

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας & Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία & Διαχείριση του Χώρου»

Κατεύθυνση

«Διαχείριση Φυσικών & Ανθρωπογενών Καταστροφών»

Η διακινδύνευση του ΕΣΜΗΕ στους φυσικούς κινδύνους Διπλωματική Εργασία

Γαλλούση Χριστίνα

Аөнма, 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας & Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καρύμπαλης Ευθύμιος (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χαλκιάς Χρήστος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Κατσαφάδος Πέτρος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Η Γαλλούση Χριστίνα δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάζει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στο χρυσοψαράκι

Πρόλογος-ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του 3^{ου} εξαμήνου του μεταπτυχιακού προγράμματος «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία & Διαχείριση του Χώρου» 2015-2016, της Α΄ Κατεύθυνσης «Διαχείριση Φυσικών & Ανθρωπογενών Καταστροφών». Η παρούσα εργασία αφορά στο προκαταστροφικό στάδιο διαχείρισης του κινδύνου και στοχεύει στη διερεύνηση της διακινδύνευσης του ΕΣΜΗΕ από την εκδήλωση φυσικών φαινομένων και αναμένεται να αυξηθούν λόγω της αλλαγής του κλίματος.

Πριν την παράθεση της μεταπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπον κ. Ευθύμιο Καρύμπαλη, Αναπληρωτή Καθηγητή Τμήματος Γεωγραφίας, για την αμέριστη και συνεχή υποστήριξή του, κατά τη φάση εκπόνησης του τεχνικού μέρους της παρούσας διπλωματικής, την οργάνωση των αποτελεσμάτων και τη σύνταξη του πονήματος. Η συνεχής τροφοδότηση με επιστημονικά δεδομένα, η καθοδήγησή του σε νέες επιστημονικές μεθόδους και πάνω από όλα την αδιάκοπη ενθάρρυνση για την ολοκλήρωσή του πονήματος, ήταν καθοριστικά για την συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστώ, ιδιαιτέρως τον κ.Χαλκιά Χ., Αναπληρωτή Καθηγητή Τμήματος Γεωγραφίας, για την διάθεση ψηφιακών δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων που αφορούν στον κατολισθητικό κίνδυνο.

Επίσης ευχαριστώ τον κ.Κατσαφάδο Π., Αναπληρωτή Καθηγητή Τμήματος Γεωγραφίας για την διάθεση κλιματικών δεδομένων προκειμένου να διερευνηθεί η ένταση των ανέμων σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Ευχαριστώ θερμά όλους τους διδάσκοντες του ΠΜΣ για την πολυεπίπεδη διδασκαλία και διεπιστημονική προσέγγιση που προσέφεραν κατά τη διάρκεια των μαθημάτων εξειδίκευσης σε θέματα διαχείριση φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους συναδέλφους από τον ΑΔΜΗΕ για την ανταλλαγή απόψεων σε θέματα που αφορούν στο αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Ιδιαιτέρως ευχαριστώ τον συνάδελφο Αντρέα, λάτρη των λογισμικών ανοιχτού κώδικα, για την καθοδήγηση και τη διάθεση της γνώσης που έχει συσσωρεύσει μετά από άπειρες ώρες ενασχόλησης με θέματα GIS.

Ευχαριστώ τον κ.Καραλή Σ., Τοπογράφο Μηχανικό διδάσκον του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. και Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής του ΤΕΙ Αθήνας, για την διάθεση ψηφιακών δεδομένων και για την εκπαίδευση που μου προσέφερε δίχως δεύτερη σκέψη, σε θέματα εκτίμησης κινδύνου φυσικών φαινομένων.

Επίσης ευχαριστώ τον κ.Καλογερόπουλο Κ., Υπ. Διδάκτορα Τμήματος Γεωγραφίας για την άμεση ανταπόκριση και διάθεση ψηφιακών δεδομένων.

Τέλος ευχαριστώ θερμά όλους τους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές, που παρακολούθησαν το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών για το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016, για την υπέροχη συνύπαρξη κατά τη διάρκεια των δύο εξαμήνων.

Περιεχόμενα

Περίληψη		1
Abstract		2
1. Εισαγωγή		6
1.1 Φυσικές Καταστρο	οφές στα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	6
1.2. Επίδραση των φυσ	σικών καταστροφών στα ΣΜΗΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης	
1.3. Ελληνικό Σύστημα	α Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	15
2. Κατολισθήσεις		20
2.1. Βιβλιογραφική αν	νασκόπηση κατολισθήσεων	20
2.1.1. Συνέπειες - ορ	ρισμός φαινομένου	20
2.1.2.Συστηματική τ	ταξινόμηση κατολισθήσεων	
2.1.3.Χρονική εξέλιδ	ξη κατολισθήσεων	
2.1.3.1. Ρυθμός με	ετακίνησης των πρανών	
2.1.3.2. Ιστορικό κ	κατολίσθησης	
2.1.4. Παράγοντες δ	δημιουργίας και εκδήλωσης κατολισθήσεων	
2.1.4.1. Συνθήκες	; ευστάθειας φυσικών και τεχνιτών πρανών	
2.1.4.2. Κατολισθ	ητικός κίνδυνος στην Ελλάδα	47
2.2. Μεθοδολογική προ	οσέγγιση & εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολία	5 θηση52
2.2.1. Επισκόπηση μ	μεθόδων καταγραφής κατολισθήσεων	
2.2.2. Επισκόπηση μ	μεθόδων ανάλυσης των κατολισθήσεων με τη χρήση ΣΓΠ	55
2.2.3. Υπολογισμός	δείκτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων	60
2.2.3.1. Εισαγωγή	ί δεδομένων και επεξεργασία παραγόντων κατολισθήσεων	,60
2.2.3.2. Εισαγωγή	ή παραγόντων, δημιουργία κατηγοριών και ταξινόμηση	61
2.2.3.3. Υπολογι παραγόντων	ισμός της πυκνότητας κατολισθήσεων για κάθε μια	α κλάση των 65
2.2.3.4. Δημιουργ αποτελεσμάτων	γία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση	& αξιολόγη σ η 67
2.3. Διακινδύνευση ΕΣ	ΣΜΗΕ σε κατολίσθηση	72

3. Άνεμοι ισχυρών εντάσεων
3.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση81
3.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά της γήινης ατμόσφαιρας81
3.1.2. Κίνηση ανέμων
3.1.3. Άνεμοι ισχυρών εντάσεων-Σίφωνες
3.1.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά και παράγοντες δημιουργίας σιφώνων
3.1.3.2. Χαρακτηριστικά σιφώνων στην Ελλάδα
3.1.3.3. Κατανομή σιφώνων στην Ελλάδα
3.1.3.4. Ένταση σιφώνων στην Ελλάδα91
3.1.4. Ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα94
3.2. Διακινδύνευση του ΕΣΜΗΕ από σίφωνες ξηράς και ορογραφικά κύματα97
4. Σύνοψη-Συμπεράσματα102
5. Βιβλιογραφία

Περίληψη

Η καταστροφή των δικτύων κοινής ωφελείας αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις από την εκδήλωση των φυσικών καταστροφών, με άμεσες και έμμεσες οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες σε εθνικό και τοπικό επίπεδο. Οι συστηματικές ζημιές που καταγράφονται την τελευταία εικοσαετία στις γραμμές Μεταφοράς των χωρών της ΕΕ, κατά την έκθεσή τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα, καταδεικνύουν την αναγκαιότητα μελέτης της επίδρασης των φυσικών καταστροφών σε εθνικό επίπεδο.

Στην Ελλάδα οι κατολισθήσεις και οι άνεμοι ισχυρών εντάσεων αποτελούν συχνά φυσικά φαινόμενα, σχετίζονται με την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινόμενων και δύναται να επιφέρουν καταστροφή σε στοιχεία του δικτύου του ΕΣΜΗΕ. Δεδομένης της αύξησης των ακραίων καιρικών φαινομένων, λόγω της αλλαγής του κλίματος, η παρούσα εργασία εστιάζει προκαταστροφικά στην εκτίμηση της επικινδυνότητας των φυσικών φαινομένων και την αποτύπωσή της σε χάρτες εθνικής κλίμακας, ώστε να είναι εφικτή η εκτίμηση του κινδύνου που διατρέχει το δίκτυο.

Στο 2° κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στο θεωρητικό πλαίσιο που διέπει τα κατολισθητικά φαινόμενα, παρουσιάζονται οι ταξινομήσεις και αναφέρονται οι παράγοντες που τα προκαλούν. Αναπτύσσεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε σε εθνική κλίμακα για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας των εδαφών σε κατολίσθηση. Αναφέρονται λεπτομερώς τα στάδια δημιουργίας των θεματικών χαρτών που οδήγησαν στους τελικούς χάρτες επιδεκτικότητας με τη μέθοδο υπολογισμού του Δείκτη Επιδεκτικότητας Κατολίσθησης, με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ).

Στο 3° κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των ανέμων και διακρίνονται οι περιπτώσεις ισχυρών ανέμων μικρής έκτασης αλλά μεγάλης έντασης, οι σίφωνες και τα ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα. Προκειμένου να εξεταστεί η έκθεση των ΓΜ στα φαινόμενο των σιφώνων κατασκευάστηκαν συνδυαστικοί χάρτες επικινδυνότητας από βιβλιογραφικά δεδομένα.

Στο 4° και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων της μελέτης και ανάδειξη των περιοχών υψηλής επικινδυνότητας ως προς το φαινόμενο των κατολισθήσεων και των ανέμων ισχυρών εντάσεων.

Λέξεις κλειδιά: Φυσικές καταστροφές, προκαταστροφικός σχεδιασμός, κατολίσθηση, σίφωνας, ΣΓΠ.

Abstract

Utilities networks destruction is one of the most important consequences of natural hazards with direct and indirect economic and social impacts in both local and national scale. The last two decades, systematic losses recorded in transmission lines of the EU countries, after being exposed to extreme weather events, show the need for a study of the impact of natural disasters on a national level.

In Greece landslides and strong winds are often natural phenomena associated with the occurrence of extreme weather events that may cause damages of the elements of the HETS network. Given the increase in extreme weather events due to climate change, aim of this dissertation is the assessment and depiction of the susceptibility on the above mentioned natural hazards in thematic maps at a national scale in order to assess the risk of the electricity network, focusing on the predisaster phase of risk assessment.

The 2nd chapter is dedicated to the conceptual framework of the landslide phenomena. The classifications as well as the factors responsible for landslides are also presented. Additionally, the methodology which has been applied for the assessment of the susceptibility of soil types to landslides on a national scale is analyzed. The steps that have been followed for the production of the thematic maps, which helped in producing the final susceptibility maps as well as the Landslide Susceptibility Index – LSI methodology are also mentioned.

The 3rd chapter is dedicated to the main characteristics of the winds while winds of extreme intense such as tornadoes and leeside windstorm. In order to study transmission line network exposure to the tornadoes, composite maps based on previous works have been constructed.

The synthesis of the results of the dissertation are included in the 4th chapter. The final results indicate the highly susceptible to both landslides and extreme winds areas of the country.

Key words: Natural hazards, predisaster planning, landslide, tornado, GIS.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Δομή του ΕΣΜΗΕ (πηγή: ΑΔΜΗΕ/http://www.admie.gr/, 2013)15
Πίνακας 2.1. Αναλυτική ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Cruden and Varnes (1996)29
Πίνακας 2.2. Βασική ορολογία – διαστάσεις περιστροφικών ολισθήσεων (τροποποιημένα σχήματα από Cooper, 2007)
Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα κίνησης της μετακινούμενης μάζας (WP/WLI 1995; Cruden and Varnes 1996)
Πίνακας 2.4. Παράγοντες που συμβάλουν στην δημιουργία του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών -Προπαρασκευαστικοί παράγοντες (Highland and Bobrowsky, 2008)
Πίνακας 2.5. Φυσικοί παράγοντες που συμβάλουν στην εκδήλωση του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών-Εναυσματικοί παράγοντες (Highland and Bobrowsky, 2008)40
Πίνακας 2.6. Παράγοντες που συμβάλουν στην αύξηση της διατμητικής τάσης και στη μείωση της διατμητικής αντοχής (Varnes, 1978)43
Πίνακας 2.7. Μέθοδοι προσδιορισμού του κινδύνου κατολισθήσεων (Aleotti & Chowdhury, 1990)
Πίνακας 2.8. Παράγοντες και κατηγορίες παραγόντων για τον υπολογισμό του LSI65
Πίνακας 2.9. Στάθμιση παραγόντων68
Πίνακας. 3.1. Κλίμακα TORRO κατά Meaden 1976 (πηγή: http://www.torro.org.uk) με περιγραφή ζημιών κλίμακας Fujita (πηγή: http://www.spc.noaa.gov/)

KATAΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης φυσικών καταστροφών παγκοσμίως το χρονικό διάστημα 1980-2015 (τροποποιημένο διάγραμμα από UNISDR, www.unisdr.org)6
Σχήμα 1.2. Μέσος ετήσιος χρόνος διακοπής ρεύματος προς τους καταναλωτές (το σκούρο γκρί χρώμα αφορά σε τιμές πενταετίας), μεταξύ 26 Ευρωπαϊκών χωρών (πηγή OSCE, 2016)8
Σχήμα 1.3. Πιθανά σενάρια αλληλεπίδρασης φυσικών κινδύνων (αναπαραγωγή από Garcia- Aristizabal et al. 2012)
Σχήμα 1.4. Σχηματική απεικόνιση κύκλου διαχείρισης κινδύνου (αναπαραγωγή από Garcia- Aristizabal et al. 2012)11
Σχήμα 1.5. Κατάρρευση πυλώνα υψηλής τάσης μετά από ανεμοθύελλα στην Ευρώπη (Γαλλία, Γερμανία)
Σχήμα 1.6. Το Σύστημα Μεταφοράς και μελλοντική επέκταση έως το 2023 σύμφωνα με ΑΔΜΗΕ (δημοσιευμένο σε σελίδα του ΥΠΕΝ, http://www.opengov.gr)16
Σχήμα 1.7. Επίδραση φυσικών καταστροφών σε πυλώνες υψηλής τάσης σε περιοχές της Ελλάδας (πηγή: φωτογραφικές λήψεις που προβάλλονται στο διαδίκτυο από ιστοσελίδες του τοπικού Τύπου (πάνω), προσωπικό αρχείο (κάτω))
Σχήμα 2.1. Ενδεικτική φωτογραφία από περιοχή της Taiwan, όπου αποτυπώνονται οι συνέπειες μιας κατολίσθησης σε γραμμικά έργα κοινής ωφέλειας (πηγή: Taiwan National Freeway Bureau via EPA)
Σχήμα 2.2. Συνδυαστικό διάγραμμα παγκόσμιας καταγραφής κατολισθήσεων και θυμάτων ανά χώρα το χρονικό διάστημα 2004-2010 (αναπαραγωγή από Petley 2012)21
Σχήμα 2.3. Ενδεικτικές φωτογραφίες από περιοχές της Ελλάδας με έντονη ανθρωπογενή παρέμβαση23
Σχήμα 2.4. Χάρτης ζωνών κατολισθητικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο (τροποποιημένο σχήμα από Koukis et al 2005) και κατανομή συχνότητας εναυσματικών παραγόντων κατολίσθησης στην Ελλάδα (αναπαραγωγή από Κούκης και Ζιούρκας, 1989).
Σχήμα 2.5. Διαγράμματα σχέσεων εξασθένισης της έντασης Arias για τον ελλαδικό χώρο (Tselentis et al, 2005b)
Σχήμα 2.6. Κατηγοριοποιημένος χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (8 παράγοντες)

Σχήμα 2.7. Κατηγοριοποιημένος χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (7 παράγοντες)
Σχήμα 2.8. Χάρτης έκθεσης στοιχείων ΕΣΜΗΕ σε περιοχές ΠΥ κλάσης σε επίπεδο νομού73
Σχήμα 2.9. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Πελοπόννησο74
Σχήμα 2.10. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Δυτική Ελλάδα76
Σχήμα 2.11. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα.
Σχήμα 2.12. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Βόρεια Ελλάδα και την Κρήτη80
Σχήμα 3.1. Χάρτης μέσης ετήσιας έντασης ανέμου(πηγή: www.rae.gr)
Σχήμα 3.2. Γεωγραφική κατανομή σιφώνων [•] και υδροσιφώνων[•] Ιανουάριος 2000- Σεπτέμβριος 2002 (Sioutas 2003)
Σχήμα 3.3. (α)Χάρτης ετήσιας συχνότητας σιφώνων και (β) γεωγραφική κατανομή σιφώνων για την, τα στοιχεία αφορούν στην περίοδο 2000-2014 (αναπαραγωγή από Sioutas et al., 2015).
Σχήμα 3.4. Συνδυαστικός χάρτης ετήσιας συχνότητας και έντασης σιφώνων ξηράς την περίοδο
2000-2014 (αναπαραγωγή από Sioutas et al., 2015)93
Σχήμα 3.5. Συγκέντρωση ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά ορέων (πηγή: The Met. Office, 1993)
Σχήμα 3.6. Μοντέλο προσομοίωσης ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά στο όρος
Μιτσικέλι, κατά τη διάρκεια της ανεμοκαταιγίδας του 1998 (πηγή: Koletsis et al. 2009)95
Σχήμα 3.7. Μοντέλο προσομοίωσης ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά, η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανέμου σε m/sec (πηγή: The Met. Office, 2017)96
Σχήμα 3.8. Χάρτης επικινδυνότητας σιφώνων ξηράς ανά νομό (επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων παραγράφου 3.1.3 από Sioutas et al., 2015)
Σχήμα 3.9. Χάρτης κινδύνου σιφώνων ξηράς ανά νομό99
Σχήμα 3.10. Χάρτης μέσης ετήσιας έντασης ανέμου(πηγή: www.rae.gr) με υπέρθεση περιοχών (γκρι) που πληρούν τις μορφολογικές προϋποθέσεις ανάπτυξης ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων (βέλη: κατεύθυνση πνοής ανέμου τον μήνα Ιανουάριο, πηγή Φλόκας 1997)

1. Εισαγωγή

1.1 Φυσικές Καταστροφές στα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Από τη δεκαετία του '90 που ονομάστηκε δεκαετία για τις φυσικές καταστροφές σε παγκόσμιο επίπεδο, η μελέτη και η γνώση για τους φυσικούς κινδύνους έχουν αναπτυχθεί ραγδαία, αντιθέτως όχι τόσο ραγδαία η ικανότητα μείωσης, σε ατομικό και κοινωνικό επίπεδο, των επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών (UNISDR, 2016). Τα θύματα και οι ζημιές από μεγάλες καταστροφές συνεχίζουν να αυξάνονται (σχήμα 1.1). Είναι φανερό, στην αρχή της τρίτης χιλιετίας, υπάρχει η συνειδητοποίηση πως οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι όχι μόνο υπάρχουν παράλληλα με τις αλλαγές σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά είναι αναπόσπαστο κομμάτι αυτών των αλλαγών (Smith, 1990).



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης φυσικών καταστροφών παγκοσμίως το χρονικό διάστημα 1980-2015 (τροποποιημένο διάγραμμα από UNISDR, www.unisdr.org)

Πολλές από τις τάσεις που παρατηρούνται στις σύγχρονες κοινωνίες, όπως η εξάντληση των διαθεσίμων, η παγκοσμιοποίηση και η ανάπτυξη της τεχνολογίας, συνεισφέρουν στην αύξηση των καταστροφών, με αντίκτυπο στους ανθρώπους και στο περιβάλλον στο οποίο διαβιούν ασχέτως του επιπέδου ανάπτυξης κάθε χώρας. Ο παγκόσμιος πληθυσμός είναι αποδέκτης των φυσικών κινδύνων ασχέτως με το βαθμό της οικονομικής η οποιασδήποτε άλλης ανάπτυξης έχει επιτύχει. Οι φυσικές αυτές καταστροφές, μπροστά στην ανθρώπινη αδυναμία αντιμετώπισης

τους, μπορούν να οδηγήσουν σε οικονομικές, δομικές και ανθρώπινες απώλειες σε τοπικό, περιφερειακό, εθνικό και διεθνές επίπεδο.

Ηδη από την δεκαετία του 90 οι επιστήμονες είχαν επισημάνει ότι τα πλημμυρικά και κατολισθητικά γεγονότα θα εντείνονταν από την αύξηση της συχνότητας ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης, λόγω της μεταβλητότητας του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής (Buma and Dehn, 1998; Dehn and Buma, 1999; Dikau and Schrott, 1999; Dehn et al., 2000; Corsini et al., 2004; Borgatti and Soldati, 2010).

Διάφορες μελέτες δείχνουν ότι η κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα της ενέργειας και τονίζουν την ανάγκη προσαρμογής του τομέα (Rademaekers et al., 2011; Ebinger and Vergara, 2011; Williamson et al., 2009). Οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος, όπως η αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων ή την αλλαγή της θερμοκρασίας των υδάτων και του αέρα, επηρεάζουν αφενός μεν την ενεργειακή ζήτηση, την προσφορά και τη μετάδοση, αφετέρου δύναται να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι υποδομές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένη στις καιρικές συνθήκες και το κλίμα, ως το άθροισμα όλων των καιρικών συνθηκών που επηρεάζουν μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Οι διασυνδεδεμένες υποδομές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι επίσης ζωτικής σημασίας, όπως βλάβη σε ένα μόνο σημείο θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχίες σε όλο το δίκτυο. Τα τελευταία χρόνια έχουν καταγραφεί πολλές περιπτώσεις που έχουν δείξει πόσο ευάλωτες είναι οι υποδομές αυτές στους φυσικούς κινδύνους και ιδιαίτερα σε αυτούς που σχετίζονται με τους κλιματικούς-μετεωρολογικούς, που αυξάνονται διαρκώς λόγω της κλιματικής αλλαγής και μεταβλητότητας.

Επί σειρά δεκαετιών ο μετριασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτέλεσε το επίκεντρο της παγκόσμιας δράσης ως προς την κλιματική αλλαγή. Τα τελευταία χρόνια, οι πολιτικές προσαρμογής αποτελούν πλέον μια νέα αλλά ζωτικής σημασίας προσέγγιση για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αλλαγής των κλιματικών παραμέτρων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση επισημαίνει ότι εκτός από τις προσπάθειες μετριασμού του φαινομένου που προκαλεί την κλιματική αλλαγή, όπως η διείσδυση των ΑΠΕ, απαιτείται και αύξηση της ανθεκτικότητας του Συστήματος. Επιπλέον, αναφέρει ότι οι φορείς εκμετάλλευσης και συντήρησης του δικτύου θα πρέπει να λαμβάνουν ως παράγοντα την αλλαγή του κλίματος σε όλες τις παραμέτρους που

αφορούν στα σχέδια ασφάλειας των δικτύων τους. Στην προσπάθειά της να αποτιμήσει τις συνέπειες στα κράτη μέλη προσδιορίστηκε ο μέσος ετήσιος χρόνος, σε λεπτά, διακοπής ρεύματος προς τους καταναλωτές. Από το σχετικό διάγραμμα φαίνεται ότι η Ελλάδα κατατάσσεται στην 19^η θέση, μεταξύ 26 Ευρωπαϊκών χωρών, με το χρόνο διακοπής ρεύματος να ξεπερνά τις 5 ώρες (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2. Μέσος ετήσιος χρόνος διακοπής ρεύματος προς τους καταναλωτές (το σκούρο γκρί χρώμα αφορά σε τιμές πενταετίας), μεταξύ 26 Ευρωπαϊκών χωρών (πηγή OSCE, 2016).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η κλιματική αλλαγή και οι επερχόμενες μεταβολές στην έκταση, την ένταση και τη συχνότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων θα επηρεάσουν υποδομές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που κατασκευάστηκαν πριν από 50-60 χρόνια και παράλληλα μια αγορά ενέργειας που είναι πιο διασυνδεδεμένη από ποτέ, με ένα εξαιρετικά φορτωμένο διακρατικό δίκτυο (König, 2016). Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση πτώσης του δικτύου, οι επιπτώσεις αφορούν όχι μόνο στη ζημία που προκύπτει από στα τεχνικά μέρη του Συστήματος άλλα και στην αποζημίωση που εξαπλώνεται στην περιοχή που επλήγη.

