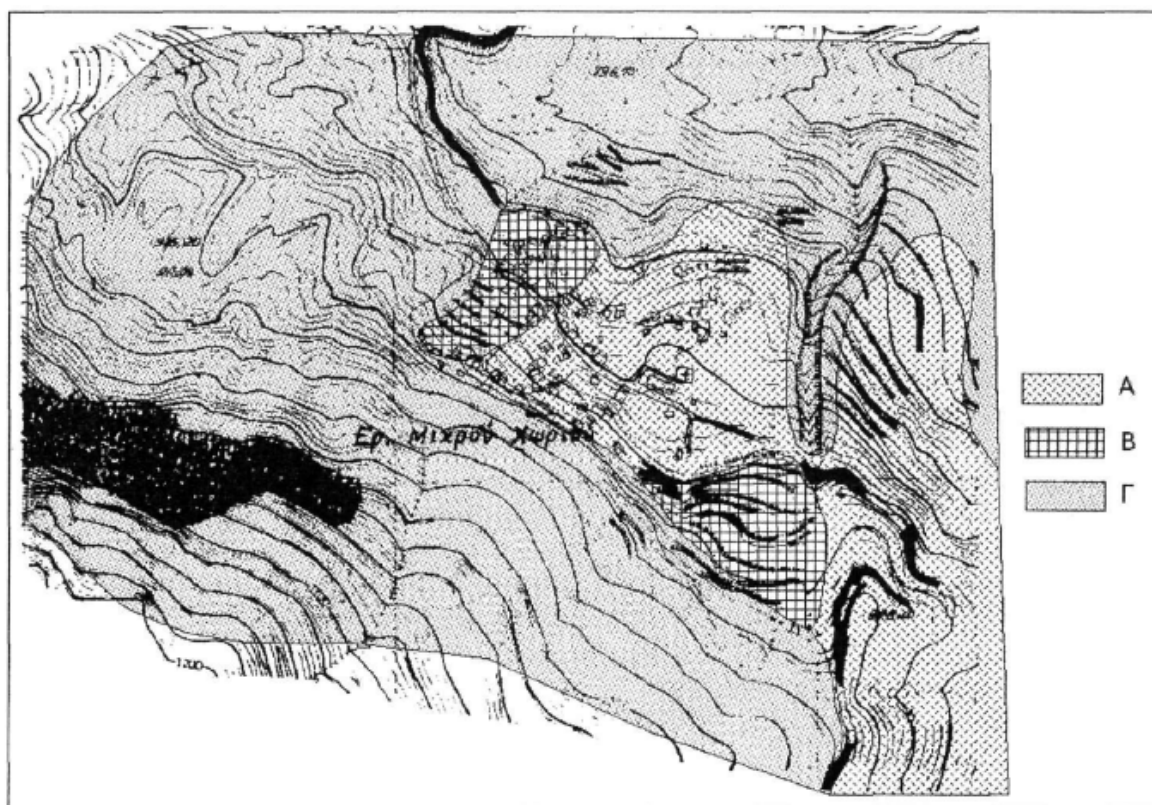
- Σε όλες τις μελέτες επιτόπου αναγνώρισης – διερεύνησης της περιοχής της κατολίσθησης και του παραμένοντος τμήματος του οικισμού σε βάθος δεκαετιών προκύπτει ότι δεν έχουν υπάρξει εκδηλώσεις ή ενδείξεις νέων ασταθειών ή διαμόρφωσης γενικών ή τοπικών επισφαλών συνθηκών, πέραν από κάποιες μικρές, τοπικές αστάθειες ελάσσονος σημασίας. Αυτό το πόρισμα, αν και μη προφανές την περίοδο αμέσως μετά την αστοχία, είναι εν πολλοίς εύλογο βάσει της

τεχνικογεωλογικής ερμηνείας του μηχανισμού και των χαρακτηριστικών της αστοχίας, υπό την έννοια ότι τα ασθενέστερα υλικά των κορημάτων και των ανώτερων, αποδομημένων ασβεστολίθων ολίσθησαν πλήρως και απομακρύνθηκαν από τα απότομα πρανή, στην επιφάνεια των οποίων στο μέτωπο της ολίσθησης πλέον επικρατούν βραχώδη, ασβεστολιθικά υλικά, πιθανότατα λιγότερο τεκτονισμένα σε σχέση με τα ασβεστολιθικά υλικά στη βάση της ολίσθησης, με καλή γεωμηχανική συμπεριφορά.

- Ειδικά στις πρώτες σχετικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ, αμέσως μετά την κατολίσθηση ή τα επόμενα χρόνια, υπήρχε σχετική αβεβαιότητα για την γενική ευστάθεια του παραμένοντος τμήματος του οικισμού, λόγω της συνδυαστικής παρουσίας του απότομου πρανούς στα ανάντη, της λιθολογίας – στρωματογραφίας με παρουσία των (πάντα επίφοβων) φλυσχικών ή μεταβατικών σχηματισμών, του ισχυρού τεκτονισμού και των πλούσιων βροχοπτώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες. Ωστόσο, σταδιακά, και με την παρέλευση αρκετών ετών χωρίς ιδιαίτερα φαινόμενα αστάθειας, στις μελέτες του ΙΓΜΕ διαπιστώνεται η γενική ευστάθεια της περιοχής και γίνεται διάκριση μεταξύ των πλέον σταθερών τμημάτων του οικισμού, όπου συναντάται κυρίως ο υγιής φλύσχης, με πρόταση άρσης εντός αυτών των απαγορεύσεων στην δόμηση, και των δυνητικά ασταθών τμημάτων, με παρουσία κυρίως πλευρικών κορημάτων, που θεωρούνται γενικώς ακατάλληλα για ανοικοδόμηση. Παράλληλα προτείνονται μέτρα διαχειριστικού – προστατευτικού χαρακτήρα για το ανάντη πρανές, αναφορικά με τη διακοπή κάθε υλοτόμησης σε αυτό, την ανακατασκευή, τη συντήρηση και τον καθαρισμό των υδραυλικών τάφρων ανάντη του οικισμού, καθώς και νέες δενδροφυτεύσεις με κατάλληλα βαθύρριζα και γρήγορα αναπτυσσόμενα δένδρα στα γυμνά πρανή και στην περιοχή της παλιάς κατολίσθησης. Επίσης υποβάλλονται προτάσεις για υδραυλικά έργα εντός του οικισμού και συστάσεις για την επιμελή κατασκευή της θεμελίωσης των νέων κτιρίων, περιορισμό του ύψους των προσωρινών τεχνητών πρανών και αποφυγή κατασκευής έργων βαρέως τύπου, επιβαρυντικών της ευστάθειας των πρανών, ειδικά πλησίον των ορίων της κατολίσθησης.
- Τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν και κωδικοποιήθηκαν στις τελευταίες σχετικές μελέτες (Χατζηνάκος κ.α., 1998 και Ρόζος και Αποστολίδης, 2004), όπου έγινε σαφής διαχωρισμός σε τρεις ζώνες περιοχών κατάλληλων για δόμηση, κατάλληλων για δόμηση υπό προϋποθέσεις και ακατάλληλων για δόμηση (Σχήμα 113).

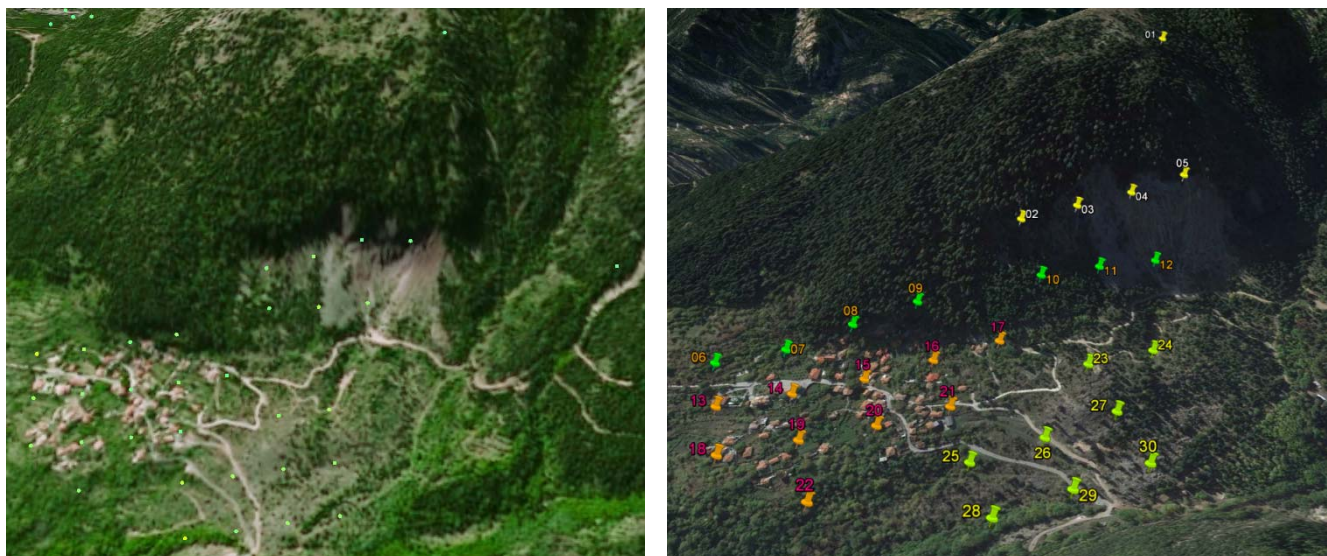
Οι συνθήκες ευστάθειας στην περιοχή του παλαιού Μικρού Χωριού εξετάζονται και στη βάση των ευρημάτων από τις σύγχρονες τηλεπισκοπικές μεθόδους, με χρήση των στοιχείων από τα στοιχεία από τη σχετική ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εδαφικών Μετακινήσεων (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>, Costantini et al., 2022), όπου παρέχεται ποσοτικοποίηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων μέσω των σύγχρονων δυνατοτήτων συμβολομετρίας από δορυφορικές εικόνες (InSAR). Η περιοχή καλύπτεται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία από τον κάνναβο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 114.

Από σχετική επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων για τα έτη 2016-2021 και την ομαδοποίηση ανά τμήμα της περιοχής συντίθενται τα διαγράμματα στο Σχήμα 115.

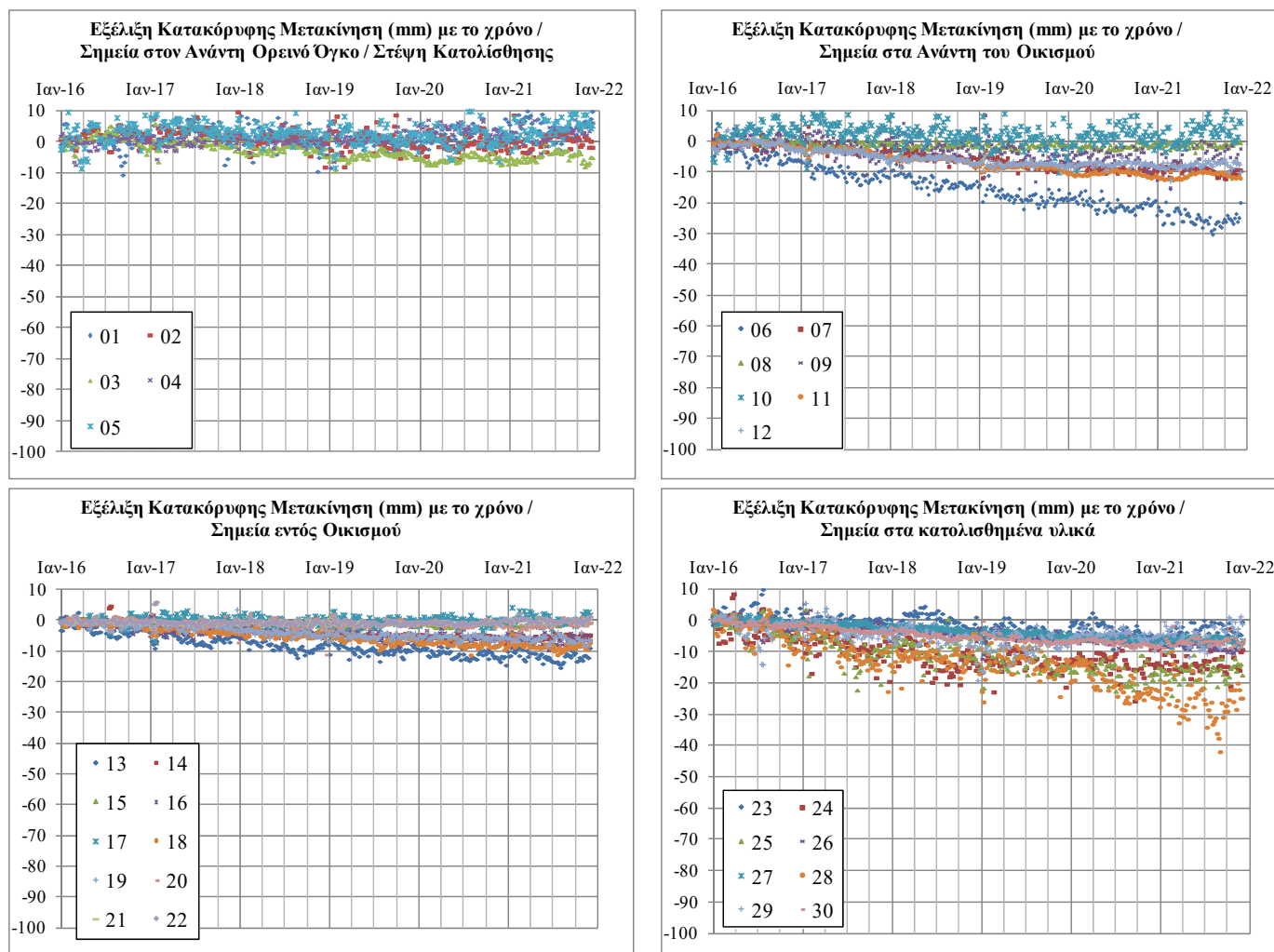


Σχήμα 4. Χάρτης οικιστικής καταλληλότητας περιοχής Παλαιού Μικρού Χωριού Ν. Ευρυτανίας. (Α) περιοχές κατάλληλες για δόμηση, (Β) περιοχές κατάλληλες για δόμηση υπό προϋποθέσεις και (Γ) περιοχές ακατάλληλες για δόμηση.

Σχήμα 113: Μετακατολισθητική Διάκριση περιοχών οικιστικής καταλληλότητας στο παλαιό Μικρό Χωριό (πηγή: Ρόζος και Αποστολίδης, 2004).



Σχήμα 114: Κάνναβος Ποσοτικού Προσδιορισμού Εδαφικών Μετακινήσεων στην Περιοχή Μελέτης (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>) και επιλεγμένα σημεία αποτυπωμένα στο google earth.



Σχήμα 115: Διαγράμματα εδαφικών υποχωρήσεων σε επιλεγμένα σημεία στην περιοχή μελέτης (στοιχεία από <https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>).

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ. 7.5, η παραπάνω ποσοτικοποίηση των μετακινήσεων με την τηλεσκοπική μέθοδο συμβολομετρίας InSAR θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με τη δέουσα προσοχή και ως ένδειξη / μακροσκοπική επισκόπηση της μετακίνησης, ιδιαίτερα από τη στιγμή που δεν συνοδεύεται από κάποιες επιτόπου μετρήσεις για αναφορά, σύγκριση και επιβεβαίωση, και λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της μεθόδου (Κεφ. 5.3), τις τιμές των συστηματικών σφαλμάτων, τις πηγές αβεβαιότητας και θορύβου, ιδιαίτερα σε απότομα πρανή και σε θέσεις με έντονη δενδροκάλυψη.

Πέραν της γενικής επιφύλαξης για την αξιολόγηση των αυτόνομων ευρημάτων από τη μέθοδο InSAR, τα στοιχεία συνηγορούν σε σταθερότητα της στάθμης του φυσικού εδάφους, τόσο στην περιοχή του ορεινού όγκου στα νότια-νοτιοδυτικά του οικισμού και της περιοχής της στέψης της κατολίσθησης, όσο και στην περιοχή στα ανάντη του οικισμού και εντός του. Τα τηλεσκοπικά στοιχεία εντάσσονται σε κοινό πλαίσιο με τα πορίσματα περί οικιστικής καταλληλότητας στο κεντρικό τμήμα του διατηρούμενου οικισμού (Χατζηνάκος κ.α., 1998).

Πιο συγκεκριμένα, στον ανάντη ορεινό όγκο και στο πρανές της στέψης της κατολίσθησης οι μετρήσεις υποδεικνύουν σταθερότητα, με κάποιες μικροδιακυμάνσεις και θόρυβο λόγω των συστηματικών σφαλμάτων (της τάξης των $1,3\text{mm} \div 3,3\text{mm}$). Όμοια είναι η εικόνα στο πρανές στα ανάντη του οικισμού και εντός αυτού, με ομοίως μηδενικές ή πρακτικά μηδενικές τιμές (0-10mm σε διάστημα 6 ετών), και με δεδομένο τα σφάλματα των μετρήσεων (της τάξης των $0,5\text{mm} \div 3,7\text{mm}$). Η καταγραφόμενη μικρή ένδειξη υποχώρησης, χωρίς ιδιαίτερα αυξημένες τιμές (μέση τιμή $< 4\text{mm}/\text{έτος}$) ή ανησυχητική εξέλιξη προς τα ανατολικά – νοτιοανατολικά (σημείο 06), αφορά περιοχή που εντάσσεται στη ζώνη οικιστικής καταλληλότητας υπό προϋποθέσεις με δενδροκάλυψη. Η μετρήση αυτή είναι χαρακτηριστική, όχι λόγω ανησυχητικού μεγέθους, αλλά γιατί παρουσιάζει συγκριτικά μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις μετρήσεις, και με κάποια εποχικότητα κατά την περίοδο του έτους, που αποδίδεται στις αλλαγές στη βλάστηση, εν συγκρίσει και σε αντιδιαστολή με κάποιες μετρήσεις με αναφορά σε σταθερές κατασκευές εντός του οικιστικού πλέγματος, οι οποίες είναι συστηματικά μηδενικές και με μικρές τιμές σφάλματος. Σημειώνεται επίσης ότι σε κάποιες θέσεις εντός της ζώνης συσσώρευσης των κατολισθημένων, χαλαρών υλικών καταγράφονται, εύλογα, κάποιες μικρού μεγέθους υποχωρήσεις, ομοίως με διακυμάνσεις, αποδιδόμενες στη δενδροκάλυψη, και με υποψία πολύ μικρών ερπυστικών παραμορφώσεων σε κάποιες από τις θέσεις.

9 Τρίτη Περίπτωση Μελέτης – Κατολισθητικά Φαινόμενα λόγω του Ιανού, Τέσσερις Χαρακτηριστικές Θέσεις στο Ν. Καρδίτσας

9.1 Εισαγωγή

Κατά το διάστημα εκδήλωσης του μεσογειακού κυκλώνα «Ιανός» (εφεξής Ιανός), από τις 17 έως τις 19 Σεπτεμβρίου 2020, παρατηρήθηκαν πολυάριθμα κατολισθητικά (και πλημμυρικά) φαινόμενα ανά τη χώρα, με τα σημαντικότερα να εντοπίζονται στους νομούς Καρδίτσας, Φθιώτιδας και Ιονίων Νήσων (κυρίως στην Κεφαλονιά και την Ιθάκη), ενώ η κακοκαιρία είχε ως αποτέλεσμα και τέσσερις ανθρώπινες απώλειες. Παράλληλα, η ένταση της βροχόπτωσης κατά το κλιματικό επεισόδιο του Ιανού είχε ως αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικών βλαβών στις υποδομές στις πληγείσες περιοχές λόγω κατολισθητικών φαινομένων (και πλημμυρών), σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα συγκριτικά με τις τυπικές βλάβες που προκαλούνται από εποχιακές κατολισθήσεις λόγω βροχόπτωσης σε αυτές τις, ούτως ή άλλως επιδεκτικές σε κατολισθήσεις, περιοχές. Οι βλάβες περιλαμβάνουν κυρίως αστοχίες φυσικών πρανών, αστοχίες τεχνητών πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων του οδικού δικτύου, δομικές καταστροφές σε υδραυλικά έργα, λοιπά τεχνικά έργα. έως γέφυρες και κτιριακά, κυρίως λόγω υποσκαφής και διάβρωσης της θεμελίωσής τους, καθώς και στις φυσικές κοίτες των ποταμών.

Η ταυτόχρονη, ραγδαία υπέρβαση των κατωφλίων βροχόπτωσης για πρόκληση κατολισθητικών και πλημμυρικών φαινομένων, η ανεπάρκεια των υδραυλικών έργων να παροχετεύσουν τις επιφανειακές ροές, καθώς και η εμφάνιση αρκετών περιπτώσεων υποσκαφών και δομικών αστοχιών στα υδραυλικά κυρίως έργα, φαίνεται πως είχαν πολλαπλασιαστική επίδραση, αυξάνοντας σημαντικά τις κοινωνικές, οικονομικές αλλά και περιβαλλοντικές συνέπειες του Ιανού. Διαφαίνεται συνεπώς ότι τα πλημμυρικά και κατολισθητικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν κατά το επεισόδιο του Ιανού, μαζί με την περίπτωση των πλημμυρών και πολυάριθμων κατολισθήσεων στο νομό Χανίων τον Φεβρουάριο του 2019 (Nefros et al., 2023, μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης >1200mm), εισάγουν στον ελληνικό χώρο περιπτώσεις έντονων κλιματικών επεισοδίων που επηρεάζουν ταυτόχρονα μια ευρεία περιοχή, υπονομεύοντας συνολικά τις υφιστάμενες υποδομές της, τα δίκτυα της και τα υφιστάμενα υδραυλικά έργα. Με δεδομένο ότι πολλές από τις υποδομές και τα υδραυλικά έργα έχουν κατασκευαστεί εδώ και αρκετές δεκαετίες με υποδεέστερες προδιαγραφές ή τιμές σχεδιασμού, εύλογα αποδεικνύονται

υποδιαστασιοποιημένα για επεισόδια αυτής της έντασης, ώστε τελικά να αυξάνεται κατακόρυφα το κοινωνικό και οικονομικό ύψος των βλαβών. Σημειώνεται ότι από σχετικά στοιχεία που αναφέρονται από τους Zekkos et. al. (2020), το ύψος των οικονομικών ζημιών από τον Ιανό εκτιμήθηκε προκαταρκτικά, και εντός μικρού διαστήματος μετά την εκδήλωση του, της τάξης των 100εκατ. USD, ωστόσο το πραγματικό ύψος είναι σίγουρα κατά πολύ υψηλότερο, με δεδομένο ότι μόνο η σχετική κεντρική σύμβαση αποκατάστασης για τις βασικές υποδομές, και μόνο για την περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας, υπερέβαινε ήδη αυτό το ποσό (https://www.imerisia.gr/oikonomia/18725_ypografetai-i-symbasi-ton-143-ekat-gia-tin-apokatastasi-ton-zimion-toy-ianoy-sti).

Η τρίτη περίπτωση μελέτης διερευνά τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατολισθητικών φαινομένων που εκδηλώθηκαν λόγω του Ιανού σε μια εστιασμένη περιοχή στο νότιο, ορεινό τμήμα του νομού Καρδίτσας, στον παλαιό Δήμο Ιτάμου, νυν Δήμο Καρδίτσας, στα νότια της λίμνης Πλαστήρα, και συγκεκριμένα μια περίπτωση πλησίον του οικισμού της Μούχας, δύο κοντινές περιπτώσεις στο οδό Καστανιά – Γιαννουσαίικα και μια περίπτωση στον ορεινό όγκο Ίταμος. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από αναγνωρισμένα υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα, λόγω του ορεινού, απότομου αναγλύφου και των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτή, κατά τα αναφερόμενα στο Κεφ. 6.1 για την κεντρική Ελλάδα.

Κάθε μία από τις τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις έχει διαφορετική γεωμετρία, κατολισθητικά χαρακτηριστικά ή επίπτωση στο οδικό δίκτυο. Ως μεμονωμένα συμβάντα δεν έχουν προφανώς τη σημασία ή το δυναμικό καταστροφικότητας των δύο προηγούμενων περιπτώσεων στον Τσιβλό και το Μικρό Χωριό, που συνδύαζαν τεράστιο όγκο μετακινούμενων υλικών με πολύ υψηλή ταχύτητα ολίσθησης και καθοριστικές συνέπειες επί του φυσικού περιβάλλοντος ή ενός οικισμού. Ωστόσο εδώ η πυκνότητα εμφάνισης πολλών συμβάντων αξιόλογης κλίμακας και διαφορετικών τύπων σε μια ευρύτερη περιοχή είναι εντυπωσιακή, καθώς τα τέσσερα παραδείγματα είναι ενδεικτικά - αντιπροσωπευτικά των πολλών δεκάδων έως εκατοντάδων αξιόλογου μεγέθους κατολισθήσεων που έλαβαν χώρα στη Δυτική Θεσσαλία λόγω του Ιανού, πρακτικά ταυτόχρονα, ενώ, συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη και μικρότερης σημασίας εδαφικές μετακινήσεις ο αριθμός των κατολισθήσεων ήταν κατά πολύ υψηλότερος (Valkaniotis et al., 2022).

9.2 Χαρακτηριστικά και Συνέπειες του Μεσογειακού Κυκλώνα «Ιανός»

9.2.1 Εισαγωγή – Στοιχεία Βροχόπτωσης

Το κλιματικό επεισόδιο του Ιανού κατατάσσεται στις περιπτώσεις μεσογειακών κυκλώνων / Medicane–Medi(terranean hurri)canes, που περιγράφουν επεισόδια με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά των τροπικών κυκλώνων, με δημιουργία ενός μεταφερόμενου αζονοσυμμετρικού σχηματισμού που ενεργοποιείται από την ενέργεια των θερμών νερών της Μεσογείου (https://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_tropical-like_cyclone). Η Ελλάδα έχει επηρεαστεί από το 1982 από έξι μεσογειακούς κυκλώνες, με αυξανόμενη συχνότητα κατά τα τελευταία χρόνια, ενώ η εμφάνισή τους είναι πιο συχνή στην κεντρική και δυτική Μεσόγειο. Παράλληλα υπάρχουν ενδείξεις ότι μελλοντικά και λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι κυκλώνες θα είναι μεγαλύτερης έντασης και διάρκειας, ακόμα και αν διατηρηθεί η τρέχουσα συχνότητά τους, ενώ ο Ιανός αποτέλεσε ένα από τα ισχυρότερα επεισόδια μεσογειακών κυκλώνων που έχουν καταγραφεί, αναφορικά με την βροχόπτωση, την ένταση, τη διάρκεια και τα τροπικά του χαρακτηριστικά (Zekkos et. al., 2020). Τα αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης 48ώρου κατά τον Ιανό αποτυπώνονται στο Σχήμα 116, βάσει των καταγραφών των μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) , με τα ύψη στη βόρεια Κεφαλονιά και την Ιθάκη να είναι ακραία (κυρίως κατά τις πρώτες 24h εξέλιξης του Ιανού), ενώ στη Ζάκυνθο, τη Λευκάδα και περιοχές της Δυτικής Θεσσαλίας εξαιρετικά υψηλά (200-300mm/48h, κυρίως κατά τις δεύτερες 24h).