Όπως επισημαίνεται άλλωστε στη διεθνή βιβλιογραφία η αξιολόγηση πολλαπλών κινδύνων για τον προσδιορισμό του συνολικού κινδύνου που διατρέχουν τα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (εφεξής αποκαλούμενο ως Σύστημα Μεταφοράς) πρέπει να λαμβάνει

υπόψη όλους τους πιθανούς κινδύνους και τις αλληλεπιδράσεις με την τρωτότητα του Συστήματος (Garcia-Aristizábal et al., 2015).

Πολλές περιοχές του κόσμου που εκτίθενται και επηρεάζονται από έναν αριθμό διαφορετικών τύπων κινδύνων. Η αξιολόγηση και ο μετριασμός των κινδύνων που ενέχουν οι φυσικές και ανθρωπογενείς απειλές σε μια δεδομένη τοποθεσία απαιτεί ανάλυση πολλαπλών κινδύνων, συμπεριλαμβανομένης της εκδήλωσης κλιμακωτών αλληλεπιδράσεων.

Η ποσοτική ανάλυση πολλαπλών κινδύνων ακολουθεί μεθοδολογίες που παρουσιάζουν πολλές προκλήσεις (Kappes et al. 2012; Marzocchi et al. 2012; Mignan, Wiemer και Giardini 2014 Mignan, A, Σ Wiemer, και D. Giardini. 2014). Οι αλληλεπιδράσεις σε επίπεδο επικινδυνότητας είναι σημαντικό να προσδιοριστούν ως προς την αλληλουχία συμβάντων που δύναται να επηρεάσουν ένα ή περισσότερα στοιχεία του δικτύου. Ένα επικίνδυνο συμβάν συνεπάγεται τροποποίηση της πιθανότητας εμφάνισης ενός δευτερογενούς γεγονότος ή μιας ακολουθίας γεγονότων που μπορεί να έχει επιπτώσεις στο σύστημα του δικτύου. Τα φυσικά φαινόμενα που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες περιπτώσεων στις οποίες ένας αρχικός φυσικός κίνδυνος μπορεί να παράγει έναν δεύτερο προκαλώντας μια νέα ασταθή κατάσταση. Σε κάθε περίπτωση, είτε μεμονωμένου είτε σε περίπτωση αλληλουχίας φυσικών κινδύνων, μια νέα ισορροπία θα επέλθει ως προς τις μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως για παράδειγμα μια νέα μορφολογική ισορροπία μετά από ένα συμβάν ροής κορημάτων(Gasparini και Garcia-Aristizábal 2014; Liu et al 2015).

Μέχρι πρόσφατα, οι κίνδυνοι που συνδέονται με διάφορα είδη φυσικών καταστροφών, όπως εκρήξεις ηφαιστείων, κατολισθήσεις, πλημμύρες και σεισμούς, συνηθιζόταν να εκτιμώνται ξεχωριστά δίνοντας μεμονωμένα αποτέλεσμα που δεν είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (Marzocchi et al. 2012). Ωστόσο τα ίδια τα γεγονότα θα μπορούσαν να συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα οι πλημμύρες και οι κατολισθήσεις που μπορούν να προκληθούν είτε κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά από μία καταιγίδας. Επίσης μετά από σεισμό υπάρχει πιθανότητα εκδήλωσης κατολίσθησης. Υπάρχει επίσης το ενδεχόμενο, ύστερα από την εκδήλωση ενός φυσικού φαινομένου που δύναται να προκαλέσει εκτεταμένες καταστροφές όπως ο σεισμός, να ακολουθήσει εντελώς τυχαία και σε σύντομο χρονικό διάστημα ένα ή περισσότερα φυσικά φαινόμενα όπως μια παρατεταμένη βροχόπτωση, χιονόπτωση. Στην περίπτωση αυτή οι πιθανές ζημίες που συνδέονται με διαφορετικούς κινδύνους κατά την αλληλεπίδρασή τους (σχήμα 1.3) μπορεί να οδηγήσουν σε μια κατάσταση όπου ο συνδυασμός

τους είναι πολύ μεγαλύτερης έντασης από ό, τι απλά το άθροισμα των μερών τους (Garcia-Aristizabal et al. 2012).

Είναι προφανές ότι για την αξιολόγηση πολλαπλών κινδύνων που αντιμετωπίζει όλες τις προκλήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και τις αβεβαιότητες σε όλα τα στάδια της ανάλυσης, θα είναι περίπλοκη και απαιτεί σημαντικούς πόρους και την εμπειρογνωμοσύνη (Kappes, et al. 2012; Komendantova et al. 2014).





Η φύση των αλληλεπιδράσεων μπορεί να περιγραφεί από ένα ευρύ σύνολο φαινομενολογικών σχέσεων, και αυτό καθιστά δύσκολο να δημιουργηθεί μια γενικευμένη διαδικασία για την ποσοτικοποίηση των πολλαπλών επιπτώσεων. Οι απλοποιήσεις υπό μορφή συνόλων αλληλεπιδράσεων σε αυτές τις περιπτώσεις είναι θεμιτές ωστόσο πρέπει να εξετάζονται πάντοτε οι αλληλεπιδράσεις σε επίπεδο κινδύνου και σε επίπεδο τρωτότητας(Garcia-Aristizábal et al 2015a; Marzocchi et al 2012).

Η διαχείριση κινδύνου είναι μία συνεχής και αναπτυσσόμενη διεργασία, που προσεγγίζει μεθοδικά όλους τους κινδύνους που περιβάλλουν τις δραστηριότητες του εκάστοτε οργανισμού. Πρέπει να περιλαμβάνεται στη στρατηγική κάθε οργανισμού, με ιδιαίτερο βάρος να δίνεται στον προκαταστροφικό σχεδιασμό των μελλοντικών δραστηριοτήτων (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4. Σχηματική απεικόνιση κύκλου διαχείρισης κινδύνου (αναπαραγωγή από Garcia-Aristizabal et al. 2012).

Ακόμα και σήμερα η χαρτογράφηση των φυσικών κινδύνων, η εκτίμηση της επικινδυνότητας και η αξιολόγηση του κινδύνου αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες. Η αυξημένη αξιοπιστία της εκτίμησης και αξιολόγησης είναι ζητούμενο από τους φορείς λήψης αποφάσεων, τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων και γενικότερα των χρήσεων και κάλυψης γης με στόχο τη βιώσιμη ανάπτυξη. Μέχρι τις αρχές του 2002 παρόλο που είχαν γίνει πολυάριθμες προσπάθειες εφαρμογής μεθόδων και τεχνικών τα αποτελέσματά τους κρίνονται ως ανεπαρκή και έπρεπε να καταβληθούν περισσότερες προσπάθειες για να κάνουν αυτές μεθόδους πιο ποσοτικές, με καλύτερα τεκμηριωμένη με σκοπό την μεταφορά ορθών επιστημονικών πληροφοριών ως προς τους φυσικούς κινδύνους στα σχέδια πολιτικής προστασίας (Guzzetti, 2002; Bathrelos et al., 2009). Ωστόσο την δεκαετία που πέρασε, σημειώθηκε αλματώδεις πρόσδος με βελτίωση κυρίως των πρωτογενών δεδομένων που εισάγονται στις βάσεις δεδομένων. Με συνέπεια την αύξηση της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη χρήση τεχνικών των ΓΣΠ (Komac, 2006). Πλέον η διαχείριση του κινδύνου, στο προκαταστροφικό στάδιο, εστιάζει μεταξύ άλλων στην αποτύπωση της επικινδυνότητας σε χάρτες με χρήση τεχνικών της τηλεπισκόπησης και των ΣΓΠ, που προσφέρουν μια σειρά γρήγορων και αξιόπιστων τεχνικών. Τα ΣΓΠ και οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης έχουν γενικότερα σημαντική συμβολή στην ανάλυση των φυσικών καταστροφών (Gournellos et al., 2006; Haq et al., 2012; Jaafari et al., 2014; Karymbalis et al., 2012; Moel et al., 2014; Papanikolaou et al., 2010; Parcharidis et al., 2011; Vahidnia et al., 2010; Patel and Srivastava 2013; Pourghasemi et al., 2013;) και ιδιαίτερα στη χαρτογράφηση ευαίσθητων περιοχών (Bates, 2004; Diakakis, 2011; Gioti et al., 2012; Muzik, 1996; Parcharidis et al., 2003; Parcharidis et al., 2015; Pradhan et al., 2014; Sanyal and Lu 2009; Strobl et al., 2012 ; Taylor et al., 2011; Tehrany et al., 2014; White et al., 2010 ; Φερεντίνου και Χαλκιάς, 2012).

1.2. Επίδραση των φυσικών καταστροφών στα ΣΜΗΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οι πρόσφατες διακοπές ρεύματος, λόγω φυσικών καταστροφών, σε πολλές άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ανέδειξαν την ευπάθεια των Συστημάτων Μεταφοράς στους πολλαπλούς κινδύνους. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι πρόσφατα ο Οργανισμός Ασφάλειας και Συνεργασίας στην Ευρώπη εξέδωσε το πρώτο εγχειρίδιο για την προφύλαξη των ΣΜΗΕ από τις φυσικές καταστροφές, όπου δίνεται έμφαση στην περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων φυσικών κινδύνων που δύναται να οδηγήσουν σε εκτεταμένη, χωρικά και χρονικά, διακοπή της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (OSCE, 2016).

Τρεις ιστορικές περιπτώσεις διακοπές ρεύματος λόγω φυσικών καταστροφών κατεγράφησαν στην Ευρώπη τα έτη 1999, 2003-2006 και 2014 (σχήμα 1.5). Οι περιπτώσεις αυτές έπληξαν μεγάλες, πληθυσμιακά και οικονομικά, χώρες όπως η Γαλλία, Γερμανία, Ιταλία, Ελβετία, Σουηδία, Δανία και αναθεώρησαν τον τρόπο σκέψης σχετικά με την ποικιλία των παραγόντων, που μπορούν να επηρεάσουν τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Από την μελέτη των περιπτώσεων πρόκυψε η ανάγκη μιας προσέγγισης πολλαπλών κινδύνων για την οικοδόμηση της ανθεκτικότητας των υποδομών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και για την αντιμετώπιση των συστημικών κινδύνων που μπορεί να προκύψουν από φυσικές καταστροφές και μπορούν να επηρεάσουν τις υποδομές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.5. Κατάρρευση πυλώνα υψηλής τάσης μετά από ανεμοθύελλα στην Ευρώπη (Γαλλία, Γερμανία).

Το 1999 η Γαλλία βίωσε πολλές καταιγίδες που επηρέασαν σοβαρά το Σύστημα Μεταφοράς της χώρας. Το μήνα Δεκέμβρη συνέβη μία από τις μεγαλύτερες ενεργειακές διαταραχές που έχει βιώσει ποτέ μια σύγχρονη ανεπτυγμένη χώρα, μετά το πέρασμα των κυκλώνων Lothar και Martin. Η ταχύτητα των ανέμων έφτασαν τα 200km/h προκαλώντας την ανατροπή 300 πυλώνων μεταφοράς υψηλής τάσης. Το ένα τέταρτο των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργεια υψηλής τάσης της Γαλλίας υπέστη σοβαρές βλάβες, αφήνοντας το μεγαλύτερο μέρος της χώρας χωρίς ρεύμα επί τρείς ημέρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι 3,4 εκατομμύρια πελάτες παρέμειναν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα αναγκάζοντας την αρμόδια Αρχή να χρησιμοποιήσει όλες τις διαθέσιμες φορητές γεννήτριες της Ευρώπης και να προχωρήσει σε εισαγωγή γεννητριών από τον Καναδά, προκειμένου να καλύψει της ανάγκες των καταναλωτών. Το 2009 συνέβη επίσης ακόμα μια καταιγίδα (Klaus) συγκρίσιμης ενέργειας με αυτή του κυκλώνα Lothar και Martin, αλλά με τέσσερις φορές λιγότερες ανατροπές πυλώνων σε σχέση με το 1999 (Joachim, 2011; Andrea, 2012; Foehn, 2012). Η ταχύτητα των ανέμων στη δεύτερη περίπτωση ξεπέρασαν τα 110Km/h και προκάλεσαν μικρότερες ζημιές.

Στα τέλη του Γενάρη του 2014 σήμανε κόκκινος συναγερμός στη Σλοβενία για ακραίες καιρικές συνθήκες. Η καταιγίδα προκάλεσε τη μεγαλύτερη ζημιά του αιώνα με δριμύ κρύο σχεδόν σε ολόκληρη τη χώρα. Σε πολλά μέρη η βροχόπτωση ξεπέρασε κατά πολύ το μέσο όριο βροχόπτωση, ενώ οι βροχοσταγόνες πάγωναν κατά τη επαφή τους με το έδαφος και τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, με στρώματα πάγου πάχους αρκετών εκατοστών. Το βάρος του πάγου ξεπέρασε τις αντοχές των ηλεκτροφόρων καλωδίων και προκλήθηκαν εκτεταμένες ζημιές στις εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής και μέσης τάσεις σε μήκος περί τα 1.000 Km. Η μεταφορά και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας διεκόπη καθώς ορισμένα τμήματα των δικτύων βρέθηκαν να έχουν καταστραφεί ολοσχερώς. Πάνω από 250.000 άνθρωποι έμειναν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ σε μερικές περιπτώσεις έμειναν πλήρως χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα για πάνω από 10 ημέρες.

Στην νοτιοανατολική Ευρώπη το 2014 επικράτησαν κατεγράφησαν εκτεταμένες πλημμύρες, καταιγίδες, πάγος και κατολισθήσεις και έπληξε την περιοχή των Βαλκανίων με καταστροφικές συνέπειες. Οι πλημμύρες έπληξαν εκατομμύρια πληθυσμού και χάθηκαν 80 ανθρώπινες ζωές. Οι σοβαρές και εκτεταμένες βροχοπτώσεις προκάλεσαν πάνω από 3.000 κατολισθήσεις με συνέπεια την καταστροφή των εναέριων και υπόγειων υποδομών του Συστήματος Μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη διακοπή παροχή ρεύματος σε περισσότερους από 250.000 πελάτες.

1.3. Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύμφωνα με την περιγραφή από τον αρμόδιο Διαχειριστή (<u>www.admie.gr</u>), το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα υψηλής (150kV και 66kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV). Στο Σύστημα περιλαμβάνεται και το δίκτυο υπογείων (Y/Γ) καλωδίων Υ.Τ. που εξυπηρετεί ακτινικά τις ανάγκες της περιοχής της πρωτεύουσας αλλά δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα μας ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, που καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400 kV καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150 kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 kV.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του 2013 (πίνακας 1.1) το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς αποτελείτο προσεγγιστικά από 11.000km γραμμών μεταφοράς, 310 Υποσταθμούς (Υ.Σ.) και 21 Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ).

Πίνακας 1.1. Δομή του ΕΣΜΗΕ (πηγή: ΑΔΜΗΕ/http://www.admie.gr/, 2013)						
ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	400kV	Σ.P. (D.C.) 400kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ	
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.647	107	8.152	39	10.945	
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ	0,58		140	15	155	
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	30		101		131	
ΣΥΝΟΛΟ	2.677	107	8.393	54	11.232	

Απλοποιημένα, οι ΓΜ ως τεχνικό έργο συντίθεται κυρίως από τους αγωγούς (ηλεκτροφόρους και αγωγούς προστασίας) και τους πυλώνες όπου προσδένονται οι αγωγοί. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων είναι κατά μέσον όρο 350m, αλλά μπορεί να ποικίλει αυξομειούμενη ώστε να προσαρμόζεται με τη διαμόρφωση και τις συνθήκες χρήσης του εδάφους.



Σχήμα 1.6. Το Σύστημα Μεταφοράς και μελλοντική επέκταση έως το 2023 σύμφωνα με ΑΔΜΗΕ (δημοσιευμένο σε σελίδα του ΥΠΕΝ, http://www.opengov.gr)

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6, το μεγαλύτερο τμήμα του Συστήματος Μεταφοράς αναπτύσσεται στην ανατολική Ελλάδα και έχει μεγαλύτερη πυκνότητα γύρω από τα μεγάλα αστικά κέντρα, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι σαφώς αυξημένες. Στην Ελλάδα συνολικά είναι εγκατεστημένοι περισσότεροι από 34.000 πυλώνες και ως εκ τούτου η γεωγραφική τους πυκνότητα είναι η υψηλότερη από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του ΕΣΜΗΕ. Κατά συνέπεια έχουν περισσότερες πιθανότητες να εκτεθούν σε φυσικά καταστροφικά φαινόμενα.

Επισημαίνεται ότι οι πυλώνες θεωρούνται αντισεισμική κατασκευή και δεν έχει καταγραφεί πτώση πυλώνα από σεισμό. Η αντοχή τους στις σεισμικές δονήσεις έγκειται στο υλικό και την τεχνική θεμελίωσής τους. Πρόκειται για δικτυωτούς χαλύβδινους πύργους που είναι κατασκευασμένοι από γωνιακά ελάσματα δομικού χάλυβα. Το υλικό κατασκευής τους είναι χάλυβας, υλικό μεγάλης αντοχής και διάρκειας ζωής. Έχουν μέσο ύψος 30-40m, είναι τυποποιημένοι σε διάφορους τύπους ανάλογα με την αντοχή τους σε μηχανικά φορτία και θεμελιώνονται στο έδαφος με τέσσερα σκέλη που έχουν ανεξάρτητη θεμελίωση σκυροδέματος το καθένα.

Μηχανικές βλάβες λόγω φυσικών καταστροφών, παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.2 για τα ΣΜΗΕ άλλων χωρών της Ε.Ε., έχουν καταγραφεί τοπικά και όχι εκτεταμένα σε στοιχεία του ΕΣΜΗΕ. Από τα καταγεγραμμένα περιστατικά, που συνήθως δημοσιεύονται στον τύπο, οι καταστροφές οφείλονται σε ζημιές στους πυλώνες λόγω ισχυρών ανέμων ή κατολισθήσεων (σχήμα 1.7). Μάλιστα πρόσφατα, τον Σεπτέμβριο του 2016, καταγράφηκε κατάρρευση πυλώνα λόγο ισχυρών ανέμων στην περιοχή του Πύργου μετά από ισχυρό σίφωνα που έπληξε την περιοχή. Το συμβάν δεν αποτελεί μοναδική περίπτωση κατάρρευσης πυλώνα από ισχυρό άνεμο, καθώς παρόμοια περιστατικά έχουν καταγραφεί και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας όπου αναπτύσσονται συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, που αναλύονται στο 3° κεφάλαιο.



Σχήμα 1.7. Επίδραση φυσικών καταστροφών σε πυλώνες υψηλής τάσης σε περιοχές της Ελλάδας (πηγή: φωτογραφικές λήψεις που προβάλλονται στο διαδίκτυο από ιστοσελίδες του τοπικού Τύπου (πάνω), προσωπικό αρχείο (κάτω))

Στην Ελλάδα, οι ζημιές των στοιχείων του ΕΣΜΗΕ από φυσικές καταστροφές είναι τοπικής κλίμακας και αφορούν σε μεμονωμένα τμήματα. Ωστόσο, αν ένας πυλώνας πάθει μηχανική βλάβη τότε διακόπτεται η λειτουργία της γραμμής μεταφοράς, στην οποία ανήκει, σε όλο της το μήκος, συνήθως δεκάδες χιλιόμετρα. Η γραμμή μεταφοράς θα παραμείνει εκτός λειτουργίας έως ότου διορθωθεί η μηχανική βλάβη. Στην περίπτωση κατάρρευσης πυλώνα από άνεμο γίνεται αντικατάσταση του πυλώνα, στην περίπτωση κατολίσθησης μπορεί να απαιτηθεί μετακίνηση τμήματος, δηλαδή μερικών πυλώνων σε νέα θέση. Στη δεύτερη περίπτωση τον βλαβών στην Ελλάδα γίνεται άμεσα και τάχιστα και ο Διαχειριστής του Συστήματος που επιλύει άμεσα τέτοια ζητήματα, διαφορετικά οι προαναφερόμενες βλάβες θα ήταν αντιληπτές από το ευρύ κοινό.

Επισημαίνεται ότι οι πυλώνες θεωρούνται αντισεισμική κατασκευή και δεν έχει καταγραφεί πτώση πυλώνα από σεισμό. Για αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία δεν εξετάστηκε η διακινδύνευσή τους από σεισμούς. Ωστόσο η διακινδύνευσή τους από κατολίσθηση προκαλούμενη από σεισμό λήφθηκε υπόψη στη μεθοδολογία που αναφέρεται στο 2° κεφάλαιο.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερόμενα και συνυπολογίζοντας ότι τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν καταστροφές ενδέχεται να ενταθούν, είτε της κλιματικής αλλαγής ή της κλιματικής μεταβλητότητας, είναι σημαντικό σε πρώτη φάση να ποσοτικοποιηθεί τουλάχιστον χωρικά η έκταση και η ένταση των δύο φαινομένων που προκαλούν τις βλάβες στις ΓΜ. Όπως επισημαίνεται άλλωστε στη διεθνή βιβλιογραφία οι Διαχειριστές των Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές καταστροφές στις στρατηγικές ανάπτυξης και συντήρησής των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (Garcia-Aristizábal et al., 2015).

2. Κατολισθήσεις

2.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση κατολισθήσεων

2.1.1. Συνέπειες - ορισμός φαινομένου

Οι κατολισθήσεις αποτελούν μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες φυσικές καταστροφές που εκδηλώνονται με ποικίλους τρόπους και δημιουργούν κοινωνικό-οικονομικές συνέπειες (Aleman, 2001). Παρατηρούνται σε φυσικά και τεχνητά πρανή, αποτελώντας ένα διαχρονικό γεωτεχνικό πρόβλημα το οποίο έχει σημαντικές κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις σε πολλές χώρες (Brabb and Harrod, 1989; Goudie, 2010). Η φωτογραφία του σχήματος 2.1 είναι αντιπροσωπευτική για την κατανόηση της καταστροφικότητας του φαινομένου σε τεχνικά έργα, προσφέροντας ταυτοχρόνως μια καλή άποψη της δομής του φαινομένου.