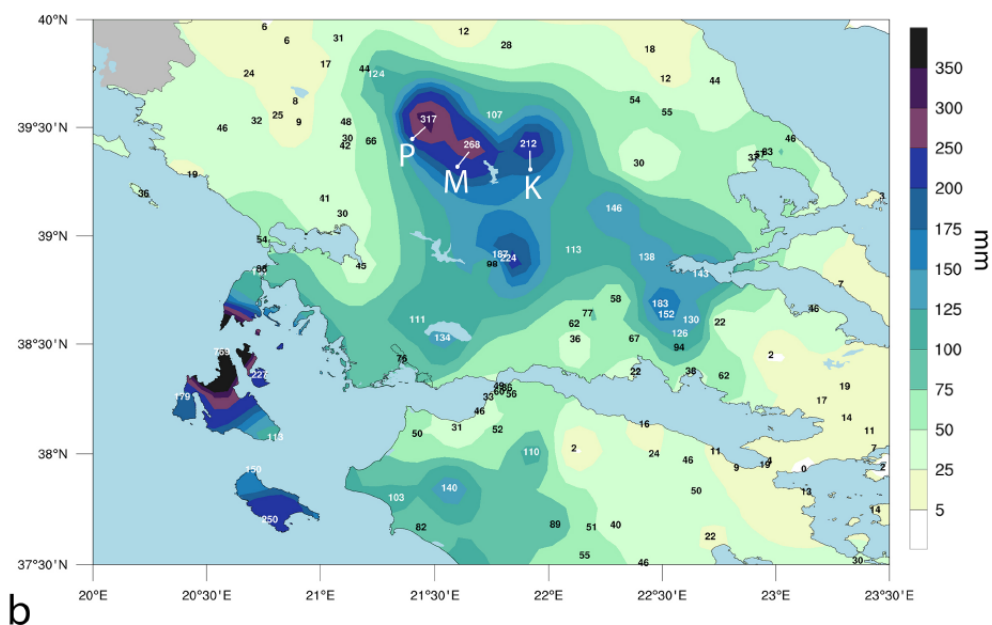
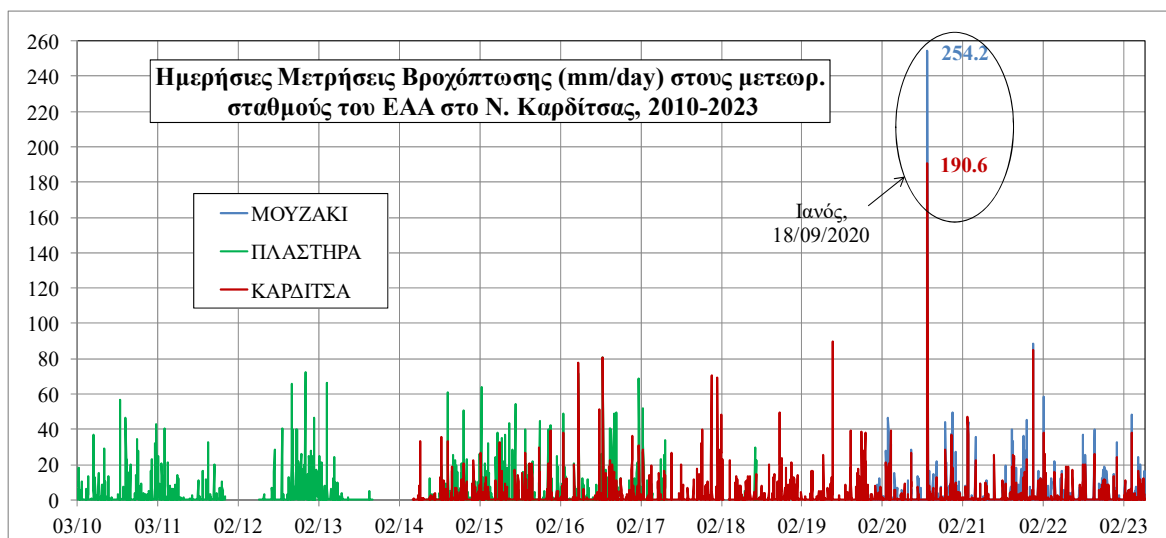


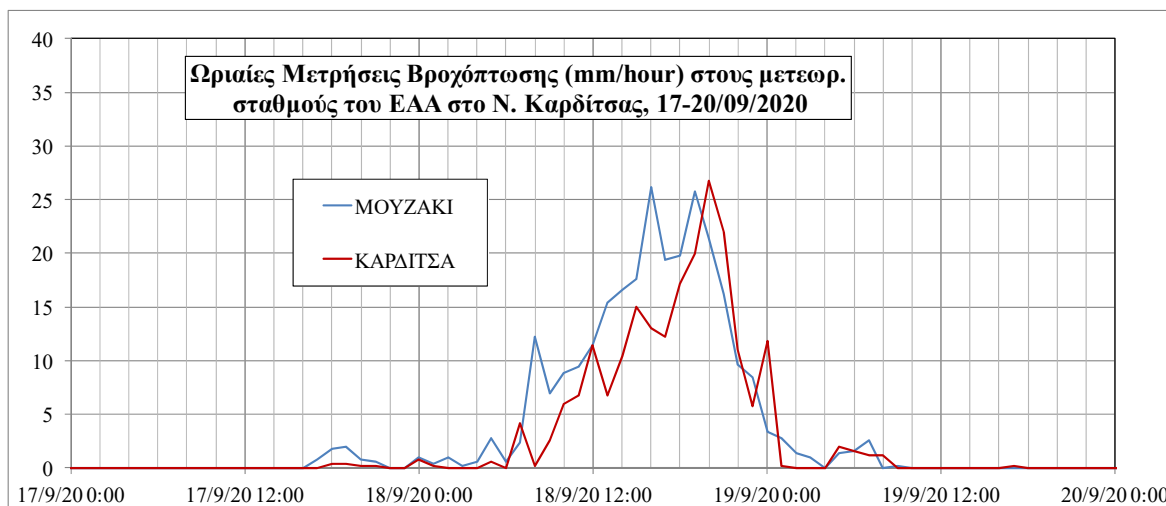
Fig. 3. (a) Total accumulated rainfall over Greece for the period spanning from 1200 UTC 17 Sep to 1200 UTC 19 Sep 2020 (48 h) and (b) zoom over central Greece, for the same period.

Σχήμα 116:
Αθροιστικά ύψη
βροχόπτωσης
48ώρου κατά τον
Ιανό (Lagouvardos
et al., 2022)

Προκειμένου να διαφανεί η κλίμακα του μεγέθους βροχόπτωσης κατά τον Ιανό, στο Σχήμα 117 αποτυπώνονται οι ημερήσιες καταγραφές σε τρεις σταθμούς του ΕΑΑ (Lagouvardos et al., 2017) στο νομό Καρδίτσας από το 2010 έως τον 05/2023 και κατά το διάστημα λειτουργίας του κάθε ενός σταθμού, ενώ . Οι καταγραφές ημέρας στις 18/09/2020 ήταν σε Μουζάκι και Καρδίτσα υπερδιπλάσιες της επόμενης μέγιστης ημερήσιας τιμής έτους που έχει καταγραφεί.



Σχήμα 117: Ημερήσιες Μετρήσεις Βροχόπτωσης σε Σταθμούς του ΕΑΑ στο νομό Καρδίτσας 2010-2023 (πηγή: <https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm>, ίδια επεξεργασία).



Σχήμα 118: Ωριαίες Μετρήσεις Βροχόπτωσης σε Σταθμούς του ΕΑΑ στο νομό Καρδίτσας κατά τον Ιανό 17-20/09/2020 (πηγή: στοιχεία ΕΑΑ μετά από επικοινωνία).

Με χρήση των «παραδοσιακών» εξισώσεων «κατώφλιου βροχόπτωσης» για την πρόκληση κατολισθήσεων (Σχήμα 50) και χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές σχέσεις για αθροιστική βροχόπτωση και ωριαία ένταση, οι μετρήσεις στους σταθμούς του ΕΑΑ στη Θεσσαλία κατά τις 24/48h του Ιανού ξεπερνούν το κατώφλι γενικά όλων των βιβλιογραφικών

προτάσεων εξισώσεων, υπερβαίνοντας τη σημασία των τοπικών χαρακτηριστικών, της φυτοκάλυψης, των λιθολογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών, και των λοιπών σχετιζόμενων παραγόντων (Σχήμα 119).

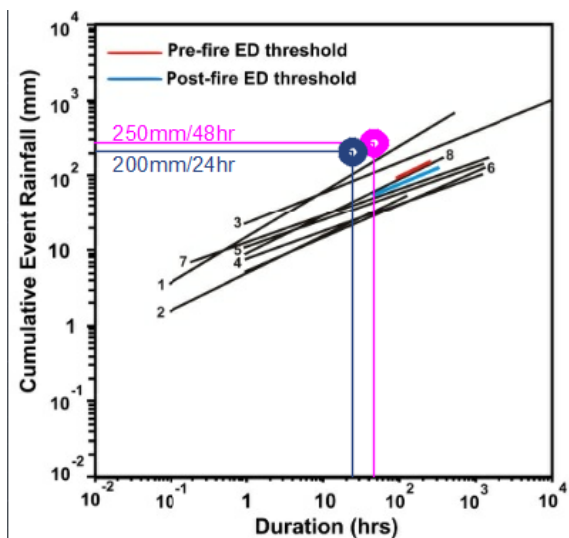


Fig. 8 Comparison of cumulative event rainfall-duration (ED) thresholds for post fire (blue line) and pre-fire (red line) conditions with global and selected regional thresholds. Sources: 1 Caine (1980); 2 Innes (1983); 3 Kanji et al. (2003); 4–6 Peruccacci et al. (2012); 7 Peruccacci et al. (2012) (by Brunetti et al. 2010); 8 Vennari et al. (2014)

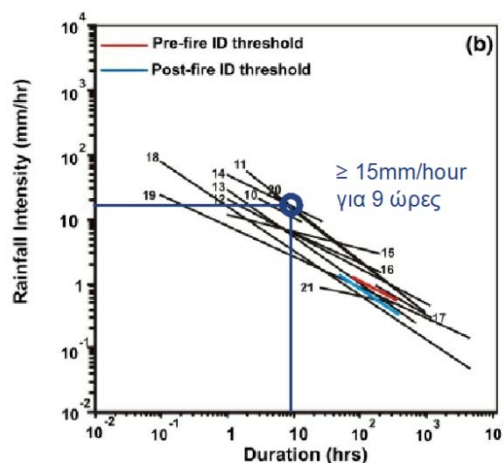


Fig. 7 Comparison of intensity-duration (ID) thresholds for post fire (blue line) and pre-fire (red line) conditions with a global and b regional thresholds. Sources: 1 Caine (1980); 2 Innes (1983); 3 Jibson (1989); 4 Clarizia et al. (1996); 5 Crosta and Frattini (2001); 6 Cannon and Gartner (2005); 7–9 Guzzetti et al. (2008); 10 Jibson (1989); 11 Larsen and Simon (1993); 12 Ceriani et al. (1992); 13 Calcaterra et al. (2000); 14 Paronuzzi et al. (1998); 15 Ahmad (2003); 16 Alleoti (2004); 17 Corominas et al. (2005); 18–19 Guzzetti et al. (2007); 20 Dahal and Hasegawa (2008); 21 Kanungo and Sharma (2014)

Σχήμα 119: Καταγραφές Βροχόπτωσης ως προς τις Εξισώσεις Κατωφλιού Πρόκλησης Κατολισθήσης, βάσει αθροιστική βροχόπτωσης (αριστερά) και ωριαίας έντασης (δεξιά) (Πηγή διαγραμμάτων: Lainas et al., 2015)

Επιπλέον, ειδικά στην εξεταζόμενη ορεινή περιοχή του Ν. Καρδίτσας, η άμεση συσχέτιση μεταξύ της βροχόπτωσης, στη βάση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης, και της εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων έχει διερευνηθεί και τεκμηριωθεί (Pyrgiotis et. al., 2007, Σχήμα 120), λόγω και της παρουσίας φλυσχικών σχηματισμών, με εγγενείς εναλλαγές και ιδιαιτερότητες στα χαρακτηριστικά και την υδροπερατότητα.

Συμπερασματικά η βροχόπτωση κατά την εκδήλωση του Ιανού στο Ν. Καρδίτσας ήταν τέτοια, ώστε να δικαιολογείται και να αναμένεται η πρόκληση πολυάριθμων κατολισθητικών φαινομένων σε μεγάλη έκταση. Αυτό αποτυπώθηκε και από τη σχετική ερευνητική υπηρεσία της NASA (<https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html>) για εκτίμηση της κατολισθητικής διακινδύνευσης σε πραγματικό χρόνο (Landslide Hazard Analysis for Situational Awareness – LHASA, Κεφ. 5.1) βάσει των στοιχείων της ημερήσιας και αθροιστικής βροχόπτωσης και της εδαφική υγρασία, όπου εκτιμήθηκε ως πολύ υψηλή η πιθανότητα εκδήλωσης φαινομένων σε πολύ μεγάλη έκταση (Σχήμα 121).

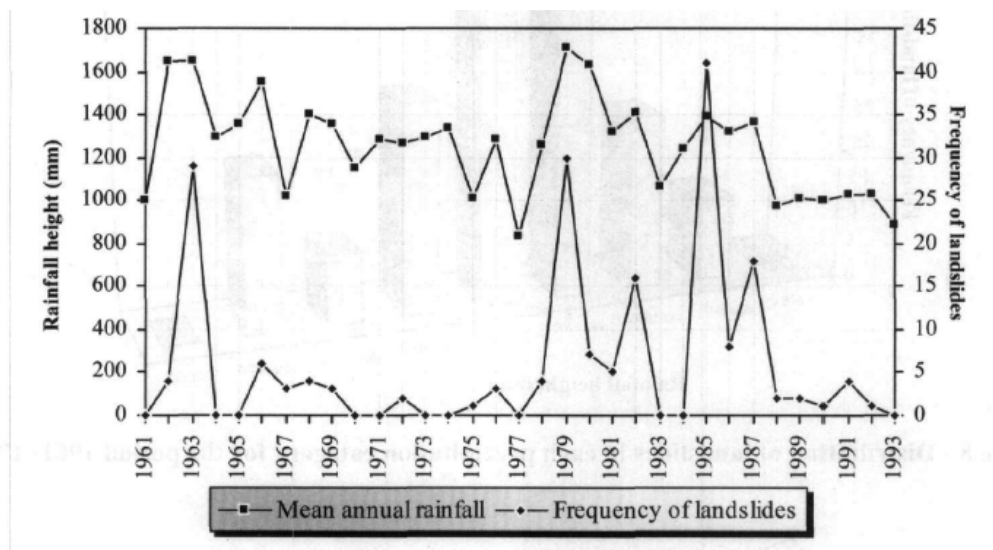


Figure 10 - Combined diagram showing the course of landslides and precipitation in the mountainous region of the county for the period 1961-1993

Σχήμα 120: Συσχέτιση Ετήσιας Βροχόπτωσης με Συχνότητα Εκδήλωσης Κατολισθήσεων στην ορεινή Καρδίτσα (πηγή: Pyrgiotis et. al., 2007).

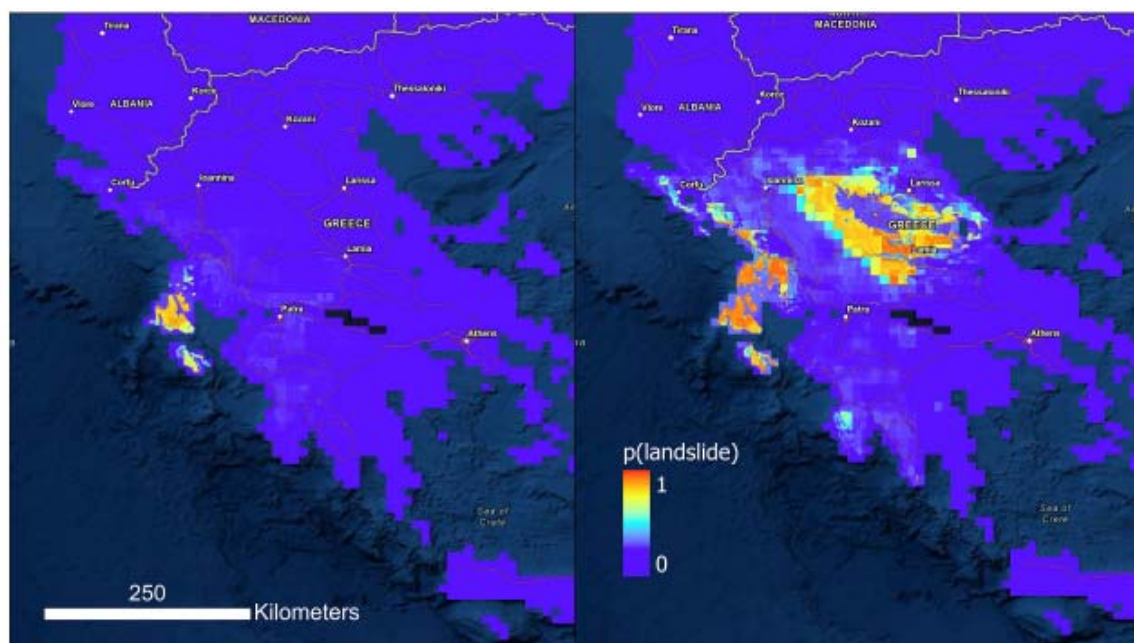


Figure 3.6. 1-day LHASA model landslide probability predictions for September 17 and September 18, 2020. (UTC)

Σχήμα 121: Κατολισθητική Πιθανότητα κατά τη διάρκεια του Ιανουά, βάσει υπηρεσίας LHASA της NASA (πηγή: Zekkos et al., 2020)

9.2.2 Κατολισθητικά Φαινόμενα κατά τον Ιανό

Η πρώτη αναλυτική καταγραφή των επιπτώσεων του Ιανού αποτυπώθηκε στην έκθεση ευρημάτων από την εκτεταμένη αναγνώριση των πληγείσων περιοχών, που διεξήχθη υπό την αιγίδα του διεθνούς Οργανισμού Γεωτεχνικής Αναγνώρισης Ακραίων Συμβάντων

(GEER, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association, Έκθεση 68, Zekkos et. al., 2020). Κατά την αναγνώριση αυτή, πολλαπλές ομάδες γεωεπιστημόνων διαφορετικής εξειδίκευσης επισκέφθηκαν λίγες ημέρες μετά το επεισόδιο τις βασικότερες (προσβάσιμες, καθώς πολλές παρέμειναν αποκλεισμένες) πληγείσες περιοχές και κατέγραψαν τα πρωταρχικά τους ευρήματα.

Οι βλάβες στη σχετική έκθεση ταξινομούνται ανά εξεταζόμενη περιοχή (Κεφαλονιά, περιοχή Καρδίτσας, περιοχή Λαμίας) και ανά επίπτωση βλάβης, ως ακολούθως:

- Αστοχίες Γεφυρών, κυρίως λόγω υποσκαφής των βάθρων ή των επιχωμάτων πρόσβασης: Μία γέφυρα στην Κεφαλονιά, και τουλάχιστον έξι γέφυρες στα ορεινά τμήματα του νομού Καρδίτσας, κυρίως προς το Μουζάκι.
- Καταστροφή Οδικού Δικτύου, κυρίως λόγω καταπτώσεων / αστοχιών από τεχνητά ορύγματα ή αστοχία επιχωμάτων: Πολυάριθμες θέσεις και στις τρεις περιοχές.
- Καταστροφή Σιδηροδρομικού Δικτύου: Τουλάχιστον τρεις θέσεις σοβαρής υποσκαφής και διάβρωσης του έρματος στις γραμμές Καλαμπάκα-Παλαιοφάρσαλος και Παλαιοφάρσαλος-Λάρισα και στο Σιδηροδρομικό Σταθμό Μαγούλας.

Εκτεταμένα Κατολισθητικά Φαινόμενα, που περιλαμβάνουν:

(i) Ολισθήσεις περιστροφικού τύπου ή επί σύνθετης επιφάνειας, σε εδαφικούς και διατμημένους-αποσαθρωμένους βραχώδεις σχηματισμούς. Πολυάριθμες περιπτώσεις κυρίως στα ορεινά τμήματα του Ν. Καρδίτσας, με μεγαλύτερη πυκνότητα στην περιοχή του Αμάραντου και στην περιοχή των Αγράφων στα δυτικά της λίμνης Πλαστήρα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις επηρεάστηκαν και τμήμα εντός οικισμών (π.χ. Ραφήνα, Αμάραντος). Στο Σχήμα 122 παρουσιάζεται σχετικός χάρτης αποτύπωσης των συμβάντων, όπως αυτά αναγνωρίστηκαν (Valkaniotis et al., 2022) από την παράθεση δορυφορικών εικόνων (Copernicus Sentinel-2).

Οι περισσότερες περιπτώσεις κατολισθήσεων αναφέρονται σε σχετικά επιφανειακές κινήσεις μικρής κλίμακας, με μετακίνηση υλικών σε αποστάσεις της τάξης των 10-20m, εκδηλωνόμενες κυρίως (~80%) σε φλυσχικούς σχηματισμούς, αποσαθρωμένους ή / και με παρουσία ιλυολίθων ή αργιολίθων.

(ii) Βραχοκαταπτώσεις ή ολισθήσεις επίπεδης – σφηνοειδούς μορφής. Συγκριτικά λιγότερες περιπτώσεις, εμφανιζόμενες κυρίως στα πιο βραχώδη τεχνητά πρανή της περιοχής Αργιθέας, πέριξ της λίμνης Πλαστήρα και προς το Καρπενήσι.

(iii) Ροές κορημάτων. Εκτεταμένες ροές πολύ μεγάλων όγκων στον Άσσο και το

Φισκάρδο Κεφαλονιάς (λόγω και των ακραίων τιμών βροχόπτωσης στη βόρεια Κεφαλονιά), συγκριτικά πιο περιορισμένα, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις αξιόλογα φαινόμενα στην περιοχή της Καρδίτσας και της Λαμίας.

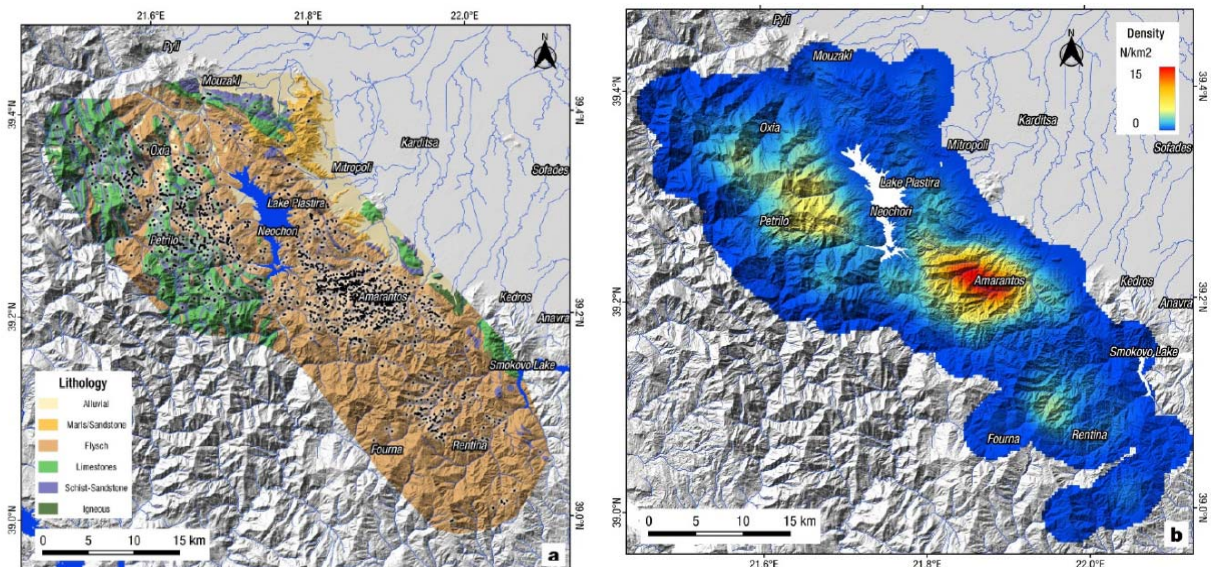


Figure 3. (a) Mapped landslides (black dots) triggered by Medicane Ianos during 17–19 September 2020, and simplified lithology of the area (see text for references). (b) Density map of Ianos landslides (using a radius of 1000 m); two major concentrations of landslides west of Lake Plastira and around Amaranos village.

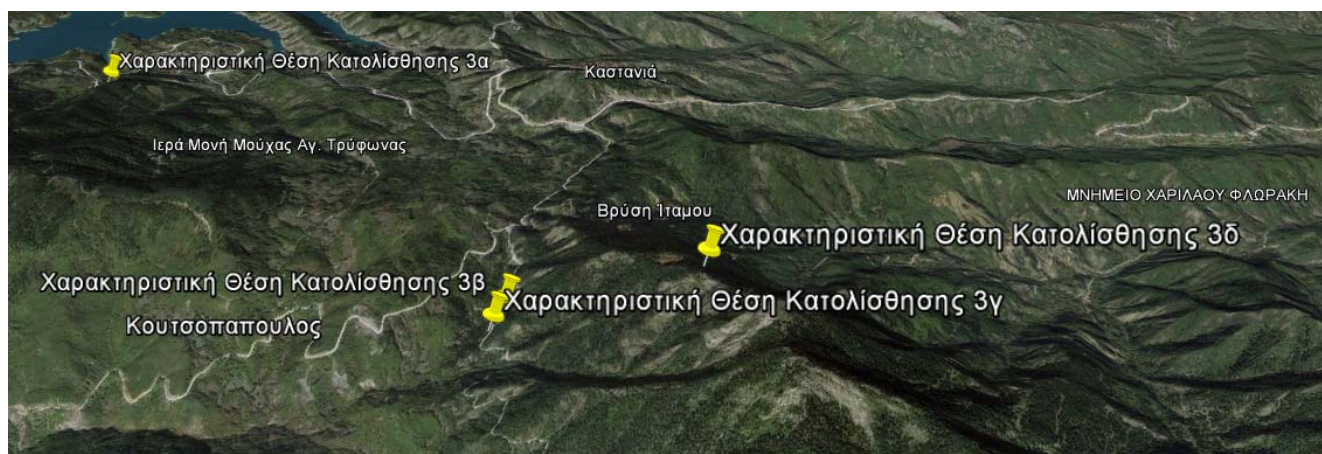
Σχήμα 122: Χάρτης Κατολισθήσεων και Πυκνότητας κατολισθήσεων στην περιοχή της Καρδίτσας κατά τον Ιανό, βάσει δορυφορικών εικόνων (πηγή: Valkaniotis et al., 2022)

- Διαβρώσεις και υποσκαφές στις κοίτες και διευθετήσεις ποταμών: Φαινόμενα αξιόλογης κλίμακας στην Κεφαλονιά και τη Λευκάδα, στον π. Σπερχειό στην περιοχή Λαμίας, αλλά και στην περιοχή Καρδίτσας και κυρίως στο Μουζάκι, όπου πέραν της προαναφερθείσας αστοχίας των γεφυρών, κατέρρευσε πλήρως το Κέντρο Υγείας Μουζακίου, λόγω αστοχίας του παραποτάμιου επιχώματος, επί του οποίου είχε θεμελιωθεί.
- Σύστημα Αντιπλημμυρικής Προστασίας νότιου τμήματος πόλης Καρδίτσας: Το σύστημα αποδείχθηκε ανεπαρκές ως προς τον υδραυλικό σχεδιασμό του για αποτροπή της πλημμύρας, καθώς τα τεχνικά του δεν υπέστησαν μεν δομικές βλάβες, αλλά είχαν ανεπαρκείς διατομές και υπερκαλύφθηκαν από τα πλημμυρικά ύδατα, ενώ και στα αναχώματά του σημειώθηκαν αστοχίες.

9.3 Χαρακτηριστικές Περιπτώσεις Κατολισθητικά Φαινόμενα λόγω του Ιανού (Μούχα, Καστανιά – Γιαννουσαίικα, Ίταμος)

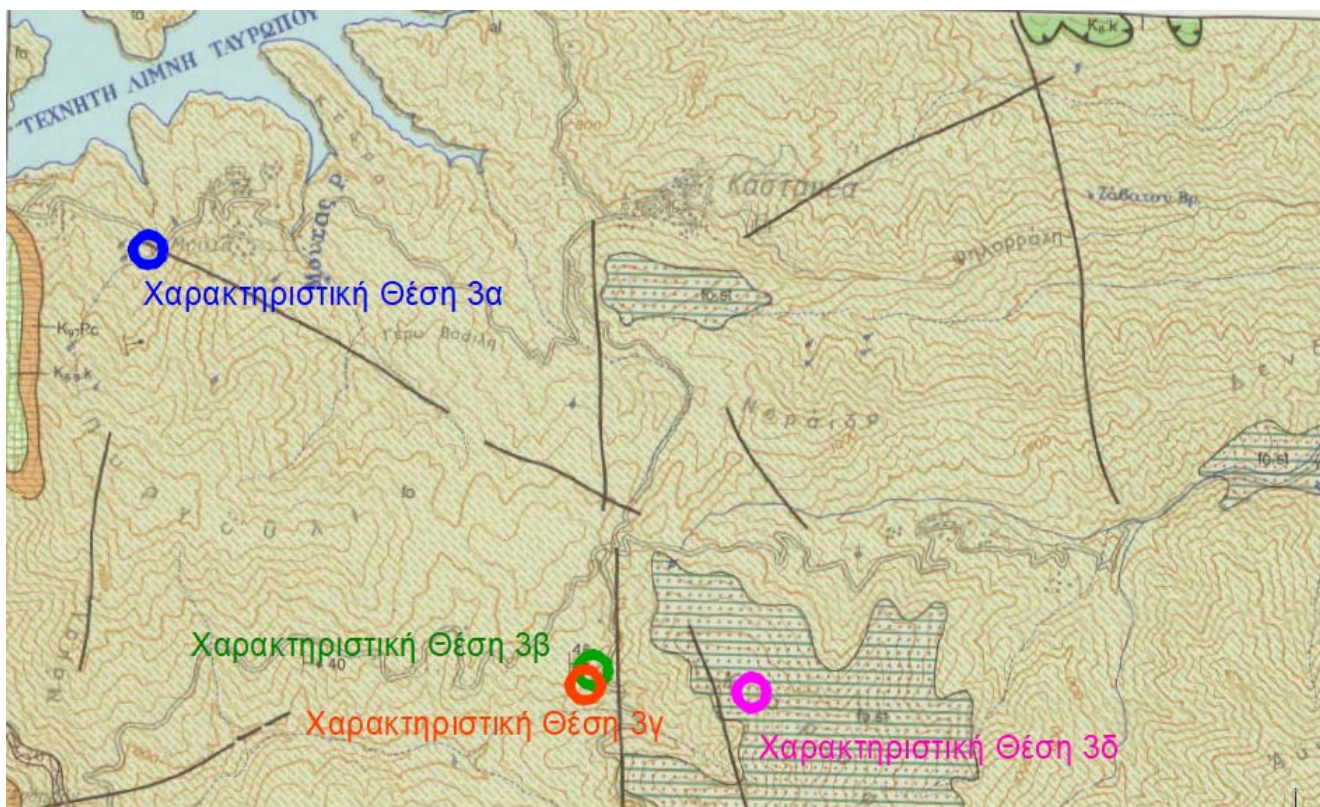
9.3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται και διερευνώνται τέσσερις χαρακτηριστικές και αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων, μεταξύ των πολλών δεκάδων ή εκατοντάδων περιπτώσεων λόγω του Ιανού, με εστίαση σε μια γεωγραφικά πιο περιορισμένη περιοχή, στα νότια της λίμνης Πλαστήρα. Οι θέσεις των τεσσάρων περιπτώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 123 επί υποβάθρου google earth και στο Σχήμα 124 επί του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ «Φουρνάς».



Σχήμα 123: Θέσεις Εξεταζόμενων Χαρακτηριστικών Κατολισθήσεων με υπόβαθρο google earth

Στην ευρύτερη περιοχή επικρατεί πλήρως ο σχηματισμός του φλύσχη, συνεπώς οι τρεις πρώτες χαρακτηριστικές θέσεις 3α – 3γ, σε χαμηλότερα υψόμετρα (περιοχή οικισμού Μούχας, οδός Καστανιά – Γιαννουσαίικα), εντάσσονται σε μια ζώνη υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας, ιδιαίτερα όπου εμφανίζεται επικλινές ανάγλυφο με δυσμενή λιθοστρωματογραφία, αυξημένο τεκτονισμό και αποσάθρωση, και με δεδομένο το υψηλό δυναμικό βροχοπτώσεων στην περιοχή. Οι ιδιαιτερότητες των φλύσχικών σχηματισμών και η υψηλή επιδεκτικότητάς τους σε κατολισθητικά φαινόμενα στον ελληνικό χώρο έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές (ενδεικτικά Πυργιώτης, 1997, ειδικά για το φλύσχη του Ν. Καρδίτσας), ενώ αποτελεί το σχηματισμό με τη μεγαλύτερη αναλογία εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στον ελληνικό χώρο (Κεφ. 6.2.2, Σχήμα 84). Η τέταρτη χαρακτηριστική θέση 3δ, σε μεγάλο υψόμετρο, βρίσκεται σε περιοχή όπου επικρατεί η βραχώδης, ψαμμιτική φάση του φλύσχη.



Σχήμα 124: Θέσεις Εξεταζόμενων Χαρακτηριστικών Κατολισθήσεων επί του γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, Φύλλο «Φουρνάς»

9.3.2 Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3α – Πλησίον Οικισμού Μούχα

Η χαρακτηριστική θέση κατολίσθησης 3α αφορά φαινόμενο πλησίον του οικισμού Μούχα, στη δυτική είσοδο του, με χαρακτηριστικότερη ένδειξη την εμφάνιση επάλληλων, τοξοειδών, ανοικτών ρωγματώσεων στο οδόστρωμα της οδού του οικισμού, παράλληλων με τον άξονα της οδού σε ένα μήκος περί τα 60m, καθώς και την έντονη παραμόρφωση και καθίζηση του οδοστρώματος. Οι ρωγματώσεις πιθανότατα οριοθετούν τη στέψη της εκδηλωθείσας κατολίσθησης, η οποία εκτείνεται προς τα κατάντη της οδού και έως το επίπεδο της μισγάγγειας (Σχήμα 125, Σχήμα 126).

Από την τεχνικογεωλογική – γεωτεχνική διερεύνηση της κατολίσθησης προέκυψαν τα ακόλουθα ευρήματα (Ατένεια, 2022a):

- Υπάρχουν ενδείξεις ότι τα φαινόμενα διάβρωσης και ασταθειών στην εξεταζόμενη θέση ήταν χρόνια και προϋπήρχαν του επεισοδίου του Ιανού, ωστόσο οι συνθήκες που διαμορφώθηκαν κατά τον Ιανό υποβάθμισαν γρήγορα τις συνθήκες ευστάθειας στο τεχνητό πρανές και το υποκείμενο φυσικό πρανές προς τη μισγάγγεια, υπό την έννοια της υπερβάλλουσας ροής στο ρέμα, της διάβρωσης του πόδα του πρανούς του επιχώματος της οδού, της διαβροχής στην επιφάνεια του πρανούς και στην έδραση

του τεχνικού του εγκάρσιου οχετού, καθώς και του απότομου υδροεμποτισμού του υπεδάφους. Αποτέλεσμα της αστάθειας ήταν η παραμόρφωση στα υποκείμενα της οδού γεωυλικά, που αποτυπώνεται και επιφανειακά, με τις ρωγματώσεις στο οδόστρωμα. Επιπλέον, κατά το επόμενο του Ιανουάριου χρονικό διάστημα, το φαινόμενο εξελίχθηκε, με περαιτέρω αύξηση του ανοίγματος των ρωγμών του οδοστρώματος.

- Στην εξεταζόμενη θέση η οδός έχει κατασκευαστεί σε επίχωμα μέσου ύψους 6m έως 9m, με την έδραση του περί τα 5m ανάντη της κοίτης του ρέματος. Το φυσικό έδαφος έδρασης του επιχώματος αποτελείται από υλικά του ελουβιακού μανδύα αποσάθρωσης του φλύσχη, προερχόμενα από την επιτόπου αποσάθρωση του υποκείμενου φλύσχη, με κυρίως αμμοίλυδη σύσταση και διατήρηση σχετικά απότομων κλίσεων 2:3 (υ:β) έως 1:1 (υ:β). Σε μεγαλύτερο βάθος συναντάται ιλυολιθικός φλύσχος, χαμηλής αντοχής, με μικρές παρεμβολές ψαμμιτών. Από το αυξημένο πάχος του ελουβιακού μανδύα και τα τοπικά πτωχά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, πιθανολογείται η ύπαρξη ρήγματος κατά μήκος της μισγάγγειας, όπως επιβεβαιώνεται και από τους σχετικούς τεκτονικούς χάρτες.
- Πέραν της βασικής ολίσθησης στη ζώνη εκατέρωθεν της περιοχής που η οδός τέμνει τη μισγάγγεια, παρατηρήθηκαν και άλλες, δευτερεύουσας σημασίας, αστάθειες, τόσο στα ανάντη πρηνή της οδού, επιφανειακού τύπου εντός του φλυσχικού μανδύα αποσάθρωσης, όσο και στα κατάντη φυσικά πρηνή του ρέματος, καθώς και διαβρώσεις και υποσκαφές στις θέσεις ροής των υδραυλικών έργων.
- Στην περιοχή διενεργήθηκε τεχνικογεωλογική αποτύπωση και γεωτεχνική έρευνα με μία γεώτρηση (Ατένεια, 2021), εντός της οποίας εγκαταστάθηκε κλισιόμετρο. Από τις μετρήσεις του κλισιομέτρου επιβεβαιώθηκε άμεσα η συνεχιζόμενη εξέλιξη της μετακίνησης και το ακριβές βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (Σχήμα 126β).



(α) Ανοικτές, παράλληλες, τοξοειδείς Ρωγμές στο Οδόστρωμα (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



(β) Υποσκαφή και Δομική Αστοχία Υδραυλικών Έργων Οδού (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



(γ) Διάταξη Ολισθαίνοντος Τεχνητού και Φυσικού Πρανούς (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



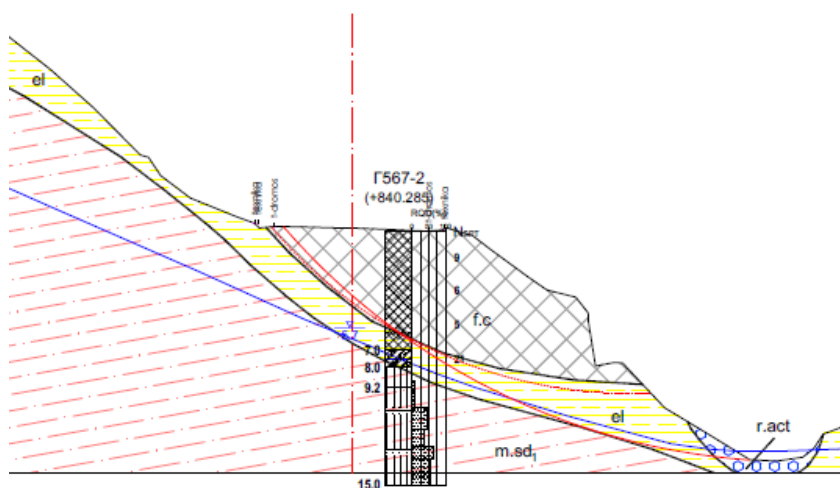
(δ) Επιφανειακές Αστάθειες στο ανάντη της Οδού φυσικό πρανές (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



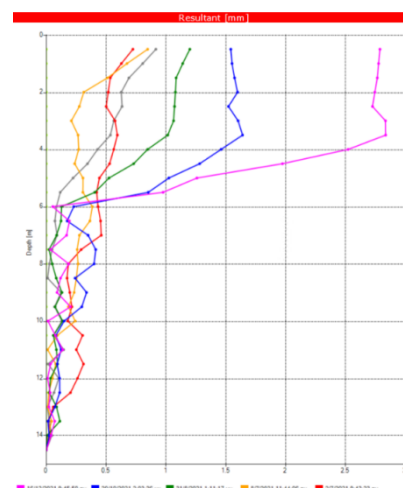
(ε) Αεροφωτογραφία Εξεταζόμενης Θέσης (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).

Σχήμα 125: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση 3α - Κατολίσθηση πλησίον του οικισμού Μούχα.

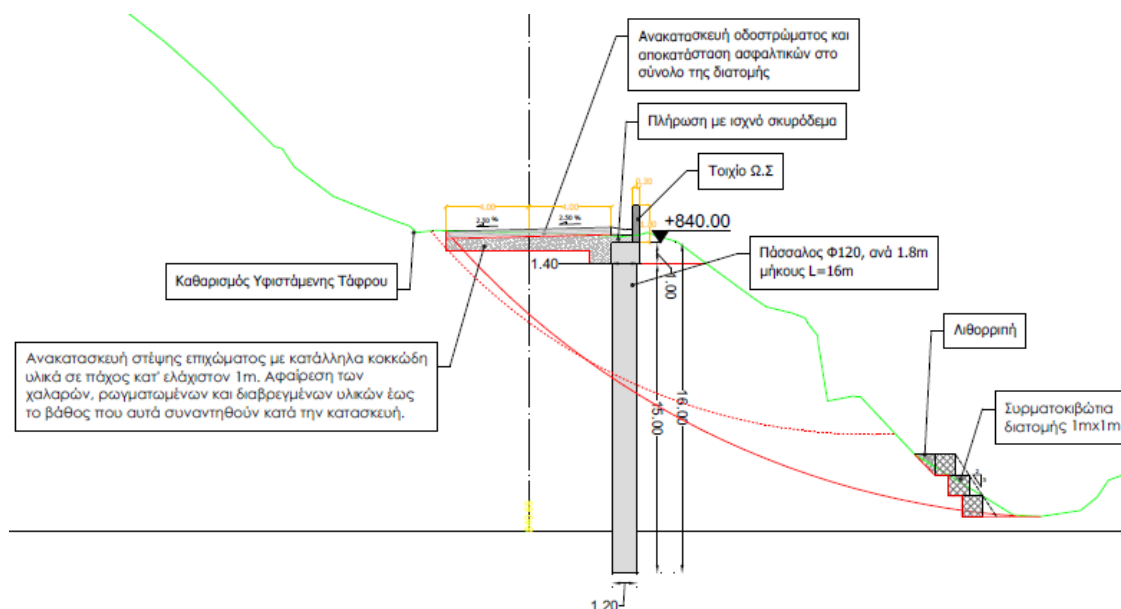
Η εκπονηθείσα μελέτη γεωτεχνικής αποκατάστασης (Ατένεια, 2022a) αποσκοπούσε στη μέγιστη δυνατή εξασφάλιση της οδού και τον περιορισμό της εκδηλωνόμενης ολίσθησης, με διασφάλιση της ευστάθειας κατά την κατασκευή και σε μακροχρόνιες συνθήκες, ενώ προκρίθηκε για λόγους ασφαλείας η ελαχιστοποίηση των κατασκευαστικών παρεμβάσεων στην ολισθαίνουσα περιοχή των πρανών της κοίτης.



(α) Τεχνικογεωλογική Διατομή και Γεώτρηση στην εξεταζόμενη Θέση (Πηγή: Ατένεια, 2022a).



(β) Ευρήματα Κλισιομέτρου (Πηγή: Ατένεια, 2022a).



(γ) Διατομή με προτεινόμενα μέτρα γεωτεχνικής αποκατάστασης (Πηγή: Ατένεια, 2022a).

Σχήμα 126: Στοιχεία σχετικά με τη Διερεύνηση και την Πρόταση Αποκατάστασης στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3a πλησίον του οικισμού Μούχα.

Από τη στιγμή που το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, οριοθετούμενο από την κατακόρυφη διαφορά στάθμης μεταξύ του επιπέδου της οδού και της κοίτης δεν είναι πολύ μεγάλο, προτιμήθηκε ως βέλτιστη η πρόταση κατασκευής πασσαλότοιχου

παράλληλα με το κατάντη όριο της οδού, μήκους ~75m, αποτελούμενος από σχετικά πυκνά διατεταγμένους πασσάλους, επαρκούς σε κάθε περίπτωση μήκους, συνδεδεμένους με κεφαλόδεσμο, ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή του με ασφάλεια από το επίπεδο της οδού, να υποστηριχθεί το πρανές και να διακοπεί άμεσα η εδαφική κίνηση, αλλά και να αντιμετωπιστούν οριστικά μελλοντικές αστάθειες. Παράλληλα, η πρόταση αποκατάσταση συνοδεύεται από την επισκευή των υφιστάμενων και κατασκευή νέων υδραυλικών έργων και τάφρων, στα ανάντη και τα κατάντη της οδού, βαθειά ανακατασκευή του οδοστρώματος με κατασκευή στρώσης εξυγίανσης μεγάλου πάχους, καθώς και διαμόρφωση της κοίτης στην περιοχή του πασσαλότοιχου με συρματοκιβώτια, για αποφυγή μελλοντικών διαβρώσεων και αποκάλυψης των πασσάλων στον πόδα του πρανούς, στην περιοχή της μισγάγγειας.

9.3.3 Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β – Οδός Καστανιά – Γιαννουσαίικα

Η χαρακτηριστική θέση κατολίσθησης 3β αφορά περίπτωση εκτεταμένων επιφανειακών ολισθήσεων – εδαφικής ροής στο ανάντη πρανές της οδού Καστανιά – Γιαννουσαίικα, που προκάλεσαν τη διακοπή της κυκλοφορίας της οδού για μεγάλο διάστημα. Το συγκεκριμένο κατολισθητικό συμβάν είχε αξιολογηθεί στην εκτεταμένη αναγνώριση των πληγείσων από τον Ιανό περιοχών, υπό την αιγίδα του διεθνούς Οργανισμού Γεωτεχνικής Αναγνώρισης Ακραίων Συμβάντων, λίγες ημέρες μετά την εκδήλωση του Ιανού, και έχει συμπεριληφθεί στη σχετική έκθεση (Zekkos et al., 2020). Σημειώνεται ότι η αναγνώριση δεν είχε προχωρήσει περαιτέρω προς Γιαννουσαίικα, λόγω του αποκλεισμού της οδού σε αυτό το σημείο. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κατολισθητικής παθολογίας της θέσης 3β είναι η εκδήλωση των ολισθήσεων και ροών σε εκτεταμένο μήκος και πλάτος, εντός πλατιάς μισγάγγειας στο ανάντη της οδού πρανές, με αποτέλεσμα τον μεγάλο όγκο μετακινούμενων υλικών, συμπεριλαμβανομένων και κορμών δέντρων, λόγω των οποίων η οδός παρέμεινε κλειστή για μεγάλο διάστημα μετά την εκδήλωση του Ιανού, αλλά και τον σχετικά επιφανειακό χαρακτήρα εκδήλωσης των μετακινήσεων.

Από την τεχνικογεωλογική – γεωτεχνική διερεύνηση της κατολίσθησης προέκυψαν τα ακόλουθα ευρήματα (Ατένεια, 2022b & 2022c):

- Οι ολισθήσεις εκδηλώθηκαν στα υλικά του επιφανειακού μανδύα του ιλυολιθικού φλύσχη, που εντοπίζεται στη θέση αυτή με κάποιο βάθος και ισχυρή αποσάθρωση, κυρίως επί του φυσικού πρανούς στα ανάντη του μικρού ύψους τεχνητού πρανούς και παρά τη δενδροκάλυψή του. Εκτιμάται ότι η ολίσθηση εκδηλώθηκε άμεσα και

με αυξημένη ταχύτητα μετακίνησης, ως αποτέλεσμα της απότομης κλίσης και του ταχύ υδροεμποτισμού των υλικών του μανδύα από την έντονη βροχόπτωση.



Figure 6.7. Complex slide (rotational and earth slide) in shale dominant flysch. The slipped material has completely covered the road (39.2116910°N, 21.7942940°E)

(α) Θέση εκτενούς επιφανειακής ολίσθησης λίγο μετά τον Ιανό, αποκλεισμός οδού Καστανιά – Γιαννουσαίικα (πηγή: Zekkos et al., 2020)



(β) Θέση εκτενούς επιφανειακής ολίσθησης μετά την πρόχειρη αποκατάσταση της οδού (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021)



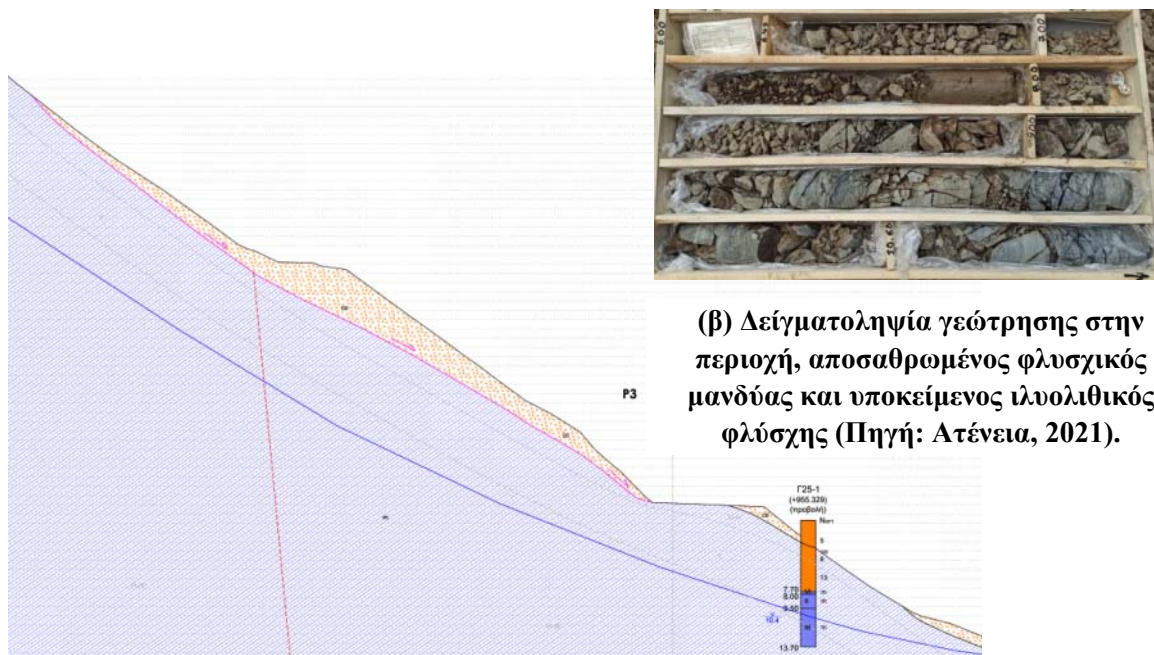
(γ) Αεροφωτογραφία Εξεταζόμενης Θέσης (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021)

Σχήμα 127: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίικα.

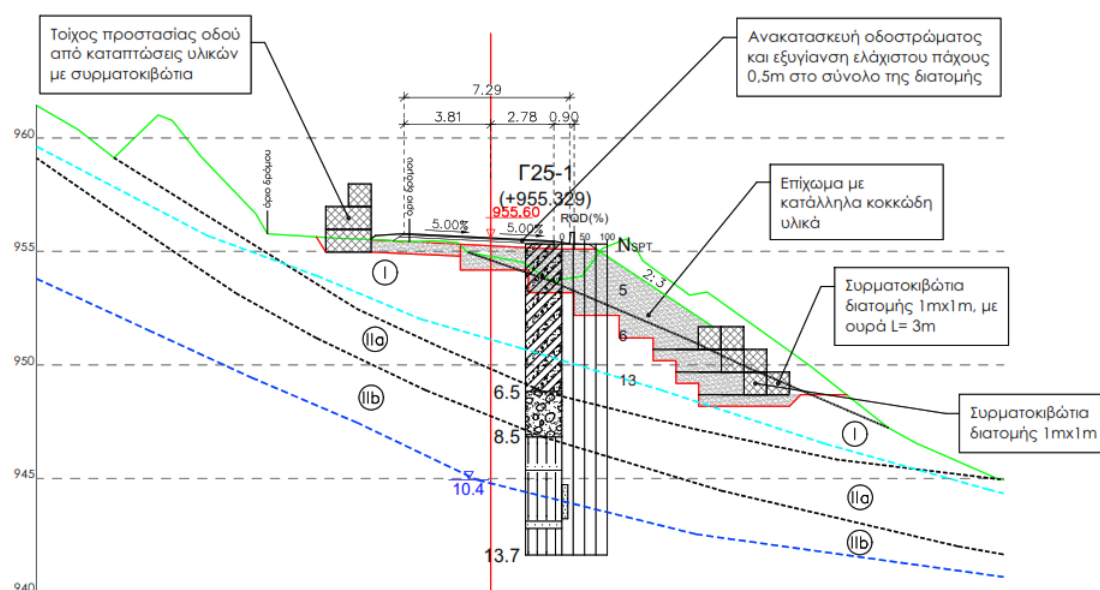
- Το ύψος της περιοχής των ολισθήσεων προσδιορίζεται έως και 70m πάνω από το επίπεδο της οδού και σε οριζόντια απόσταση της τάξης των 100m, με πλάτος έως και 60m. Πολλά από τα μετακινούμενα υλικά παρέμειναν μετά την ολίσθηση επί του πρανούς, σε χαλαρή και αναμοχλευμένη διάταξη, ενώ άλλα κατέληξαν στο

οδόστρωμα της οδού ή στα κατάντη αυτής, χωρίς να προκαλούν ζητήματα ασταθειών στα εκεί φυσικά πρανή.

- Στην περιοχή υπήρχε υδραυλικός οχετός σχετικά μικρής διαμέτρου, που δεν ήταν δυνατόν να παροχετεύσει τις αυξημένες επιφανειακές υδάτινες ροές, εμπλουτισμένες με φερτά υλικά. Η αδυναμία λειτουργίας του οχετού επέτεινε τον κορεσμό στα γεωυλικά στη βάση του πρανούς, στα ανάντη της οδού.



(α) Τεχνικογεωλογική Διατομή και Γεώτρηση στην εξεταζόμενη Θέση (Πηγή: Ατένεια, 2022c).



(γ) Διατομή με προτεινόμενα μέτρα γεωτεχνικής αποκατάστασης (Πηγή: Ατένεια, 2022b).