Σχήμα 2.1. Ενδεικτική φωτογραφία από περιοχή της Taiwan, όπου αποτυπώνονται οι συνέπειες μιας κατολίσθησης σε γραμμικά έργα κοινής ωφέλειας (πηγή: Taiwan National Freeway Bureau via EPA)

Προσφάτως, οι οικονομικές απώλειες που σχετίζονται με το φαινόμενο, αγγίζουν τα 4,5 δις US\$ το χρόνο στην Ιαπωνία, 2,6 δις US\$ το χρόνο στην Ιταλία, 2 δις US\$ το χρόνο στις Η.Π.Α και 1,5 δις US\$ το χρόνο στην Ινδία (Schuster, 1996). Σύμφωνα με εκτιμήσεις της Συντονιστικής Επιτροπής Ανακούφισης Καταστροφών του Ο.Η.Ε, οι ετήσιες απώλειες από φυσικές

καταστροφές, με τις κατολισθήσεις να αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό τους, ανέρχονται σε ποσοστό της τάξης έως και 2% του Α.Ε.Π, στις αναπτυσσόμενες χώρες (Hutchinson, 1995).

Πέραν των οικονομικών συνεπειών από την εκδήλωση των κατολισθήσεων καταγράφονται χιλιάδες θύματα ανά έτος παγκοσμίως. Η πρώτη επιστημονική προσπάθεια καταγραφής και ανάλυσης των θανατηφόρων κατολισθήσεων σε παγκόσμια κλίμακα, δημοσιεύτηκε από τον Petley (2012) και αφορούσε το χρονικό διάστημα 2004-2010. Σε διάστημα μόλις επτά ετών κατεγράφησαν παγκοσμίως 2.620 φονικές κατολισθήσεις με περισσότερα από 30.000 θύματα, χωρίς να περιλαμβάνονται αυτές που προκλήθηκαν από σεισμό (σχήμα 2.2). Ο συγγραφέας επισημαίνει ότι το πλήθος των θανάτων παραμένει ακόμα και σήμερα υποεκτιμημένο, είτε γιατί ως αιτία θανάτου καταγράφεται ο μηχανισμός γένεσης της κατολίσθησης (συνήθως ακραία καιρικά φαινόμενα), είτε επειδή τα θύματα υποκύπτουν στα τραύματά τους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα οπότε δεν καταγράφεται η πραγματική αιτία θανάτου, είτε τελικά επειδή τα θύματα απλά δεν καταγράφονται.



Σχήμα 2.2. Συνδυαστικό διάγραμμα παγκόσμιας καταγραφής κατολισθήσεων και θυμάτων ανά χώρα το χρονικό διάστημα 2004-2010 (αναπαραγωγή από Petley 2012).

Η μελέτη του Petley κατέδειξε τη θετική συσχέτιση των καταγραφών με την πληθυσμιακή πυκνότητα, ενώ τα χαμηλά ποσοστά θυμάτων σε περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας όπως η Αφρική ερμηνεύεται από την περιορισμένη ανθρωπογενή επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον. Οι περισσότερες θανατηφόρες κατολισθήσεις καταγράφονται στην Ασία, ιδιαίτερα κατά μήκος των Ιμαλάϊων και της Κίνας. Η πλέον καταστροφική κατολίσθηση που αναφέρεται διεθνώς, στην Κίνα το 1920 μετά από σεισμό και προκάλεσε το θάνατο σε 100.000 ανθρώπους, καθώς τα σπίτια τους σκεπάστηκαν από μάζες ασβεστούχων πηλών (Feng and Guo, 1985).

Το φαινόμενο ακολουθεί ετήσιο κύκλο με μέγιστη εποχιακή εμφάνιση το καλοκαίρι στο Βόρειο Ημισφαίριο. Η χωρική τους κατανομή αναδεικνύει τη μορφολογία του αναγλύφου που ελέγχεται από τεκτονικές κινήσεις και την βροχόπτωση ως τους κύριους παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση του φαινομένου. Για τις αναπτυγμένες χώρες της Ευρώπης αναφέρει ότι πάρα το μικρό πλήθος θυμάτων το κόστος των ζημιών είναι ιδιαίτερα υψηλό, καθώς η αξία της γης, της κάλυψής της και οι χρήσεις γης είναι αυξημένη, συγκριτικά με τις υπόλοιπες χώρες. Τέλος σε παγκόσμια κλίμακα ο συγγραφέας διαπιστώνει ότι η κατανομή των θανατηφόρων κατολισθήσεων αποκλίνει από την κανονική κατανομή παρουσιάζοντας μορφή 'παχιάς ουράς', που είναι κοινή και σε άλλες φυσικές καταστροφές (Newman, 2005).

Η κατανόηση της σχέσης που συνδέει την αστάθεια των πρανών με τα φυσικά φαινόμενα που την προκαλούν, είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό επέκτασης και σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (Keller and Blodgett, 2005; Petley, 2010). Η έρευνα που εστιάζει στην κατανόηση των φυσικών φαινομένων αποτελεί θεμέλιο στη διαχείριση του κινδύνου, υπό την έννοια ότι τροφοδοτεί με την απαραίτητη επιστημονική γνώση τα μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων που δύναται να προκαλέσουν φυσική καταστροφή που στοχεύει στην πρόβλεψη της επικινδυνότητας και τελικά την εκτίμηση του κινδύνου. Οι φυσικές καταστροφές και οι κίνδυνοι που εγκυμονούν και που σχετίζονται με την πιθανή αύξηση της συχνότητας και της έντασης των φαινομένων λόγω της κλιματικής αλλαγής ή της κλιματικής μεταβλητότητας και της αύξηση των βροχοπτώσεων.

Η αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως και η επαγόμενη επέκτασης των αστικών περιοχών αναμένεται να εντείνει το φαινόμενο των κατολισθήσεων στην περίπτωση επέκτασης σε περιοχές υπό κλίση. Ο παγκόσμιος αστικός πληθυσμός υπολογίστηκε σε 3 δισεκατομμύρια το 2003 και αναμένεται να αυξηθεί σε 5 δισεκατομμύρια μέχρι το 2030 (United Nations, 2004). Υπό αυτή την έννοια η μελέτη των κατολισθήσεων επικεντρώνεται σε τοπική κλίμακα πλησίον των αστικών κέντρων όπου οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις θα αναμένεται να αυξηθούν.

Η αύξηση του αστικού πληθυσμού θα απαιτήσει σημαντική επέκταση των αστικών ορίων, αυξάνοντας τον κίνδυνο κατολισθήσεων που προκαλούνται από βροχοπτώσεις ή σεισμική δραστηριότητα (Schuster and Highland, 2007). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 70, οι εκτάσεις 142 πόλεων με πληθυσμό άνω των 100.000 αυξήθηκαν κατά 19% σε χρονικό διάστημα 15 ετών (Schuster 1996). Η αστική επέκταση οδηγεί στην ανάπτυξη στέγασης, την κατασκευή νέων βιομηχανικών δομών, επέκταση αστικές εγκαταστάσεις αλλά και την επέκταση των συστημάτων μεταφορών και επικοινωνιών. Η αύξηση αυτή αναμένεται να διαταράξει σημαντικά το τοπίο λόγω της εκσκαφής μεγάλου όγκου γεωλογικών υλικών (Schuster 2007), ενώ μεγάλο μέρος αυτής της διαταραχής αναμένεται να συμβεί στις πλαγιές λόφων (Olshansky, 1996).



Σχήμα 2.3. Ενδεικτικές φωτογραφίες από περιοχές της Ελλάδας με έντονη ανθρωπογενή παρέμβαση.

Η ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως εκσκαφές ορυγμάτων, τεχνητές επιχώσεις, εσφαλμένη διευθέτηση όμβριων υδάτων και αποψίλωση βλάστησης, αλλοιώνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των πρανών και μπορούν να συμβάλουν στην αποσταθεροποίησή τους (Olshansky 1996). Ο κίνδυνος κατολίσθησης αυξάνεται σημαντικά σε περίπτωση υποσκαφής στον πόδα είτε σε άλλο τμήμα παλιότερης κατολίσθησης περίπτωση που συναντάται συχνά στην κατασκευή γραμμικών έργων υποδομής όπως το οδικό δίκτυο (σχήμα 2.3).

Τα φυσικά πρανή (πλαγιές) είναι η πιο κοινή γεωμορφή παγκοσμίως, αποτελούν δυναμικά εξελισσόμενα συστήματα και παρουσιάζουν διαφορετική μορφή, ανάλογα με τις διεργασίες που συμβάλουν στο σχηματισμό τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολύπλοκη γεωμορφή καθώς τα επί μέρους τμήματά τους μπορεί να είναι είτε ευθύγραμμα ή καμπύλα, να έχουν ήπια ή απότομη κλίση και να δομούνται είτε από το ίδιο ή ανομοιογενές υλικό. Η μορφή ενός πρανούς εξαρτάται από τη λιθολογία και το κλίμα της περιοχής, ωστόσο είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη λόγω της κίνησης των υλικών που το συνθέτουν (Keller and Blodgett, 2005). Η κίνηση των υλικών επί των πρανών αποτελεί αντικείμενο επιστημονικής μελέτης ήδη από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα και αναφέρεται με τον όρο κατολίσθηση ή μετακίνηση μαζών.

Χάριν ευκολίας στη διεθνή βιβλιογραφία, η αναφορά γενικά στα «κατολισθητικά φαινόμενα» που περιλαμβάνουν όλες τις αστοχίες πρανών, ερπυσμούς, ολισθήσεις, ροές, ανατροπές, καταπτώσεις, κλπ, σε ξηρά και θάλασσα, γίνεται με τον μονολεκτικό όρο «κατολίσθηση (landslide)» (Keller and Blodgett, 2005). Βέβαια, η ορθή αναφορά του όρου κατολίσθηση θα έπρεπε να περιορίζεται στις ταχέως εκδηλούμενες κινήσεις εδαφικών μαζών και στις περιπτώσεις που η ελκτική δύναμη της βαρύτητας σε γεωλογικούς σχηματισμούς υπερβαίνει την αντίσταση τριβής για κίνηση προς τα κάτω. Σε κάθε περίπτωση οι μετακινήσεις μαζών ή κατολισθήσεις μπορεί να έχουν σοβαρές καταστροφικές συνέπειες.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί όπως για τον ορισμό των κατολισθητικών φαινομένων. Έναν από τους πρώτους ορισμούς έδωσε ο Terzaghi το 1950, ορίζοντας ως κατολίσθηση "μία γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, εναπομένοντος εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω".

Είκοσι χρόνια αργότερα οι Zaruba and Mencl (1969) διατύπωσαν τον εξής ορισμό "μία γρήγορη κίνηση που οφείλεται στην ολίσθηση πετρωμάτων ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μία καλά καθορισμένη επιφάνεια".

Για την διάκριση του φαινομένου από άλλα παρόμοια φυσικά φαινόμενα ο Coates (1977) απέφυγε να δώσει ορισμό, διατυπώνοντας όρους και προϋποθέσεις για την κατάταξη μίας κίνησης στις κατολισθήσεις. Πρωτίστως αναφέρει ότι, η κίνηση πρέπει να ανήκει σε ένα από τα είδη κινήσεων μαζών πτώση, ολίσθηση και ροή. Η δύναμη της βαρύτητας παίζει πρωτεύοντα ρόλο και η κίνηση γίνεται σε ελεύθερη επιφάνεια, προς τα κάτω και προς τα έξω. Η ταχύτητα

της κίνησης είναι σχετικά μεγάλη, εξαιρώντας τον ερπυσμού από την γενική κατηγορία των κατολισθήσεων. Το μετακινούμενο υλικό να είναι τμήμα όρους ή λόφου και να περιλαμβάνει μέρος του μανδύα ή του μητρικού πετρώματος ή και τα δύο. Τέλος, διευκρινίζει ότι η ζώνη ή το επίπεδο της κίνησης δεν πρέπει να ταυτίζεται με γεωλογικό ρήγμα.

Ο Varnes το 1978 πρότεινε τον όρο «μετακινήσεις πρανών» (slope movement) ως πιο δόκιμο και ως κατολίσθηση όρισε «η προς τα κάτω και προς τα έξω κίνηση υλικών των πρανών, υπό την επίδραση της βαρύτητας». Κατά τον Varnes ο όρος περιλαμβάνει κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Οι Brunsden and Prior(1984) προτίμησε τον όρο «μετακινήσεις μαζών» (mass movement) κάνοντας σαφή διάκριση από την «μεταφορά μαζών» ως μια διαδικασία η οποία δεν απαιτεί ένα μέσο μεταφοράς όπως το νερό, τον αέρα ή τον πάγο (Dikaut et al, 1996).

Η κίνηση βραχώδους μάζας, κορημάτων ή εδαφικών υλικών προς τα κατάντη ενός πρανούς, αποτελεί τον πλέον απλουστευμένο ορισμό που διατύπωσε ο Cruden (1991) για λογαριασμό της Ομάδας Εργασίας της UNESCO για την Παγκόσμια Απογραφή Κατολισθήσεων.

Πρόσφατα οι Hungr et al. (2014) εμπνευσμένοι από τους προβληματισμούς που έθεσαν οι Leroueil et al. (1996, 2001), εστίασαν στη φάση εκδήλωσης του φαινομένου και διατύπωσαν τον εξής ορισμό για την αστοχία « η αστοχία ενός πρανούς είναι το πιο σημαντικό επεισόδιο κίνησης, στην ήδη γνωστή ή αναμενόμενη ιστορία μιας κατολίσθησης, η οποία περιλαμβάνει τον σχηματισμό της πρώτης πλήρως ανεπτυγμένης επιφάνειας θραύσης με αποτέλεσμα την ασυνεχή μετατόπιση μάζας σε διακριτή ή μη ζώνη πεπερασμένου πάχους.

Οι προαναφερόμενοι ορισμοί δίνουν μια γενική εικόνα του φαινομένου. Ωστόσο η διερεύνηση της επικινδυνότητας των κατολισθήσεις απαιτεί την κατανόηση όλων των πτυχών του φαινομένου, καθώς λαμβάνονται υπόψη στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσης. Ως εκ τούτου στις παραγράφους που ακολουθούν, παρατίθεται συνοπτική περιγραφή της ταξινόμησης των κατολισθήσεων και η ανάλυση των παραγόντων που συμβάλλουν στην προετοιμασία και την εκδήλωση του φαινομένου.

2.1.2.Συστηματική ταξινόμηση κατολισθήσεων

Για τη συστηματική μελέτη των κατολισθήσεων υπό την ευρύτερη έννοια της μετακίνησης μαζών έχουν προταθεί από πολλούς ερευνητές-κατά καιρούς-διάφορα συστήματα ταξινόμησης, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικά κριτήρια όπως τον τύπο της μετακίνησης (ολίσθηση, ροή, κατάπτωση κ.α.), τον μηχανισμό ολίσθησης, το είδος του υλικού που μετακινείται (βραχώδης μάζα, εδαφικός σχηματισμός), την ταχύτητα της κίνησης, την ενεργότητα του φαινομένου, το αίτιο της μετακίνησης, τη γεωμετρία της περιοχής θραύσης, τη γεωμετρία και μορφολογία του πρανούς, το περιβάλλον εκδήλωσης της μετακίνησης κ.α. (μεταξύ άλλων Varnes, 1958; Erskine, 1973; Zaruba and Mencl, 1976; Varnes, 1978; WP/WLI, 1995; Cruden and Varnes, 1996).

Τα συστήματα ταξινόμησης, εκτός ότι είναι απαραίτητα για την περιγραφή του φυσικού φαινομένου, είναι απαραίτητα τόσο στην έρευνα, όσο και στην αντιμετώπιση των μετακινήσεων μαζών, αλλά και γενικότερα στην ευχερέστερη επικοινωνία μεταξύ των ασχολούμενων με το αντικείμενο (Λέκκας, 2000). Πληρέστερα θεωρούνται τα συστήματα που περιλαμβάνουν όσο το δυνατό περισσότερους παράγοντες και γι' αυτό το λόγο έχουν διατηρηθεί και επικρατήσει τόσο στη διεθνή βιβλιογραφία όσο και στην καθημερινή πρακτική (Λέκκας, 2000).

Το πρώτο σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων διατυπώθηκε πιθανότατα στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και προέρχεται από χώρα των Άλπεων (Baltzer, 1875). Βασίστηκε στη διάκριση του τρόπου κίνησης των υλικών και ξεχωρίστηκαν οι τρεις τύποι κίνησης, πτώση, ολίσθηση και ροή. Αύτη η βασική διάκριση εξακολουθεί να υιοθετείται μέχρι σήμερα (Hungr et al., 2014), με προσθήκη αρκετών εξειδικευμένων τύπων, όπως η πλευρική εξάπλωση, που αναλύονται σε επόμενη παράγραφο.

Οι ροές κορημάτων περιγράφονται ήδη από το 1910, στη μονογραφία του Stini, ως ξεχωριστός τύπος μετακίνησης υλικών που αναπτύσσεται επί του υδρογραφικού δικτύου σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο μετά από έντονη βροχόπτωση. Ο τύπος αυτός, λόγω των αυξημένων καταστροφών που μπορεί να προκαλέσει, συγκεντρώνει μέχρι και σήμερα το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων (Bull, 1964; Pierson 2005; Vallance 2005).

Στις αρχές του 20⁰⁰ αιώνα αρκετοί συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων του Heim (1932), Zaruba and Mencl (1969), επικεντρώθηκαν στην ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση τη δομή και την υφή των υλικών και πρότειναν περιγραφές βασισμένη σε γεωλογικούς όρους. Την ίδια περίοδο στις ΗΠΑ, ο Sharpe (1938) εισήγαγε ένα τρισδιάστατο σύστημα ταξινόμησης βάσει του

τύπου της κίνησης, το υλικό και την ταχύτητα κίνησης. Επίσης, διέκρινε διαφορετικού τύπους μετακινήσεις και επινόησε αντίστοιχους όρους για τη ροή κορημάτων (επί του υδρογραφικού δικτύου), τη χιονοστιβάδα κορημάτων (επί πλαγιάς υπό κλίση) και τη ροή γαιών.

Ο Varnes το 1954 ξεκίνησε την επέκταση του πλαισίου ταξινόμηση που είχε ήδη θέσει ο Sharpe το 1938 μέσω του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας των ΗΠΑ, προτείνοντας ένα από τα πιο αποδεκτά και συχνότερα χρησιμοποιούμενο σύστημα ταξινόμησης (Varnes 1978; Cruden and Varnes, 1996). Χρησιμοποιεί ως βασικά κριτήρια για την ταξινόμηση τον τύπο της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού. Αν και η ταξινόμηση κατά Varnes επικράτησε για πάνω από έξι δεκαετίες, η πρόοδος στη μελέτη των κατολισθήσεων αλλά και η εμπειρία των γεωεπιστημόνων οδήγησε τους Hungr et al. (2014), στην αναθεώρησή της. Οι ερευνητές πρότειναν τροποποιήσεις ως προς τη διάκριση των υλικών και δευτερευόντως αλλαγές που σχετίζονται με τους μηχανισμούς κίνησης, επισημαίνοντας ότι πάντα θα υπάρχουν ασάφειες ως προς την ταξινόμηση ενός τόσο πολύπλοκου φαινομένου. Ο λόγος που ώθησε τους ερευνητές στην αναθεώρηση, έγκειται στο ότι δεν είναι συμβατή ούτε με τη γεωλογική ορολογία των υλικών που διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού των πετρωμάτων, ούτε με τις γεωτεχνικές ταξινομήσεις των υλικών που βασίζονται στις μηχανικές τους ιδιότητες (Morgenstern 1992; Leroueil et al. 1996). Το είδος του υλικού μπορεί όντως να είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατολισθήσεων, ωστόσο η διάιρεση των υλικών σε τρεις μόλις κατηγορίες (βραχώδη, συνεκτικά και μαλακά εδάφη) δεν κάλυπτε την επιστημονική κοινότητα από διαφορετικών επιστημονικών πεδίων.

Ο Erskine (1973), ταξινομεί τις κατολισθήσεις σε τέσσερις κατηγορίες με βάση την εξέλιξή, δίνοντας βαρύτητα στις επιπτώσεις που πιθανόν να έχουν στα τεχνικά έργα. Στις «πρόσφατες ενεργές» συγκαταλέγονται αυτές που εκδηλώνονται με πρόσφατες κινήσεις, ενώ στις «σταθεροποιημένες» αυτές που δεν έχουν ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης. Ενεργές θεωρεί αυτές που δείχνουν να μην έχουν σταθεροποιηθεί ακόμα και «επαναδραστηριοποιημένες πρόσφατα» αυτές που σημειώνεται επαναδραστηριοποίησή τους μετά από μια περίοδο σταθεροποίησης.

Οι Zaruba-Mencl (1976) κατέταξαν τις κατολισθήσεις ανάλογα με τη φύση και τη συνεκτικότητα του υλικού. Η ταξινόμηση αυτή είναι απλή και θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στις συνθήκες της Ελλάδας. Οι «περιστροφικές» κατολισθήσεις εκδηλώνονται κυρίως σε σχηματισμούς χαλαρούς ή με μέτρια διαγένεση και είναι γενικά σημαντικού πάχους. Οι

«μεταθετικές ή στρωματοειδείς» κατολισθήσεις έχουν μικρό πάχος και εκδηλώνονται με επίπεδο ολίσθησης παράλληλο με το πρανές, όπου τα κορήματα και τα υλικά αποσάθρωσης επικάθονται σε μαλακότερους σχηματισμούς ή όπου ιζηματογενείς σχηματισμοί έχουν στρώση και κλίση ομόρροπη προς το πρανές. Ολισθήσεις βραχωδών μαζών εκδηλώνονται κατά μήκος προετοιμασμένων επιφανειών ασυνέχειας (στρώση, διάκλαση κ.α.) που κλίνουν ομόρροπα προς το πρανές. Οι «καταπτώσεις βράχων» παρατηρούνται σε πολύ απότομα πρανή και βραχώδεις ακτές. Πρόκειται για αποκολλήσεις τεμαχίων και στη συνέχεια κίνηση στο κενό. Τα «ρεύμα γαιών» είναι συνήθη όταν τα εδαφικά υλικά διαβραχούν (αύξηση του φορτίου, μείωση της διατμητικής αντοχής και τριβής). Χαρακτηρίζονται από μεγάλη κινητική ενέργεια της ολισθαίνουσας μάζας. Η «ρευστοποίηση» αμμωδών σχηματισμών μπορεί να προκληθεί τόσο από απότομες μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού όσο και από δονήσεις, συνήθως σεισμικές.

Στην Αγγλία, ο Hutchinson (1988) ανέπτυξε ένα σύστημα ταξινόμησης πολλαπλών διαστάσεων λαμβάνοντας υπόψη το υλικό, τη μορφολογία, την περιεκτικότητα σε νερό, το ρυθμό, την κινηματική, εστιάζοντας στο μηχανισμό της αστοχίας και της διάδοσής της.

Από τις προαναφερόμενες ταξινομήσεις αυτή που έχει επικρατήσει παγκοσμίως για περισσότερο από πέντε δεκαετίες είναι η ταξινόμηση κατά Varnes (Varnes 1978; Cruden and Varnes, 1996). Συνολικά διακρίνονται έξι τύποι μετακίνησης, κατάπτωση, ανατροπή, ολίσθηση, πλευρική εξάπλωση, ροή και η σύνθετη μετακίνηση, που διαφοροποιούνται ως προς το είδος της μετακίνησης ανάλογα πάντα με το υλικό (πίνακας 2.1.). Ο τύπος κάθε κατολίσθησης εξαρτάται από τις γεωλογικές και κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής. Στον ελλαδικό χώρο οι ολισθήσεις αποτελούν τον πιο καταστρεπτικό τύπο κατολισθήσεις καθώς οι ζημιές που προκαλούν είναι μη αναστρέψιμες και δύναται να οδηγήσουν ακόμα και σε εκκένωση περιοχής κατοίκισης.

Η κατανόηση του μηχανισμού κίνησης των ολισθήσεων θεωρείται απαραίτητη όχι μόνο για τη λήψη μέτρων αποκατάστασης αλλά και κατά τη φάση πρόληψης, συγκεκριμένα για την εκπόνηση μελετών που στοχεύουν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας του φαινομένου. Στον πίνακα 2.1. παρουσιάζονται αναλυτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των τύπων κατολισθήσεων κατά Varnes ενώ στον πίνακα 2.2 αποδίδεται σχηματικά η πιο κοινή υποκατηγορία περιστροφικής κίνησης στην Ελλάδα που είναι η κάθιση.
Πίνακας 2.1. Αναλυτική ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Cruden and Varnes (1996) Τύπος μετακινούμενου υλικού Μηχανικά εδάφη Βραχώδες υπόβαθρο Μηχανικά εδάφη Χονδρόκοκκα Λεπτόκοκκα Ι. Κατάπτωση Γύπος μετακινούμενου υλικού Μηχανικά εδάφη Χονδρόκοκκα Λεπτόκοκκα Ι. Κατάπτωση βράχων Κατάπτωση βράχων Κατάπτωση κορημάτων Κατάπτωση γαιών Οι «καταπτώσεις» αφορούν σε αποσπάσεις μαζών διαφόρων μεγεθών από απότομα πρανή.

Αρχικά η κίνηση γίνεται κατά μήκος μιας επιφάνειας λόγω βαρύτητας, χωρίς ή ελάχιστη διατμητική μετατόπιση, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί ελεύθερης πτώσης, αναπήδηση και κύλιση. Η ταχύτητα της κίνησης είναι γρήγορη έως πολύ γρήγορη και συνήθως αυξάνει προς τα κάτω λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Εκδηλώνονται κυρίως ύστερα από σεισμική δραστηριότητα, από επίδραση των διεργασιών της αποσάθρωσης/διάβρωσης και από ανθρώπινες επεμβάσεις, όπως εκσκαφές στον πόδα πρανών, κατά την κατασκευή έργων οδοποιίας. Διακρίνονται ανάλογα με το είδος της μάζας που πέφτει, σε πτώσεις βράχων, πτώσεις κορημάτων και σε πτώσεις εδάφους.

2. Ανατροπή



Ανατροπή βράχων

Ανατροπή κορημάτων

Ανατροπή γαιών

Οι «ανατροπές» περιλαμβάνουν πτώσεις μαζών οι οποίες ξεκινούν με περιστροφή της αποσπώμενης μάζας γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής, το οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρος της μετακινούμενης μάζας. Η ταχύτητα της κίνησης είναι εξαιρετικά αργή στα πρώτα στάδια της μετακίνησης, ενώ γίνεται εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια εξέλιξής της. Προκαλούνται συνήθως από τη βαρύτητα, αλλά και από πλευρικές ωθήσεις που ασκούνται είτε από τα γειτονικά πετρώματα ή από υδροστατική πίεση λόγω του νερού ή του πάγου που βρίσκεται εντός των ασυνεχειών του πετρώματος.

Πίνακας 2.1. Αναλυτική ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Cruden and Varnes (1996)				
Τύπος μετακινούμενου υλικού)	
Τύπος κίνησης	D	Μηχανικά εδάφη		
	Βραχωσες υποραθρο	Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα	
3. Ολίσθηση				
	3.α. Περιστροφική ολίσθηση			
	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών	
	3.β. Μεταθετική ολίσθηση			
	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών	

Οι «ολισθήσεις» περιλαμβάνουν μετακινήσεις, οι οποίες προϋποθέτουν παραμόρφωση και μετατόπιση ή θραύση του υλικού κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών. Η κίνηση μπορεί να συμβεί ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια ολίσθησης ή να μεταδοθεί προοδευτικά από μια περιοχή τοπικής θραύσης προς τα ανάντη ενσωματώνοντας περισσότερες ζώνες αδυναμίας του εδαφικού υλικού. Η ταχύτητα της κίνησης είναι από εξαιρετικά αργή έως πολύ γρήγορη. Προκαλούνται συνήθως εξαιτίας ισχυρών και/ή παρατεταμένων βροχοπτώσεων ή από γρήγορη τήξη χιονιού, που οδηγούν σε κορεσμό με νερό των πρανών και αύξηση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, καθώς και στη διαβρωτική ενέργεια του νερού ποταμών, χειμάρρων και λιμνών, που προκαλεί υποσκαφή στον πόδα των πρανών. Διακρίνονται δύο τύποι ολισθήσεων από τους οποίους, στο μεν πρώτο υπάρχει μια περιστροφική κίνηση της μάζας γύρω από ένα νοητό άξονα, στο δε δεύτερο υπάρχει μια μετάθεση της μάζας χωρίς να ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο τόξο.

Στις «περιστροφικές ολισθήσεις» η ολισθαίνουσα μάζα των εδαφικών υλικών οριοθετείται από τους υποκείμενους σταθερούς ορίζοντες, με μια επιφάνεια μορφής συνήθως "κουταλιού" ή κοίλη προς τα επάνω που διαμορφώνεται κατά μήκος μιας ή περισσοτέρων επιφανειών αδυναμίας του υλικού κάτω από τη δράση διατμητικών δυνάμεων. Οι επιφάνεια αδυναμίας ακολουθεί συνήθως προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνέχειας ή αδυναμίας, οι οποίες συνήθως είναι κάποιο στρώμα αργίλου που λειτουργεί ως λιπαντική επιφάνεια υπό την επίδραση του νερού. Αποτελούν τον πιο κοινό τύπο κατολισθήσεων και η παραμόρφωση που παρατηρείται στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας είναι μικρή. Οι «μεταθετικές ολισθήσεις» γίνονται κατά μήκος μιας επίπεδης ή σχεδόν επίπεδης επιφάνειας με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Η κίνηση δηλαδή δεν περιλαμβάνει σημαντική στροφή ή στροφή προς τα πίσω της κεφαλής και έτσι διακρίνεται εύκολα από τη περιστροφική ολίσθηση. Η κίνηση αυτή ελέγχεται κυρίως από την ύπαρξη ασυνεχειών όπως στρώση, ρήγματα και διαρρήξεις. Το άνυσμα της ολίσθησης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο εάν η επιφάνεια ολίσθησης έχει μια σημαντική κλίση και η διατμητική αντίσταση κατά μήκος της είναι μικρή. Σε αυτόν τον τύπο ολίσθησης παρατηρείται έντονη παραμόρφωση έως και κατακερματισμός της μετακινούμενης μάζας. Διακρίνονται, σε ολισθήσεις τεμαχών, όταν η μάζα είναι μεγάλη και σε ολισθήσεις κατακερματισμένων τεμαχών, όταν υπάρχουν πολλές μικρές μονάδες οι οποίες τέμνονται από ασυνέχειες.

Πίνακας 2.1. Αναλυτική ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Cruden and Varnes (1996)				
	Τύπος μετακινούμενου υλικού			
Τύπος κίνησης	D., (S. (0.0	Μηχανικά εδάφη		
	Βραχωσες υποραθρο	Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα	
4. Πλευρική εξάπλωση				
Οι «πλε συμπαγά εφελκυσ πλαστικά άμμους κινείται, την επιφ τεμάχια κατανέμ επίδραστ υπερκείμ συνοχή τ κορεσμά	Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου υρικές εξαπλώσεις» αναφέροντα νός εδάφους, με αποτέλεσμα τον στικών ρωγμών. Απαραίτητη π ών και μαλακών υλικών, όπως γι και ιλύες. Ουσιαστικά το ρευστο διαμέσου των εφελκυστικών ρα άνεια του εδάφους. Ο υπερκείμε που κινούνται, περιστρέφοντα εται σε όλη την εκτεινόμενη μά η συγκεκριμένων παραγόντων (α ιενων πετρωμάτων ή τεχνικών ε των κατώτερων στρωμάτων. Η ρ	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων ι στην πλευρική διάταση ενό διαχωρισμό σε τεμάχη μέσω κ ροϋπόθεση είναι η ύπαρξη α παράδειγμα ρέουσες πλαστι ποιημένο υλικό των κατώτερι γμών, προς τα ανώτερα συνει γμών, προς τα ανώτερα συνει νος βραχώδης ορίζοντας συνή ι, βυθίζονται ή θρυμματίζον ίζα. Η πλευρικές εξαπλώσεις σεισμική δόνηση, πίεση που ενστοποίηση πέραν της αυξημ βροχόπτωσης ή γρήγορης τή	Πλευρική εξάπλωση γαιών ς συνεκτικού πετρώματος ή ατακόρυφων διατμητικών ή στα κατώτερα στρώματα κές αργίλους ή λεπτόκοκκες ων στρωμάτων, πιέζεται και κτικά πετρώματα και τελικά θως διαμελίζεται σε μεγάλα νται, άλλοτε η μετατόπιση η προκαλούνται ύστερα από ασκείται από το βάρος των βεροποιούν και μειώνουν τη ιένης φόρτισης προϋποθέτει ιζης χιονιού, είτε λόγω των	
υλικών	των κατώτερων στρωμάτων. Η τι	αχύτητα της μετακίνησης κυμ	αίνεται από αργή έως μέση,	
απο μερ περίπτω	νικα χιλιοστα εως δεκαδες μετρ ση που η εκδήλωση της εξάπλωσ	α ανα ημερα, ενω πολυ γρη ης οφείλεται σε σεισμική δόνr	γορη μπορει να γινει στην ιση.	
5. Poý				
A REAL	Ροή βραχώδους	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών	

υποβάθρου (ερπυσμός)

(ερπυσμός εδάφους)

Οι «ροές» είναι γρήγορες ή αργές μετακινήσεις χαλαρών υλικών με ή χωρίς παρουσία υγρής φάσης. Σε πολλές περιπτώσεις, έχουν τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων και των ταχυτήτων των ρευστών με υψηλό ιξώδες. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, μπορούν να κινηθούν πολύ γρήγορα και να γίνουν από τις πιο καταστροφικές μετακινήσεις μαζών. Η ταχύτητα της μετακίνησης εξαρτάται από την κλίση του επιφανειακού αναγλύφου και την περιεκτικότητα του νερού μέσα στη μάζα του μετακινούμενου υλικού. Η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων νερού σε κορήματα προκαλεί ροές κορημάτων, ενώ αντίστοιχη παρουσία νερού σε λεπτόκοκκα υλικά προκαλεί ροές λάσπης. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται και ο όρος «ερπυσμός» που χαρακτηρίζει πολύ αργές και συνεχής παραμορφώσεις στο χώρο, μικρό μέρος από τις οποίες μπορούν να αντιστραφούν μετά την άρση των τάσεων.

Πίνακας 2.1. Αναλυτική ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Cruden and Varnes (1996)				
	Τύπος μετακινούμενου υλικού			
Ι υπος κίνησης		Μηχανικά εδάφη		
	Βραχωσες υπορασρο	Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα	
6. Σύνθετη				
Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων κίνησης				
Οι σύνθετες μετακινήσεις είναι ο συνδυασμός όλων των παραπάνω τύπων που εκδηλώνονται είτε στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας είτε στα διάφορα στάδια εξέλιξής της. Σαν σύνθετες ολισθήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες διαφορετικού τύπου μετακινήσεις γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές και ταυτόχρονα.				

Πίνακας 2.2. Βασική ορολογία – διαστάσεις περιστροφικών ολισθήσεων (τροποποιημένα σχήματα από Cooper, 2007)



Κορυφή (Top)-[3]: Το υψηλότερο σημείο της επαφής μεταξύ του μετατοπισθέντος υλικού [13] της μετακινούμενης μάζας και της κύριας επιφάνειας θραύσης [2].

Ακρο (Tip)-[8]: Το σημείο στην απόληξη του πόδα [9] που βρίσκεται μακρύτερα από την κορυφή [3] της μετακινούμενης μάζας.

Μετατοπισμένο υλικό (Displaced material) [13]: Είναι το υλικό που έχει απομακρυνθεί από την αρχική του θέση στο πρανές. Περιλαμβάνει το υλικό της ζώνης εκκένωσης [17] και το υλικό της ζώνης συσσώρευσης [18].

Ζώνη εκκένωσης (Zone of depletion)-[14]: Η περιοχή της μετακινούμενης μάζας (κατολίσθησης) μέσα στην οποία το υλικό που μετατοπίσθηκε βρίσκεται χαμηλότερα από την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20].

Ζώνη συσσώρευσης (Zone of accumulation)-[15]: Η περιοχή της μετακινούμενης μάζας (κατολίσθησης) μέσα στην οποία το υλικό που μετατοπίσθηκε βρίσκεται υψηλότερα από την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20].

Περιοχή ή χώρος εκκένωσης (Depletion)-[16]:

Είναι ο όγκος που περικλείεται από την κύρια επιφάνεια θραύσης [2], την μετακινούμενη μάζα [17] και την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20]. Υλικό εκκένωσης (Depletion mass)-[17]: Ο όγκος του μετατοπισμένου υλικού [13] που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης [10] αλλά βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20].

Υλικό συσσώρευσης (Accumulation mass)-[18]: Ο όγκος του μετατοπισμένου υλικού [13] ο οποίος βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20]. Απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης (Toe of surface of rupture)-[11]: Η διατομή (συχνά βρίσκεται θαμμένη) μεταξύ του κατώτερου τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης [10] μιας μετακίνησης και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους [20].

Επιφάνεια διαχωρισμού (Surface of separation)-[12]: Το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους [20] που βρίσκεται κάτω από τον πόδα [7] της ολισθαίνουσας μάζας. Διαχωρίζει το υλικό που έχει μετατοπιστεί από το υλικό που δεν έχει μετακινηθεί, χωρίς όμως κατά μήκος της να έχει συμβεί θραύση.

Αρχική επιφάνεια εδάφους (Original ground surface)-[20]: Είναι η αρχική επιφάνεια του εδάφους πριν από την εκδήλωση της μετακίνησης.

Βάθος της ολισθαίνουσας μάζας (Depth of the displaced mass)-[21]: Μέγιστο βάθος μετακινούμενης μάζας.

Βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (Depth of the rupture surface)-[22]: Μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Ολικό μήκος (Total length)-[23]: Ελάχιστη απόσταση από την στέψη της μετακινούμενης μάζας μέχρι το άκρο της [L].

Μήκος μετακινούμενης μάζας (Length of the displaced mass)-[24]: Ελάχιστη απόσταση από την κορυφή της μετακινούμενης μάζας έως το άκρο της.

Μήκος επιφάνειας ολίσθησης (Length of the rupture surface)-[25]: Ελάχιστη απόσταση από την στέψη μέχρι την απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης.

Πλάτος μετακινούμενης μάζας (Width of the displaced mass)-[26]: Μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρικών ορίων της μετακινούμενης μάζας, κάθετα στο μήκος της.

Πλάτος επιφάνειας ολίσθησης (Width of the rupture surface)-[27]: Μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρών της επιφάνειας ολίσθησης, κάθετα στο μήκος της.

Κύρια επιφάνεια θραύσης-Μέτωπο μετακίνησης (Main scarp)-[2]: Η απότομη επιφάνεια αδιατάρακτου εδάφους στο ανώτερο τμήμα της μετακίνησης, που προκαλείται από την απομάκρυνση του μετακινούμενου υλικού [13] από το αδιατάρακτο υλικό. Η προέκταση της κύριας επιφάνειας κάτω από το υλικό που μεταιοπίστηκε αποτελεί την επιφάνεια ολίσθησης [10].

Δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης (Minor scarp)-[5]: Μια απότομη επιφάνεια στο υλικό που μετατοπίστηκε, η οποία προέκυψε εξαιτίας διαφορικών κινήσεων που συμβαίνουν μέσα στη μάζα που ολισθαίνει.

Στέψη (Crown)-[1]: Το υλικό που εξακολουθεί να βρίσκεται στη θέση του, πρακτικά χωρίς μετατόπιση, και βρίσκεται πάνω από την κύρια επιφάνεια θραύσης.

Πλευρικό όριο μετακίνησης (Flank)-[19]: Το αδιατάρακτο έδαφος που βρίσκεται πλευρικά της επιφάνειας ολίσθησης. Οι όροι αριστερά και δεξιά χρησιμοποιούνται κοιτώντας την ολίσθηση από τη στέψη.

Ρωγμές επί της στέψης (Crown cracks): Διαρρήζεις που εκδηλώνονται στο υλικό της στέψης.

Εγκάρσιες διαρρήζεις (Transverse cracks): Διαρρήζεις που αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση κίνησης του υλικού που μετατοπίζεται.

Εγκάρσιες ράχες (Transverse ridges): Επιμήκης, στενές ράχες που δημιουργούνται κάθετα στη διεύθυνση κίνησης του υλικού που μετατοπίζεται.

Ακτινωτές διαρρήζεις (Radial cracks): Διαρρήζεις που αναπτύσσονται παράλληλα στη διεύθυνση κίνησης του υλικού που μετατοπίζεται.

Κεφαλή (Head) [4]: Ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος της επαφής ανάμεσα στο μετακινούμενο υλικό και την κύρια επιφάνεια θραύσης.

Κόριο σώμα (Main body) [6]: Το τμήμα του μετατοπισθέντος υλικού που υπέρκειται της επιφάνειας θραύσης και βρίσκεται μεταξύ της κύριας επιφάνειας θραύσης [2] και της απόληξης του πόδα [11].

Πόδας (Foot) [7]: Το μετατοπισμένο υλικό που αποτίθεται κατάντη της επιφάνειας ολίσθησης και πάνω στην αρχική επιφάνεια του εδάφους [20].

Απόληξη πόδα (Toe) [9]: Το κατώτερο, συνήθως, καμπύλου σχήματος περιθώριο του μετατοπισθέντος υλικού της ολισθαίνουσας μάζας. Είναι το πιο απομακρυσμένο τμήμα από την κύρια επιφάνεια θραύσης [2].

Επιφάνεια ολίσθησης (Surface of rupture) [10]: Η επιφάνεια που σχηματίζεται (ή έχει σχηματισθεί) από το υλικό που έχει μετατοπισθεί [13=17+18] κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους [20].



2.1.3.Χρονική εξέλιξη κατολισθήσεων

2.1.3.1. Ρυθμός μετακίνησης των πρανών

Η ταχύτητα της κίνησης μιας μετακινούμενης μάζας, αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο της αξιολόγησης της επικινδυνότητας και σχετίζεται με την ανθρώπινη ανταπόκριση στον κίνδυνο κατολισθήσεων καθώς και το ενδεχόμενο ζημιών στις υποδομές. Το 1995 η Ομάδα Εργασίας της UNESCO για την Παγκόσμια Καταγραφή των Κατολισθήσεων (WP/WLI 1995) και το 1996 οι Cruden and Varnes, χρησιμοποίησαν την ταχύτητα της κίνησης, για να περιγράψουν τις μετακινήσεις μαζών. Διακρίθηκαν επτά μεγάλες κατηγορίες ταχύτητας κίνησης των πρανών, που κυμαίνονται από εξαιρετικά αργές έως εξαιρετικά γρήγορες (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα κίνησης της μετακινούμενης μάζας (WP/WLI 1995; Cruden and Varnes 1996)				
Κατ	τηγορία	1	Γαχύτητα	Περιγραφή
7			Εζαιρετικά γρήγορη	Καταστροφές μεγάλης έντασης. Τα κτήρια καταπλακώνονται και καταστρέφονται από την πρόσκρουση της μετακινούμενης μάζας, καταγράφονται πολλά θύματα, αδύνατη διαφυγή.
		5 m/sec		
6	1		Πολύ γρήγορη	Καταγράφονται αρκετά θύματα, η ταχύτητα είναι αρκετά μεγάλη περιορίζοντας τη δυνατότητα διαφυγής.
		3 m/min		
5			Γρήγορη	Υπάρχει η δυνατότητα εκκένωσης κτιρίων και διαφυγής των κατοίκων σε ασφαλής περιοχές. Καταστροφή περιουσιών, κτηρίων, και εξοπλισμός ενώ καταγράφονται σοβαρές βλάβες σε εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής.
		1.8 m/hr		
4			Μέτρια	Προσωρινή διατήρηση ανθεκτικών κατασκευών.
		13 m/month		
3			Αργή	Δυνατότητα ενισχυτικών παρεμβάσεων σε ανθεκτικά κτίρια και υποδομές, οι οποίες μπορούν να διατηρηθούν με συστηματική συντήρηση, υπό την προϋπόθεση να μην αυζηθεί σημαντικά η ταχύτητα του φαινομένου.
		1.6 m/yr		
2			Πολό αργή	Διατήρηση ορισμένων κτιρίων-κατασκευών, χωρίς να επηρεάζονται από την κίνηση.
		15 mm/yr		
1			Εζαιρετικά αργή	Ανεπαίσθητες μετακινήσεις. Εφικτή η κατασκευή εγκαταστάσεων, υπό την εφαρμογή κατάλληλών τεχνικών προδιαγραφών.

Ο βαθμός της απώλειας της συνοχής των υλικών κατά τη διάρκεια της αστοχίας καθορίζει την ταχύτητα της κατολίσθησης. Συνδυαστικά με την κλίση του πρανούς και την περιεκτικότητα των υλικών σε νερό, διαμορφώνει την καταστροφικότητα της κατολίσθησης (Keller and Blodgett, 2005).

Μια εξαιρετικά γρήγορη μετακίνηση μάζας θα μπορούσε να προκαλέσει απώλειες, τόσο σε ανθρώπινες ζωές, καθώς δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για να εκκενώσουν την πληγείσα περιοχή με ασφάλεια, όσο και υλικές ζημιές. Ωστόσο, μια μεγάλη, σε έκταση, αργά μετακινούμενη μάζα είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσει απώλειες ανθρώπινων ζωών, αλλά μπορεί, όμως, δυνητικά να προκαλέσει πολύ σημαντικές υλικές ζημιές, τόσο σε περιουσίες όσο και σε υποδομές.

2.1.3.2. Ιστορικό κατολίσθησης

Μια κατολίσθηση είναι ένας φυσικός μηχανισμός που αναπτύσσεται στο χρόνο μέσα από διάφορα στάδια (Terzaghi 1950; Leroueil et al 1996; Leroueil et al,2001; Highland and Bobrowsky, 2008). Η τυπική της, εκτός από την κύρια φάση εκδήλωσης της αστοχίας, περιλαμβάνει πρόδρομες παραμορφώσεις επί του εδάφους (ρωγμές) και επακόλουθες μετατοπίσεις (Skempton and Hutchinson, 1969). Μεταξύ των φάσεων μετακίνησης, μπορεί να παρεμβάλλονται είτε μεγάλες ή μικρές περίοδοι σχετικής ηρεμίας (Hungr et al., 2014). Η εκδήλωση της κύριας αστοχίας αποτελεί τη σημαντικότερη φάση και συμβαίνει συνήθως επί μιας προϋπάρχουσας και πλήρους ανεπτυγμένης επιφάνειας διάρρηξης (Morgenstern and Tschalenko, 1967).