Σχήμα 128: Στοιχεία σχετικά με τη διερεύνηση και την πρόταση αποκατάστασης στην Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3β στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίικα.

- Πέραν της τεχνικογεωλογικής αποτύπωσης στην περιοχή εκτελέστηκε και γεωτεχνική έρευνα με μία γεώτρηση, για την ακριβέστερη εκτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών και παραμέτρων στην περιοχή (Ατένεια, 2021, Σχήμα 127β).

Για τη γεωτεχνική αποκατάσταση στην συγκεκριμένη θέση εκπονήθηκε σχετική μελέτη (Ατένεια, 2022b), με στόχευση τη μόνιμη αποκατάσταση της οδού και την προστασία της από μελλοντικά κατολισθητικά φαινόμενα από το ανάντη πρανές. Τα μέτρα που προκρίθηκαν περιλαμβάνουν την πλήρη αφαίρεση των υπολειμματικών, φερτών υλικών που παραμένουν επί του ανάντη πρανούς, αλλά και των χαλαρών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόχειρη αποκατάσταση της κυκλοφορίας της οδού, τη μικρή οριζοντιογραφική παραλλαγή της χάραξης της οδού της τάξης των 5m, ώστε να απομακρυνθεί κατά το δυνατόν το οδόστρωμα από το επισφαλές πρανές, την ανακατασκευή του χωματουργικού έργου διέλευσης της οδού, με νέο επίχωμα και ενίσχυση στη βάση του με συρματοκιβώτια και μικρή όπλιση, την αποκατάσταση των υφιστάμενων και την κατασκευή συμπληρωματικών υδραυλικών έργων εκατέρωθεν της οδού και την κατασκευή τοίχου συρματοκιβωτίων στη βάση του ανάντη πρανούς, για την προστασία έναντι μελλοντικών εδαφικών ολισθήσεων, περαιτέρω ενισχυμένου στις κρίσιμες θέσεις εισόδου των υδραυλικών έργων.

9.3.4 Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ – Οδός Καστανιά – Γιαννουσαίκα

Η χαρακτηριστική θέση κατολίσθησης 3γ αφορά θέση πολύ κοντά στη παραπάνω θέση 3β, ομοίως στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίκα, και αφορά επανενεργοποίηση παλαιάς κατολίσθησης, η στέψη της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται στο επίπεδο της οδού. Η ολίσθηση στην εξεταζόμενη θέση χαρακτηρίζεται σημαντικού μήκους και πλάτους, αλλά και μεγάλου βάθους, εκτιμώμενου έως και τα 25m, καθώς συναντούνται στην περιοχή ασθενείς φλυσχικοί σχηματισμοί σε μεγάλα πάχη.

Η παθολογία περιλαμβάνει επάλληλες, διαδοχικές αστάθειες και θραύσεις στα φυσικά, απότομα πρανή κατάντη της οδού και έως το επίπεδο της μισγάγγειας, με την παραμόρφωση να εκδηλώνεται και στο οδόστρωμα, με ρωγματώσεις σε αυτό, οι οποίες, ανάλογα με τη θέση φτάνουν έως και το ανάντη όριο του, και κάποιες από αυτές με σημαντικό άνοιγμα, συνολική υποχώρηση του επιπέδου της οδού περί τα 20cm, καθώς και βαθιές αυλακώσεις και επιφανειακή διάβρωση στα εδαφικά πρανή κατάντη της οδού.

Από τη τεχνικογεωλογική – γεωτεχνική διερεύνηση της κατολίσθησης προέκυψαν τα ακόλουθα ευρήματα (Ατένεια, 2022c & 2022d):

- Η περιοχή παρουσίαζε αστάθειες και κατά το παρελθόν, όπως μαρτυρούν οι επισκευές του οδοστρώματος, ωστόσο με τον Ιανό η ολίσθηση επανενεργοποιήθηκε με ταχύτερο ρυθμό και μεγαλύτερη ένταση των ασταθειών και σημαντικό άνοιγμα των ρωγματώσεων. Ωστόσο η εξέλιξη του κατολισθητικού φαινομένου κατά το επόμενο του Ιανού διάστημα διατηρήθηκε γενικά βραδεία και ελεγχόμενη, με την οδό να παραμένει στοιχειωδώς λειτουργική παρά τις ρωγμές και την υποχώρηση, χωρίς διακοπή της κυκλοφορίας.
- Το αυξημένο πλάτος της ολίσθησης στο επίπεδο της οδού, που ανέρχεται έως 180m, το μεγάλο μήκος της κατά τη διεύθυνση της μετακίνησης, εκτεινόμενο έως τα 120m προς τα κατάντη, η απότομη φυσική κλίση του πρανούς, η διαμόρφωση επάλληλων διαδοχικών ασταθειών και οι παρατηρούμενοι ερπυσμοί παραπέμπουν σε βαθιά επιφάνεια, εκτιμώμενη έως τα 25m στο κεντρικό της τμήμα κάτω από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
- Η παραπάνω εκτίμηση ενισχύεται από τη γεωτεχνική έρευνα (Ατένεια, 2021), στην οποία σε δύο γεωτρήσεις συναντήθηκε ιλυολιθικός σχηματισμός χαμηλής αντοχής, ισχυρά αποσαθρωμένος και κερματισμένος, και τοπικά έως τελείως αποσαθρωμένος έως βάθος της τάξης των 15m. Από αυτό το στοιχείο και την κινηματική της ολίσθησης, το βάθος της μετακίνησης εκτιμάται έως τα 25m.



(α) Αρχή στέψης εκτενούς ολίσθησης στο κατάντη της οδού φυσικό πρανές (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



(β) Έντονες ρωγματώσεις και υποχώρηση οδοστρώματος (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



(γ) Εδαφικές θραύσεις, διαμόρφωση βαθμίδων, παραμόρφωση κορμών δέντρων, επιφανειακή διάβρωση και ερπυσμοί (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021)



(δ) Αεροφωτογραφία με κάτοψη περιοχής ολίσθησης (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021)



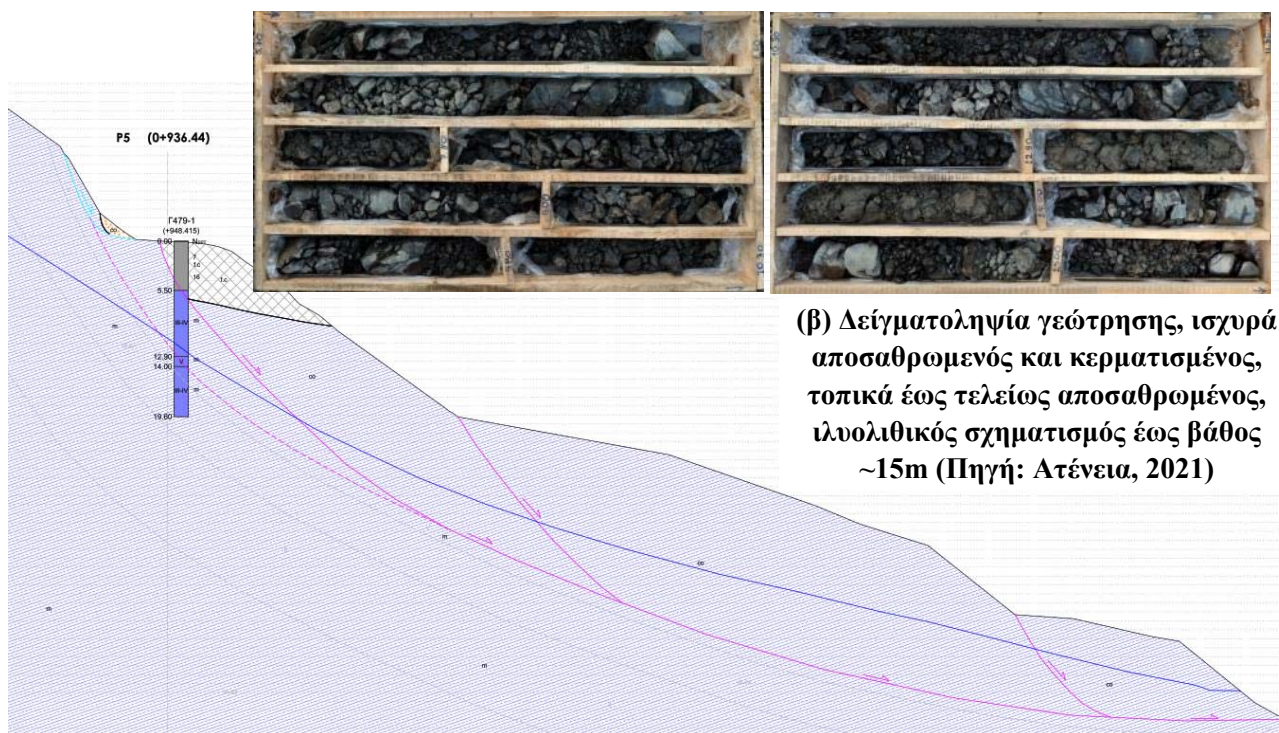
(ε) Αεροφωτογραφία περιοχής στέψης ολίσθησης (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021)

Σχήμα 129: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ στην οδό Καστανιά – Γιαννουσαίκα.

Για τη χαρακτηριστική περίπτωση κατολίσθησης 3γ αναγνωρίστηκε ότι, λόγω του μεγάλου βάθους και όγκου της μετακίνησης, η αντιμετώπιση και σταθεροποίηση της απαιτεί έργα πολύ μεγάλης κλίμακας, μη ρεαλιστικής για την τοπική οδό. Κρίθηκε ότι οι χαμηλοί ρυθμοί μετακίνησης που παρατηρούνται και διατηρούνται μετά τον Ιανό επιτρέπουν τη διατήρηση της λειτουργίας της οδού εντός της κατολισθαίνουσας μάζας, με πρόβλεψη για παρακολούθηση των μετακινήσεων και την περιοδική αποκατάσταση των ζημιών του ασφαλοτάπητα από τις μελλοντικές καθιζήσεις.

Συνεπώς τα μέτρα που προκρίνονται (Ατένεια, 2022d) αφορούν την αποκατάσταση των φθορών του οδοστρώματος, με επιμελή ανακατασκευή του με εξυγίανση και κατά περίπτωση στήριξη της βάσης του, για σχετικό περιορισμό των παραμορφώσεων στο οδόστρωμα, καθώς και επικουρικά μέτρα προστασίας των υδραυλικών τάφρων και της

οδού από μικροκαταπτώσεις από το ανάντη πρηνές. Η βασική πρόταση αναφέρεται στη συστηματική γεωτεχνική παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου, με πύκνωση στη λήψη μετρήσεων μετά από έντονες βροχοπτώσεις.



(α) Τεχνικογεωλογική Διατομή και Γεώτρηση στην εξεταζόμενη Θέση (Πηγή: Ατένεια 2022c).

(β) Δείγματοληψία γεώτρησης, ισχυρά αποσαθρωμένος και κερματισμένος, τοπικά έως τελείως αποσαθρωμένος, ιλυολιθικός σχηματισμός έως βάθος ~15m (Πηγή: Ατένεια, 2021)

Σχήμα 130: Στοιχεία σχετικά με τη τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση στη Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3γ (οδός Καστανιά – Γιαννουσαίκα).

9.3.5 Χαρακτηριστική Θέση Κατολίσθησης 3δ – Ορεινός Όγκος Ίταμος

Η χαρακτηριστική θέση κατολίσθησης 3δ αφορά κατολίσθηση εντυπωσιακού μεγέθους εντός του φυσικού περιβάλλοντος, από την κορυφή του βουνού (θέση «Κορυφή» όρους Ιτάμου / Τσιούκας), πολύ μεγάλου μήκους, τα χαρακτηριστικά της οποίας προσομοιάζουν με αυτά της βιβλιογραφικής φωτογραφίας στο Σχήμα 44, που αναφερόταν στις επιπτώσεις των κατολισθήσεων στην καταστροφή δασών. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στέψης της κατολίσθησης, περί τα +1300m, έως την περιοχή απόθεσης των ολισθημένων υλικών (ενδεικτική στάθμη +850m÷+900m) υπερβαίνει τα 400m, με οριζοντιογραφική απόσταση περί το 1χλμ. Η κατολίσθηση έλαβε χώρα λίγες ημέρες (κατά τις σχετικές μαρτυρίες) μετά το επεισόδιο του Ιανού.



(α) Αεροφωτογραφία Αστοχίας (Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).



**(β) Καταστροφή κατάντη χωματόδρομου
(Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).**



**(γ) Πλευρική Εικόνα Αστοχίας
(Φωτ. Α. Γεωργαλάς, 2021).**

**Σχήμα 131: Φωτογραφίες σχετικές με την παθολογία στη Χαρακτηριστική Θέση 3δ
Κατολίσθησης στο Όρος Ίταμος.**

Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε σε υλικά παχυστρωματώδους ψαμμιτικού φλύσχη. Πρόκειται για εκτεταμένη αστοχία ψαμμιτικών πάγκων στο επίπεδο της στρώσης του σχηματισμού,

μορφής επίπεδης ολίσθησης. Τα κολλούβια υλικά της ολίσθησης αποτέθηκαν σε μεγάλο μήκος της κατάντη μισγάγγειας καταστρέφοντας τη δασική βλάστηση και τον τοπικό χωματόδρομο που ενώνει την τοποθεσία Βρύση Ιτάμου με το Ιστορικό Μουσείο Χαρ. Φλωράκη και τον οικισμό Ραχούλα.

Η εκδήλωση της αστοχίας οφείλεται στην πλήρωση των ασυνεχειών της βραχώμαζας και την ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων στα τοιχώματα των ψαμμιτικών πάγκων, με σταδιακή κατείσδυση τους εντός της βραχώμαζας και έως το επίπεδο εκδήλωσης της ολίσθησης. Η κατά μαρτυρίες μικρή καθυστέρηση στην εκδήλωση της αστοχίας αποδίδεται στη συνέχιση της κατείσδυσης του μεγάλου όγκου μετεωρικών υδάτων κατά το χρονικό διάστημα από τον κυκλώνα Ιανό έως την εκδήλωση της ολίσθησης, ώστε να δημιουργηθούν οι οριακές συνθήκες ευστάθειας, ενώ η αστοχία των ανάντη τμημάτων και η έναρξη της ολίσθησής τους με μεγάλη ταχύτητα συμπαρέσυρε και τα κατάντη, οριακά ευσταθή τμήματα.

Λόγω του μεγέθους της μετακίνησης, η εκδήλωση της ολίσθησης διακρίνεται και στις χαμηλής ανάλυσης δορυφορικές φωτογραφίες (Σχήμα 132, πηγή: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>).



Σχήμα 132: Δορυφορικές Εικόνες Χαρακτηριστικής Θέσης Κατολίσθησης 3δ στο Όρος Ίταμος, ημερομηνία 05/09/2020 πριν τον Ιανό (αριστερά) και 25/09/2020 μετά τον Ιανό (δεξιά) (πηγή: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> με εστίαση στην εξεταζόμενη περιοχή).

9.4 Συνέπειες Κατολισθήσεων

Οι παραπάνω τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές, καθώς κάθε μία έχει διαφορετική τυπολογία και χαρακτηριστικά, αλλά και διαφορετική επίδραση επί του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Ο ακόλουθος Πίνακας 11 συνοψίζει

την ποιοτική περιγραφή των συνεπειών σε κάθε θέση, ενώ σχολιάζεται και το κόστος και ο βαθμός εξασφάλισης από την προτεινόμενη αποκατάσταση σε κάθε περίπτωση.

Όπως αναδεικνύεται και από τα στοιχεία του πίνακα, οι τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές μεταξύ των κατολισθητικών εκδηλώσεων κατά τον Ιανό στην ευρύτερη περιοχή της ορεινής Καρδίτσας, καθώς καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος αναφορικά με :

- Τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης:
σχετικά μικρός όγκος ↔ πολύ μεγάλος όγκος,
πολύ αργή ταχύτητα εξέλιξης ↔ πολύ μεγάλη ταχύτητα.
- Τις συνέπειες: βραχυχρόνιες ↔ μακροχρόνιες ↔ δυνητικές, στο φυσικό ή/και ανθρωπογενές περιβάλλον.
- Τα μέτρα αποκατάστασης: κανένα μέτρο ↔ πολύ ήπια, οικονομικά μέτρα με ανάγκη παρακολούθησης και επιφύλαξη μελλοντικής επέμβασης μεγάλης κλίμακας ↔ σχετικά ήπια, οικονομικά μέτρα με μελλοντική ανάγκη συντήρησης και αποδοχή ενδεχομένου παροδικής επανάληψης καταπτώσεων χωρίς διακινδύνευση των χρηστών της οδού ↔ βαριά μέτρα υποστήριξης με σχετικά υψηλό κόστος για άμεση εξασφάλιση και αποτροπή αναμενόμενης πλήρους ολίσθησης.

Είναι αντιληπτό ότι οι παραπάνω αντιπροσωπευτικές τυπολογίες, και οι σχετικές αποφάσεις επί της αποκατάστασης, αλλά και της πρόβλεψης για έλεγχο / παρακολούθηση κάποιων κρίσιμων θέσεων έναντι μελλοντικής κατολισθητικής διακινδύνευσης, αφορούν δεκάδες θέσεις κατολισθήσεων στην πληγείσα περιοχή του Ν. Καρδίτσας.

Πίνακας 11: Περιγραφή Επιπτώσεων στις Χαρακτηριστικές Θέσεις 3α έως 3δ.

Χαρακτηριστική Θέση	Τύπος Κατολισθήσης	Όγκος και Ταχύτητα Κατολισθήσης	Βραχυχρόνιες Επιπτώσεις σε φυσικό και ανθρωπογενές Περιβάλλον	Κόστος και Εξασφάλιση Προτεινόμενης Αποκατάστασης	Μακροχρόνιες – Δυνητικές Επιπτώσεις σε φυσικό και ανθρωπογενές Περιβάλλον
3α Πρανές Κατάντη Οδού	Περιστροφική, ενδιάμεσου βάθους.	Σχετικά Περιορισμένος Όγκος. Χαμηλή Ταχύτητα, ωστόσο ενεργή και εξελισσόμενη με βραδύ ρυθμό, ανάγκη παρέμβασης για αποτροπή ευρείας αστοχίας.	Περιορισμένες. Η οδός παρέμεινε λειτουργική παρά τις ρωγματώσεις. Μικροεπιπτώσεις στο ρέμα λόγω διαβρώσεων.	Αρκετά Υψηλό Κόστος (ισχυρός πασσαλότοιχος) δεδομένου του μήκους της οδού και του όγκου της κατολισθήσης. Μόνιμη Εξασφάλιση – Αποτροπή μετακινήσεων.	Αποτροπή επιπτώσεων με εφαρμογή πρότασης αποκατάστασης. Σε περίπτωση μη εφαρμογής είναι δεδομένη η επέκταση της αστοχίας σε εύλογο χρόνο, ο μακροχρόνιος αποκλεισμός της οδού στην είσοδο του οικισμού και η διαμόρφωση πολύ δυσμενέστερων / ακριβότερων συνθηκών αποκατάστασης.
3β Πρανές Ανάντη Οδού	Πολλαπλές Επιφανειακές Περιστροφικές Ολισθήσεις – Διαβρώσεις – Ροές.	Σχετικά Μεγάλος Όγκος. Μεγάλη Ταχύτητα, λόγω απότομης εκδήλωσης, μεγάλης υψομετρικής διαφοράς και κλίσης.	Μεγάλες. Σημαντική Μορφολογική αλλοίωση πρανούς, Διάβρωση. Αποκλεισμός οδού προς Γιαννουσαίικα για μεγάλο χρονικό διάστημα.	Σχετικά Μικρό (Μικρή οριζ. παραλλαγή, νέο επίχωμα, τοίχος συρματοκιβωτίων για προστασία από ανάντη ολισθήσεις). Μόνιμη εξασφάλιση, εκτός ακραίων συμβάντων.	Περιορισμός επιπτώσεων και προστασία οδού με εφαρμογή της πρότασης αποκατάστασης, μικρή πιθανότητα νέου αποκλεισμού σε ακραία συμβάντα. Σε περίπτωση μη εφαρμογής, διαρκείς ολισθήσεις υλικών στην οδό, συχνή διακοπή λειτουργίας.
3γ Πρανές Ανάντη Οδού	Περιστροφική, μεγάλων διαστάσεων, μεγάλου βάθους.	Πολύ Μεγάλος Όγκος. Πολύ χαμηλή Ταχύτητα, ωστόσο ενεργή και δυνητικά εξελισσόμενη με βραδύ ρυθμό.	Περιορισμένες. Η οδός παρέμεινε λειτουργική παρά τις ρωγματώσεις και την υποχώρηση. Μικροεπιπτώσεις στο ρέμα λόγω διαβρώσεων και ερπυσμών.	Πολύ Μικρό (επισκευές, εξυγίανση οδοστρώματος και υδραυλικών έργων), ωστόσο σε βάθος χρόνο μικρό – μέσο (παρακολούθηση). Απαγορευτικό το κόστος μόνιμης εξασφάλισης.	Ανάγκη Μακροχρόνιας Παρακολούθησης για έγκαιρη προειδοποίηση ενεργοποίησης, Αναμενόμενη ανάγκη επισκευών. Σε περίπτωση μη εφαρμογής, επέκταση ρωγματώσεων, οριακή λειτουργικότητα οδού, πιθανή ανάγκη σημαντικής αλλαγής χάραξης με σημαντικό κόστος..
3δ Πρανές Ανάντη Οδού	Επίπεδες Ολισθήσεις, εξελισσόμενες σε διαμήκη Ροή Κορημάτων	Εξαιρετικά Μεγάλος Όγκος. Μεγάλη Ταχύτητα, απότομης εκδήλωσης, πολύ μεγάλης υψομετρικής διαφοράς και κλίσης.	Μορφολογική αλλοίωση πρανούς, Διάβρωση. Καταστροφή Δάσους. Καταστροφή χωματόδρομου προς Βρύση Ιτάμου.	Δεν υπάρχει πρόταση αποκατάστασης. Πολύ μικρό κόστος πρόχειρης επισκευής χωματόδρομου.	Αναμένονται μελλοντικές ροές λόγω διαβρώσεων και διατήρησης μετακινημένων υλικών επί των απότομων πρανών. Πιθανή η σταδιακή φυσική αναδάσωση. Πολύ μικρή επικινδυνότητα για ανθρωπογενείς λειτουργίες.

9.5 Συνθήκες Ευστάθειας μετά τις Κατολισθήσεις – Τηλεπισκόπηση και Παρακολούθηση

Η ταυτόχρονη εκδήλωση πολύ μεγάλου αριθμού κατολισθήσεων κατά το επεισόδιο του Ιανού είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή υποδομών (οδικό δίκτυο, τεχνικά έργα, υδραυλικά έργα) ή/και την ανάδειξη του υποσχεδιασμού τους. Η πρώτη προτεραιότητα της διοίκησης ήταν εύλογα προς την κατεύθυνση της ταχείας ανάταξης των λειτουργιών στην περιοχή (απομάκρυνση ολισθημένων υλικών, πρόχειρη αποκατάσταση οδικών δικτύων και λοιπών λειτουργιών, εξασφάλιση επισφαλών θέσεων) και εν συνεχεία προς το σχεδιασμό των μόνιμων μέτρων αποκατάστασης. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις, όπως αναδείχθηκε παραπάνω (κυρίως χαρακτηριστική θέση 3γ, ενδεχομένως και χαρακτηριστική θέση 3β), τα μέτρα αποκατάστασης δεν είναι δυνατόν να είναι πολύ υψηλού κόστους, με δεδομένο τον δευτερεύοντα χαρακτήρα του οδικού δικτύου, αλλά να διατηρούνται σε χαμηλό / εύλογο επίπεδο, με έλεγχο της ευστάθειάς της κάθε τέτοιας θέσης μέσω συστηματικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς των πρανών, αποδοχή της αναγκαιότητας περιοδικής συντήρησης (π.χ. καθαρισμός καταπτώσεων από ανάντη πρανή) και κατανόησης της πιθανότητας απαίτησης μελλοντικής επέμβασης μεγαλύτερης κλίμακας στις πιο κρίσιμες από αυτές τις θέσεις. Παράλληλα, μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης αποκατάστασης, θα πρέπει να υπάρχει μια γενικότερη επισκόπηση της περιοχής, ώστε να οριστούν και να αξιολογηθούν οι θέσεις που παραμένουν επίφοβες και χρήζουν παρακολούθησης.

Σε αυτό το πλαίσιο οι δυνατότητες των σύγχρονων μέσων τηλεπισκόπησης μπορούν να προσφέρουν πολύ χρήσιμες υπηρεσίες: Ενδεικτικά αναφέρεται:

- Ήδη κατά τη φάση αναγνώρισης της περιοχής αμέσως μετά τον Ιανό (Zekkos et al., 2020) η χρήση των αυτόνομων αεροχημάτων (UAVs/drones) για την αποτύπωση των συνθηκών ήταν ευρεία. Επιπλέον, και πέραν της γενικής επισκόπησης της περιοχής και των κρίσιμων θέσεων, η ενσωμάτωση χρήσης των UAVs στα στάδια τοπογράφησης, τεχνικογεωλογικής αποτύπωσης και αξιολόγησης και γεωτεχνικής μελέτης σχεδιασμού της αποκατάστασης έχει ενταχθεί στην τρέχουσα πρακτική των τοπογραφικών, γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών (Ατένεια, 2022a–2022d). Ειδικά σε περιπτώσεις δύσβατων, μη προσβάσιμων περιοχών (χαρακτηριστικές θέσεις 3δ και 3β, Σχήμα 132, Σχήμα 127γ), οι δυνατότητες επισκόπησης και

αξιολόγησης των συνθηκών από τα UAVs, αλλά και παραγωγής αποτυπώσεων με σύνταξη ψηφιακών μοντέλων εδάφους με ικανοποιητική, και ανάλογα με την περίπτωση και τη βλάστηση ακρίβεια, αποτελούν τομή, αποτελώντας τεχνολογικό εργαλείο που πλέον τείνει να καθιερωθεί και στον ελληνικό χώρο.