Στην διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχει πληθώρα εργασιών με εκτενείς αναφορές στο ιστορικό κατολισθήσεων καθώς αυτό συμβάλει στην κατανόηση της πολυπαραγοντικότητας του φαινομένου. Περιλαμβάνει στοιχεία που αφορούν στην χωροχρονική εξέλιξη μιας κατολίσθησης, συλλέγονται στο πεδίο και εμπλουτίζονται διαχρονικά με δεδομένα που προκύπτουν από τεχνικές τηλεπισκόπισης που πολλές φορές περιλαμβάνουν την ογκομέτρηση της μετακινούμενης μάζας (Gallousi and Koukouvelas, 2007; Guzzetti et al., 2009).

Συγκριμένα καταγράφονται οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη φάση εκδήλωσης και το χρονικό επαναδραστηριοποίησης. Για κάθε επιμέρους φάση σημειώνονται η έκταση, η ένταση, ο όγκος και η απόσταση που διήνυσε το μετακινούμενο υλικό. Τα στοιχεία αυτά συλλέγονται, κατά κύριο λόγο, από γεωλόγους που ειδικεύονται στην έρευνα κατολισθήσεων στο πεδίο και όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο οι περισσότερες μεθοδολογικές προσεγγίσεις του φαινομένου στηρίζονται είτε στα στοιχεία των καταγραφών ή απευθείας στην άποψη των ειδικών. Συμβάλλουν στην αποτύπωση της και είναι απαραίτητα στην περεταίρω μελέτη του φαινομένου και δη στην εκτίμηση της επικινδυνότητας με στατιστικές μεθόδους.

Ιδιαίτερα στην Ιταλία, που πλήττεται συστηματικά από το φαινόμενο, οι αναφορές είναι εκτεταμένες και αποτελούν αντικείμενο συστηματικής μελέτης επί δεκαετίες (Pasuto et al., 1993; Angeli et al., 1994; Vietmeier et al., 1999; Herva's et al., 2003; Reichenbach et al., 2004; Guzzeti et al., 2009; Devoto et al., 2013; Galve et al., 2015; Biolchi et al, 2016). Ακολούθως, παρατίθεται ενδεικτικά μια περίπτωση μελέτης κατολίσθησης από την Βόρεια Ιταλία με πλήρες καταγεγραμμένο ιστορικό, που καταδεικνύει την πολυπαραγοντικότητα του φαινομένου.

Η κατολίσθηση της Tessina βρίσκεται στις Ιταλικές Άλπεις στη BA Ιταλία και αν και εκδηλώθηκε πριν από μισό αιώνα περίπου, θεωρείται ακόμα ενεργή. Πρόκειται για μια σύνθετη κατολίσθηση με περιστροφικές και μεταθετικές ολισθήσεις να χαρτογραφούνται στο ανώτερο τμήμα και ροές στο μέσω και κατώτερο (Herva's et al., 2003; Borgatti et al., 2004). Καταλαμβάνει περιοχές με υψομετρικό εύρος περί τα 600m, με τη στέψη να βρίσκεται σε υψόμετρο 1.200m. Σε χρονικό διάστημα 40 ετών η έκτασή της σχεδόν διπλασιάστηκε, από τα $300.000m^2$ στα $500.000m^2$, ο συνολικός όγκος της μετακινούμενης μάζας ξεπέρασε τα $7.000.000m^3$ και η μέγιστη καταγεγραμμένη ταχύτητα τα 70-100m ανά μέρα ή 3-4m την ώρα.

Από λιθολογική άποψη εντοπίζεται στο σχηματισμό του φλύσχη, που χαρακτηρίζεται από εναλλαγές μαργών και στρώματα αργιλικού σχίστη πάχους έως και 1m. Το συνολικό πάχος του σχηματισμού του φλύσχη ποικίλει και σε ορισμένες θέσεις ξεπερνά το 1km, λόγω της γεωτεκτονικής του θέσης. Οι επάλληλες επωθήσεις και εφιπεύσεις που δημιουργήθηκαν κατά τον τελευταίο ορογενετικό κύκλο, Αλπική ορογένεση, είχαν ως αποτέλεσμα να σχηματιστούν από τεκτονικά σύγκλινα και αντίκλινα τα οποία πλέον δομούνται από πολυπτυχωμένους σχηματισμούς.

Οι κύριες μετακινήσεις, συνολικού όγκου 5.000.000m³, εκδηλώθηκαν τη δεκαετία του 60 και οδήγησαν στη δημιουργία νέων αποθέσεις, επί της ομώνυμης κοιλάδας, πάχους έως και 50cm (Borgatti L, 2004). Συγκεκριμένα, τον Οκτώβρη του 1960 μετά από έντονη βροχόπτωση (400mm σε ένα μήνα) πυροδοτήθηκε μια περιστροφική ολίσθηση, με μετακινούμενο υλικό της τάξης του 1.000.000m³. Στα επόμενα τέσσερα χρόνια σημειώθηκαν τρεις επαναδραστηριοποιήσεις, υπό μορφή καθιζήσεων εντός του κύριου σώματος, που συνοδεύτηκαν

από ροή γαιών στα κατώτερα στρώματα. Η ροή ακολουθώντας το ανάγλυφο και δη το υδρογραφικό δίκτυο διήνυσε απόσταση μεγαλύτερη των 3km φτάνοντας σε απόσταση 600m από οικισμό στα κατάντη.

Αν και η περιοχή επλήγη από καταστροφικές πλημμύρες, από το 1966 και για τα επόμενα είκοσι χρόνια, δεν κατεγράφησαν σημαντικές επανενεργοποιήσεις στην κατολίσθηση. Τον Αύγουστο του 1990 μια σημαντική επαναδραστηριοποίηση συνέβη στα ανώτερα τοπογραφικά τμήματα της κατολίσθηση. Διήρκησε 10 ημέρες και συνοδεύτηκε από ροή στο κατώτερο τμήμα επεκτείνοντας τον πόδα κατά 200m. Επί ένα χρόνο σημειώνονταν προοδευτικές μετατοπίσεις, χωρίς όμως να προκληθεί ιδιαίτερος κίνδυνος. Τον Δεκέμβριο του 1991, και ενώ είχε καταγραφεί ένας μέτριος σεισμός που θεωρήθηκε τυχαίο γεγονός, συνέβη μια σημαντική μετακίνηση στο ανατολικό τμήμα της κατολίσθησης και μετά από τέσσερις μήνες ξαφνικά κατέρρευσε περιοχή έκτασης 40.000 m². Η ροή που προκλήθηκε κάλυψε οδικό άξονα της περιοχής, μετά από ένα μήνα. Έκτοτε η κατολίσθηση επεκτάθηκε σημαντικά με αποτέλεσμα το 1993 η συνολική διαμήκης έκτασή της να ξεπερνά τα 2,5km και το μέγιστο πλάτος τα 500m.

Το 1995 η μετακινούμενη μάζα, καλύπτοντας απόσταση 30m ανά ημέρα, έφθασε στο χωριό Lamosano, που βρίσκεται σε απόσταση 3,5km από την στέψη της κατολίσθησης, προκαλώντας για πρώτη φορά σοβαρή κατάσταση κινδύνου. Τον Σεπτέμβριο του 1998, χωρίς προφανές έναυσμα, η κατολίσθηση επαναδραστηριοποιήθηκε επαναλαμβάνοντας την αρχική κίνηση επί της κύριας θραύσης, εκτοπίζοντας το κυρίως σώμα και προκαλώντας ροή, που μέσα σε λίγες μέρες διήνυσε 1km και έφτασε στο χωριό Funes.

Το ιστορικό της κατολίσθησης Tessina καταδεικνύει ότι υπό την επίδραση του νερού, σε μια λιθολογικά ευαίσθητη και τεκτονικά καταπονημένη περιοχή, μια οριακή κατάσταση ισορροπίες δυνάμεων δύναται να διαταραχθεί προκαλώντας μετακίνηση μαζών εκατομμυρίων κυβικών μέτρων. Άπαξ και το φαινόμενο εκδηλωθεί η περεταίρω επέκτασή του μπορεί να διαρκέσει πολλές δεκαετίες με διαστήματα παύσης που μπορεί να διαρκέσουν από μερικά έτη έως και δεκαετίες. Το έναυσμα της επαναδραστηριοποίησης δεν είναι πάντοτε το ίδιο, ενώ κάποιες φορές είναι απροσδιόριστης αιτίας. Τα πετρώματα στην Tessina καταπονούνταν επί εκατομμύρια χρόνια και παρέμειναν αμετακίνητα άλλα τόσα, παρά τις ακραίες βροχοπτώσεις που προηγήθηκαν αυτής του 1960.

2.1.4. Παράγοντες δημιουργίας και εκδήλωσης κατολισθήσεων

Οι βασικές πτυχές του μετριασμού του κινδύνου από τις μετακινήσεις μαζών σχετίζονται πρωτίστως με την αναγνώριση και η κατανόηση των παραγόντων που συμβάλουν στη δημιουργία και στην εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων, ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός των κρίσιμων τιμών εκδήλωσης του φαινομένου και η προσπάθεια για διασφάλιση από την έκθεση σε κίνδυνο στοιχείων του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο τα κατολισθητικά φαινόμενα ακολουθούν μια μακρά προπαρασκευαστική περίοδο έως ότου εκδηλωθούν. Ουσιαστικά, ένα πρανές μεταβαίνει από μια σταθερή κατάσταση σε μια οριακά σταθερή και στη συνέχεια σε μια ασταθή κατάσταση, υπό την επίδραση μιας σειράς παραγόντων-αιτιών η δράση των οποίων το καθιστά επιδεκτικό σε αστάθεια. Η επίδραση των παραγόντων είναι μια μακροχρόνια διαδικασία που συντελείται συνήθως πολύ αργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολα αντιληπτή στον απλό παρατηρητή. Ωστόσο, η εκδήλωση των περισσότερων καταστροφικών κατολισθήσεων αποτελεί μια γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη διαδικασία και γίνεται αντιληπτή λίγο πριν ή αμέσως μετά την φάση εκδήλωσης (Wieczorek, 1996). Ως εκ τούτου στη διεθνή βιβλιογραφία οι παράγοντες που συμβάλουν στη δημιουργία και την εκδήλωση των μετακινήσεων μαζών διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι παράγοντες που συμβάλουν στην δημιουργία του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών. Περιλαμβάνουν διεργασίες που επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα διαμορφώνοντας τις συνθήκες οριακής ισορροπίας ενός πρανούς, χωρίς όμως στην πραγματικότητα να εκδηλώνεται το φαινόμενο και καλούνται προπαρασκευαστικοί παράγοντες ή αιτιώδεις παράγοντες (Πίνακας 2.4).

Στη δεύτερη κατηγορία αναφέρονται οι παράγοντες που συμβάλουν στην εκδήλωση του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών, πρόκειται για τους παράγοντες οι οποίοι διαταράσσουν τις συνθήκες ισορροπίας του πρανούς, επιδρούν περιοδικά και αποτελούν το έναυσμα για την εκδήλωση του φαινομένου, αποτελούν δηλαδή την αφορμή, και καλούνται εναυσματικοί παράγοντες ή *Triggering factors* (Wieczorek, 1996) και παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.4. Παράγοντες που συμβάλουν στην δημιουργία του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών -Προπαρασκευαστικοί παράγοντες (Highland and Bobrowsky, 2008).

Βέβαια, οι ίδιοι παράγοντες μπορεί άλλες φορές να έχουν προπαρασκευαστικό χαρακτήρα και άλλες να αποτελούν το έναυσμα, ή και τα δύο μαζί. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, μια μετακίνηση μάζας οφείλεται σε έναν μόνο εναυσματικό παράγοντα ο οποίος δρα καθοριστικά, όπως για παράδειγμα ένας σεισμός (Cruden and Varnes, 1996; Keefer and Manson, 1998; Alexander, 1993; Petley, 2010). Αν και υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συμβάλουν στην εκδήλωση μιας μετακίνησης μάζας, οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν τις περισσότερες από τις καταστροφικές μετακινήσεις μαζών στον κόσμο είναι η βροχόπτωση, η σεισμικότητα, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η ανθρώπινη παρέμβαση. Τα αποτελέσματα της δράσης τους ποικίλουν ευρέως και εξαρτώνται από παράγοντες όπως η κλίση του πρανούς, η μορφολογία του εδάφους, ο τύπος του εδάφους, το γεωλογικό υπόβαθρο, και εξαρτάται επίσης και από την ύπαρξη ή μη ανθρώπων ή κατασκευών εντός των ορίων της περιοχής που επηρεάζεται από την μετακινούμενη μάζα. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των κύριων παραγόντων που συμβάλουν στην εκδήλωση του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης μαζών.

Πίνακας 2.5. Φυσικοί παράγοντες που συμβάλουν στην εκδήλωση του φυσικού φαινομένου της μετακίνησης των μαζών-Εναυσματικοί παράγοντες (Highland and Bobrowsky, 2008).	
– Ισχυρή βροχόπτωση	
 Γρήγορη τήξη χιονιού 	
 Παρατεταμένη, υψηλής έντασης βροχόπτωση 	
 Γρήγορος υποβιβασμός της στάθμης του νερού ύστερα από πλημμύρες, παλίρροιες 	
 Διάρρηξη φραγμάτων σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες 	
- Σεισμοί	
 Ηφαιστειακές εκρήξεις 	
 Αποσάθρωση από τη δράση του παγετού 	
 Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών 	

Οι περισσότερες κατολισθήσεις που έχουν σημειωθεί παγκοσμίως και στην Ελλάδα εκδηλώνονται είτε μετά από ακραίες βροχοπτώσεις είτε από σεισμούς μεγάλου σεισμικού μεγέθους (Keefer 2002; Prestininzi and Romeo, 2005; Koukis et al., 2005). Για τον ελλαδικό χώρο η σχέση μεταξύ βροχόπτωσης, ως εναυσματικού παράγοντα, και μετακινήσεων μαζών διερευνήθηκε πρώτη φορά από τους Koukis et al. (1996), όπου αναλύθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από τριάντα μετεωρολογικούς σταθμούς της δυτικής Ελλάδας, καλύπτοντας μια περίοδο τριάντα οκτώ ετών (1953-1991), σε συνδυασμό με δεδομένα κατολισθητικών φαινομένων της ίδιας περιόδου. Ήδη από το 1989 ο Ζιούρκας επιχειρώντας την πρώτη συστηματική μελέτη των κατολισθήσεων στην Ελλάδα με στατιστικές μεθόδους, ανέδειξε την παρατεταμένη βροχόπτωση ως τον σημαντικότερο παράγοντα εκδήλωσης κατολίσθησης ανάμεσα σε δεκαεπτά παράγοντες (σχήμα 2.3). Ακολουθούν κατά σειρά συχνότητας η έντονη διάβρωση από τη δράση του νερού, η υποσκαφή στον πόδα για την κατασκευή τεχνικών έργων και οι σεισμοί.

Η έντονη ή παρατεταμένη βροχόπτωση, η γρήγορη τήξη του χιονιού και η απότομη μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, μπορούν να αποτελέσουν εναυσματικούς παράγοντες των μετακινήσεων μαζών (Croizer, 1986). Οι παράγοντες που συμβάλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων λόγω βροχόπτωσης είναι η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και το βάρος που προσθέτει στη μάζα του πρανούς το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Ειδικότερα, σε περιπτώσεις αργιλικών εδαφών η παρατεταμένη βροχόπτωση αποτελεί τον κύριο εναυσματικό παράγοντα, καθώς τα αργιλικής σύστασης εδάφη χρειάζονται αρκετές ημέρες βροχόπτωσης ώστε να καταστούν κορεσμένα σε νερό. Αντιθέτως η έντονη βροχόπτωση μικρής διάρκειας, δεν είναι ικανή να προκαλέσει τον κορεσμό αργιλικών εδαφών ωστόσο μπορεί να πυροδοτήσεις καταπτώσεις βράχων ιδιαίτερα σε τεχνητά πρανή.

Τα υπολειμματικά ή κοκκώδη εδάφη εξαιτίας της δομής τους παρουσιάζουν καλές συνθήκες στράγγισης, οπότε παρατεταμένης διάρκειας βροχοπτώσεις δεν μπορούν να οδηγήσουν σε κορεσμό τα συγκεκριμένα εδάφη. Αντίθετα, έντονες βροχοπτώσεις, μικρής διάρκειας, είναι δυνατόν να προκαλέσουν τον κορεσμό τους με νερό. Αυτό έχει ως επακόλουθο την μείωση των δυνάμεων τριβής στο εσωτερικό των σχηματισμών αυτών, λόγω της αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες για εκδήλωση φαινομένων μετακίνησης μαζών (Wieczorek, 1996; Iverson, 2000). Για αυτούς τους τύπους των εδαφών, τα κατολισθητικά φαινόμενα, συνήθως, εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια της νεροποντής ή σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά το περάς του φαινομένου. Ωριαία βροχόπτωση με ύψος βροχής άνω των 40 mm είναι αρκετή για να προκαλέσει μια ολίσθηση εδάφους, ενώ για ωριαία βροχόπτωση με ύψος βροχής άνω των 70 mm ο κατολισθητικός κίνδυνος αυξάνεται σημαντικά.

Οι μετακινήσεις μαζών όπου ο εναυσματικός παράγοντας είναι μια σεισμική δόνηση, είτε εκδηλώνονται σε βραχώδη πρανή είτε σε εδαφικούς σχηματισμούς (Keefer, 1984; Hutchinson, 1987; Sassa, 1996; Rodriguez et al., 1999; Prestininzi and Romeo, 2000; Chigira et al., 2010), μπορούν να προξενήσουν μεγάλες καταστροφές και απώλειες ανθρώπινων ζωών (Bird and Bommer, 2004). Ειδικότερα, είναι γνωστό ότι οι περισσότεροι σεισμοί μεσαίου και μεγάλου μεγέθους είναι ικανοί να προκαλέσουν μετακινήσεις μαζών (Keefer, 1984). Οι μετακινήσεις μαζών που εκδηλώνονται κατά την διάρκεια σεισμών επικεντρώνονται κυρίως σε τεκτονικά ενεργές περιοχές με έντονο ανάγλυφο, και μαζί με τα κύματα βαρύτητας (τσουνάμι) είναι από τις πιο καταστροφικές δευτερογενείς επιπτώσεις των ισχυρών σεισμών (Koukouvelas and Doutsos, 1996; Koukouvelas et al., 1996; Harp and Jibson, 1996; Marzorati et al., 2002; Gallousi and Koukouvelas, 2007; Owen et al., 2008; Ren and Lin, 2010; Dai et al., 2011). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συν-σεισμικές κατολισθήσεις προκαλούν περισσότερες απώλειες ανθρώπινων ζωών από ότι ο ίδιος ο σεισμός (Ren et al., 2013). Επομένως, οι κατολισθήσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια σεισμών έχουν σημαντική επίδραση στον σεισμικό σχεδιασμό των πόλεων και των υποδομών που βρίσκονται κοντά σε ρηξιγενείς ζώνες.

2.1.4.1. Συνθήκες ευστάθειας φυσικών και τεχνιτών πρανών

Η διατμητική τάση και η διατμητική αντοχή είναι οι αντίρροπες δυνάμεις που καθορίζουν αν κάποιο πέτρωμα ενός πρανούς θα κινηθεί ή θα παραμείνει σταθερό. Η διατμητική τάση (δύναμη ή ροπή ολίσθησης) είναι η συνιστώσα του βάρους ενός πετρώματος που είναι παράλληλη προς το πρανές και ενεργεί για να μετακινήσει προς τα κατάντη μια μάζα ή ένα πρανές, ενώ η διατμητική αντοχή (δύναμη ή ροπή συγκράτησης) είναι η εσωτερική αντοχή του πετρώματος, που καθορίζεται από την τριβή και την συνεκτικότητα των επί μέρους τμημάτων του πετρώματος ή του αποσαθρωμένου μανδύα και ανθίσταται στην μετακίνηση. Όταν η διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη της διατμητικής αντοχής τότε η ευστάθεια του πρανούς διαταράσσεται με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μετακίνηση της μάζας των πετρωμάτων κατά μήκος του πρανούς.

Ο λόγος της διατμητικής αντοχής προς τη διατμητική τάση μας δείχνει το βαθμό ευστάθειας ενός πρανούς, ονομάζεται συντελεστής ασφαλείας και για την μετακίνηση μαζών ορίζεται ως:

$$\mathbf{FS} = \tau_f / \tau_{mob},$$

, όπου τ_f η διατμητική αντοχή πάνω στο επίπεδο του πρανούς και τ_{mob} η διατμητική τάση πάνω στο επίπεδο του πρανούς.

Οι δυνάμεις συγκράτησης ή ολίσθησης σχετίζονται με τη γωνία της κλίσης και τη γωνία τριβής του πρανούς. Ενώ μια μεγάλη γωνία τριβής του πετρώματος σημαίνει αυξημένη αντοχή, μια μεγάλη κλίση πρανούς συνεπάγεται αυξημένες δυνάμεις ολίσθησης. Ως εκ τούτου, μια μάζα πετρώματος μεγάλης γωνίας τριβής (μεγάλη διατμητική αντοχή) καθίσταται λιγότερο επιδεκτική στη μετακίνηση συγκρινόμενη με μια μάζα πετρώματος μικρότερης γωνίας τριβής (μικρή διατμητική αντοχή) σε πρανές τις ίδιας κλίσης. Επιπρόσθετα, μια μάζα πετρωμάτων είναι λιγότερο πιθανό να μετακινηθεί σε ένα πρανές ήπιας κλίσης σε σχέση με πρανές μεγαλύτερης κλίσης.

Για τιμές του συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερες της μονάδας (FS>1) ένα πρανές παραμένει σταθερό (ανενεργό), ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας (FS<1) καθίσταται ασταθές (ενεργό). Όταν ο συντελεστής ασφαλείας έχει τιμές ίσες με τη μονάδα (FS=1), τότε σημαίνει ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση οριακής ή ασταθούς ισορροπίας. Η αστάθεια ενός πρανούς (FS<1) μπορεί να συμβεί ως αποτέλεσμα της επενέργειας των παραγόντων που συμβάλλουν είτε στην

αύξηση της διατμητικής τάσης ή στην μείωση της διατμητικής αντοχής, είτε στον συνδυασμό τους (Varnes, 1978). Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράγοντες, ενώ ακολουθεί σύντομη περιγραφή τους.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής τάσης περιλαμβάνουν την αφαίρεση υποστήριξης, την πλευρική πίεση, την πρόσθετη φόρτιση, τις παροδικές γήινες τάσεις, την αύξηση της κλίσης του πρανούς και την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Οι πέντε πρώτοι παράγοντες συμβάλλουν καθοριστικά στην εκδήλωση του φαινομένου για την Ελλάδα και αναλύονται στη συνέχεια.