- Οι πολλά υποσχόμενες, σύγχρονες δυνατότητες γεωτεχνικής παρακολούθησης από απόσταση προβάλλουν ιδιαίτερα δελεαστικές για την περίπτωση των κατολισθήσεων του Ιανού, υπό την έννοια ότι απαιτούνται πολλές μετρήσεις σε πολλές θέσεις για τη σωστή διαχείριση της κατολισθητικής επικινδυνότητας σε θέσεις ενεργοποίησης της εδαφικής κίνησης (όπως η χαρακτηριστική θέση 3γ) και έκτοτε παρουσιάζουν βραδεία εξέλιξη με μικρομετακινήσεις και μικροπαραμορφώσεις. Υπό αυτή την έννοια, η εγκατάσταση συστημάτων γεωτεχνικών οργάνων με αυτοματοποιημένη λήψη και αποστολή μετρήσεων (βάθρα μέτρησης μετακινήσεων, κλισιόμετρα, ηλεκτρικά πιεζόμετρα) θα είχε το προφανές πλεονέκτημα της συνεχούς, ταχύτατης και εξ αποστάσεων παρακολούθησης της ευρύτερης περιοχής, έναντι της απαίτησης διαρκούς εργασίας των ομάδων καταγραφής και αποτύπωσης στο πεδίο. Παρόλο που διεθνώς τα σχετικά όργανα και δυνατότητες είναι διαθέσιμα, η χρήση τους δεν έχει γενικευτεί στον ελληνικό χώρο, με δεδομένα τα υψηλά αρχικά κόστη, και για την περίπτωση του Ιανού τη μεγάλη διασπορά των περιοχών ενδιαφέροντος και τους κινδύνους βανδαλισμού λόγω εκ των πραγμάτων εγκατάστασης των οργάνων σε μη ελεγχόμενο περιβάλλον. Ωστόσο η πρόοδος στο συγκεκριμένο αντικείμενο είναι ταχύτατη και δεν αποκλείεται στο άμεσο μέλλον να τυποποιηθεί η χρήση οργάνων αυτοματοποιημένης λήψης και αποστολής, ή να καθιερωθούν άλλες μέθοδοι, όπως η ταχύτατη και μαζική λήψη μετρήσεων στα όργανα στο πεδίο από UAVs.
- Η αξιοποίηση των δορυφορικών εικόνων για τον εντοπισμό αλλαγών επί του φυσικού εδάφους και οι σχετικές τεχνολογίες (διαφορικής) συμβολομετρίας ραντάρ (InSAR / DInSAR) αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία (Κεφ. 5.3), και στα Κεφ. 7.5 και 8.5 παρουσιάστηκαν σχετικά στοιχεία για τις γενικές συνθήκες ευστάθειας στην πρώτη και δεύτερη περίπτωση μελέτης. Ωστόσο, και παρά τη διαρκή αύξηση της διαθεσιμότητας και τη βελτίωση της ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων, υπεισέρχεται σε αυτές εύλογη αβεβαιότητα, με δεδομένη και την τρέχουσα ενεργότητα της περιοχής και την πυκνή βλάστηση. Συνεπώς, και με δεδομένο ότι στις ενεργοποιημένες κατολισθητικές κινήσεις λόγω του Ιανού απαιτείται κυρίως παρακολούθηση των βραδέως εξελισσόμενων μικρομετακινήσεων, για έγκαιρη

προειδοποίηση προς την εντατικότερη παρακολούθηση και τη λήψη μέτρων, η αξιοποίηση των δορυφορικών εικόνων δεν συνιστά, τουλάχιστον έως αυτή τη στιγμή, ρεαλιστική εναλλακτική για αυτή την κλίμακα και αυτή τη χρήση, παρά μόνο ως επικουρική – διερευνητική μέθοδος. Το παραπάνω συμπέρασμα δεν αναιρεί την τεκμηριωμένη μεγάλη χρησιμότητα της μεθόδου στην αναγνώριση και αξιολόγηση της συνολικής εικόνας διασποράς των ξεκάθαρα εκδηλωθεισών κατολισθητικών μετακινήσεων κατά τον Ιανό (Valkaniotis et al., 2022).

- Η αποτύπωση των επισφαλών περιοχών κατολισθήσεων μέσω σάρωσης με κάμερες LiDAR θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση, παρέχοντας την απαιτούμενη ακρίβεια. Ωστόσο η παρουσία βλάστησης στην περιοχή και η «μαλακή» επιφάνεια των φλυσχικών εδαφών, σε σχέση με βραχώδη πρανή, καθώς και το μεγάλο κόστος και η απαίτηση επιτόπου παρουσίας και σταθερών σημείων αναφοράς αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες, τουλάχιστον μέχρι η μέθοδος να γίνει πιο ευέλικτη και προσιτή (π.χ. ελαφρές καμερών LiDAR σε UAVs).

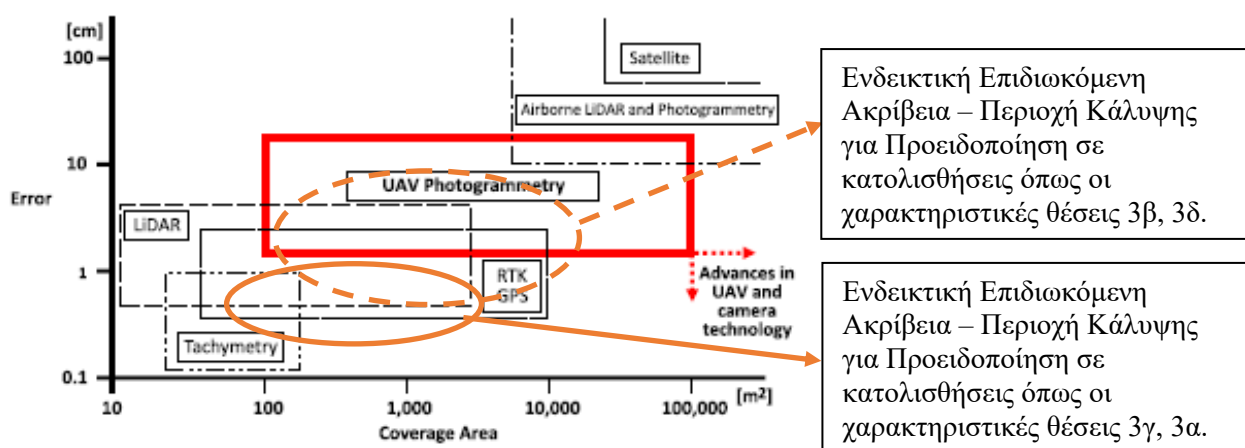


Fig. 5. UAV application to surveying tasks. (Adapted from Siebert and Teizer 2014.)

Σχήμα 133: Επισήμανση στο Σχήμα 82 της επιδιωκόμενης ακρίβειας σε κάθε χαρακτηριστική θέση (πηγή διαγράμματος: Greenwood et al., 2019).

- Σε κάθε περίπτωση, τα άλματα στα τεχνολογικά επιτεύγματα στους παραπάνω τομείς είναι συνεχή και ενσωματώνονται πολύ γρήγορα σε εργαλεία και εφαρμογές γενικής χρήσης. Υπό αυτή την έννοια θεωρείται βέβαιο ότι τα επόμενα λίγα χρόνια θα υπάρχουν τα μέσα, προς τον ένα ή τον άλλο τύπο εργαλείων / οργάνων παρακολούθησης και προειδοποίησης, ώστε να αναιρούνται οι σημερινοί περιορισμοί και να προσφέρονται τα μέσα για λήψη ολοκληρωμένων και οικονομικών μετρήσεων ακριβείας, είτε πλήρως εξ' αποστάσεως ή στο πεδίο αλλά με πολύ μικρότερη κινητοποίηση και μεγαλύτερη ταχύτητα λήψης.

10 Περιπτώσεις Συνδυαστικής Εφαρμογής Σύγχρονων Μεθόδων Τηλεπισκόπησης στον Ελληνικό και Διεθνή Χώρο

10.1 Εισαγωγή

Στο Κεφ. 5 παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές και τα πεδία εφαρμογής των σύγχρονων μεθόδων διερεύνησης και παρακολούθησης κατολισθητικών φαινομένων, καθώς και οι δυνατότητες εγκατάστασης συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Στη συνέχεια, και μετά την γενική περιγραφή των κατολισθητικών φαινομένων του ελληνικού χώρου στο Κεφ. 6, στα Κεφ. 7.5 και 8.5 παρουσιάστηκαν τα διαθέσιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα για τις περιοχές των δύο παλαιών κατολισθήσεων της πρώτης και δεύτερης περίπτωσης μελέτης. Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω κεφάλαια, η αποσπασματική χρήση ποσοτικών στοιχείων από μία τηλεπισκοπική μέθοδο, όπως η μέθοδος συμβολομετρίας InSAR, θα πρέπει να είναι ενδεικτική και μόνο, στο πλαίσιο μιας γενικής επισκόπησης της περιοχής, ενώ προκειμένου να αρθούν οι αβεβαιότητες ως προς την εφαρμοσιμότητά της, προτείνεται η παρακολούθηση να συνδυαστεί με κάποιες επιτόπου μετρήσεις αναφοράς. Στο Κεφ. 9, στο πλαίσιο της τρίτης μελέτης περίπτωσης, αναδείχθηκε η τυποποίηση της χρήσης σύγχρονων μέσων και οργάνων, όπως των UAVs, στην άμεση αναγνώριση και εν συνεχεία τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση των κατολισθητικών συμβάντων. Για λόγους πληρότητας, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται σύντομα δύο πολύ πρόσφατες περιπτώσεις από τον ελληνικό χώρο, όπου εφαρμόστηκε με ικανοποιητικά αποτελέσματα η συνδυαστική χρήση σύγχρονων τηλεπισκοπικών μεθόδων παρακολούθησης, καθώς και μια τρίτη περίπτωση από την Ιταλία, με επιτυχημένη λειτουργία συστήματος προειδοποίησης.

10.2 1η Περίπτωση – Παρακολούθηση Ενεργής Κατολίσθησης στο Άνω Κεράσοβο Αιτωλοακαρνανίας

Η 1^η περίπτωση αφορά κατολίσθηση στο Άνω Κεράσοβο Ν. Αιτωλοακαρνανίας, η οποία έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 2021, με εναυσματικό παράγοντα την έντονη βροχόπτωση. Το επόμενο διάστημα σημειώθηκαν δύο σοβαρά συμβάντα επανενεργοποίησης – επέκτασης, τον Δεκέμβριο του 2021, πάλι μετά από έντονες βροχοπτώσεις, και το Σεπτέμβριο του 2022 (Σχήμα 134, Σχήμα 135). Στην περιοχή εντοπίζονται φλυσχικοί

σηματισμοί, ισχυρά πτυχωμένοι και κερματισμένοι, με παρουσία γαιώδους μανδύα αποσάθρωσης μεγάλου πάχους έως 7m.



Σχήμα 134: Κατολίσθηση στο Άνω Κεράσοβο, επάνω απεικόνιση από google earth πριν (αριστερά) και μετά το συμβάν (δεξιά), κάτω φωτογραφία από τοπική ιστοσελίδα (<https://sinidisi.gr/synechizetai-katolisthisi-dromoy-pros-to-ano-kerasovo/>)

Η περιοχή βρίσκεται υπό μελέτη και διερεύνηση από ερευνητές της Γεωλογικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών (Nikolakopoulos et al., 2023), με χρήση και σύγχρονων μεθόδων. Συγκεκριμένα:

- Μετά την ενεργοποίηση κάθε κατολίσθησης έγινε λεπτομερής καταγραφή, μέτρηση και αποτύπωση των ρωγμών.
- Μετά την πρώτη κατολίσθηση εγκαταστάθηκαν δύο δέκτες GNSS εντός της περιοχής ολίσθησης και ένας τρίτος εκτός. Ωστόσο η μεταγενέστερη επέκταση της ολίσθησης κατά τον 09/2022 περιελάμβανε και την περιοχή του τρίτου δέκτη, ο οποίος και καταστράφηκε.
- Στην περιοχή έγιναν φωτογραφίες με χρήση UAV και παράχθηκαν τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα του εδάφους με χρήση ψηφιακών μεθόδων φωτογραμμετρίας,

μετά από κάθε νέο κατολισθητικό συμβάν και μετά το πέρας της επόμενης χειμερινής περιόδου.

- Από τα δεδομένα συμβολομετρίας InSAR από τη σελίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εδαφικών Μετακινήσεων (<https://egms.land.copernicus.eu>) αναζητήθηκαν τα καταχωρημένα στοιχεία αναφορικά με τυχόν καταγραφή του συμβάντος την ημερομηνία εκδήλωσης, και με δεδομένη την παρουσία διαθέσιμου σημείου απεικόνισης εντός της κατολίσθησης. Το διαθέσιμο χρονικό πλαίσιο της υπηρεσίας EGMS καλύπτει το χρόνο εκδήλωσης μόνο της αρχικής ολίσθησης.

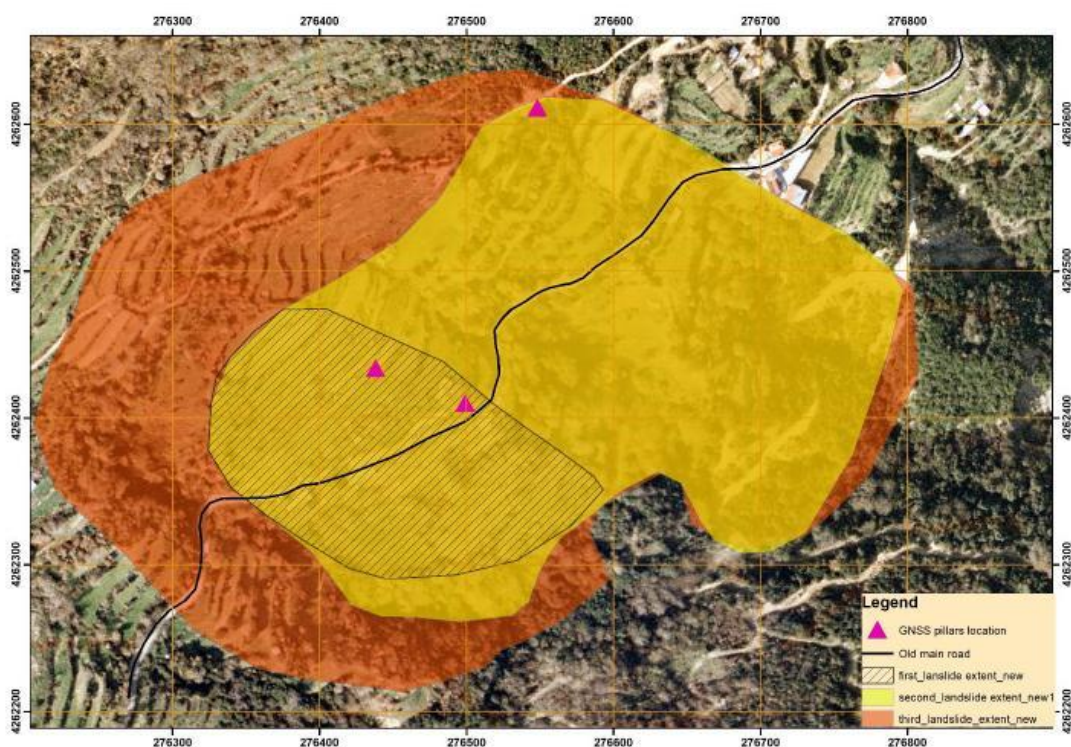


Figure 6. An overview of the evolution of the landslide extent. The stripe pattern depicts the landslide extent on 8 February 2021, with yellow representing the landslide area on 14 December 2021 and red representing the extent of the landslide on 25 September 2022.

Σχήμα 135: Κάτοψη αρχικής Κατολίσθησης και επόμενων φάσεων επανενεργοποίησης – επέκτασης, θέσεις εγκατάστασης δεκτών GNSS (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)

Τα έως σήμερα ευρήματα και συμπεράσματα από την συνεχιζόμενη παρατήρηση της εξελισσόμενης κατολισθητικής δραστηριότητας είναι συνοπτικά τα ακόλουθα (Nikolakopoulos et al., 2023):

- Από τις διαδοχικές φωτογραφικές αποτυπώσεις της περιοχής με UAV και την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους προκύπτουν σημαντικές μεταβολές στις στάθμες του αναγλύφου, με μέγιστα μεγέθη απόκλισης $>1,0\text{m}$. Επισημαίνεται επίσης η σημαντική, εξελισσόμενη διάβρωση στην περιοχή, λόγω και των βροχοπτώσεων,

καθώς στην τελευταία σύγκριση ψηφιακών μοντέλων (περίοδος 09/2022 – 04/2023) και χωρίς κάποια διακριτή επανενεργοποίηση, παρατηρούνται γενικευμένες αλλαγές – υποχωρήσεις στο ανάγλυφο (Σχήμα 136(d), συγκριτικά με Σχήμα 136(c)).

- Οι τοπογραφικές μετρήσεις στους δέκτες GNSS επιβεβαιώνουν τις μεγάλες τιμές μετακίνησης, οριζόντιας και με επιλεκτική διεύθυνση προς την διεύθυνση του πρανούς και δευτερευόντως κατακόρυφης, με σχετική επαύξηση κατά την τελευταία χειμερινή περίοδο, σε συμφωνία με τα φωτογραμμετρικά ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Σχήμα 137). Αναδεικνύεται ο σημειακός χαρακτήρας των μετρήσεων, και η αβεβαιότητα κατά πόσο αυτές είναι αντιπροσωπευτικές της γενικής τάσης μετακίνησης στην περιοχή, με δεδομένη τη σύνθετη γεωμετρία της ολίσθησης και τα διαφορετικά μοτίβα εξέλιξης της μετακίνησης σε διαφορετικές ζώνες αυτής.

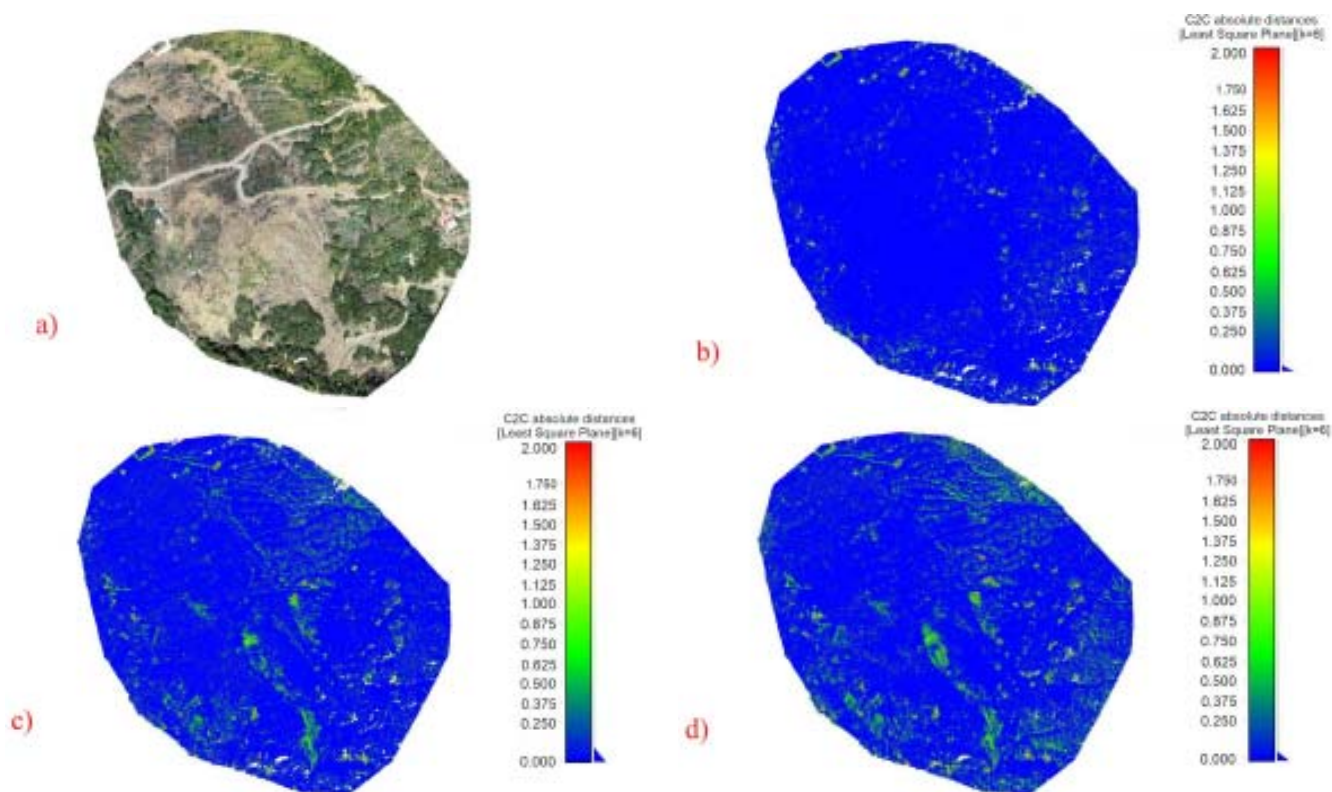


Figure 10. Cloud-to-cloud comparison. (a) Initial UAV point cloud acquired on 25 September 2022. (b) C2C distances calculated between the point cloud of 25 September 2022 and the respective point cloud of 20 December 2022. (c) C2C distances calculated between the point cloud of 25 September 2022 and the respective point cloud of 28 January 2023. (d) C2C distances calculated between the point cloud of 25 September 2022 and the respective point cloud of 11 April 2023.

Σχήμα 136: Αποτελέσματα αποτυπώσεων και παραγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους με εντοπισμό διαφοροποιήσεων (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)

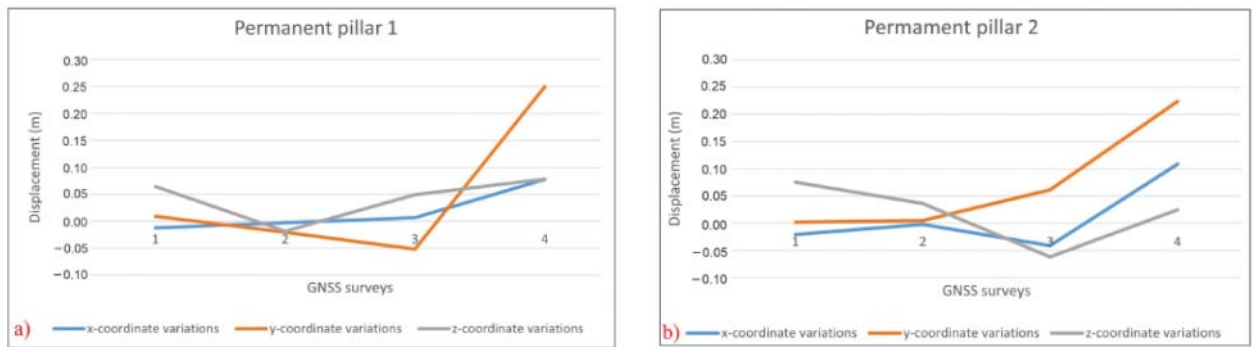


Figure 11. (a) GNSS variations of the coordinates of permanent pillar 1 over time. The x-axis corresponds to the multitemporal GNSS surveys, while the y-axis illustrates the calculated displacements. (b) GNSS variations of the coordinates of permanent pillar 2 over time. The x-axis corresponds to the multitemporal GNSS surveys, while the y-axis illustrates the calculated displacements.

Σχήμα 137: Αποτελέσματα μετρήσεων στους δέκτες GNSS (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)

- Από τα δεδομένα διαφορικής συμβολομετρίας InSAR, που καλύπτουν μόνο τη φάση αρχικής ενεργοποίησης της κατολίσθησης, μπορεί να αναγνωριστεί ένδειξη της εκδήλωσης της μετακίνησης, τουλάχιστον ποιοτική. Επίσης κατά το προηγούμενο και επόμενο της πρώτης ενεργοποίησης διάστημα διαφαίνεται επίσης μια συνισταμένη ερπυστική παραμόρφωση (Σχήμα 138).

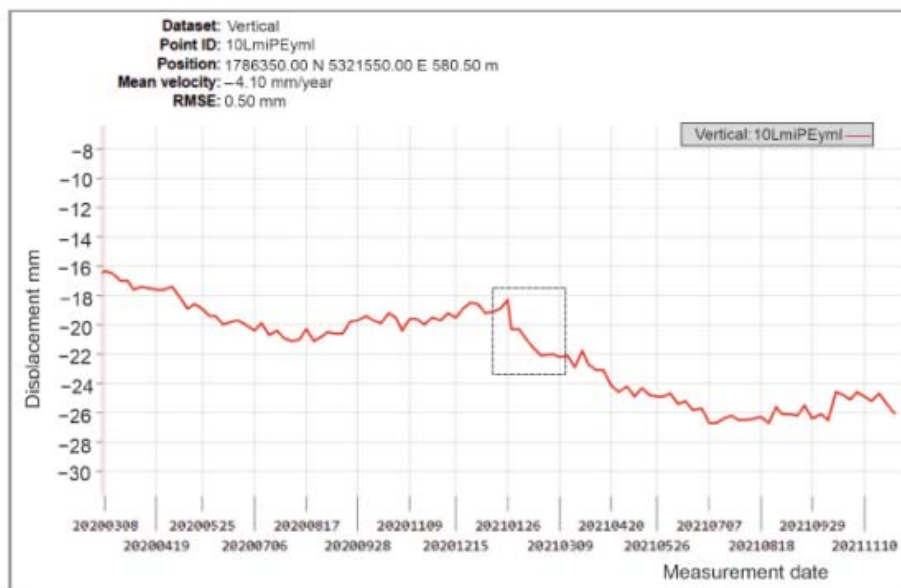


Figure 13. PSI measurements in the landslide area. After the occurrence of the first landslide episode on 28 January 2021, subsidence is marked with a dashed black rectangular box.

Σχήμα 138: Διάγραμμα Καταγραφής Εδαφικής Υποχώρησης στην περιοχή της αστοχίας με τη μέθοδο InSAR (EGMS), επισημαίνεται η ένδειξη κατά την πρώτη ενεργοποίηση (πηγή: Nikolakopoulos et al., 2023)

Συμπερασματικά, η κατολισθητική δραστηριότητα στο Άνω Κεράσοβο Αιτωλοακαρνανίας είναι ενεργή και καταγράφονται σημαντικού μεγέθους παραμορφώσεις, με βασικό

παράγοντα ενεργοποίησης – κινητοποίησης την εκδήλωση έντονων βροχοπτώσεων. Η συνδυαστική παρακολούθηση με αποτυπώσεις από UAVs και χρήση φωτογραμμετρίας, τοπογραφικές μετρήσεις σε δέκτες GNSS και διερεύνηση των διαθέσιμων στοιχείων της μεθόδου συμβολομετρίας InSAR καταλήγει σε ποιοτικά ανάλογα ευρήματα, ενώ με δεδομένη την ταχεία εξέλιξη του φαινομένου και τη διαφοροποίηση του μεγέθους της παραμόρφωσης εντός της ολισθούμενης περιοχής, η σύγκλιση των ποσοτικών ευρημάτων είναι για την ώρα δυσχερής. Οι αποτυπώσεις με UAV αποτελούν τη μέθοδο που προσφέρει τη μεγαλύτερη εποπτικότητα στην παρακολούθηση της κατολίσθησης.

10.3 2η Περίπτωση – Παρακολούθηση Βραδέως Εξελισσόμενης Κατολίσθησης στο Μέτσοβο

Η 2^η περίπτωση αφορά βραδέως εξελισσόμενη από το 2010 και έκτοτε παρακολουθούμενη κατολίσθηση στο Μέτσοβο του Ν. Ιωαννίνων. Η κατολίσθηση εκτείνεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του οικισμού, εντός αποσαθρωμένου φλυσχικού σχηματισμού (Σχήμα 139) και παρακολουθείται επί μακρόν με συμβατικά γεωτεχνικά και τοπογραφικά όργανα. Πρόκειται για ολίσθηση σε σύνθετη επιφάνεια, με επιφάνεια ολίσθησης σε κυμαινόμενα βάθη 5-10m πλησίον του οικισμού έως 25-30m εκτός αυτού, με καταγραφόμενες οριζόντιες μετακινήσεις της τάξης των 4-16mm/έτος.