Η αφαίρεση υποστήριξης είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους παράγοντες που προκαλούν μετακινήσεις μαζών. Είναι δυνατό να γίνει είτε στο πόδι του πρανούς, είτε πλευρικά και μπορεί να οφείλεται, είτε σε φυσικά αίτια, είτε σε ανθρώπινη παρέμβαση. Ειδικότερα, η αφαίρεση υποστήριξης από φυσικά αίτια μπορεί να οφείλεται στη διαβρωτική ενέργεια του νερού των ποταμών και χειμάρρων και σε υποσκαφές των ακτών (λόγω της δράσης των κυμάτων ή των παλιρροιών), είτε σε υποσκαφές από την κίνηση των παγετώνων ή τη δράση των ανέμων. Οι ρηξιγενείς ζώνες με σημαντικά κατακόρυφη συνιστώσα μετακίνησης αποτελεί μια συχνή φυσική περίπτωση αφαίρεσης υποστήριξης στον Ελλαδικό χώρο και όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο της μεθοδολογίας λαμβάνεται υπόψη στην σύνταξη χαρτών επιδεκτικότητας των εδαφών σε κατολισθήσεις. Η ανθρώπινη παρέμβαση στα φυσικά πρανή οδηγεί συχνά στην αφαίρεση υποστήριξης. Η εκδήλωση κατολισθήσεων μετά από υποσκαφή και αφαίρεση υλικών, λόγω λατομικώνμεταλλευτικών δραστηριοτήτων, ή για την κατασκευή γραμμικών τεχνικών έργων, αποτελεί μια συνήθη συνέπεια. Η εμβληματική περίπτωση της κατολίσθησης Vajion το 1963 με 2.500 θύματα, κατέδειξε το μέγεθος της καταστροφής που μπορεί να προκαλέσει η ανθρώπινη παρέμβαση σε τεχνητές λίμνες και ταμιευτήρες με την ελεγχόμενη κατακόρυφη διακύμανση της στάθμης του νερού.

Η πλευρική πίεση που ασκείται, εξαιτίας πλευρικών τάσεων που αναπτύσσονται εντός των σχηματισμών, στη μάζα του πρανούς, είναι δυνατό να παίξει καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση της μετακίνησης μιας μάζας. Οι πλευρικές τάσεις, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, προστίθενται στις υπάρχουσες τυχόν διατμητικές τάσεις αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα μετακίνησης μιας μάζας. Οι πλευρικές τάσεις είναι δυνατό να προέρχονται από την παθανότητα μετακίνησης μιας μάζας. Οι πλευρικές τάσεις αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα μετακίνησης μιας μάζας. Οι πλευρικές τάσεις είναι δυνατό να προέρχονται από την παθανότητα μετακίνησης μιας μάζας. Οι πλευρικές τάσεις είναι δυνατό να προέρχονται από την παρουσία νερού σε ρωγμές και κοιλότητες των πετρωμάτων, το πάγωμα του νερού μέσα σε ρωγμές και διακλάσεις, τη διόγκωση πετρωμάτων λόγω του εμποτισμού τους από το επιφανειακό νερό που κατεισδύει. Η κινητοποίηση παραμενουσών τάσεων μέσα σε μάζες γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί, όπως παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο, ένας από τους κυριότερους λόγους εκδήλωσης κατολισθήσεων στην Κεντρική και Δυτική Ελλάδα.

Η πρόσθετη φόρτιση είναι δυνατό να οφείλεται τόσο στη δράση φυσικών παραγόντων όσο και σε ανθρώπινες παρεμβάσεις. Στα φυσικά αίτια συγκαταλέγονται η μεταφορά και απόθεση υλικών λόγω της βαρύτητας και της δράσης του επιφανειακού ύδατος, αλλά και το βάρος είτε από την ανάπτυξη της βλάστησης. Το νερό, που προέρχεται τόσο από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την επιφανειακή απορροή, προσθέτει σημαντικό φορτίο βάρους καθώς αυξάνει τη μάζα του πρανούς. Οι ανθρωπογενής παρέμβαση συμβάλει στην αύξηση του βάρους των πρανών, είτε με την κατασκευή κτιρίων και μεγάλων τεχνικών έργων, είτε με την απόρριψη αδρανών υλικών και σκουπιδιών ή την κατασκευή επιχωμάτων. Όσο πιο αργά γίνεται η επιφόρτιση τόσο μειωμένες είναι οι πιθανότητες μετακίνησης, ενώ όσο πιο γρήγορα γίνεται τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες εκδήλωσης κατολίσθησης.

Οι παροδικές γήινες τάσεις είναι δυνατό να αποτελέσουν το έναυσμα της μετακίνησης μιας βραχώδους ή εδαφικής μάζας, επειδή οι επιταχύνσεις προκαλούν αύξηση της διατμητικής τάσης και μεταβάλουν γενικά το καθεστώς τάσεων σε ένα πρανές. Μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε μείωση της διατμητικής αντοχής, εξαιτίας της μείωσης της συνοχής των υλικών που προκαλείται

λόγω των δονήσεων. Στην Ελλάδα οι παροδικές γήινες τάσεις οφείλονται κυρίως σε σεισμικές κινήσεις και λιγότερο σε δονήσεις προερχόμενες από ανθρώπινες δραστηριότητες. Μια δόνηση που προκαλείται από ένα σεισμό, μεγέθους M=3-4 ή μεγαλύτερο, μπορεί να διαταράξει την συνοχή σε κοκκώδεις σχηματισμούς ακόμα και με χαμηλή περιεκτικότητα υγρασίας. Ιδιαίτερα, σε συνθήκες όπου το έδαφος είναι κορεσμένο, με νερό, ακόμα και μικρού μεγέθους δονήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αναδιάταξη των εδαφικών κόκκων που οδηγεί σε προσωρινή αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής και την αποσταθεροποίηση του πρανούς.

Η προοδευτική αύξηση της κλίσης του πρανούς είναι δυνατό να προκαλέσει αύξηση των διατμητικών τάσεων και σε οριακές περιπτώσεις θραύση και μετακίνηση μαζών. Η ανθρώπινης παρέμβαση όπως η εκσκαφή για την κατασκευή τεχνικών έργων και λατομείων, αλλά και η αποψίλωση της βλάστησης σε ένα πρανές, δύναται να αυξήσουν την κλίση σε ένα φυσικό πρανές σε σύντομο χρονικό διάστημα, δημιουργώντας συνθήκες αστάθειας. Η μεταβολή στην κλίση του πρανούς μπορεί να προκληθεί και από φυσικά αίτια με πολύ πιο αργούς ρυθμούς συγκριτικά με τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που προαναφέρθηκαν. Η διάβρωση, λόγω της δράσης του νερού και του ανέμου, αλλά και οι ενδογενείς διεργασίες σε τεκτονικά ενεργές περιοχές δύναται να αυξήσουν την κλίση του πρανούς με φυσικό τρόπο.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην μείωση της διατμητικής αντοχής σχετίζονται με τη γεωλογική δομή των περιοχών, την παρουσία του νερού, τις φυσικοχημικές διεργασίες (αποσάθρωση) και τοπικά άλλοι παράγοντες. Ιδιαίτερα στη Δυτική και Κεντρική Ελλάδα το νερό στους γεωλογικούς συνδυαστικά με τη γεωλογική δομή συμβάλλουν καθοριστικά στην εκδήλωση του φαινομένου. Ουσιαστικά, το νερό προκαλεί μείωση των τριβών μεταξύ των τμημάτων ενός πετρώματος και μείωση των ενεργών τάσεων εξαιτίας της πίεσης που ασκεί στους πόρους και τις ρωγμές.

Η γεωλογική δομή μιας περιοχής είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων και σχετίζεται με την σύσταση, την υφή και τη δομή των πετρωμάτων συνδυαστικά με τη γεωμετρία του πρανούς. Ειδικότερα, η διατμητική αντοχή των πετρωμάτων επηρεάζεται από τη λιθολογική σύσταση, τις πρωτογενείς δομές και την τεκτονική παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, τα πετρώματα μπορεί να έχουν μικρή διατμητική αντοχή είτε πρωτογενώς, λόγω της σύστασής τους και της υφής τους, είτε δευτερογενώς από την δράση τεκτονικών κινήσεων. Οι πρωτογενείς δομές των πετρωμάτων που αφορούν στη στρώση και στις μεταξύ τους επαφές (κανονική ακολουθία ή ασυμφωνία), συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολίσθησης ανάλογα με την γεωμετρία του πρανούς. Η εκδήλωση των κατολισθήσεων είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιοχές που δομούνται από πετρώματα με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, εναλλαγές ψαθυρών-συμπαγών στρωμάτων ή διαπερατών-αδιαπέρατων.

Η τεκτονική παραμόρφωση οδηγεί σε κατακερματισμό των πετρωμάτων με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής τους αντοχής. Η παραμόρφωση είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση των επωθήσεις ή των εφιππεύσεων και εκφράζεται μέσω πτυχών, διαρρήξεων, διακλάσεων, ρηγμάτων και της σχιστότητας. Σε κάθε περίπτωση για την εκδήλωση κατολίσθησης, εκτός από τη γεωμετρία της ασυνέχειας (κλίση, διεύθυνση) αυτή καθαυτή σημαντικό ρόλο παίζει η σχέση της με τη γεωμετρία του πρανούς.

Κάτω από ορισμένες συνθήκες, τα πετρώματα είναι δύναται να υποστούν φυσικοχημικές διεργασίες που μεταβάλλουν, αλλοιώνουν και τελικά καταστρέφουν την εσωτερική τους δομή, με αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής. Οι φυσικοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν, την ενυδάτωση αργιλικών ορυκτών και την ανταλλαγή ιόντων, που οδηγούν στη μείωση των δυνάμεων συνοχής, την ξήρανση των αργίλων με συνέπεια το σχηματισμό ρωγμών, καθώς και τη φυσική αποσύνθεση των κοκκωδών πετρωμάτων. Σταδιακή καταστροφή πετρωμάτων μπορεί επίσης να επέλθει, λόγω διάλυσης και απομάκρυνσης του συνδετικού υλικού, από την κυκλοφορίας του νερού.

Στους λοιπούς παράγοντες που μπορούν να δράσουν τοπικά και να έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της διατμητικής αντοχής των πετρωμάτων, συγκαταλέγεται η δράση του ριζικού συστήματος των δέντρων, που κατά περίπτωση μπορεί να προκαλέσουν κατακερματισμό των πετρωμάτων. Η δράση αυτή μπορεί να ενισχυθεί από ισχυρούς ανέμους, που μεταφέρουν τάσεις μέσου του κορμού στο ριζικό σύστημα, ικανές να προκαλέσουν καταπονήσεις στα πετρώματα μειώνοντας την διατμητική αντοχή τους.

2.1.4.2. Κατολισθητικός κίνδυνος στην Ελλάδα

Η εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων στην Ελλάδα είναι ένα αρκετά συνηθισμένο φαινόμενο που επηρεάζει σημαντικά την κοινωνία και οικονομία της χώρας. Οι περισσότερες και μεγαλύτερες κατολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί, αποτελούν κατά κύριο λόγο ζώνες παλαιότερης ενεργοποίησης που οφείλονται κυρίως σε γεωλογικές και κλιματικές διεργασίες οι οποίες έλαβαν χώρα στο παρελθόν και συνεχίζονται, σε πολλές περιπτώσεις, μέχρι σήμερα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Οι περισσότερες και μεγαλύτερες κατολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί στον Ελληνικό χώρο, εντοπίζονται σε ευαίσθητες γεωλογικά ζώνες που βρίσκονται κυρίως στην Κεντρική και Δυτική Ελλάδα (σχήμα 2.4). Στις περιοχές αυτές παράγοντες όπως η λιθολογική σύσταση των σχηματισμών, η δράση των τεκτονικών-νεοτεκτονικών δυνάμεων, το τοπογραφικό ανάγλυφο και οι κλιματικοί παράγοντες, έχουν διαμορφώσει κατάλληλες συνθήκες για την εκδήλωση κατολισθήσεων ευρείας κλίμακας (Koukis and Ziourkas, 1991; Koukis et al, 2005).

Ο σημαντικότερος αριθμός κατολισθήσεων εκδηλώνεται σε ιζήματα Κρητιδικής έως Τεταρτογενούς ηλικίας, στα νεογενή, το φλύσχη και τη μεταβατική σειρά προς αυτόν (Ζιούρκας, 1998). Επίσης ασταθείς θεωρούνται οι λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι και οι κερατόλιθοι που έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό, με την αστάθεια να εντείνεται στην περίπτωση που βρίσκονται επωθημένοι επί των μαλακών ιζημάτων του φλύσχη και ιδιαίτερα κάτω από σεισμική φόρτιση (Gallousi and Koukouvelas, 2007, Koukouvelas et al. 2006). Ήδη από τη δεκαετία του ογδόντα με εφαρμογή κλασικών γεωλογικών και γεωτεχνικών μεθόδων διατυπώθηκαν επιστημονικές απόψεις από τους Κούκης και Ρόζος οι γεωλογικές-τεκτονικές δομές στον Ελληνικό χώρο που είναι ευνοϊκές προς κατολίσθηση (Κούκης-Ρόζος, 1982; Koukis and Ziourkas, 1991).

Ως πρώτη ευάλωτη δομή θεωρούν τα συμπαγή πετρώματα σταθερού όγκου, υψηλής διατμητικής αντοχής, που παρουσιάζουν αντίσταση στη διάβρωση και δημιουργούν απότομα πρανή, στην περίπτωση που καλύπτουν σχηματισμούς μικρότερης αντοχής. Οι αποσαθρωτικές διεργασίες και η διάβρωση δρουν επιλεκτικά στην περίπτωση σχηματισμών με εναλλαγή στρωμάτων διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων, με αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το φλύσχης (Koukis and Rozos, 1982). Η εκδήλωση κατολισθήσεων σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται στις θέσεις όπου η κλίση των στρωμάτων είναι ομόρροπη προς τα πρανή. Τέλος, στις δομές που επηρεάζονται από έντονη τεκτονική δραστηριότητα παρατηρείται χαλάρωση των πετρωμάτων, ιδιαίτερα των ανώτερων στρωμάτων σε σχέση με τα κατώτερα.



Σχήμα 2.4. Χάρτης ζωνών κατολισθητικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο (τροποποιημένο σχήμα από Koukis et al 2005) και κατανομή συχνότητας εναυσματικών παραγόντων κατολίσθησης στην Ελλάδα (αναπαραγωγή από Κούκης και Ζιούρκας, 1989).

Οι μεγαλύτερες σε επιφανειακή εξάπλωση κατολισθήσεις στον Ελληνικό χώρο εντοπίζονται σε ζώνες ανθρακικών πετρωμάτων έντονα τεκτονισμένων από επωθητικές κινήσεις, σε θέσεις με πολύ απότομο ανάγλυφο και κάτω από την ισχυρή δράση κλιματολογικών συνθηκών. Ωστόσο, η συχνότερη εμφάνιση κατολισθήσεων καταγράφεται σε σχηματισμούς όπως φλύσχης, σχιστοκερατόλιθοι, νεογενή ιζήματα, κορήματα κλιτύων και στα χαλαρά τεταρτογενή υλικά. Προκαλούντα κυρίως από το συνδυασμό των βροχοπτώσεων και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, συμπεριλαμβανομένου των πυρκαγιών, αλλά και των σεισμών.

Η γεωλογική δομή τα Ελλάδας περιλαμβάνει ποικίλους γεωλογικούς σχηματισμούς που συνίστανται από διαφορετικές λιθολογικές ενότητες, που χαρακτηρίζονται από πλευρικές και κατά βάθος εναλλαγές. Η λιθολογική ετερογένεια σε συνδυασμό με την παραμόρφωση που δέχθηκαν τα πετρώματα κατά την ορογενετική φάση των Εξωτερικών Ελληνίδων, δημιουργούν ένα σύνθετο γεωλογικό καθεστώς. έντονη πτύχωση και τις δομές ασυνέχειας που δημιουργήθηκαν (Koukis et al., 2005). Η αντίδραση των γεωλογικών σχηματισμών στην παραμόρφωση που δέχθηκαν κατά την τελευταία ορογενετική φάση, διαφέρει από τα ανατολικά προς τα δυτικά (Doutsos and Kokalas, 2001). Ως εκ τούτου η Ελλάδα μπορεί να χωριστεί σε δύο τομείς, βάσει της γεωτεκτονικής τους θέσης και της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε δύο τομείς, στον δυτικό-κεντρικό και τον ανατολικό τομέα. Ο πρώτος εξαπλώνεται στις Εξωτερικές Ελληνίδες και ο δεύτερος κυρίως στις Εσωτερικές Ελληνίδες (Sabatakakis et al., 2013).

Χωρικά οι μεγαλύτερες και πιο καταστρεπτικές κατολισθήσεις εντοπίζονται στη Δυτική Ελλάδα και η κατανομή τους ακολουθεί τον ορογεωγραφικού άξονα της Πίνδου (Koukis et al., 2005, Βασιλειάδης 2010; Sabatakakis et al., 2013). Ιδιαίτερα επισφαλείς θεωρούνται οι περιοχές που δομούνται από συγκεκριμένους σχηματισμούς όπως ο φλύσχης, οι ημισυνεκτικές νεογενείς αποθέσεις και οι χαλαροί τεταρτογενείς σχηματισμοί, όπου πολύ συχνά καταγράφονται διαφορικές καθιζήσεις και ολισθήσεις. Πλέον επικίνδυνοι θεωρούνται οι τεταρτογενείς, δηλαδή χαλαροί σχηματισμοί που συνίστανται από αργιλοαμμώδη υλικά και κορήματα, λόγω της κατακόρυφης και οριζόντιας μεταβλητότητας στη σύστασή τους. Σε απότομα πρανή, οι τεταρτογενείς σχηματισμοί διευκολύνουν τις καταπτώσεις βράχων (ασβεστολιθικών, κερατολιθικών) καθώς και των ψαμμιτικών πάγκων του φλύσχη. Οι κατολισθήσεις στο σχηματισμό του φλύσχη εκδηλώνονται λόγω της ισχυρής τεκτονικής καταπόνησής από τις επωθήσεις, αλλά και της σύστασής του που χαρακτηρίζεται από εναλλαγές οριζόντων με κυμαινόμενους φυσικομηχανικούς δείκτες και διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Οσον αφορά στα συμπαγή πετρώματα (ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι), η εκδήλωση των κατολισθήσεων

οφείλεται στις έντονες πολυσχιδείς διαρρήξεις και στα απότομα πρανή που σχηματίζουν. Σε συνδυασμό με τις υποσκαφές των πρανών το φαινόμενο των κατολισθήσεων εντείνεται.

Όπως προαναφέρθηκε, στην Δυτική Ελλάδα κατά τη διάρκεια του τελευταίου ορογενετικού κύκλου, τα πετρώματα υπέστησαν έντονη τεκτονική παραμόρφωση από τις συμπιεστικές δυνάμεις, ενώ παράλληλα διαμορφώθηκε το γνωστό υψηλό τοπογραφικό ανάγλυφο της Πίνδου, με απότομα πρανή στα μέτωπα των επωθήσεων. Ως εκ τούτου χαρτογραφούνται σχηματισμοί υψηλής αντοχής υπό μορφή καλυμμάτων (ασβεστολιθικών, κερατολιθικών) υπέρκεινται μαλακών σχηματισμών μικρότερης αντοχής. Οι συνθήκες αυτές διαγράφονται πλέον δυσμενείς στην περίπτωση σεισμών μεγάλου μεγέθους όπου συνοδεύονται από έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Επιπροσθέτως, τα περισσότερα επωθητικά μέτωπα καλύπτονται από μεγάλου πάχους κορημάτων τα οποία χαρακτηρίζονται ως επιρρεπή σε κατολίσθηση.

Στην Κεντρική Έλλάδα, τα προβλήματα είναι ανάλογα με τη Δυτική, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ένταση κατά ζώνες. Τη μεγαλύτερη αστάθεια εμφανίζουν τα ιζήματα της ζώνης Ωλονού-Πίνδου, ενώ στη ζώνη αυτή υπάγεται και η μεγάλη τεκτονική τάφρος τού Κορινθιακού, πού βρίσκεται σε γεωδυναμική εξέλιξη και φιλοξενεί πολλές εστίες ισχυρών σεισμών. Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου χαρακτηρίζεται από συνεχείς εναλλαγές μεταξύ πολυπτυχωμένων πετρωμάτων συνδυαστικά με το έντονο ανάγλυφο και τη συσσώρευση τάσεων. Οι περισσότερες κατολισθήσεις εντοπίζονται στους σχηματισμούς του φλύσχη και τα πλευρικά κορήματα πού παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη κατά μήκος των γραμμών επώθησης και εφίππευσης των ασβεστολιθικών-κερατολιθικών λεπίων στο φλύσχη. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ενεργοποίηση των υλικών, με τη δημιουργία κλιμακωτών θραύσεων και ολισθήσεων, καθώς οι υδροπερατοί σχηματισμοί τροφοδοτούν και εμποτίζουν με άφθονο νερό τα πρακτικώς στεγανά πετρώματα του φλύσχη, πάνω στον οποίο βρίσκονται επωθημένοι. Στη ζώνη αυτή διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες σε έκταση κατολισθήσεις στον ελλαδικό χώρο συνδέονται με τις επωθημένες και κατακερματισμένες ασβεστολιθικές μάζες. Βασικά παραδείγματα αποτελούν η κατολίσθηση στην περιοχή Τσιβλού Βαλιμής (Β. Πελοπόννησος), της Παναγοπούλας (Β. Πελοπόννησος) και της Σεργούλας (βόρειες ακτές Κορινθιακού κόλπου).

Στην Πελοπόννησο η εκδήλωση των κατολισθήσεων εντοπίζεται κυρίως στα Δ, ΒΔ και Β, αφορά κυρίως στους σχηματισμούς του Νεογενούς αλλά και στα ιζήματα της μεταβατικής σειράς της ζώνης Ωλονού Πίνδου, για τους λόγους που ήδη προαναφέρθηκαν. Στην περίπτωση των νεογενών σχηματισμών, σε αντιστοιχία με τον φλύσχη-ασβεστόλιθους, οι αδρομερείς ορίζοντες επίκεινται της λεπτομερούς φάσης, προκαλώντας συνθήκες ασταθούς ισορροπίας. Στους βραχώδεις σχηματισμούς παρατηρούνται με πολύ μικρότερη συχνότητα καταπτώσεις ολισθήσεις βραχωδών μαζών, πλην όμως όπου εκδηλωθούν είναι μεγάλης συνήθως έκτασης με σοβαρά προβλήματα. Ιδιαίτερα στην περιοχή της Βόρειας Πελοποννήσου, αλλά και σε περιοχές στις κοντά στις βόρειες ακτές του Κορινθιακού οι κατολισθήσεις σχετίζονται με τους σεισμούς και τις παραμένουσες τεκτονικές τάσεις, είτε αυτές είναι υπολειπόμενες είτε νεοτεκτονικές (Gallousi and Koukouvelas, 2007, Koukouvelas et al. 2006, Koukis et al., 2005). Σε περιοχές με λιγότερο τεκτονικά διαταραγμένα πρανή συνήθως τα κυριότερα αίτια είναι οι έντονες βροχοπτώσεις, η ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο τοπίο.

Στην Ανατολική Ελλάδα, το φαινόμενο είναι σαφώς πιο περιορισμένο λόγω των γεωλογικών και κλιματικών συνθηκών. Το γεγονός ότι καταλαμβάνεται στο μεγαλύτερο τμήμα από συμπαγή και συνεκτικά πετρώματα με μεγάλο πάχος και ομοιόμορφη κατανομή των φυσικομηχανικών χαρακτήρων, προσδίδει μεγαλύτερη ευστάθεια στους σχηματισμούς αυτούς και δημιουργεί μικρότερης εκτάσεως προβλήματα στο νεότερους σχηματισμούς (νεογενή, φλύσχης, τεταρτογενείς αποθέσεις) πού υπέρκεινται. Αναλυτικότερα, στις ζώνες πού συνθέτουν την Ανατολική Ελλάδα, το προαλπικό υπόβαθρο συνίσταται από σχηματισμούς του μεταμορφωμένου - ημιμεταμορφωμένου συστήματος που χαρακτηρίζονται από ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές. Κατολισθητικές κινήσεις βέβαια παρατηρούνται και εδώ όπως για παράδειγμα στους χαλαρούς σχηματισμούς (νεογενή κυρίως ιζήματα, στο φλύσχη, στις τεταρτογενείς αποθέσεις) και σε πολύ μικρότερη συχνότητα στους βραχώδεις σχηματισμούς. Ειδικότερα, πλέον ασταθείς παρουσιάζονται οι ζώνες που καταλαμβάνονται από τα νεογενή, λεπτομερούς κυρίως φάσεως, από σχιστοκερατόλιθους, καθώς και από εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων, κερατολίθων, μαργών και ασβεστολιθικών ενστρώσεων. Οι καταπτώσεις βράχων ευνοούνται ιδιαίτερα σε συμπαγή πετρώματα (μάρμαρα. Σχιστόλιθοι, γρανίτες, κ.α.), με έντονη διάρρηξη, σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Η περιοδική δράση των θλιπτικών–εφελκυστικών τάσεων, λόγω παγετού δημιουργούν μόνο τοπικά προβλήματα. Επίσης στα απότομα πρανή ηφαιστειακών πετρωμάτων δημιουργούνται ολισθήσεις εδαφών και καταπτώσεις βράχων, και είναι ιδιαίτερα επιρρεπή παρουσία αστοχιών και αργιλώδη υλικών ή τόφφων. Ανάλογα φαινόμενα εκδηλώνονται στην περίπτωση ανάπτυξης σκληρών μεταμορφωμένων πετρωμάτων σε πιο μαλακούς σχηματισμούς, ή εκεί όπου επικρατούν σχιστολιθικοί σχηματισμοί ή εναλλαγές αργιλικών λεπτών ενστρώσεων ή σχιστολίθων και πλέον σκληρών πετρωμάτων (ψαμμίτες, μάρμαρα). Τέλος θραύσεις και ολισθήσεις παρατηρούνται στο μανδύα αποσάθρωσης των σχηματισμών του υποβάθρου και τα κορήματα, όταν είναι μεγάλου πάχους και έχουν το αργιλικό στοιχείο, καθώς και στη ζώνη χαλάρωσης αυτών, που είναι σχετικά βαθειά.

2.2. Μεθοδολογική προσέγγιση & εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση

2.2.1. Επισκόπηση μεθόδων καταγραφής κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις μπορούν να προβλεφθούν και να εκτιμηθούν οι δυνητικές συνέπειές τους, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων, τα οποία θα συμβάλλουν στη θωράκιση και προστασία του πληθυσμού και των υποδομών. Η πρόβλεψη και η εκτίμηση του κατολισθητικού κινδύνου βασίζεται στην υπόθεση ότι οι νέες κατολισθήσεις είναι πολύ πιθανό να συμβούν σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές που προκάλεσαν τις παλιότερες κατολισθήσεις. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη χαρτογράφηση των υφιστάμενων κατολισθήσεων συμβάλλουν στην εκτίμηση κατολισθητικού κινδύνου.

Η δημιουργία αξιόπιστων χαρτών πρόβλεψης του κινδύνου σε τοπικό επίπεδο, απαιτεί πρωτίστως τη γνώση της χωρικής και χρονικής συχνότητας του φαινομένου στην περιοχή μελέτης (Morton et al., 2003). Συνεπώς κάθε μελέτη κινδύνου πρέπει να ξεκινά με την απογραφή των κατολισθήσεων, ενώ για κάθε νέα κατολίσθηση στα πρώτα στάδια εξέλιξης η καταγραφή πρέπει να συνοδεύεται από παρατηρήσεις πεδίου.

Για την καταγραφή των κατολισθήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλες τεχνικές. Αν και παραδοσιακά η φωτοερμηνεία αεροφωτογραφιών υπήρξε η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική για την χαρτογράφηση κατολισθήσεων (Cardinali et al., 2002), πλέον με την ταχεία ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών και δη της διαστημικής παρατηρείται στροφή προς τη χρήση δορυφορικών εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης (QuickBird, IKONOS, WorldView, GeoEye, EROS-B, CARTOSAT-1, CARTOSAT-2, ALOS-PRISM, GEOYE). Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα τηλεπισκοπικών δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης έχει συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη νέων αποτελεσματικών μεθόδων χαρτογράφησης των κατολισθήσεων.

Οπτικές εικόνες με διακριτική ικανότητα μεγαλύτερη από 10 μέτρα, όπως οι εικόνες SPOT, LANDSAT, ASTER, SENTINEL-2, DMC, καθώς και εικόνες SAR (RADARSAT, ERS, KEA, ENVISAT) έχουν αποδειχθεί ότι είναι χρήσιμες στην οπτική ερμηνεία των μεγάλων κατολισθήσεων σε επιμέρους περιπτώσεις, ωστόσο απαιτείται και στερεοσκοπική απεικόνιση υψηλής έως πολύ υψηλής ανάλυσης (Metternicht et al., 2005; SafeLand Project, 2010).

Το υψηλό κόστος εξακολουθεί να είναι ένας περιοριστικός παράγοντας απόκτησης των εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης, ειδικά στην περίπτωση διαχρονικής μελέτης του φαινομένου που

απαιτεί πολλαπλές λήψης, πριν και μετά το φαινόμενο που ενεργοποίησε τις κατολισθήσεις (τροπικές καταιγίδες ή τυφώνες και σεισμοί). Εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση των δορυφορικών εικόνων πολύ υψηλής ευκρίνειας ανοιχτής πρόσβασης, που προσφέρονται μέσω της εφαρμογής Google Earth με παγκόσμια κάλυψη. Αν και η εφαρμογή προσφέρει τη δυνατότητα διαχρονικής θέασης για τα τελευταία δεκαπενταετία, η διακριτική ικανότητά των παλαιότερων εικόνων δεν επιτρέπει την συγκριτική μελέτη σε μεγάλη κλίμακα, ωστόσο είναι εφικτή η διαχρονική καταγραφή μεγάλων κατολισθήσεων ως προς το χρόνο εμφάνισή τους.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εξέλιξη στην οπτική ερμηνεία των κατολισθητικών φαινομένων από την ερμηνεία εικόνων σκιασμένου αναγλύφου που παράγονται από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους από LiDAR, από τα οποία έχουν αφαιρεθεί στοιχεία της επιφάνειας της γης (Haugerud et al, 2003). Η χρήση του σκιασμένου αναγλύφου από LiDAR επιτρέπει την πολύ λεπτομερή χαρτογράφηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της παραμόρφωσης και του μηχανισμού της κατολίσθησης. Η παραμόρφωση του αναγλύφου στην περίπτωση μεγάλων κατολισθήσεων είναι ορατή και μπορεί να χαρτογραφηθεί ακόμα και σε δασώδεις περιοχές (Ardizzone et al, 2007). Επίσης, ο συνδυασμός εναέριων (Airborne Laser Scanner -ALS) και επίγειων σαρωτών (Terrestial Laser Scanner -TLS), θεωρείται επιτυχής στην ποσοτικοποίηση κατολίσθησης. Επίγειες μετρήσεις LiDAR έχουν επίσης εφαρμοστεί με επιτυχία για την παρακολούθηση κατολίσθησης (Rosser et al., 2005).

Την τελευταία δεκαετία αναπτύχθηκαν σημαντικά μέθοδοι για την αυτόματη ανίχνευση των κατολισθήσεων με βάση την φασματική τους υπογραφή ή τα υψομετρικά χαρακτηριστικά τους. Η ταξινόμηση πολυφασματικών εικόνων, όπως SPOT, LANDSAT, ASTER και IRS-1D LISS3 έχει αποδειχθεί ότι είναι οι καταλληλότερες για τη χαρτογράφηση κατολισθήσεων, επιδέχονται περιορισμούς όμως στην περίπτωση που οι κατολίσθηση δεν είναι πρόσφατη και είναι καλυμμένη με βλάστηση (Nichol and Wong, 2005). Ιδιαίτερα χρήσιμες έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμες για την καταγραφή μεγάλου αριθμού κατολισθήσεων σε εκτεταμένες περιοχές, που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια ενός γενεσιουργού γεγονότος. Ωστόσο, η τεχνική της ταξινόμησης οπτικών δορυφορικών εικόνων επιδέχεται σημαντικούς περιορισμούς μετά την εκδήλωση καταστρεπτικών φυσικών φαινομένων όπως καταιγίδων, ιδιαίτερα στις τροπικές περιοχές, επειδή επικρατεί επίμονη νεφοκάλυψη για μεγάλο χρονικό διάστημα πάνω από την πληγείσα περιοχή.

Πρόσφατα στις μεθόδους ταξινόμησης εικόνας, που χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση κατολισθήσεων, εκτός από αυτές που βασίζονται στα φασματικά γαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων προστέθηκε η μέθοδος της αντικειμενοστραφούς ανάλυσης εικόνας (Object Oriented Analysis - OOA). Η μέθοδος αυτή εντοπίζει με επιτυχία (αυτόματα ή ημι-αυτόματα) υφιστάμενες κατολισθήσεις χρησιμοποιώντας συνδυαστικά τα φασματικά, τα σχηματικά και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων από εικόνες τηλεπισκόπησης (Akcay και Aksoy, 2008). Η ΟΟΑ έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει με ακρίβεια κατολισθήσεις μειώνοντας το χρόνο που απαιτείται για την καταγραφή και δημιουργία βάσεων δεδομένων κατολισθήσεων σε μεγάλες περιοχές (Martha et al., 2010). Η αφαίρεση διαχρονικών μοντέλων εδάφους εκτός από την οπτικοποίησης επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της μετατόπισης που έλαβε γώρα. Η αφαίρεση ΨΜΕ από SRTM, ASTER και SPOT δεν παρέχουν επαρκή ακρίβεια για τον υπολογισμό της πραγματικής μετακινούμενης μάζας, ωστόσο από υψηλής ανάλυσης υψομετρικά δεδομένα Quickbird, IKONOS, PRISM (ΑΛΟΣ), Cartosat-1 και στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν οι διαχρονικές μεταβολές των μετακινήσεων μιας κατολίσθησης. Επίσης, οι εικόνες Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (InSAR) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μέτρηση των μετατοπίσεων επιφάνειας. (Ferretti et al 2001), παρουσιάζει όμως σημαντικούς περιορισμούς σε περιοχές με πολλή βλάστηση όπως τα τροπικά περιβάλλοντα.

Ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένη έργα για την απογραφής και χαρτογράφησης κατολισθήσεων και πλημμυρών υπήρξε το έργο AVI στην Ιταλία (Guzzeti et al., 1994). Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μελετών περίπτωσης παγκοσμίως για τη χρήση τεχνικών χαρτογράφησης κατολισθήσεων και την αξιολόγηση της επικινδυνότητας (Guzzeti et al., 1999). Οι υπάρχουσες βάσεις δεδομένων κατολισθήσεων συχνά παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα (Ardizzone et al., 2002) που σχετίζονται με την πληρότητα στο χώρο και ακόμα περισσότερο στο χρόνο, ενώ

2.2.2. Επισκόπηση μεθόδων ανάλυσης των κατολισθήσεων με τη χρήση ΣΓΠ

Την τελευταία δεκαετία, η χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολισθήσεων με χρήση ΓΣΠ αποτελεί μια από τις συνηθέστερες μεθόδους μελέτης του φαινομένου. Ως επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολισθήσεων ορίζεται η ροπή του εδάφους για να παραγάγει κατολισθήσεις (Guzzetti et al., 1999). Ουσιαστικά, ένας χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολισθήσεων απεικονίζει τις περιοχές που είναι πιθανόν να εμφανίσουν κατολισθήσεις στο μέλλον και μπορεί να οδηγήσεις στον καθορισμό ζωνών επικινδυνότητας στα πλαίσια σχεδιασμού πολεοδομικού και χωροταξικού σχεδιασμού.

Η μεθοδολογίες ζωνοποίησης βασίζονται στη συσχέτιση παραγόντων που συνέβαλαν κατά το παρελθόν στην εκδήλωση κατολισθήσεων, αποτυπώνοντας την επικινδυνότητα του φαινομένου σε παράγωγους χάρτες. Για τον Ελλαδικό χώρο έχουν εφαρμοστεί διάφορες μεθοδολογίες σε διαφορετικές κλίμακες με αξιόπιστα και σημαντικά συμπεράσματα ανά περιοχή (Koukis and Ziourkas, 1991; Koukis et al., 1994; Φερεντίνου, 2004; Koukis et al. 2005; Γκουρνέλλος et al., 2006; Bathrellos et al., 2009; Βασιλειάδης, 2010; Rozos et al., 2010; Φερεντίνου και Χαλκιάς, 2012; Sambatakakis et al., 2013; Πολυκρέτης et al., 2013).

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων εξαρτάται από δευτερογενής παράγοντες που αφορούν στην ποιότητα των διαθέσιμων γεωγραφικών δεδομένων. Πρωτίστως επηρεάζονται από την κλίμακα, την ευκρίνεια και την αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου. Επίσης οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη και η ανάλυση των παραγόμενων θεματικών επιπέδων που προκύπτουν από αυτούς, συνδυαστικά με τα δεδομένα συσχετισμού ελέγχουν σημαντικά τα εξαγόμενα συμπεράσματα. Σε κάθε περίπτωση οι μέθοδοι με χρήση ΣΓΠ εφαρμόζονται ευρέως για τη μελέτη του φαινομένου παγκοσμίως (π.χ. Guzzetti, 2002; Catani et al., 2005; Yiping and Beighley, 2006).

Σύμφωνα με τους Aleotti και Chowdhury (1990) οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του κινδύνου κατολισθήσεων χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις ποιοτικές και τις ποσοτικές (πίνακας 2.7).

Α. Ποιοτικές μέθοδοι: βασίζονται στη γνώμη ειδικών, γεωεπιστημόνων που έχουν εμπειρία πεδίου σχετική με τα κατολισθητικά φαινόμενα. Ο ειδικός, συνήθως αμέσως μετά το συμβάν, καταγράφει τις ρεαλιστικές συνθήκες που επικρατούν στην επηρεαζόμενη περιοχή από την κατολίσθηση και αποτελεί την πλέον αξιόπιστη πηγή πληροφόρησης, προσδίδοντας στις

ποιοτικές μεθόδους υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Ωστόσο, αυτό προϋποθέτει λεπτομερείς εργασίες πεδίου και εκτεταμένη γεωλογική χαρτογράφηση, γεγονός που τις καθιστά χρονοβόρες, επίπονες και ιδιαίτερα δαπανηρές. Επίσης, ένα βασικό μειονέκτημα των ποιοτικών μεθόδων είναι η υποκειμενική κρίση του ειδικού, που επιδρά στην απόδοση των συντελεστών βαρύτητας κάθε παράγοντα, κατά συνέπεια και στον τελική εκτίμηση της επικινδυνότητας. Είναι ευλογοφανές ότι η εμπειρία ενός ειδικού επιδέχεται χωρικούς περιορισμούς, συνεπώς στην περίπτωση που η περιοχή μελέτης ξεπερνά την τοπική κλίμακα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γνώμη αρκετών ειδικών.

Πίνακας 2.7. Μέθοδοι προσδιορισμού του κινδύνου κατολισθήσεων (Aleotti & Chowdhury, 1990)				
А. Поютік	ές Μέθοδοι			
	Α.1 Γεωμορφολογική ανάλυση			
	Α.2 Χρήση δεικτών ή παραμετρικών χαρτών			
	 Συνδυασμός ή υπέρθεση χαρτών-δεικτών με συντελεστές βαρύτητας 			
	 Λογικά αναλυτικά μοντέλα (ημιποσοτική μέθοδος) 			
В. Поботік	Β. Ποσοτικές Μέθοδοι			
	Β.1 Στατιστική ανάλυση			
	 Διμεταβλητή ανάλυση 			
	 Πολυμεταβλητή ανάλυση 			
	Β.2 Γεωτεχνικές προσεγγίσεις			
	 Ντετερμινιστική ανάλυση (υπολογισμός FS) 			
	 Πιθανολογικές προσεγγίσεις 			
	Β.3 Ανάλυση Νευρωνικών Δικτύων			

Στις ποιοτικές περιλαμβάνονται οι εξής τρεις επιμέρους μέθοδοι:

Α.1. Γεωμορφολογική ανάλυση: αποτελεί μέθοδο πεδίου, με τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας να υλοποιείται άμεσα στο πεδίο από τον ειδικό και δεν δύναται να εφαρμοστεί σε περιοχές περιφερειακής ή εθνικής κλίμακας.

Α.2. Χρήση δεικτών ή παραμετρικών χαρτών: χωρίζεται σε δύο επιμέρους μεθόδους, την υπέρθεση χαρτών-δεικτών και τα λογικά αναλυτικά μοντέλα.

- i. Συνδυασμός ή υπέρθεση χαρτών-δεικτών: Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται απλή υπέρθεση χαρτών αφού πρώτα έχουν αποδοθεί συντελεστές σύμφωνα με την κρίση του ειδικού. Κάθε χάρτης αντιπροσωπεύει και ένα παράγοντα που θεωρητικά είναι γνωστό ότι δύναται συμβάλει στην προετοιμασία ή στην πυροδότηση μιας κατολίσθησης.
- ii. Λογικά αναλυτικά μοντέλα: Η δεύτερη μέθοδος είναι ημι-ποσοτική και αποσκοπεί στη μοντελοποίηση τις επικινδυνότητας των κατολισθήσεων, με απώτερο στόχο την πρόβλεψή τους. Η απόδοση βαρών δεν γίνεται απευθείας από τον ειδικό άλλα προηγείται η σύγκριση μεταξύ των δεδομένων που συλλέχτηκαν στο πεδίο, προκειμένου να αναδειχθούν οι σχέσεις μεταξύ των παραγόντων. Μια από της πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις για την μελέτη της βαρύτητας και σημασίας των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο των κατολισθήσεων, αλλά και γενικότερα τους φυσικούς κινδύνους, είναι η Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης γνωστή ως ΑΗΡ. Η μέθοδος, με βάση τα χαρακτηριστικά της γραμμικής άλγεβρας, ιεραρχεί και ποσοτικοποιεί τη διαδικασία σκέψης του ειδικού, αποδίδοντας βάρη σε κάθε παράγοντα. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία ιεραρχεί τους παράγοντες, που δύναται που επηρεάζουν τις κατολισθήσεις, μέσω της ανά ζεύγη σύγκρισης. Από τη σύγκριση, που πραγματοποιείται ανά δύο

παράγοντες για κάθε πιθανό ζευγάρι, αποδίδεται ένα σχετικό βάρος σε κάθε ένα

Β. Ποσοτικές μέθοδοι: Στις ποσοτικές περιλαμβάνονται τρεις επιμέρους μέθοδοι:

απ' αυτά.

Β.1. Στατιστική ανάλυση: Σ' αυτού του τύπου την ανάλυση, οι συνδυασμοί των παραγόντων εκδήλωσης κατολίσθησης προσδιορίζονται στατιστικά ώστε να επιτευχθεί παραγωγή ποσοτικών προβλέψεων σε ευρύτερη περιοχή με παρόμοια χαρακτηριστικά. Η μέθοδος επιτρέπει την κατανόηση των σχέσεων που επικρατούν μεταξύ των κατολισθήσεων και των παραγόντων που τις προετοιμάζουν ή τις πυροδοτούν, με σαφώς περιορισμένη υποκειμενικότητα συγκριτικά με τις ποιοτικές ή ημι-ποιοτικές μεθόδους.

i. Διμεταβλητή ανάλυση: οι παράγοντες χωρίζονται σε κατηγορίες και συσχετίζονται με χάρτη απογραφής κατολισθήσεων. Ανάλογα με την πυκνότητα των κατολισθήσεων ανά κατηγορία υπολογίζεται ο συντελεστής βαρύτητας για όλες τις κατηγορίες κάθε παράγοντα.

Στην κατηγορία αυτή ανήκει ένας από τους πιο διαδεδομένους δείκτες στατιστικής ανάλυσης, ο «Δείκτης Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων» (Landslide Susceptibility Index ή LSI) που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο που ακολουθεί.

ii. Πολυμεταβλητή ανάλυση: στην στατιστική προσέγγιση, οι παράμετροι των επιρρεπών στις κατολισθήσεις περιοχών αναλύονται είτε με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης, είτε με τη μέθοδο της διαχωριστικής ανάλυσης.

B.2. Γεωτεχνικές προσεγγίσεις: Περιλαμβάνει την ντετερμινιστική ανάλυση που υπολογίζει τον συντελεστή ασφάλειας μέσα από εργαστηριακές μετρήσεις και την πιθανολογική ανάλυση του συντελεστή ασφάλειας με χρήση της θεωρίας των πιθανοτήτων προκειμένου να εξαλειφτούν τα σφάλματα λόγω χωροχρονικών μεταβολών.

- i. Ντετερμινιστική ανάλυση: η ντετερμινιστική ανάλυση χρησιμοποιείται άμεσα στο σχεδιασμό των τεχνικών έργων εφόσον παρέχει τις βέλτιστες ποσοτικές πληροφορίες, σχετικά με τον κίνδυνο κατολισθήσεων, καθώς βασίζεται στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που χαρτογραφούνται σε μια περιοχή. Ουσιαστικά μέσα από τη χρήση ειδικών μοντέλων ευστάθειας των πρανών προσδιορίζονται η διατμητική τάση και αντοχή των εδαφών (λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η πίεση του νερού), με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.4.1. ο συντελεστής ασφάλειας (FS) εκφράζει τον λόγο μεταξύ των δυνάμεων που προκαλούν την αστοχία των πρανών και εκείνων που την αποτρέπουν. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιορισμένης έκτασης περιοχές καθώς απαιτεί μεγάλη ποσότητα εργαστηριακών δοκιμών και έρευνα πεδίου, ωστόσο παρέχει χάρτες μεγάλης κλίμακας χαρτών.
- ii. Πιθανολογική προσέγγιση: Η μέθοδος κάνει χρήση της θεωρίας των πιθανοτήτων και υπολογίζει τον δείκτη αξιοπιστίας και την πιθανότητα αστοχίας, θεωρώντας ότι ο συντελεστής ασφάλειας Fs είναι μια τυχαία μεταβλητή που παρουσιάζει μέση τιμή και τυπική απόκλιση. Η μέθοδος αντιμετωπίζει τα προβλήματα αβεβαιότητας της ντετερμινιστικής μεθόδου, που προκύπτει από τις τιμές των μετρούμενων παραμέτρων

λόγω των χωροχρονικών μεταβολών των πετρωμάτων, την διακύμανση των πιέσεων στους υπόγειους υδροφορείς που εξαρτώνται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες.