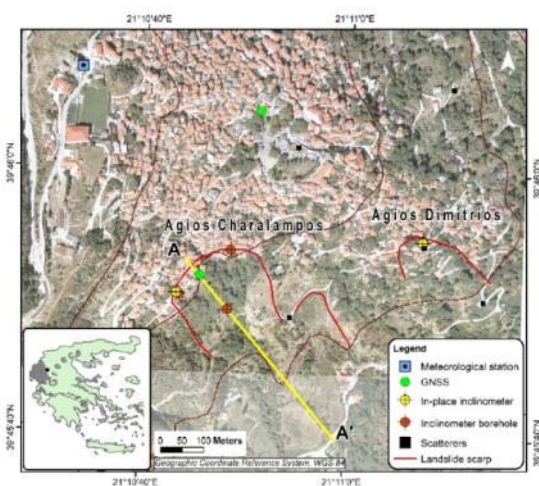


Figure 1. The study area of Metsovo in Greece and the installed instrumentation (cross-section AA' presented in Figure 3 is depicted with a yellow line).

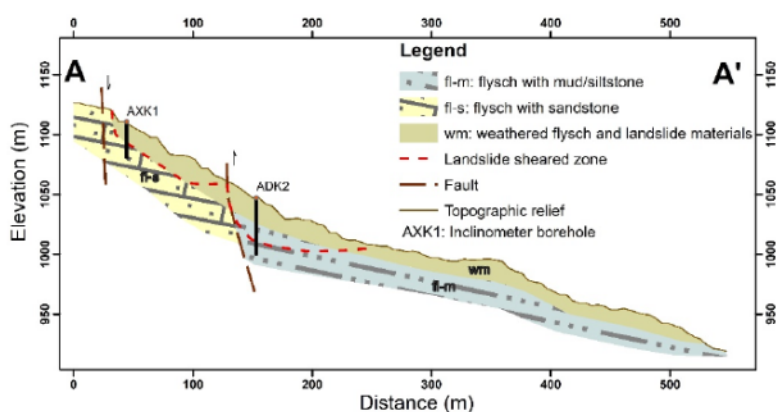


Figure 3. Geological cross-section AA' in Metsovo.

Σχήμα 139: Οριζοντιογραφία και Χαρακτηριστική Τομή Κατολίσθησης στο Μέτσοβο (πηγή: Depountis et al., 2022)

Πρόσφατα, και χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια αλλαγή στους ρυθμούς εξέλιξης της μετακίνησης, οι μέθοδοι παρακολούθησης της κατολίσθησης διερευνήθηκαν με πρόσθετα, σύγχρονα μέσα και μεθόδους (Depountis et al., 2022):

- Κατασκευάστηκε κλισιόμετρο συνεχούς καταγραφής με αυτοματοποιημένη λήψη μετρήσεων.
- Εγκαταστάθηκαν Δέκτες GNSS αυτοματοποιημένης καταγραφής και αποστολής μετρήσεων, καθώς και τριγωνικά, παθητικά Σημεία Αναφοράς (Scatterers / passive Corner Reflectors) για υποβοήθηση της σχεδιαζόμενης, ακριβούς δορυφορικής απεικόνισης συμβολομετρίας InSAR.
- Έγιναν αεροφωτογραφίσεις μέσω UAV με παραγωγή και τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους με φωτογραμμετρία.
- Εγκαταστάθηκε μετεωρολογικός σταθμός.

Τα έως σήμερα ευρήματα συνοψίζονται ακολούθως (Depountis et al., 2022):

- Στα κλισιόμετρα συνεχούς καταγραφής προσδιορίστηκε πολύ μικρού μεγέθους μετακίνηση, σε βάθος 5m-10m, για περίοδο καταγραφής ενός έτους.
- Οι αεροφωτογραφίσεις μέσω UAV έγιναν σε ετήσια βάση. Εύλογα το παρατηρούμενο πολύ μικρό μέγεθος μετακίνησης στην περιοχή, μικρότερο ή συγκρίσιμο της ακρίβειας της αποτύπωσης μέσω UAV και φωτογραμμετρίας, δεν επιτρέπει ασφαλείς σχετικές συγκρίσεις.

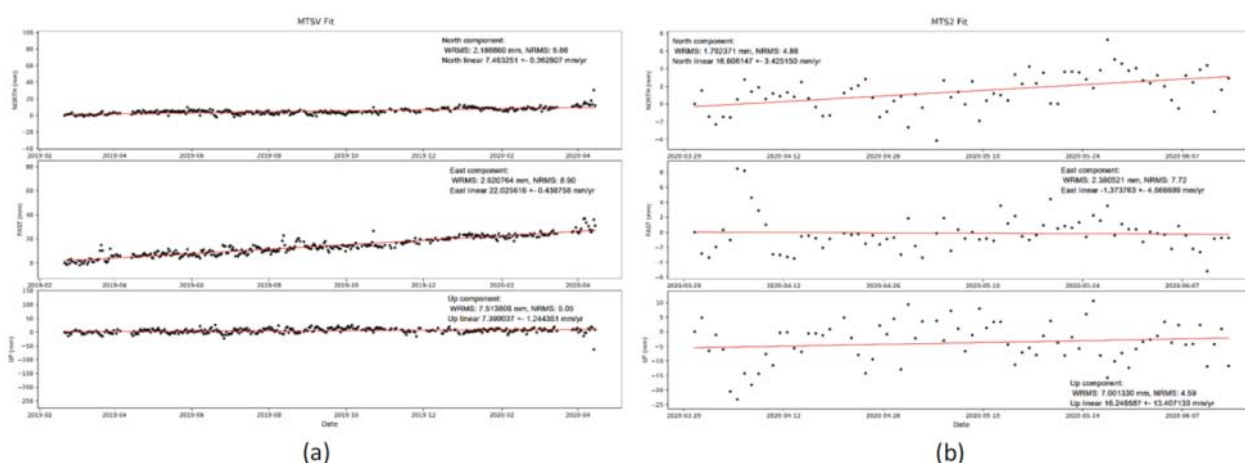


Figure 7. Time series and rate of the surface movement in Metsovo: (a) GNSS station MTSV; (b) GNSS station MTS2.

Σχήμα 140: Αποτελέσματα μετακινήσεων από δύο δέκτες GNSS (πηγή: Depountis et al., 2022).

- Οι δέκτες GNSS διπλής συχνότητας ομοίως κατέδειξαν μικρού μεγέθους μετακινήσεις, ωστόσο με σημαντικές διακυμάνσεις στις καταγραφές (Σχήμα 140).

Σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία, θεωρείται ότι θα απαιτηθεί περαιτέρω χρόνος λειτουργίας τους για λήψη πιο αξιόπιστων μετρήσεων.

- Οι συμβολομετρικές απεικονίσεις, σαράντα σε αριθμό σε διάστημα 9 μηνών σε πολύ πυκνό κάμμα 2m (δορυφόρος TERRASAR-X του γερμανικού κέντρου αεροδιαστήματος), μετά από επεξεργασία με τους διαφορικούς αλγορίθμους PSI και SBAS, κατέδειξαν ζώνες πολύ περιορισμένης έως περιορισμένης έκτασης με συγκριτικά μεγαλύτερη επιφανειακή παραμόρφωση της τάξης των 1-2cm, κάποιες από αυτές βρισκόμενες εντός των υπό παρακολούθηση περιοχών και κάποιες εκτός αυτών (Σχήμα 141). Τα παραπάνω ευρήματα και το μέγεθος της μετακίνησης βρίσκονται σε εύλογη συμφωνία με τα ευρήματα των καταγραφών από τα ήδη εγκατεστημένα κλισιόμετρα, της τάξης των 4-16mm σε βάθος.

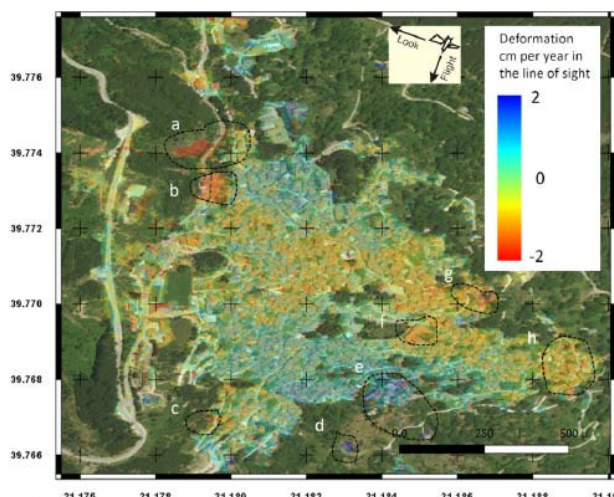


Figure 9. Deformation map of the DS descending track of the Metsovo area.

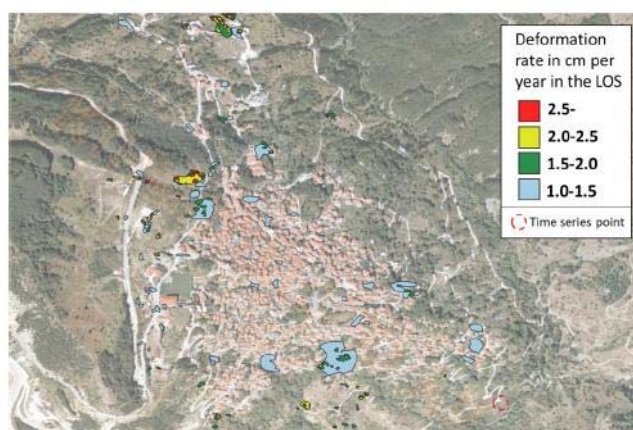


Figure 11. Polygons with all the deformation rate ranges of the DS of the descending track. With red dashed circle is marked the point that its time series is presented in Figure 12.

Σχήμα 141: Επισήμανση περιοχών με συγκριτικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις βάσει της διαφορικής συμβολομετρίας InSAR (πηγή: Derountis et al., 2022).

Συμπερασματικά, η βραδέως εξελισσόμενη κατολισθητική παραμόρφωση στο Μέτσοβο διερευνήθηκε, πέραν της υφιστάμενης παρακολούθησης με παραδοσιακά γεωτεχνικά όργανα, και μέσω σύγχρονων μέσων και εργαλείων. Λόγω της πολύ μικρής κλίμακας των παραμορφώσεων, οι απεικονίσεις ακριβείας μέσω συμβολομετρίας InSAR, με πολύ πυκνό κάμμα και εγκατάσταση παθητικών σημείων αναφοράς για αύξηση της ακρίβειας, έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα ενδείξεων ακριβείας σε όλη την περιοχή του οικισμού. Πράγματι η μέθοδος κατέδειξε ζώνες πολύ περιορισμένης έως περιορισμένης έκτασης με συγκριτικά πιο αυξημένη επιφανειακή παραμόρφωση, εύρημα που μπορεί να αποβεί χρήσιμο στα επόμενα στάδια της παρακολούθησης.

10.4 3η Περίπτωση – Επιτυχημένη Λειτουργία Συστήματος

Προειδοποίησης στις Ιταλικές Άλπεις

Στο Κεφ. 5.3.3 αναφέρεται ότι λόγω των χαρακτηριστικών των επίγειων ραντάρ GB-InSAR, και της προσφερόμενης δυνατότητας συνεχούς σάρωσης ενός πρανούς προς εντοπισμό μικρομετακινήσεων με μεγάλη ακρίβεια, αυτά μπορούν αξιοποιηθούν ως βασική μέθοδος παρακολούθησης σε ένα σύστημα προειδοποίησης.

Παρατίθενται ακολούθως συνοπτικά στοιχεία από την περίπτωση επιτυχούς λειτουργίας του για έγκαιρη προειδοποίηση επερχόμενης βραχώδους κατάπτωσης αξιόλογου όγκου σε περιοχή των ιταλικών Άλπεων (Carlà et al., 2019), στα ανάντη πολιτιστικού μνημείου, κτιρίων και επαρχιακής οδού (Σχήμα 142).

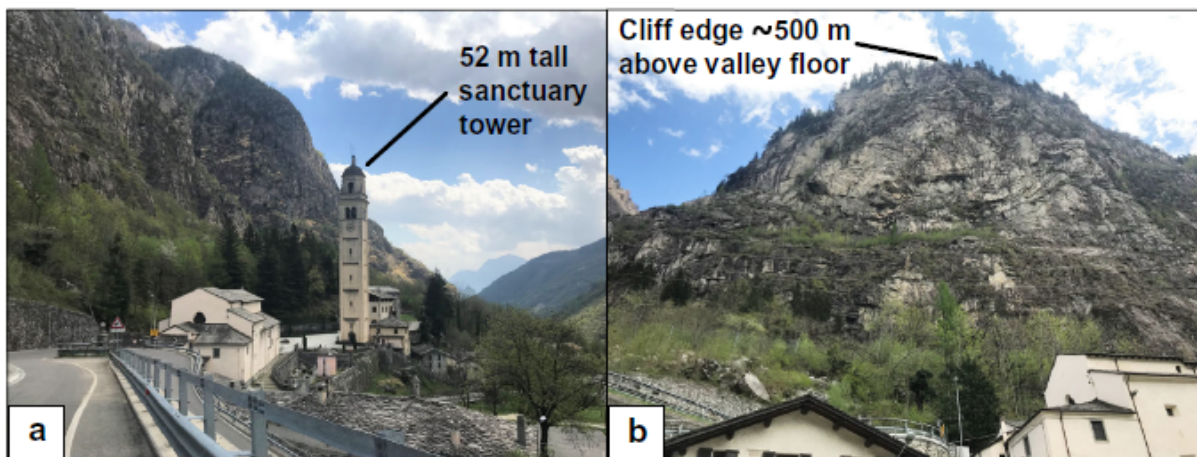


Fig. 1 a View of the Gallivaggio sanctuary from the NR 36 and **b** of the overhanging granitic slope
Σχήμα 142: Περιοχή Επιτυχούς Προειδοποίησης Κατολίσθησης με Επίγειο Ραντάρ GB-InSAR (πηγή: Carlà et al., 2019).

Στο πρανές, αποτελούμενο από βραχώδη γρανίτη με μεγάλου μήκους ασυνέχειες (Σχήμα 143), καταγραφόταν μια σταθερή ερπυστική παραμόρφωση, η οποία επιταχύνθηκε σε συγκεκριμένη περιοχή περί τη στέψη του πρανούς, και για περίοδο άνω του ενός μηνός. Το στοιχείο αυτό, που αναδείχθηκε από την συνεχή παρακολούθηση του πρανούς με επίγειο ραντάρ GB-InSAR, ερμηνεύτηκε ως πρόδρομο φαινόμενο επερχόμενης αστοχίας μορφής ολίσθησης επικρεμάμενου βραχώδους τεμάχους μεγάλων διαστάσεων (Σχήμα 144). Από τη διαρκή παρακολούθηση, την καλή γνώση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο πρανές και τη χρήση εμπειρικών σχέσεων, ο χρόνος εκδήλωσης της αστοχίας κατέστη δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια, κάποιες ώρες πριν την ώρα εκδήλωσής της. Αποτέλεσμα ήταν ο έγκαιρος αποκλεισμός της οδού και των κτιρίων (Carlà et al., 2019).

Παρόλο που τα κτίρια και η οδός υπέστησαν σοβαρές βλάβες από την αστοχία, δεν υπήρξε ανθρώπινη απώλεια ή τραυματισμός (Σχήμα 145).

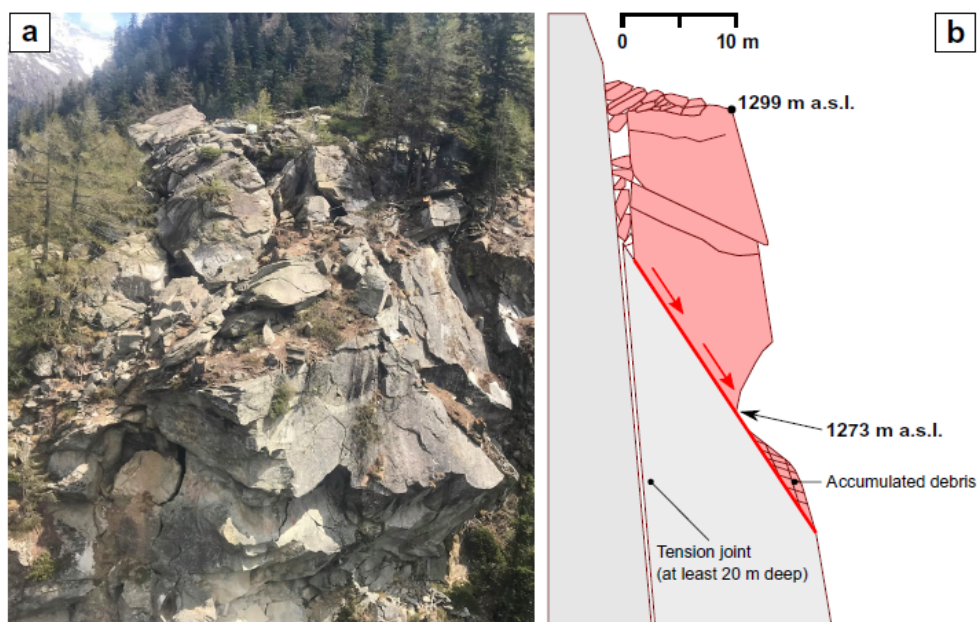


Fig. 4 a Frontal view and b cross-sectional sketch of the ~5000 m³ instability prior to the 29 May 2018 failure

Σχήμα 143: Φωτογραφία Ασταθούς βραχώδους τεμάχους πριν την αστοχία και αποτύπωση σε τομή (πηγή: Carlà et al., 2019).

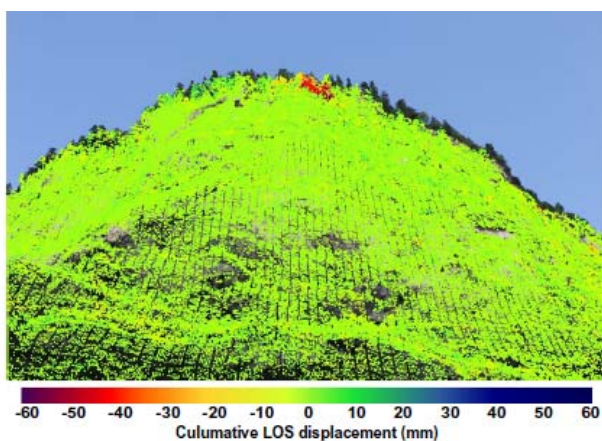


Fig. 5 Map of cumulative LOS displacements measured by the GBInSAR in the period 13–26 April 2018, superimposed on an optical image taken from the look perspective of the instrument. Gray areas over the slope correspond to the parts of the optical image (i.e., rock surface) with no return signal

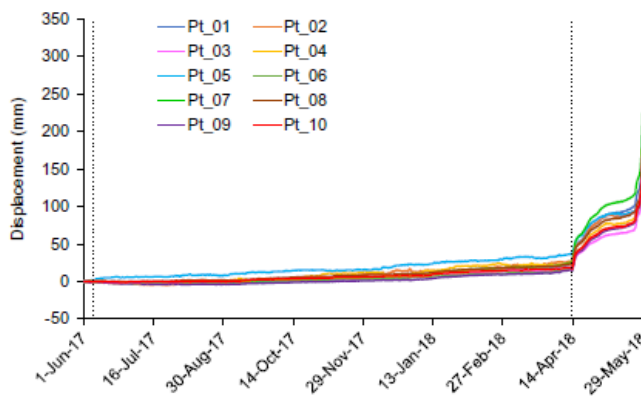


Fig. 6 Displacement time series of the control points between 1 June 2017 and 4:15 p.m. (local time) on 29 May 2018. The black dotted lines point out the 7 June 2017 and 13 April 2018 minor rockfalls, the red dotted line the time of the final failure

Σχήμα 144: Έγκαιρη Αναγνώριση Πρόδρομων Ενδείξεων Κατολίστησης βάσει της παρακολούθησης με το Επίγειο Ραντάρ GB-InSAR (πηγή: Carlà et al., 2019)



Σχήμα 145: Φωτογραφίες από το Συμβάν της Βραχοκατάπτωσης (πηγή:
<https://www.santuariogallivaggio.it/frana-di-gallivaggio/>)

11 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τις επιπτώσεις των κατολισθητικών φαινομένων στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον προς τις ακόλουθες κατευθύνσεις:

- Το θεωρητικό πλαίσιο εκδήλωσης των κατολισθήσεων.
- Τη διεθνώς καθιερωμένη μεθοδολογία ανάλυσης και διαχείρισης της κατολισθητικής επικινδυνότητας, με διακριτά στάδια και ενσωμάτωση σε αυτή τη διαδικασία των διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων κάθε εποχής.
- Την εξέλιξη των δυνατοτήτων των σύγχρονων εργαλείων ανάλυσης και των μεθόδων τηλεπισκόπησης, παρακολούθησης και προειδοποίησης των κατολισθητικών φαινομένων.
- Τις επιπτώσεις των κατολισθήσεων, σε φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, υπό το πρίσμα των σύγχρονων, παρατηρούμενων ή αναμενόμενων μεταβολών στο μέγεθος και την έκταση τους, λόγω της κλιματικής αλλαγής και της παρατηρούμενης / επερχόμενης έντασης των εναυσματικών κλιματικών παραγόντων πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων, της διαρκούς επέκτασης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο φυσικό περιβάλλον και σε επιδεκτικές σε κατολισθήσεις περιοχές και της παγκόσμιας ανισορροπίας στη φυσική τρωτότητα και την ανθεκτικότητα των κοινοτήτων να ανταπεξέρχονται στα κατολισθητικά συμβάντα.
- Το πλαίσιο και τις ιδιαιτερότητες των κατολισθητικών φαινομένων στην Ελλάδα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εξετάστηκαν οι επιπτώσεις των κατολισθήσεων και ο ρόλος των σύγχρονων εργαλείων και μεθόδων παρακολούθησης και προειδοποίησης σε τρεις περιπτώσεις μελέτης, κάθε μια από διαφορετική εποχή.

Η παλαιά κατολίσθηση στον Τσιβλό Αχαΐας (1913) κατέστρεψε πλήρως τον οικισμό Συλίβαινα και τμήμα του οικισμού Τσιβλός, με τέσσερις ανθρώπινες απώλειες και τη δημιουργία μιας πρόσκαιρης λίμνης, λόγω αποκοπής της ροής του π. Κράθης, και της μόνιμης ομώνυμης λίμνης, λόγω αποκοπής της ροής ενός μικρού παραποτάμου του. Πρόκειται για κατολίσθηση πολύ μεγάλων διαστάσεων με πολύ υψηλή ταχύτητα μετακίνησης και υψηλό δυναμικό καταστροφής. Περιγράφεται το τεχνικογεωλογικό πλαίσιο της εντός αποδομημένων ασβεστολιθικών σχηματισμών, ο μηχανισμός εκδήλωσης της κατολίσθησης και η σημασία των παραγόντων της συστηματικής βροχόπτωσης κατά το προηγούμενο διάστημα και της παρουσίας και γεωμετρίας του

ρίγματος της Βαλιμής. Η κατολίσθηση αποτελεί μοναδική περίπτωση στον ελληνικό χώρο ως προς τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, λόγω της δημιουργίας και της διατήρησης επί έναν αιώνα της ομώνυμης λίμνης, που εξελίσσεται ως φυσικό οικοσύστημα και τοπόσημο.

Πρόκειται για μια ιδιαίτερη περιοχή, πολύ μεγάλης έκτασης, με κατολισθητικό ιστορικό αλλά χωρίς κάποια υπόνοια ή ενεργή παρακολούθηση έναντι νέων φαινομένων, πέραν των μικρής κλίμακας, επιδερμικών ρωών κορημάτων, στα απότομα πρηνή στη στέψη της κατολίσθησης και στα εκατέρωθεν πρηνή του π. Κράθη, μακριά από τη λίμνη. Σε αυτές τις συνθήκες, τα σύγχρονα εργαλεία τηλεπισκόπισης, με εκτίμηση της υποχώρησης της επιφάνειας του φυσικού εδάφους μέσω σύγκρισης διαδοχικών δορυφορικών εικόνων, όπως στην περίπτωση της συμβολομετρίας InSAR, είναι πολύ χρήσιμα και κατάλληλα για γενική, εξ' αποστάσεως και μακροσκοπική επισκόπηση και παρακολούθηση της περιοχής, παρέχοντας γενικά δεδομένα ικανοποιητικής ακρίβειας για τη ζητούμενη κλίμακα, καλύπτοντας μια ευρεία περιοχή. Ωστόσο, με δεδομένες και τις αβεβαιότητες της μεθόδου, και παρά την γενικά αξιοπιστία της στη μεγάλη κλίμακα, η συνδυαστική παρακολούθηση μιας εστιασμένης περιοχής με μακροσκοπικές, τηλεσκοπικές μεθόδους μαζί με τυποποιημένες, καλύτερα ελεγχόμενες μεθοδολογίες αποτύπωσης συστήνεται προς άρση των αβεβαιοτήτων και επικύρωση των ποιοτικών και ποσοτικών σχετικών ευρημάτων της τηλεπισκοπικής μεθόδου. Στην εξεταζόμενη πρώτη περίπτωση μελέτης και χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη σελίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εδαφικών Μετακινήσεων (<https://egms.land.copernicus.eu>) για περίοδο 2016-2021 με χρήση της μεθοδολογίας InSAR, και με επίγνωση των αβεβαιοτήτων της μεθόδου όταν χρησιμοποιείται αυτόνομα, προκύπτουν κάποιες υποχωρήσεις στο απότομο, παραμένον πρηνές στη στέψη της κατολίσθησης, σε πολύ μεγάλο υψόμετρο, που αποδίδονται σε επιδερμικές ολισθήσεις κορηματικών υλικών. Το μέγεθος των υποχωρήσεων μειώνεται στα υψομετρικά χαμηλότερα και λιγότερο επικλινή κατάντη τμήματα της κατολίσθησης και περαιτέρω στα απότομα πρηνή της κοιλάδας του π. Κράθη, ενώ οι καταγραφές στην περιοχή της λίμνης, όπου τοπικά επικρατούν και νεογενείς, μαργαϊκοί σχηματισμοί, είναι πρακτικά μηδενικές.

Η κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας (1963) κατέστρεψε πλήρως το δυτικό τμήμα του οικισμού, με δεκατρείς απώλειες. Έλαβε χώρα σε μια περίοδο σταδιακής ανάπτυξης της γεωλογικής γνώσης και καλύτερης κατανόησης των κατολισθητικών φαινομένων και μηχανισμών, αλλά και κρατικής παρέμβασης προς μεταστέγαση των

πληττόμενων οικισμών. Ομοίως περιγράφεται το τεχνικογεωλογικό πλαίσιο εκδήλωσης της κατολίσθησης, εντός ασβεστολιθικών κορημάτων και του υποκείμενου αποδομημένου ασβεστολιθικού σχηματισμού. Και σε αυτή την περίπτωση το κατολισθητικό φαινόμενο ήταν ένα και ιδιαιτέρως καταστροφικό, με απομάκρυνση των ασθενών υλικών και με παραμένοντα υλικά καλύτερης ποιότητας και χωρίς ενδείξεις νέων ή περιοδικά ενεργοποιούμενων ολισθήσεων. Λόγω της γειννίας του παλαιού οικισμού με το απότομο ανάντη πρανές, τόσο στο τμήμα που αστόχησε όσο και στο διατηρούμενο, όπου συναντώνται σχηματισμοί του φλύσχη και της μεταβατικής ζώνης φλύσχη – ασβεστολίθων, η διερεύνηση της ευστάθειας του πρανούς και η τεκμηρίωση περί οικιστικής καταλληλότητας του διατηρούμενου τμήματος του οικισμού αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης επί μακρόν. Σήμερα, και χωρίς ιδιαίτερα φαινόμενα ασταθειών ή ανησυχητικές ενδείξεις, στο κεντρικό τμήμα του διατηρούμενου παλαιού οικισμού, που έχει αξιολογηθεί ως κατάλληλο για οικιστικές χρήσεις αναπτύσσονται κάποιες δραστηριότητες, κυρίως εποχιακά.

Με δεδομένο ότι η ευστάθεια του ανάντη του οικισμού πρανούς έχει διερευνηθεί διεξοδικά επί πολλά έτη, ο ρόλος των σύγχρονων εργαλείων τηλεπισκόπησης των συνθηκών εντάσσονται και σε αυτή την περίπτωση κυρίως στις δυνατότητες εξ' αποστάσεως εποπτείας και έγκαιρης αναγνώρισης τυχόν ανησυχητικών ενδείξεων, ως έμμεση προειδοποίηση κάποιας μεταβολής της τρέχουσας σταθερής κατάστασης για κινητοποίηση. Από την επεξεργασία των σχετικών στοιχείων της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εδαφικών Μετακινήσεων μέσω της μεθοδολογίας επιβεβαιώνεται η σταθερότητα στα πρανή και δεν προέκυψε κάποιο ανησυχητικό εύρημα, πάντα έχοντας επίγνωση των αβεβαιοτήτων και σφαλμάτων της μεθόδου συμβολομετρίας InSAR.

Η τρίτη περίπτωση μελέτης αφορά τα πρόσφατα, εκτεταμένα κατολισθητικά φαινόμενα κατά τον μεσογειακό κυκλώνα Ιανός (2020). Οι εξαιρετικά υψηλές έως ακραίες τιμές βροχόπτωσης προκάλεσαν εκτεταμένες αστοχίες σε πολυάριθμα φυσικά και τεχνητά πρανή και υποδομές, κυρίως στο οδικό δίκτυο και σε υδραυλικά έργα. Εικάζεται δε ότι ανάλογα κλιματικά φαινόμενα στο μέλλον, εκδηλωνόμενα με μεγαλύτερη συχνότητα ή με πρωτοφανή για τα ελληνικά δεδομένα ένταση τροπικού χαρακτήρα, λόγω της κλιματικής αλλαγής, θα αποτελούν τους βασικούς παράγοντες ενεργοποίησης κατολισθητικών φαινομένων σε ευρύτερη κλίμακα, σε αντιδιαστολή με τον συνήθη τοπικό χαρακτήρα των ελληνικών κατολισθήσεων.

Στο πλαίσιο εξειδίκευσης της τρίτης περίπτωσης μελέτης, εξετάστηκαν τέσσερις αντιπροσωπευτικές, χαρακτηριστικές θέσεις – τύποι κατολισθήσεων, στο ορεινό τμήμα του Ν. Καρδίτσας νοτίως της λίμνης Πλαστήρα, με διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά τους, τις βραχυχρόνιες, μακροχρόνιες ή δυνητικές επιπτώσεις τους και τα απαιτούμενα μέτρα αποκατάστασης. Σε κάποιες θέσεις υπήρξε ταχεία εκδήλωση του κατολισθητικού φαινομένου, ώστε μελλοντικά να αναμένονται δευτερεύουσας σημασίας ολισθήσεις ή ροές επί του μετώπου που διαμορφώθηκε, σε άλλες θέσεις με εξελισσόμενες εδαφικές μετακινήσεις προτάθηκαν βαριά μέτρα υποστήριξης για άμεση ανάσχεση και οριστική αντιμετώπιση του φαινομένου, ενώ σε άλλες, και με δεδομένο τον τοπικό χαρακτήρα του επηρεαζόμενου οδικού δικτύου, ως βέλτιστη επιλογή προκρίνεται η λήψη ήπιων μέτρων προστασίας και η συστηματική παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου.

Σε αυτό το πλαίσιο μιας ευρείας περιοχής που έχει καταστεί, μετά τον Ιανό, κατολισθητικά ενεργοποιημένη, και με δεδομένη της επιδεκτικότητά της σε αστάθειες λόγω του απότομου αναγλύφου, της επικράτησης φλυσχικών σχηματισμών και των ισχυρών βροχοπτώσεων, ο ρόλος των εργαλείων και μεθόδων ταχείας αναγνώρισης, διερεύνησης, παρακολούθησης και προειδοποίησης είναι αυξημένος. Η χρήση των UAVs χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την επισκόπηση της περιοχής, τόσο κατά την αρχική φάση αναγνώρισης των συνθηκών στην πληττόμενη περιοχή, όσο και κατά την εκπόνηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών αποκατάστασης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η δορυφορική συμβολομετρία InSAR για τη μακροσκοπική επισήμανση του πολύ υψηλού αριθμού των κατολισθητικών φαινομένων που προκλήθηκαν κατά τον Ιανό, στην ευρύτερη περιοχή της δυτικής ορεινής Καρδίτσας, και καλύτερη κατανόηση των κρίσιμων κατολισθητικών παραγόντων.

Παράλληλα, λόγω της ενεργοποίησης μετακινήσεων σε περιοχές οδικών δικτύων και υποδομών, προκύπτουν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις γεωτεχνικής παρακολούθησης της περιοχής, ιδιαίτερα σε επίπεδο μικρομετακινήσεων, σε θέσεις βραδέως εξελισσόμενων φαινομένων σημαντικού όγκου, επί της επιφάνειας του εδάφους ή εντός αυτού. Σε αυτή την κλίμακα και με την τρέχουσα ενεργότητα της περιοχής, τα στοιχεία από επεξεργασία δορυφορικών εικόνων μπορούν να είναι μόνο επιβοηθητικά και απαιτούνται ακριβέστερες και καλύτερα ελεγχόμενες μεθοδολογίες. Πέραν των παραδοσιακών μεθόδων τοπογράφησης και γεωτεχνικής παρακολούθησης, υπάρχουν τεχνολογικές εξελίξεις, ταχέως επεκτεινόμενες και βελτιούμενες, ωστόσο με πολύ μικρή διείσδυση στην τρέχουσα πρακτική στον ελληνικό χώρο, που προσφέρουν δυνατότητες συστηματικής γεωτεχνικής

παρακολούθησης από απόσταση ή με πολύ πιο γρήγορη εργασία στο πεδίο, ή ακριβείς αποτυπώσεις σε μικρό χρόνο. Είναι δεδομένο ότι στο άμεσο μέλλον η χρήση τέτοιων σύγχρονων οργάνων και συστημάτων θα εδραιωθεί στην ανάλυση και διαχείριση των κατολισθήσεων.

Η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται με συνοπτική, βιβλιογραφική παρουσίαση κάποιων ακόμα περιπτώσεων. Οι δύο αφορούν τη συνδυαστική παρακολούθηση ενός κατολισθητικού φαινομένου, με σύγχρονες και πιο τυπικές μεθόδους παρακολούθησης. Η πρώτη περίπτωση (Άνω Κεράσοβο Αιτωλοακαρνανίας) αφορά μια κατολισθητικά ενεργή περιοχή με μεγάλες, εξελισσόμενες εδαφικές παραμορφώσεις, όπου οι αποτυπώσεις μέσω UAV, με παραγωγή διαδοχικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους και οι τοπογραφικές μετρήσεις μέσω δεκτών GNSS αποτελούν τα βασικά μέσα παρακολούθησης. Η δεύτερη περίπτωση (Μέτσοβο) αναφέρεται σε βραδέως εξελισσόμενη κατολισθητική δραστηριότητα στην περιοχή, ήδη υπό παρακολούθηση με συμβατικά γεωτεχνικά όργανα. Η εφαρμογή της μεθόδου InSAR, με λεπτομερείς απεικονίσεις και έμφαση στην αύξηση της ακρίβειας των στοιχείων, αφενός κατέδειξε συμπεράσματα σε συμφωνία με αυτά των κλισιομετρικών μετρήσεων στην περιοχή, αφετέρου παρείχε εποπτικότερη εικόνα για τις μικροπαραμορφώσεις στην ευρύτερη περιοχή. Η τρίτη συνοπτικά παρουσιαζόμενη περίπτωση αφορά την επιτυχημένη λειτουργία συστήματος προειδοποίησης έναντι βραχοκατάπτωσης μεγάλης κλίμακας στις ιταλικές Άλπεις, μέσω συνεχούς σάρωσης επισφαλούς πρανούς με επίγειο ραντάρ InSAR.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω αναδεικνύονται οι μεγάλες δυνατότητες των σύγχρονων, διαθέσιμων μέσων και μεθόδων διερεύνησης, παρακολούθησης και προειδοποίησης κατολισθητικών φαινομένων, τα οποία προσφέρουν κατά περίπτωση τηλεπισκόπηση, μεγάλη ακρίβεια, πολύ μεγαλύτερη κάλυψη, ταχύτητα αποτύπωσης ή προσιτότητα. Αυτά τα μέσα και οι μέθοδοι σταδιακά εντάσσονται, πέραν του ερευνητικού επιπέδου, και στην τρέχουσα πρακτική της κατολισθητικής διερεύνησης και παρακολούθησης. Οι προσφερόμενες καινοτομίες είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρες, ωστόσο θα πρέπει να εφαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και το πεδίο εφαρμοσιμότητας και καταλληλότητας κάθε μεθόδου, αλλά και τα ιδιαίτερα γνωρίσματα και τις στοχεύσεις παρακολούθησης για κάθε κατολισθητικό συμβάν.

Από την διερεύνηση των περιπτώσεων μελέτης, αναδείχθηκε ότι η μέθοδος της διαστημικής συμβολομετρίας InSAR προσφέρει τηλεπισκοπική παρακολούθηση ευρύτερων περιοχών με θεωρητικά μεγάλη ακρίβεια έναντι μικρομετακινήσεων. Η

μέθοδος εντόπισε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κατολισθητικών φαινομένων που εκδηλώθηκαν στο Ν. Καρδίτσας κατά τον Ιανό, πέραν των εύκολα αναγνωρίσιμων σε θέσεις του οδικού δικτύου. Ωστόσο στη γενική εφαρμογή της μεθόδου για παρακολούθηση συγκεκριμένου συμβάντος υπεισέρχονται αβεβαιότητες, ειδικά σε περιοχές με βλάστηση, ώστε να προσφέρεται για γενική εποπτεία με πιο ποιοτικά χαρακτηριστικά (περίπτωση Τσιβλού και Μικρού Χωριού, αναγνώριση σημειωθείσας μεταβολής στην περίπτωση του Άνω Κερασόβου). Αντίθετα η μέθοδος δεν ενδείκνυται για ποσοτική εκτίμηση μεγάλων ή ταχύτατα εξελισσόμενων παραμορφώσεων, λόγω των τεχνικών χαρακτηριστικών της μεθόδου ή περιπτώσεων μικρής επιφάνειας αστοχίας σε σχέση με την περιοχή απεικόνισης.

Η πιο αναλυτική και λεπτομερής εφαρμογή της μεθόδου (πυκνός κάνναβος, επιφανειακά σημεία υποβοήθησης απεικόνισης), με επιβεβαίωση των ευρημάτων της και με παραδοσιακές μεθόδους παρακολούθησης, όπως η περίπτωση του Μετσόβου, μειώνει τις αβεβαιότητες και αυξάνει την εμπιστοσύνη στη χρήση και τα ευρήματα της μεθόδου, που μπορούν να αξιολογηθούν και να αξιοποιηθούν σε μια πολύ πιο ευρεία περιοχή από αυτή που εφαρμόζεται η γεωτεχνική παρακολούθηση. Ωστόσο, για την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη θέματα προσβασιμότητας στα στοιχεία και χρονικής διαθεσιμότητας των μετρήσεων, καθώς τα μεν γενικά στοιχεία από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Εδαφικών Μετακινήσεων ήταν διαθέσιμα σε μεταγενέστερο χρόνο, οι δε λεπτομερείς αποτυπώσεις συμβολομετρίας στην περίπτωση του Μετσόβου κάλυπταν ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα.

Η μέθοδος επίγειας συμβολομετρίας InSAR επικεντρώνεται σε ένα μεμονωμένο, ιδιαίτερης σημασίας πρυνές και όχι μια ευρύτερη περιοχή, ωστόσο με συνεχή σάρωση του και με άμεση πρόσβαση στα δεδομένα. Συνεπώς υπάρχει δυνατότητα ταχείας αξιολόγησής τους, παρέχοντας έγκαιρη επισήμανση τυχόν μικρομετακινήσεων στο πρυνές, ως πιθανό πρόδρομο φαινόμενο μιας επερχόμενης αστοχίας. Αυτή η χρήση μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα σύστημα προειδοποίησης ή σχέδιο κατολισθητικής διαχείρισης, όπως αναδείχθηκε στην περίπτωση επιτυχημένης «πρόγνωσης» της αστοχίας στην περίπτωση των ιταλικών Άλπεων.

Η χρήση των UAVs επεκτείνεται διαρκώς, λόγω των δυνατοτήτων άμεσης αναγνώρισης, εποπτικής επισκόπησης από αέρα απρόσιτων περιοχών, φωτογράφισης, διερεύνησης και τεχνικογεωλογικής αποτύπωσης μιας μεγάλης περιοχής (περίπτωση κατολισθήσεων Ιανού), σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της ευελιξίας και του μειωμένου κόστους.

Επιπλέον η δυνατότητα παραγωγής διαδοχικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους με μεθόδους φωτογραμμετρίας σε μια περιοχή με ταχέως εξελισσόμενες, μεγάλου μεγέθους εδαφικές παραμορφώσεις, προσφέρει άμεση διαθέσιμη και εύκολα αντιληπτή επισήμανση και παρακολούθηση των αλλαγών στο χώρο, σε ικανοποιητική ακρίβεια (περίπτωση Άνω Κερασόβου). Και εδώ η βλάστηση αποτελεί παράγοντα που απομειώνει την ακρίβεια της αποτύπωσης, η οποία αντίστοιχα βελτιώνεται με την ενσωμάτωση της τοπογραφικής πληροφορίας από επίγεια σημεία ελέγχου.

Για τις περιπτώσεις που η φυτοκάλυψη ή δενδροκάλυψη παρεμποδίζει ή μειώνει την ακρίβεια των τηλεπισκοπικών μεθόδων από το διάστημα ή τον αέρα και παράλληλα ζητείται ο προσδιορισμός των μικρομετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους ή σε βάθος (κατολισθήσεις Ιανού, Μέτσοβο), η συνεχής, αυτοματοποιημένη λήψη και αποστολή μετρήσεων από γεωτεχνικά όργανα αποτελεί τεχνικά εφικτή επιλογή, σταδιακά εφαρμοζόμενη σε ευρύτερη κλίμακα, με τα πλεονεκτήματα της ακρίβειας και αμεσότητας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Βιβλιογραφικές Αναφορές στην Αγγλική Γλώσσα

1. AGS (Australian Geomechanics Society). (2000). Landslide risk management concepts and guidelines. Australian Geomechanics Vol. 35, No 1, pp. 49-92.
2. AGS (Australian Geomechanics Society). (2007). Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. Australian Geomechanics Vol. 42, No 1, pp. 13-36.
3. Alatzas, S.D. (2020). Multi-Temporal SAR Interferometry for Monitoring Ground Deformation in Greece. PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Rural and Surveying Engineering. <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.19802>.
4. Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1), pp. 21–44. doi:10.1007/s100640050066
5. Amatya, P., Kirschbaum, D., Stanley, T., Tanyas, H. (2021). Landslide mapping using object-based image analysis and open source tools. Engineering Geology, Volume 282, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106000>.
6. Antronico, L., De Pascale, F., Coscarelli, R., Gullà, G. (2020). Landslide risk perception, social vulnerability and community resilience: The case study of Maierato (Calabria, southern Italy). International Journal of Disaster Risk Reduction. 46. 101529. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101529>.
7. Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. Wisner, B. (1994). At Risk: Natural Hazards, People Vulnerability and Disasters 1st edition. 10.4324/9780203428764.
8. Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B., Pelella, L. (2000). The influence of meteoric events in triggering shallow landslides in pyroclastic deposits of Campania, Italy. In: Bromhead E., Dixon N., Ibsen M.L. (eds), Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, Wales: A.A. Balkema, 1: 209-214
9. Carlà, T., Nolesini, T., Solari, L., Rivolta C., Dei Cas L., Casagli N. (2019) Rockfall forecasting and risk management along a major transportation corridor in the Alps through ground-based radar interferometry. Landslides. 16, pp. 1425–1435. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01190-y>.
10. Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S. Tofani, V., Ciampalini A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi G., Tanteri L., Lu, P. (2017) Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. Geoenvironmental Disasters 4:9, p. 23. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>.
11. Casagli, N., Morelli, S., Frodella, W., Intrieri, E., Tofani, V. (2018). TXT-tool 2.039-3.2 Ground-Based Remote Sensing Techniques for Landslides Mapping, Monitoring and Early Warning. In: Sassa, K., et al. Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools . Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_18.

12. Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., Raspini, F. (2023) Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*. 4, pp. 51–64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>.
13. Cascini, L., Bonnard, Ch., Corominas, J., Jibson, R., Montero-Olarte, J. (2005). Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberthardt, E. (eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London, pp. 199–235.
14. Colesanti, C., Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*. 88(3-4). pp. 173-199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
15. Costa, J.E., Schuster, R.L. (1988). The Formation and Failure of Natural Dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100, pp. 1054-1068. <https://doi.org/10.3133/ofr87392>.
16. Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Passera, E., Rucci, A., Dehls, J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Eineder, M., Brcic, R., Siegmund, R., Kotzerke, P., Kenyeres, A., Proietti, S., Solari, L., and Andersen, H. (2022) EGMS: a New Copernicus Service for Ground Motion Mapping and Monitoring, EGU General Assembly 2022. Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-9733. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9733>.
17. Crozier, M. (2005). Management Frameworks for Landslide Hazard and Risk: Issues and Options. *Landslide Hazard and Risk*. pp. 331-350. 10.1002/9780470012659.ch11.
18. Cruden, D.M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, pp. 27-29.
19. Cruden, D.M., Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. *Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report*, 247, pp. 36-75.
20. Cruden, D.M., VanDine, D. (2013). Classification, Description, Causes and Indirect Effects: Canadian Technical Guidelines and Best Practices related to Landslides. *Geological Survey of Canada Open File*. 7359.
21. Cui, P., Dang, C., Zhuang, J., You, Y, Chen, X. Scott, K.M. (2008). Landslide-dammed lake at Tangjiashan, Sichuan province, China (triggered by the Wenchuan Earthquake, May 12, 2008): risk assessment, mitigation strategy, and lessons learned. *Environmental Earth Sciences* 65, pp. 1055–1065. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0749-2>.
22. Dai, F.C, Lee, C.F., Ngai, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, Volume 64, Issue 1, pp. 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
23. Dandridge, C.; Stanley, T.A.; Kirschbaum, D.B.; Lakshmi, V. (2023). Spatial and Temporal Analysis of Global Landslide Reporting Using a Decade of the Global Landslide Catalog. *Sustainability* 2023, 15, 3323. 10.3390/su15043323.
24. Depountis, N., Kavoura, K., Nikolakopoulos, K., Drakatos, G., Argyrakis, P., Elias, P., Sabatakakis, N. (2022). Landslide monitoring using geotechnical, UAV, GNSS and MTInSAR instrumentation. 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring. <https://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13818>.

25. Diaz, V.J. (1992). Landslides in the squatter settlements of Caracas; towards a better understanding of causative factors. *Environment and Urbanization*, 4(2), pp. 80-89. <https://doi.org/10.1177/095624789200400208>.
26. Evans, S., Cruden, D., Bobrowsky, P., Guthrie, R., Keegan, T., Liverman, D. (2005). Landslide risk assessment in Canada; a review of recent developments. In *Landslide Risk Management*, Editors: O Hungr, R Fell, R Couture and E Eberhardt. Taylor and Francis, London. pp. 351-366.
27. Evans, S.G., Delaney, K.B., Hermanns, R.L., Strom, A., Scarascia-Mugnozza, G. (2011). The Formation and Behaviour of Natural and Artificial Rockslide Dams; Implications for Engineering Performance and Hazard Management. In: Evans, S., Hermanns, R., Strom, A., Scarascia-Mugnozza, G. (eds) *Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences*, vol 133. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_1.
28. Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A.J., van Westen, C.J, Tanyas, H., Hovius, N., Hales, T.C., Jibson, R.W., Allstadt, K.E., Zhang, L., Evans, S.G., Xu, C., Li, G., Pei, X., Xu, Q., Huang, R. (2019). Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*. Volume 57, Issue 2, pp. 421-503. <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>.
29. Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In *Landslide Risk Management*, Editors: O Hungr, R Fell, R Couture and E Eberhardt. Taylor and Francis, London. pp. 3-26
30. Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C. Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*. 102. 10.1016/j.enggeo.2008.03.022.
31. Ferentinou, M., Chalkias, C. (2013). Mapping Mass Movement Susceptibility Across Greece with GIS, ANN and Statistical Methods. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds) *Landslide Science and Practice*. Vol. 1, pp. 321-327, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_42.
32. Froude, M.J., Petley, D.N. (2018). Global Fatal Landslide Occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, pp. 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>.
33. Gariano, S. L., Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 162. 10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
34. Geertsema, M., Highland, L., Vagueouis, L. (2009). Environmental Impact of landslides. in: *Landslides – Disaster Risk Reduction*, edited by: Kyoji, S., Canuti, P., Springer, pp. 589-607. doi: 10.1007/978-3-540-69970-5_31.
35. GEO (Geotechnical Engineering Office) - ERM-Hong Kong, Ltd. (1998) Geo Report No. 75: Landslides and Boulder Falls from Natural Terrain: Interim Risk Guidelines. p. 183.
36. Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J. (2000). Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring. *Engineering Geology*, vol. 55 (3), pp. 167–192. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1).
37. Greenwood, W., Lynch, J., Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*. 25. doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464.

38. Groumpou, M., Avramidis, P., Iliopoulos, G., Papaefthymiou, H., Koukouvelas, I.K. (2021). The Krathis lake, one century of evolution. *European Journal of Geography*, Volume 12, Issue 2, pp. 020 – 035. doi: <https://doi.org/10.48088/ejg.m.gro.12.2.20.35>.
39. Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., Pavlovčič-Prešeren, P. A. (2023). Cost-Effective GNSS Solution for Continuous Monitoring of Landslides. *Remote Sensing*. 15 (9), 2287. <https://doi.org/10.3390/rs15092287>
40. Haque, U., Blum, P., Da Silva, P., Andersen, P., Pilz, J., Chalov, S., Malet, J.-P., Jemec Auflič, M., Andres, N., & Poyiadji, E., Lamas, P., Wenyi, Z., Peshevski, I., Pétursson, H., Kurt, T., Dobrev, N., García-Davalillo, J.C., Halkia, M., Ferri, S., Gaprindashvili G., Engström J., Keellings, D. (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslides*, vol. 13, no. 6, pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3>
41. Haque, U., da Silva, P.F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J.H., Glass, G.E. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of The Total Environment*. Volume 682, pp. 673-684, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415>.
42. Herrera, G., Mateos, R.M., García-Davalillo, J.C., Grandjean, G., Poyiadji, E., Maftai, R., Filipciuc, T.C. & Auflič, M.J., Jež J., Podolszki, L., Trigila, A., Iadanza, C., Raetzo, H., Kociu, A., Przyłucka, M., Kułak, M., Sheehy, M., Pellicer, X., McKeown, C., Jensen, O., et al. (2018). Landslide databases in the Geological Surveys of Europe. *Landslides*, 15, pp. 359-379. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0902-z>.
43. Highland, L., Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook - A guide to understanding landslides: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
44. Highway Research Board (1958). Special Report 29, Landslides and Engineering Practice, Committee on Landslide Investigations.
45. Huggel, C., Khabarov, N., Korup, O., Obersteiner, M. (2012). Physical impacts of climate change on landslide occurrence and related adaptation. In *Landslides, Types, Mechanisms and Modeling*. pp. 121 – 133, Cambridge University Press doi:10.1017/cbo9780511740367.012
46. Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M. and Hutchinson, J.N. (2001) Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7, 221-238. <http://dx.doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
47. Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. Vol. 11(2), pp. 167-194.
48. Hutchinson, J.N. (1968). Mass movement. In: R.W. Fairbridge (ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*, pp. 688–695). Reinhold, New York.
49. Hutchinson, J.N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. Bonnard (ed.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1988, Vol. 1, pp. 3–36. A A Balkema, Rotterdam.
50. International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides (1995). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 52: 75–78.

51. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M. H., Loye A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*. 61. pp. 5-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>.
52. Javadnejad, F., Slocum, R., Gillins, D., Olsen, M., Parrish, C. (2021). Dense Point Cloud Quality Factor as Proxy for Accuracy Assessment of Image-Based 3D Reconstruction. *Journal of Surveying Engineering*. 147. 04020021-1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000333](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000333).
53. Jones, R.L., Guha-Sapir, D. & Tubeuf, S. (2022). Human and economic impacts of natural disasters: can we trust the global data?. *Scientific Data* 9, 572. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01667-x>
54. Kahn, M.E. (2005). The Death Toll from Natural Disasters: The Role of Income, Geography, and Institutions. *The Review of Economics and Statistics*, MIT Press, vol. 87(2), pp. 271-284. <http://www.jstor.org/stable/40042902>
55. Kang, H., Kim, Y. (2016). The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Natural Hazards*, vol. 80, 3, pp. 1475–1493.
56. Karantanellis, E. (2021). Landslide Detection and Characterization based on OBIA Methodology and UAV Photogrammetry. PhD Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Sciences, School of Geology. p. 177. <https://doi.org/10.12681/eadd/50888>.
57. Kersten, T.P., Lindstaedt, M. (2022). Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field. *Applied Geomatics*. 14, pp. 421–434. <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2>.
58. Kirschbaum, D., Stanley, T., Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*. 249. 10.1016/j.geomorph.2015.03.016.
59. Kirschbaum D., Stanley, T. (2018). Satellite-Based Assessment of Rainfall-Triggered Landslide Hazard for Situational Awareness. *Earth's Future*. Vol. 6 (3), pp. 505-523, doi.org/10.1002/2017EF000715.
60. Kjekstad, O., Highland, L. (2009). Economic and Social Impacts of Landslides. in: S. Kyoji, P. Canuti (eds), *Landslides – Disaster Risk Reduction*, Springer, pp. 573–587. [doi:10.1007/978-3-540-69970-5_30](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_30).
61. Koukis, G. (1982). Mass movements in the Greek territory. A critical factor for environmental evaluation and development. *Proceedings of IV International Congress of IAEG*, New Delhi, vol. 3, pp. 233-243.
62. Koukis, G. (1988) Slope deformation phenomena, related to the engineering geological conditions in Greece. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*. vol. 1, Lausanne, pp. 1187–1192.
63. Koukis, G., Ziourkas, C. (1991). Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 43, pp. 47-60. <https://doi.org/10.1007/BF02590170>.
64. Koukis, G., Tsiambaos, G., Sabatakakis, N. (1994). Slope movements in the Greek territory: A statistical approach. *Proceedings of 7th International Congress of IAEG*, Lisbon, vol. 6, pp. 4621-4628.

65. Koukis, G., Koutsoyiannis, D. (1997). Greece. in: C. Embleton, C. Embleton-Hamann (eds), Developments in Earth Surface Processes, Volume 5, pp. 215-24, Elsevier, ISBN 9780444888242, [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(97\)80010-7](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(97)80010-7).
66. Koukis, G., Tsiambaos, G., Sabatakakis, N. (1997). Landslide movements in Greece. Engineering geological characteristics and environmental consequences. P.G. Marinos, G.C. Koukis, G.C. Tsiambaos & G.C. Stournaras (eds), International Symposium of Engineering Geology and the Environment, pp. 789-792.
67. Koukis, G., Sabatakakis, N., Nikolaou, N., Loupasakis, C. (2005). Landslide hazard zonation in Greece. Proceedings of the Open Symposium on landslides risk analysis and sustainable disaster management by International Consortium on Landslides, Washington USA, Chapt 37 pp. 291-296.
68. Koukis, G., Pyrgiotis, L., Kouki, A. (2015) Landslide Phenomena in Greece: Types of Movement Related to the Lithology and Structure of the Geological Formations. In Lollino, G. et al. (eds.), Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2, pp. 1023-1027, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_179
69. Kyriou, A. (2021) Landslide monitoring using remote sensing, GNSS, GIS methods and interferometric techniques. PhD Thesis, University of Patras, Department of Geology, Sector of Applied Geology & Geophysics.
70. Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S. (2017). The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. Geoscience Data Journal, 4. pp. 4-16. <https://doi.org/10.1002/gdj3.44>
71. Lagouvardos, K., Karagiannidis, A., Dafis, S., Kalimeris, A., Kotroni, V. (2022). Ianos - A hurricane in the Mediterranean. Bulletin of the American Meteorological Society. 103. pp. E1621–E1636. 10.1175/BAMS-D-20-0274.1.
72. Lainas, S., Sabatakakis, N., Koukis, G. (2015). Rainfall thresholds for possible landslide initiation in wildfire-affected areas of western Greece. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 75. 10.1007/s10064-015-0762-5.
73. Lee, E.M., Jones, D. (2004) Landslide risk assessment. Thomas Telford, London. <http://dx.doi.org/10.1680/lra.31715>.
74. Lin, C.W., Liu, S.H., Lee, S.Y., Liu, C.C. (2006). Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan. Engineering Geology, 86(2-3), pp. 87–101. doi:10.1016/j.enggeo.2006.02.010.
75. Mertens K., Jacobs, L., Maes, J., Kabaseke, C., Maertens, M., Poesen, J., Kervyn, M., Vranken, L. (2016). The direct impact of landslides on household income in tropical regions: A case study from the Rwenzori Mountains in Uganda. Science of The Total Environment, Volume 550, pp. 1032-1043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.171>.
76. Munich Re. 2012 Natural Catastrophe Year in review. <https://www.iii.org/sites/default/files/docs/pdf/MunichRe-010412.pdf>
77. Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Christian Herold, C., Jaedicke, C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. Landslides 3, 159–173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>

78. Nefros, C., Loupasakis, C. (2022). Introducing a geospatial database and GIS techniques as a decision-making tool for multicriteria decision analysis methods in landslides susceptibility assessment. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 59(1), 68–103. <https://doi.org/10.12681/bgsg.29038>
79. Nefros, C., Tsagkas, D., Kitsara, G., Loupasakis, C., Giannakopoulos, C. (2023). Landslide Susceptibility Mapping under the Climate Change Impact in the Chania Regional Unit, West Crete, Greece. *Land* 12, no. 1: 154. <https://doi.org/10.3390/land12010154>
80. Nikolakopoulos, K.G., Kyriou, A., Koukouvelas, I.K., Tomaras, N., Lyros, E. (2023). UAV, GNSS, and InSAR Data Analyses for Landslide Monitoring in a Mountainous Village in Western Greece. *Remote Sensing*. 15(11):2870. <https://doi.org/10.3390/rs15112870>.
81. Ozturk, U., Bozzolan, E., Holcombe, E.A., Shukla, R., Pianosi, F., Wagener, T. (2022). Analysis: Landslides increasingly threaten the world's urban poor. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-02141-9>
82. Papoutsis, I., Kontoes, C., Alatzas, S., Apostolakis, A., Loupasakis, C. (2020). InSAR Greece with Parallelized Persistent Scatterer Interferometry: A National Ground Motion Service for Big Copernicus Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12(19), 3207. <https://doi.org/10.3390/rs12193207>
83. Park, Y., Pradhan, A. M. S., Kim, U., Kim, Y.-T., Kim, S. (2016). Development and Application of Urban Landslide Vulnerability Assessment Methodology Reflecting Social and Economic Variables. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–13. doi:10.1155/2016/4572498
84. Pellicani, R., Manzari, P., Marzo, C., Spilotro, G., Argentiero, I., Ermini, R., Apollonio, C. (2019). UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy). *Geosciences*. 9 (6), 248. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060248>.
85. Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*. 40. 927-930. doi: 10.1130/G33217.1
86. Petley, D. N., Hearn, G. J., Hart, A. (2012). Towards the Development of a Landslide Risk Assessment for Rural Roads in Nepal. *Landslide Hazard and Risk*, 595–619. doi:10.1002/9780470012659.ch20
87. Petrucci, O. (2022). Landslide Fatality Occurrence: A Systematic Review of Research Published between January 2010 and March 2022. *Sustainability*. 14 (15): 9346. <https://doi.org/10.3390/su14159346>
88. Polykretis, C., Ferentinou, M., Chalkias, C. (2015). A comparative study of landslide susceptibility mapping using landslide susceptibility index and artificial neural networks in the Krios River and Krathis River catchments (northern Peloponnese, Greece). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 74(1), pp. 27-45. doi: 10.1007/s10064-014-0607-7
89. Pyrgiotis, L., Koukis, G., Sabatakakis, N. (2007). Rainfall and landslides in Karditsa county (Greece): a statistical approach. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 40. pp. 1722-1731. 10.12681/bgsg.17099.
90. Ramachandran, S., de la Fuente, A., Tonizzo, M., Sahin, S., Adam, B., Sanghi, A. (2010). Natural hazards, unnatural disasters: the economics of effective prevention. *World Bank*

- Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/620631468181478543/Natural-hazards-unnatural-disasters-the-economics-of-effective-prevention>
91. Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E., Lainas, S. (2013) Landslide susceptibility zonation in Greece. *Natural Hazards*, 65 (1) pp.523–543.
 92. SafeLand, Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. (2010). Deliverable D2.10, Identification of landslide hazard and risk "hotspots" in Europe - Work Package 2.4 - Identification of landslide hazard and risk "hotspots" in Europe. <https://www.ngi.no/en/projects/safeland/>
 93. SafeLand, Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. (2011). Deliverable D3.7, Expected changes in climate-driven landslide activity (magnitude, frequency) in Europe in the next 100 years - Work Package 3.3 - Landslide risk evolution in selected "hotspots" areas. <https://www.ngi.no/en/projects/safeland/>
 94. SafeLand, Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. (2012). Deliverable D2.6, Methodology for evaluation of the socio-economic impact of landslides (socio-economic vulnerability) - Work Package WP2.2 – Vulnerability to landslides. <https://www.ngi.no/en/projects/safeland/>
 95. Sakkas, G., Misailidis, I., Sakellariou, N., Kouskouna, V., Kaviris, G. (2016). Modeling landslide susceptibility in Greece: a weighted linear combination approach using analytic hierarchical process, validated with spatial and statistical analysis. *Natural Hazards*. 84, pp. 1873–1904. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2523-6>.
 96. Santi, P.M., Hewitt, K., VanDine, D.F., Barillas Cruz, E. (2011). Debris-flow impact, vulnerability, and response. *Natural Hazards*. 56. pp. 371-402. [10.1007/s11069-010-9576-8](https://doi.org/10.1007/s11069-010-9576-8).
 97. Schuster, R.L. (1996) Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.), *Landslides – investigation and mitigation*, National Res. Council, Washington, D.C., Trans. Res. Board Spec. Report 247, pp. 12–35
 98. Schuster, R.L., Highland, L.M. (2001). Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the Western Hemisphere; USGS Open-File Report 01-276; US Department of the Interior, US Geological Survey: Denver, CO, USA, 48p.
 99. Schuster, R.L., Highland, L.M. (2006) The Third Hans Cloos Lecture, Urban Landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 1, March 2006, pp. 1–27
 100. Schuster, R.L., Highland, L.M. (2007) Overview of the effects of mass wasting on the natural environment. *Geological Society of America, Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XIII, No. 1, February 2007, pp. 25–44
 101. Šegina, E., Peternel, T., Urbančič, T., Realini, E., Zupan, M., Jež, J., Caldera, S., Gatti, A., Tagliaferro, G., Consoli, A., Reyes González J., Auflič M.J. (2020). Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System. *Remote Sensing*. 12 (20), 3375. <https://doi.org/10.3390/rs12203375>
 102. Soeters, R., van Westen, C.J. (1996) Slope Instability Recognition Analysis and Zonation. In: Turner K.T. and Schuster, R.L., Eds., *Landslides: Investigation and Mitigation*, Special Report

- No. 247, Transportation Research Board National Research Council, Washington DC, pp. 129-177.
103. Solari, L., Del Soldato, M., Raspini, F., Barra, A., Bianchini, S., Confuorto, P., Casagli, N., Crosetto, M. (2020). Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy. *Remote Sensing*. 12 (8), 1351. <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.
104. Staiger R. (2005). The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). TS 38- Using Laser Scanning in Engineering Surveys, TS 38.6 Geometrical Quality of Laser Scans, FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt April 2005. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/cairo/papers/ts_38/ts38_05_staiger.pdf.
105. Stanley, T., Kirschbaum, D.B. (2017). A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nat Hazards* 87, pp. 145–164. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>
106. Terzaghi, K. (1950). *Mechanisms of Landslides*. Geotechnical Society of America, Berkeley, pp. 83-125.
107. Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., Genevois, R. (2007). Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach, *International Journal of Remote Sensing*. 28:16, pp. 3425-3446. <https://doi.org/10.1080/01431160601024234>.
108. The World Bank and The United Nations (2010). *Natural Hazards UnNatural Disasters; The Economics of Effective Prevention*, <http://documents.worldbank.org/curated/en/620631468181478543/Natural-hazards-unnatural-disasters-the-economics-of-effective-prevention>
109. Tobin, G.A. (1999). Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*. Volume 1, Issue 1, pp. 13-25. [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(99\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(99)00002-9).
110. Tomljenovic, I., Höfle, B., Tiede, D., Blaschke, T. (2015). Building Extraction from Airborne Laser Scanning Data: An Analysis of the State of the Art. *Remote Sensing*. 2015; 7(4). pp. 3826-3862. <https://doi.org/10.3390/rs70403826>.
111. Transportation Research Board (1978). Special Report 176, *Landslides: Analysis and Control*, Schuster R. & Krizek R. (eds), National Academy of Sciences.
112. Transportation Research Board (1996). Special Report 247, *Landslides: Investigation and Mitigation*, Turner A.K., Schuster R. (eds), National Academy Press.
113. Turner, A.K. (2018). Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions*. 3 (70). <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>.
114. UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Author Nadim F. (2017). *Landslide hazard and risk assessment*. pp. 10. <https://www.undrr.org/publication/landslide-hazard-and-risk-assessment>.
115. UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Editor Safaie D. (2017). *Governance System, Methodologies, and Use of Results*. pp. 77. https://www.unisdr.org/files/globalplatform/591f213cf2fbe52828_wordsintoactionguideline.nationaldi.pdf
116. UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030*. pp.35. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework>

117. Valkaniotis, S., Papathanassiou, G., Marinos, V., Saroglou, C., Zekkos, D., Kallimogiannis, V., Karantanellis, E., Farmakis, I., Zalachoris, G., Manousakis, J., Ktenidou, O.-J. (2022). Landslides Triggered by Medicane Ianos in Greece, September 2020: Rapid Satellite Mapping and Field Survey. *Applied Sciences* 12 (23):12443. <https://doi.org/10.3390/app122312443>.
118. Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Montanarella, L. (2013). Landslide Databases in Europe: Analysis and Recommendations for Interoperability and Harmonisation. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds) *Landslide Science and Practice*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_4
119. Van Westen, C., Castellanos, E., Kuriakose, S. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, Volume 102, Issues 3–4, pp. 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>.
120. Varnes, D. J. (1958). Landslide Types and Processes. In *Special Report 29: Landslides and Engineering Practice* (Eds: Eckel, E. B., Highway Research Board, Washington, D.C. pp. 20-47.
121. Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In *Special Report 176: Landslides: Analysis and control* (Eds: Schuster, R.L and Krizek, R.J), Transportation and Road research board, National Academy of Science, Washington D.C. pp. 11-33.
122. Wilde, M., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Hervás, J. (2018). Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2. *Journal of Maps*. 14. 97-104. [10.1080/17445647.2018.1432511](https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1432511).
123. WP/ WLI. (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 47, pp. 53–57.
124. WP/ WLI., Popescu, M.E. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 50, pp. 71–74.
125. Záruba, Q., Mencl, V. (1969). *Landslides and their control*. Elsevier, Amsterdam, 205 p
126. Zekkos D., Zalachoris G., Alvertos, A.E., Amatya P.M., Blunts P., Clark M., Dafis S., Farmakis I., Ganas A., Hille M., Kalimogiannis V., Karagiannidis A., Karantanellis E., Khan K., Kirshbaum D., Kourkoulis R., Kotroni V., Ktenidou O.-J., Lagouvardos K., Loli M., Makrinikas A., Marinos V., Manousakis J., Nikas K., Panousis D., Papathanassiou G., Saroglou C., Simopoulos A., Stanley T., Tsavalas A., Valkaniotis S. (2020) The September 18-20 2020 Medicane Ianos Impact on Greece - Phase I Reconnaissance Report. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Report*, GEER-068, <https://doi.org/10.18118/G6MT1T>.
127. Zhang, K., Okazawa, H., Hayashi, K., Hayashi, T., Fiwa, L., Maskey, S. (2022). Optimization of Ground Control Point Distribution for Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Inaccessible Fields. *Sustainability*. 14(15):9505. <https://doi.org/10.3390/su14159505>.
128. Zhang, L.M., Zhang, S., Huang, R.Q. (2014). Multi-hazard scenarios and consequences in Beichuan, China: the first five years after the 2008 Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, vol. 180, pp. 4-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.020>.
129. Zygouri, V., Koukouvelas, I.K. (2019). Landslides and natural dams in the Krathis River, north Peloponnese, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, pp. 207–222. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1225-y>.

Βιβλιογραφικές Αναφορές στην Ελληνική Γλώσσα

- E-1. Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής. (2021). Παρουσίαση Γεωτεχνικής Έρευνας – Τεχνική Έκθεση – Παράρτημα, Έργο: «Αποκατάσταση των ζημιών στις υφιστάμενες οδικές καθώς και σε λοιπές υποδομές στην Περιφέρεια Θεσσαλίας που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανός» στις 18 & 19 Σεπτεμβρίου 2020», Ανάδοχος Τέρνα Α.Ε., Κύριος του Έργο: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών/ΓΓΥ/ΕΥΔΕ ΚΣΣΥ.
- E-2. Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής. (2022a). Οριστική Γεωτεχνική Μελέτη, Οδικό Τμήμα 1-10, Θέση 567, Έργο: «Αποκατάσταση των ζημιών στις υφιστάμενες οδικές καθώς και σε λοιπές υποδομές στην Περιφέρεια Θεσσαλίας που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανός» στις 18 & 19 Σεπτεμβρίου 2020», Ανάδοχος Τέρνα Α.Ε., Κύριος του Έργο: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών/ΓΓΥ/ΕΥΔΕ ΚΣΣΥ.
- E-3. Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής. (2022b). Οριστική Γεωτεχνική Μελέτη, Οδικό Τμήμα 1-9, Θέσεις 472, 473, 25, 502 Παραρτήματος Ι, ΙΙ, ΙV, Έργο: «Αποκατάσταση των ζημιών στις υφιστάμενες οδικές καθώς και σε λοιπές υποδομές στην Περιφέρεια Θεσσαλίας που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανός» στις 18 & 19 Σεπτεμβρίου 2020», Ανάδοχος Τέρνα Α.Ε., Κύριος του Έργο: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών/ΓΓΥ/ΕΥΔΕ ΚΣΣΥ.
- E-4. Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής. (2022c). Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Οδικό Τμήμα 1-9, Χ.Θ. 0+300 έως Χ.Θ. 4+600, Έργο: «Αποκατάσταση των ζημιών στις υφιστάμενες οδικές καθώς και σε λοιπές υποδομές στην Περιφέρεια Θεσσαλίας που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανός» στις 18 & 19 Σεπτεμβρίου 2020», Ανάδοχος Τέρνα Α.Ε., Κύριος του Έργο: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών/ΓΓΥ/ΕΥΔΕ ΚΣΣΥ.
- E-5. Ατένεια Μελέτες Γεωμηχανικής. (2022d). Οριστική Γεωτεχνική Μελέτη, Οδικό Τμήμα 1-9, Θέσεις 477-479-478, 485, 486, 503 Παραρτήματος ΙΙ, Έργο: «Αποκατάσταση των ζημιών στις υφιστάμενες οδικές καθώς και σε λοιπές υποδομές στην Περιφέρεια Θεσσαλίας που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανός» στις 18 & 19 Σεπτεμβρίου 2020», Ανάδοχος Τέρνα Α.Ε., Κύριος του Έργο: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών/ΓΓΥ/ΕΥΔΕ ΚΣΣΥ.
- E-6. Βασιλειάδης, Ε. (2010). Ζωνοποίηση της Επικινδυνότητας των Κατολισθητικών Φαινομένων στον Ελληνικό Χώρο. Δημιουργία και Εφαρμογή Μοντέλων με Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-7. Γκουρνέλλος, Θ., Χαλκιάς, Χ., Τσαγκάς, Δ. (2006). Επιδεκτικότητα Εκδήλωσης Κατολισθήσεων για τον Ελληνικό Χώρο. Ανάλυση με τη Χρήση Κανόνων Ασαφούς Λογικής και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Γεωγραφίες, Νο 12, σ. 114-126.
- E-8. Ζιούρκας, Κ. (1989). Κατολισθητικά Φαινόμενα στον Ελληνικό Χώρο. Τεχνικογεωλογική Θεώρηση – Στατιστική Ανάλυση. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-9. ΙΓΜΕ (1980). Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας, κλίμακα 1:50.000, Φύλλο Φραγκίστα.
- E-10. ΙΓΜΕ (1991). Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας, κλίμακα 1:50.000, Φύλλο Φουρνάς.

- E-11. ΙΓΜΕ (1993). Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας, κλίμακα 1:50.000, Φύλλο Δερβένι.
- E-12. ΙΓΜΕ (2010). Συμβολή του Ινστιτούτο στην Βιώσιμη και Ανταγωνιστική Ανάπτυξη, Επιστολή προς ΥΠΕΚΑ - Απάντηση του Βουλευτή του Λάος κ. Βελόπουλου, Αρ. Πρωτ. 44/2010.
- E-13. Κάβουρα, Α. Π. (2013). Κατολισθήσεις στο Νομό Αχαΐας: Ανάπτυξη Μοντέλου Επικινδυνότητας. Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης στο πλαίσιο του προγράμματος «Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-14. Κάβουρα, Α. Π. (2017). Ανάπτυξη Μοντέλου Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων σε περιοχή της Δυτικής Ελλάδας. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-15. Κοντογιώργος, Β. (2018). Κατολισθητικά φαινόμενα στην Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας, η περίπτωση του Παλαιού Μικρού χωριού. Πτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας & Εφαρμοσμένων Οικονομικών, Τμήμα Γεωγραφίας.
- E-16. Κορδούλη, Μ. (2020). Μεθοδολογίες Αποτίμησης της Επιδεκτικότητας προς Κατολίσθηση μέσω της Ανάπτυξης Πολυδιαχειριστικών Συστημάτων. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-17. Κουσουρής, Θ. Σ. (2014). Οι Λίμνες στην Ελλάδα. 5/6. Στερεά Ελλάδα, Εύβοια, Πελοπόννησος «Λιμνών Καταγραφές & Μαρτυρίες» https://www.ekke.gr/projects/estia/Cooper/limnes/5_book.pdf
- E-18. ΚΠΕ (Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης) Ακράτας (2003). Ο Υγροβιότοπος της Λίμνης Τσιβλού - Εκπαιδευτικό Πρόγραμμα.
- E-19. Κρασάκης, Π. (2017). Εκτίμηση Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας στην Ορεινή Περιοχή των Δήμων Ναυπακτίας και Καρπενησίου με την Εφαρμογή Γεωχωρικής Ανάλυσης και τη Χρήση Δεδομένων Συμβολομετρίας. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, ΜΠΣ «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Έργων Υποδομής (ΠΣΕ)»
- E-20. Λέκκας, Ε. (2000). Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές. Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. 2η Έκδοση. 270σ.
- E-21. Λουπασάκης, Κ. (2013) Σημειώσεις Διαλέξεων μαθήματος «Τεχνική Γεωλογία Ι», Ακαδημαϊκό έτος 2013-2014, ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, http://www.legah.metal.ntua.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=16
- E-22. Μπλιώνα, Μ. (2008). Ανάπτυξη Βάσης Δεδομένων Κατολισθήσεων στον Ελληνικό Χώρο. Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης στο πλαίσιο του προγράμματος «Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-23. Οικονόμου, Σ. (2003). Η τραγωδία του Μικρού Χωριού Ευρυτανίας. Μικροχωρίτικα Γράμματα, τεύχος 74.
- E-24. Παπανικολάου, Δ., Διακάκης, Μ. (2011). Μεταβολές στην Ένταση και την Κατανομή των Φυσικών Καταστροφών. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής

- E-25. Πλάκας, Ε. (2016). Το χωριό που νίκησε τον θάνατο. Η ιστορία της κατολισθήσης του Μικρού Χωριού Ευρυτανίας. Η καταστροφή και αναγέννηση της «Μικρής Ελβετίας». Βαγγέλης Πλάκας, Θεσσαλονίκη.
- E-26. Πυργιώτης, Α. (1997). Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες στο Νομό Καρδίτσας. Κατολισθητικά Φαινόμενα στους Σχηματισμούς του Φλύσχη. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- E-27. Ρόζος, Δ., Αποστολίδης, Ε. (2004). Τεχνικογεωλογική Διερεύνηση των Αστοχιών Πρανών στο Παλαιό Μικρό Χωριό Νομού Ευρυτανίας για την ασφαλή οικιστική Ανάπτυξη του. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. 36 (4), σ. 1806-1815, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.
- E-28. Σαπουντζάκη, Κ., Δανδουλάκη, Μ. (2016). Κίνδυνοι και Καταστροφές, Έννοιες και Εργαλεία Αξιολόγησης, Προστασίας, Διαχείρισης. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- E-29. Strutyńska, Z. (2017). Κατολισθητικά φαινόμενα στο Ν. Αχαΐας. Διερεύνηση των αιτιών τους και σύνθεση χαρτών επιδεκτικότητας για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κράθης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- E-30. Τσαγγαράτος, Π. (2012). Διερεύνηση της Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς των Γεωλογικών Σχηματισμών με τη Χρήση Πληροφοριακών Συστημάτων. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- E-31. Τσαγκάς, Δ. (2011). Γεωμορφολογικές Παρατηρήσεις και Κινήσεις Βαρύτητας στη Βόρεια Πελοπόννησο. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος.
- E-32. Τσαμπά, Α. (2018). Εφαρμογή προγνωστικών χωρικών μοντέλων για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας και η χρήση τους ως εργαλείου διαχείρισης κινδύνων. Η περίπτωση της λεκάνης απορροής του Κρικελιώτη ποταμού του νομού Ευρυτανίας. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, ΜΠΣ «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Έργων Υποδομής (ΠΣΕ)»
- E-33. Φουμέλης, Μ. (2009). Μελέτη Επιφανειακής Παραμόρφωσης Ευρύτερης Περιοχής Αθηνών βάσει Διαφορικών Μετρήσεων GPS και Συμβολομετρίας Ρανταρ. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος, Τομέας Γεωφυσικής – Γεωθερμίας.
- E-34. Χατζηνάκος, Ι., Αποστολίδης, Ε., Πογιατζή, Ε., Κυνηγαλάκης, Μ. (1998). Τεχνική Έκθεση Τ-2010 για το έργο «Έρευνα Κατολισθητικών Φαινομένων, Τεχνικογεωλογική Χαρτογράφηση, Οριοθέτηση Οικισμών Κοινότητες: Μικρό Χωριό, Τριπόταμος, Προυςός, Φουρνά, Ψιανά». ΙΓΜΕ, Διεύθυνση Τεχνικής Γεωλογίας.

Ιστοσελίδες

(τελευταίος έλεγχος πρόσβασης στις 12/07/2023)

- W-1. <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>
- W-2. <http://eliaserver.elia.org.gr:8080/lselia/rec.aspx?id=540394>
- W-3. <http://geoland.metal.ntua.gr/#7/37.949/22.670>
- W-4. <http://iplhq.org/ls-world-report-on-landslide/>
- W-5. <http://www.kolivas.de/archives/372418>
- W-6. http://www.db.gndci.cnr.it/php2/rainfall_thresholds/thresholds_type.php?typesigla=I-D
- W-7. <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>
- W-8. <https://egms.land.copernicus.eu>
- W-9. https://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_tropical-like_cyclone
- W-10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>
- W-11. https://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam
- W-12. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>
- W-13. <https://gaia.igme.gr/portal/home/>
- W-14. <https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>
- W-15. <https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html>
- W-16. <https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>
- W-17. <https://landslides.nasa.gov/viewer>
- W-18. <https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm>
- W-19. <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/>
- W-20. <https://ourworldindata.org/natural-disasters#what-share-of-deaths-are-from-natural-disasters>
- W-21. <https://public.emdat.be>
- W-22. <https://public.emdat.be/about>
- W-23. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/revisit-and-coverage>
- W-24. <https://shefuni.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=98462998953c4f1fbd7caa166373f63>
- W-25. <https://sinidisi.gr/synechizetai-katolisthisi-dromoy-pros-to-ano-kerasovo/>
- W-26. https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf
- W-27. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/landslides/>
- W-28. <https://www.copernicus.eu/en>
- W-29. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work/
- W-30. https://www.esa.int/Applications/Technology_Transfer/Space-Based_Architecture_for_GNSS_Augmentation_Systems
- W-31. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_GR/SEM521D6UQH_0.html
- W-32. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-earth-observation>
- W-33. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>
- W-34. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/cairo/papers/ts_38/ts38_05_staiger.pdf
- W-35. <https://www.gim-international.com/content/article/recent-developments-in-airborne-lidar-2>

- W-36. <https://www.iii.org/sites/default/files/docs/pdf/MunichRe-010412.pdf>
- W-37. https://www.imerisia.gr/oikonomia/18725_ypografetai-i-symbasi-ton-143-ekat-gia-tin-apokatastasi-ton-zimion-toy-ianoy-sti
- W-38. <https://www.kathimerini.gr/society/561221164/metakinisi-oikismon-logo-katolisthiseon/>
- W-39. <https://www.ngi.no/en/projects/safeland/>
- W-40. <https://www.santuariogallivaggio.it/frana-di-gallivaggio/>
- W-41. <https://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>
- W-42. <https://www.undrr.org/terminology/resilience>
- W-43. https://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf
- W-44. <https://www.usgs.gov/faqs/what-landslide-and-what-causes-one>