B.3. Ανάλυση νευρωνικών δικτύων: Σε αντίθεση με όλες τις προαναφερόμενες μεθόδους, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (TNΔ) δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης των κατολισθήσεων βάσει πολύπλοκων, άγνωστων και μη-γραμμικών σχέσεων με τους γενεσιουργούς παράγοντες που τις επηρεάζουν. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα μαθηματικό ή υπολογιστικό μοντέλο επεξεργασίας πληροφοριών που βασίζεται στις γνωστικές διαδικασίες και την οργανωτική δομή των νευροβιολογικών δικτύων και δίνουν ικανοποιητικές προβλέψεις ακόμα κι όταν τα δεδομένα είναι αβέβαια. Το τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου δεν διαφέρει από τις προαναφερόμενες, η εφαρμογή των TNΔ αποσκοπεί στον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των παραγόντων και τελικά στη δημιουργία ενός χάρτη ζωνοποίησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.

Πέραν των προαναφερόμενων χρησιμοποιείται η ανάλυση βασισμένη στην Ασαφή Λογική, στα Neuro-fuzzy Model και τα Δένδρα Απόφασης. Η Ασαφής Λογική χρησιμοποιείται στην περίπτωση που δεν καθίσταται δυνατή η χρήση συμβατικών στατιστικών μεθόδων λόγω της αβεβαιότητας που προκύπτει από περιορισμένα δεδομένα ή λόγω της ασαφούς οριοθέτησης των παραγόντων. Τα Neuro-fuzzy Model συνδυάζουν τη μέθοδο των ΤΝΔ και της ασαφούς λογικής. Αρχικά πραγματοποιείται τυχαία επιλογή γνωστών κατολισθήσεων για των υπολογισμό βαρών και στη συνέχεια δημιουργείται ένας χάρτης επιδεκτικότητας που επαληθεύεται από τις υπόλοιπες καταγραφές.

2.2.3. Υπολογισμός δείκτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων

2.2.3.1. Εισαγωγή δεδομένων και επεξεργασία παραγόντων κατολισθήσεων

Ο Δείκτης Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων (Landslide Susceptibility Index ή LSI) είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων. Ο δείκτης υπολογίζει την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για κάθε κατηγορία διαφόρων παραγόντων, αποδίδοντας βάρη σε κάθε κατηγορία και κάθε παράγοντα. Το τελικό προϊόν της μεθόδου είναι ένας ταξινομημένος χάρτης σε κλάσεις επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Ο υπολογισμός του δείκτη δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{LSI}_{ij} = \ln \left(\frac{N_{i,j}}{A_{i,j}} \middle/ \frac{N_T}{A_T} \right)$$

, όπου Ν/Α: η πυκνότητα κατολισθήσεων ανά κατηγορία / πυκνότητα συνόλου.

Οι παράγοντες που συμμετέχουν στην μέθοδο συνήθως περιλαμβάνουν την λιθολογία, την κλίση, το υψόμετρο, τη βροχόπτωση, τις χρήσεις γης κ.α., και ποικίλουν ανάλογα με την διαθέσιμη ψηφιακή πληροφορία. Για κάθε έναν παράγοντα δημιουργούνται κατηγορίες παραγόντων και τα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα/χάρτες, σε κοινό σύστημα συντεταγμένων ώστε να είναι εφικτή η χωρική τους συσχέτιση. Στη συνέχεια για κάθε κατηγορία ανά θεματικό επίπεδο γίνεται συσχέτιση με καταγεγραμμένες κατολισθήσεις.

Η συσχέτιση οδηγεί στον υπολογισμό της πυκνότητας εμφάνισης κατολίσθησης για κάθε μια από τις κατηγορίες (κλάσεις) στις οποίες ταξινομείται κάθε παράγοντας. Έτσι, για κάθε κατηγορία παραγόντων (π.χ. μια λιθολογική μονάδα ή μια κατηγορία απόστασης από το οδικό δίκτυο) υπολογίστηκε μια τιμή συντελεστή βαρύτητας ως ο φυσικός λογάριθμος του λόγου πυκνότητα κατολισθήσεων στην κατηγορία προς πυκνότητα κατολισθήσεων σε όλο το χάρτη. Η χρήση αυτού του συντελεστή εξασφαλίζει ότι οι τιμές του συντελεστή βαρύτητας θα είναι αρνητικές όταν η πυκνότητα των κατολισθήσεων είναι μικρότερη από τη μέση και θετικές όταν είναι μεγαλύτερη.

Όλες οι επιμέρους τεχνικές που προαναφέρθηκαν περιλαμβάνονται στα περισσότερα λογισμικά GIS, εμπορικά όπως το ArcGIS ή μη εμπορικά όπως το QGIS.

Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά τα στάδια της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

2.2.3.2. Εισαγωγή παραγόντων, δημιουργία κατηγοριών και ταξινόμηση

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οχτώ παράγοντες που σύμφωνα με την βιβλιογραφία (παράγραφος 2.1.4) συμβάλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων και είναι οι εξής:

- 1. Λιθολογικός χάρτης (διανυσματική μορφή, κλίμακα 1:500.000, πηγή ΙΓΜΕ)
- 2. Χάρτης βροχόπτωσης (ψηφιδωτή μορφή, κλίμακα 1:1.000.000, πηγή ΙΓΜΕ)
- 3. Χάρτης υψομέτρου ή ΨΜΕ (ψηφιδωτή μορφή, ανάλυση 25x25m, πηγή: www.copernicus.eu)
- 4. Χάρτης κλίσεων αναγλύφου (ψηφιδωτή μορφή, ανάλυση 25x25m, πηγή: επεζεργασία ΨΜΕ)
- 5. Τεκτονικός χάρτης (διανυσματική μορφή, πηγή: SHARE)
- 6. Χάρτης οδικού δικτύου (διανυσματική μορφή, πηγή: www.opendata.gov)
- 7. Χάρτης υδρογραφικού δικτύου (διανυσματική μορφή, πηγή: www.opendata.gov)
- 8. Χάρτης χρήσεων-κάλυψης γης (διανυσματική μορφή, πηγή: www.opendata.gov)

Αφού προσδιορίστηκαν οι παράγοντες συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα σε εθνική κλίμακα ξεκίνησε η επεξεργασία των δεδομένων αρχικά με τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων ώστε να εισαχθούν σε περιβάλλον ΣΓΠ. Για τους παράγοντες που τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου ήταν σε μορφή ψηφίδας, εκτός του ΨΜΕ, ψηφιοποιήθηκαν ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία κατηγοριών.

Πιο συγκεκριμένα για κάθε θεματικό επίπεδο/παράγοτα ισχύουν τα εξής:

<u>Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ)</u>: Βασικό δεδομένο, σχεδόν για τις περισσότερες εφαρμογές που εξετάζουν φυσικά φαινόμενα που αφορούν στην γεωμορφολογία, είναι τα ΨΜΕ. Πλέον η Ε.Ε. διαθέτει δωρεάν το ΨΜΕ όλων των χωρών μελών της, όπως και άλλα χρήσιμα ψηφιακά δεδομένα στην διαχείριση των φυσικών καταστροφών όπως δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 & 2. Το ΨΜΕ είναι διαθέσιμο από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus, μέσω της ψηφιακής πύλης http://www.copernicus.eu. Μέσω του προγράμματος διαστημικής η Ε.Ε. διαθέτει δωρεάν ψηφιακή στους ευρωπαίους πολίτες αλλά σε ολόκληρο τον κόσμο.

Η ανάλυση του ΨΜΕ είναι 25m, ικανοποιητική για την μελέτη φυσικών φαινομένων σε εθνική κλίμακα. Το ΨΜΕ για την Ελλάδα περιλαμβάνεται στα δύο επιμέρους αρχεία EUD_CP-DEMS_5500015000-AA και EUD_CP-DEMS_5500025000-AA. Τα δεδομένα δεν είναι κατηγοριοποιημένα ανά χώρα και διατίθενται στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων Lambert Azimuthal Equal-Area, ως εκ τούτου ο χρήστης πρέπει να προβάλει το ΨΜΕ στο προβολικό σύστημα ενδιαφέροντος που συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ΕΓΣΑ 87 (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς) και στη συνέχεια να εφαρμόσει μάσκα επιλογής εστιάζοντας στην περιοχή ενδιαφέροντος.

<u>Κλίση εδάφους</u>: Από το ΨΜΕ δημιουργήθηκαν το επίπεδο πληροφορίας που αφορά στον παράγοντα της κλίσης του εδάφους. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.14 η κλίση του αναγλύφου είναι βασικός παράγοντας που ελέγχει της αστάθεια των πρανών (Huang and Li 1992; Wu et al. 2001). Συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως βασικός παράγοντας στην εφαρμογή όλων των μεθόδων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (Saha et al. 2002; Lee et al. 2004a, b,; Lee and Talib, 2005).

Ο υπολογισμός της κλίσης στα περισσότερα λογισμικά επιτυγχάνεται με την εφαρμογή φίλτρου 3x3 και ουσιαστικά σχετίζεται με την εφαρμογή της πρώτη παραγώγου του αναγλύφου. Στην περιοχή μελέτης η εφαρμογή της τεχνικής υπολογισμού της κλίσης απέδωσε τιμές από 0°-86°. Οι τιμές ταξινομήθηκαν στις πέντε κατηγορίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8. Οι ήπιες κλίσεις αναπτύσσονται σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς, οι μέσες σε σχηματισμούς του Νεογενούς και του φλύσχη, ενώ απότομες κλίσεις χαρακτηρίζουν όπως ήταν αναμενόμενο συμπαγή βραχώδη πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος και τα μεταμορφωμένα πετρώματα.

<u>Βροχόπτωση</u>: Η βροχόπτωση παίζει καθοριστικό παράγοντα εκδήλωσης των κατολισθήσεων, τόσο προπαρασκευαστικά όσο και ως έναυσμα (Koukis et al. 1996; Polemio and Sdao 1999; Sdao and Simeone 2007). Η συλλογή δεδομένων σε εθνική κλίμακα βασίστηκε στον βροχομετρικό χάρτη του ΙΓΜΕ (1993) που αποτυπώνει το μέσο ύψος βροχής υπό μορφή ισοϋετών καμπυλών ανά 200mm. Ο χάρτης βασίζεται σε βροχομετρικά δεδομένα 25ετίας. Δεδομένου ότι ο χάρτης διατίθεται σε αναλογική μορφή, ψηφιοποιήθηκε για όλη την έκταση της χώρας. Αποτυπώθηκε σε πολυγωνική

μορφή προκειμένου. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης, στην περιοχή μελέτης, κυμαίνεται από 200mm, στις πεδινές περιοχές της ανατολικής Ελλάδας, έως και 2400mm στις ορεινές περιοχές. Τα μεγαλύτερα ύψη σημειώνονται στην Κεντρική και τη Δυτική Ελλάδα, καθώς και στις ορεινές περιοχές τις Πελοποννήσου και της Κρήτης.

- <u>Χρήση-κάλυψη γης</u>: Η χρήση-κάλυψη γης είτε από φυσική βλάστη, γεωργικές καλλιέργειες, αστική δόμηση κ.α. επηρεάζει σημαντικά την εκδήλωση του φαινομένου. Στην περίπτωση των δασών, το ριζικό σύστημα των μεγάλων δέντρων μπορεί να λειτουργήσει προστατευτικά (Greenway 1987; Montgomery et al. 2000). Για την κάλυψη των αναγκών της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό αρχείο Corine Land Cover που διατίθεται δωρεάν από το Ευρωπαϊκό Γραφείο Περιβάλλοντος. Οι χρήσεις ταξινομήθηκαν στις τέσσερις βασικές κατηγορίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8.
- <u>Απόσταση από το οδικό και το υδρογραφικό δίκτυο</u>: Η υποσκαφή στον πόδα του πρανούς είτε από την δράση του νερού ή την κατασκευή δρόμου αποτελεί συνήθη παράγοντα εκδήλωσης κατολίσθησης. Ο υπολογισμός της απόστασης από το οδικό και το υδρογραφικό δίκτυο πραγματοποιήθηκε με την λειτουργία ευκλείδειας απόστασης. Οι κατηγορίες ταξινομήθηκαν ανά 100m και παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8.
- <u>Απόσταση από ρήγμα:</u> Η ένταση Arias είναι μια εδαφική παράμετρος που παρουσιάζει καλή συσχέτιση με την κατανομή των σεισμικά προκαλούμενων κατολισθήσεων (Jibson and Keefer, 1993) και πλέον χρησιμοποιείται στις μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων (Jibson et al., 1998; Luzi and Pergalani, 2000). Έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα όρια στις μέσες τιμές της έντασης, πέρα από τα οποία είναι πιθανή η εμφάνιση συγκεκριμένων τύπων κατολισθήσεων (Keefer and Wilson, 1989).

Η πρώτη συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση της έντασης Arias με την κατανομή των προκαλούμενων κατολισθήσεων διατυπώθηκε από του Wilson & Keefer (1985) και βασίστηκε σε δεδομένα σεισμών-κατολισθήσεων από την περιοχή της Καλιφόρνια. Σύμφωνα με τη συνάρτηση η μέση τιμή της εδαφικής κίνησης από ένα σεισμό αυξάνεται σε σχέση με το μέγεθος και φθίνει με την επικεντρική απόσταση. Αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις προτάθηκαν στη συνέχεια για την περιοχή της Μεσογείου (Faccioli, 1995) και της Ιταλίας-Ελλάδας (Piacelo et al, 2000).

Οι Keefer & Wilson (1989) αντιστοίχισαν όρια τιμών της έντασης Arias με αναμενόμενους τύπους κατολισθήσεων. Για την εκδήλωση καταπτώσεων και ολισθήσεων μικρής έκτασης καθώς και ροές μεγάλης έκτασης η ελάχιστη τιμή της έντασης Arias εκτιμάται στα 0.11m/sec. Περιστροφικές ολισθήσεις ή ολισθήσεις τεμαχών και ροές εδαφών σημειώνονται για τιμές έντασης Arias μεγαλύτερες από 0.32m/sec, ενώ για την εκδήλωση πλευρικών εξαπλώσεων πρέπει να ξεπερνά τα 0.54m/sec.

Συγκεκριμένα για την Ελλάδα έχουν υπολογιστεί τρεις διαφορετικές συναρτήσεις, μια για κάθε τύπο εδάφους βραχόμαζα, συνεκτικά και χαλαρά εδάφη (Tselentis et al., 2005b). Οι τελευταίες εφαρμόστηκαν για τη μελέτη αστάθειας των πρανών της διώρυγας της Κορίνθου (Γκίκα, 2005). Στην παρούσα εργασία για τον καθορισμό της απόστασης από το ρήγμα ως παράγοντας πρόκλησης κατολίσθησης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις εξασθένισης της έντασης Arias που προτείνεται από τους Tselentis et al, 2005b (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5. Διαγράμματα σχέσεων εξασθένισης της έντασης Arias για τον ελλαδικό χώρο (Tselentis et al, 2005b)

<u>Λιθολογία</u>: Ο παράγοντας της λιθολογίας έχει ήδη κατηγοριοποίηση οπότε δεν επεξεργάστηκε σε αυτό το στάδιο. Η κατηγοριοποίηση βασίστηκε στις ιδιαιτερότητες των πετρωμάτων στον ελλαδικό χώρο, όπως αυτή αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.1.4.2. Συνολικά διακρίθηκαν συνολικά οχτώ κατηγορίες.
2.2.3.3. Υπολογισμός της πυκνότητας κατολισθήσεων για κάθε μια κλάση των παραγόντων

Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκε η πυκνότητα των κατολισθήσεων για κάθε μια κατηγορία των παραγόντων. Αρχικά για κάθε κατηγορία παράγοντα υπολογίστηκε η έκτασή της, η οποία παρατίθεται στη δεύτερη στήλη του πίνακα 2.8. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας των κατολισθήσεων ανά κατηγορία παράγοντα, χρησιμοποιήθηκε το διανυσματικό σημειακό επίπεδο 1.026 περίπου κατολισθήσεων από καταγραφές του ΙΓΜΕ. Σε κάθε σημείο (θέση κατολίσθησης) έγινε απογραφή για κάθε κατηγορία παράγοντα και ακολούθησε η διαδικασία της αυτοματοποιημένης καταμέτρησης ανά κατηγορία. Τα αποτέλεσμα τις καταγραφής από κάθε κατηγορία.

Πίνακας 2.8. Παράγοντες και κατηγορίες παραγόντων για τον υπολογισμό του LSI						
Παράγοντας - κατηγορία				Έκταση Km ²	Πλήθος	LSI
1. Λιθολογία						
	1	Ασβεστόλιθοι Πίνδου		8.231	178	0,92
	2	Ασβεστόλιθοι		27.665	110	-0,78
ACA	3	Νεογενή ιζήματα		14.569	193	0,43
	4	Μολασσικές αποθέσεις		4.672	23	-0,56
	5	Τεταρτογενείς αποθέσεις		26.464	99	-0,84
	6	Μεταμορφωμένα		16.233	92	-0,42
	7	Πλουτώνια		7.348	24	-0,97
1.1	8	Φλύσχης		13.552	307	0,96
			Σύνολο	118.734	1.026	
			Μ.Ο.			-0,16
2. Βροχόπτωση (μέση ετήσια σε mm)			Τολική αλοκλιση			0,71
	1	0-200		1.435	7	-0,57
	2	200-400		30.188	69	-1,33
	3	400-600		29.736	135	-0,64
and the second second	4	600-800		20.806	214	0,17
A STAR	5	800-1000		14.424	189	0,42
	6	1.000-1.200		9.969	159	0,61
N 2 - 2	7	1.200-1.400		5.734	114	0,83
	8	1.400-1.600		3.736	81	0,92
	9	1.600-1.800		1.716	33	0,80
14	10	1.800-2.000		818	19	0,99
	11	2.000-2.200		222	6	1,14
	12	2.200-2.400		42	0	-1,29
			Σύνολο	118.826	1.026	
	_		Μ.Ο. Τυπική απόκλιση			0,17 0,90

Πίνακας 2.8. Παράγοντες και κατηγορίες παραγόντων για τον υπολογισμό του LSI						
Παράγοντας - κατηγορία				Έκταση Km ²	Πλήθος	LSI
3. Κλίση αναγλύφου						
and the second second	1	0° - 10°		61.614	334	-0,46
AN SS	2	10°-20°		34.371	430	0,37
1.2	3	20° - 30°		17.236	210	0,35
	4	30° - 40°		5.150	48	0,08
	5	> 40°		647	4	-0,33
2.24			Σύνολο	119.018	1.026	
Salar Salar			Μ.Ο. Τυπική απόκλιση			0,00 0,38
4. Υψόμετρο (m)						
	1	1 - 200		37.159	188	-0,53
ACC STORE	2	200 - 400		21.518	216	0,15
	3	400 - 600		17.357	193	0,25
	4	600 - 800		15.325	166	0,23
C. C	5	800 - 1.000		10.158	145	0,50
and the	6	> 1.000		17.502	118	-0,25
			Σύνολο Μ.Ο	119.018	1.026	0.06
			Τυπική απόκλιση			<i>0,38</i>
5. Απόσταση από ρήγμα						
	1	0-1.000		4.761	57	0,33
a sola	2	1.000 - 2.000		4.624	45	0,12
24	3	2.000 - 3.000		4.845	32	-0,27
AR I	4	3.000 - 6.000		14.958	111	-0,15
1 Areas	5	6.000 - 1.0000		20.238	157	-0,11
MA S	6	10.000-20.000		40.584	343	-0,02
	7	>20.000		29.007	281	0,12
and the second se			Σύνολο Μ.Ο.	119.018	1.026	0.00
			Τυπική απόκλιση			0,20
6. Απόσταση από οδικό δίκτυο						
	1	0-100		16.044	301	0,78
	2	200 - 200		8.343 8.752	154	0,76
	4	300 - 400		6 928	97	0.49
	5	400 - 500		7.998	80	0,15
	6	> 500		70.953	254	-0,88
(W.			Σύνολο	119.018	1.026	
	_		Μ.Ο. Τυπική απόκλιση			0,32 0,63

Πίνακας 2.8. Παράγοντες και κατηγορίες παραγόντων για τον υπολογισμό του LSI							
Παράγοντας - κατηγορία			Έκταση Km ²	Πλήθος	LSI		
7. Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο							
and the state	1	0-100	17.577	161	0,06		
	2	100 - 200	9.623	91	0,09		
	3	200 - 300	10.557	101	0,10		
	4	300 - 400	8.505	82	0,11		
	5	> 400	72.755	591	-0,06		
K.K.		Σύνολ	0 119.018	1.026			
) Orly ma		М.С			0,06		
7.5000		Τυπική απόκλισ	1		0,07		
8. Χρήση-κάλυψη γης							
- Alexand	1	Γεωργικές εκτάσεις	48.160	520	0,23		
	2	Δάση-δασικές εκτάσεις	66.779	450	-0,25		
	3	Δομημένο περιβάλλον	3.969	56	0,49		
		Σύνολ	0 118.908	1.026			
		М.С			016		
		Τυπική απόκλιο	1		0,37		

Στην τελευταία στήλη του πίνακα 2.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του συντελεστή βαρύτητας (δείκτης επιδεκτικότητας) για κάθε μια κατηγορία κάθε παράγοντα. Ο δείκτης είναι θετικός όπου η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη από τη μέση και αρνητικός όπου είναι μικρότερη. Ο δείκτης αυτός αποδόθηκε στο θεματικό χάρτη για κάθε κριτήριο, με επαναταξινόμηση των επιπέδων και νέες τιμές κλάσεων τους συντελεστές βαρύτητας.

2.2.3.4. Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση & αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από τον πίνακα 2.8 είναι εμφανές ότι οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων κάθε παράγοντας διαφέρουν ως προς τα στατιστικά του χαρακτηριστικά. Συνεπώς κάθε παράγοντας έχει διαφορετική βαρύτητα στην εκτίμηση της συνολικής επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Η στάθμιση των παραγόντων βάσει της διακύμανσης των τιμών των συντελεστών των επιμέρους κριτηρίων έγινε εξαγωγή ενός κύριου συντελεστή βαρύτητας για κάθε παράγοντα.

Πίνακας 2.9. Στάθμιση παραγόντων					
Пα	ράγοντας	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής βαρύτητας με συμμετοχή 8 παραγόντων	Συντελεστής βαρύτητας με συμμετοχή 7 παραγόντων	
7	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,07	0,93	0,98	
5	Απόσταση από ρήγμα	0,20	0,80	0,93	
8	Χρήση-κάλυψη γης	0,37	0,63	0,88	
4	Υψόμετρο	0,38	0,62	0,87	
3	Κλίση αναγλύφου	0,38	0,62	0,87	
6	Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,63	0,37	-	
1	Λιθολογία	0,71	0,29	0,76	
2	Βροχόπτωση	0,90	0,10	0,70	

Οι συντελεστές βαρύτητας των οχτώ παραγόντων του πίνακα 2.8 συνδυαστικά με τους συντελεστές βαρύτητας κάθε κατηγορίας του πίνακα 2.9 οδήγησαν στη δημιουργία δύο χαρτών επιδεκτικότητας. Ο πρώτος χάρτης προέκυψε με υπέρθεση, απλή άθροιση, όλων των επαναταξινομημένων επιπέδων (σταθμισμένων χαρτών) λαμβάνοντας υπόψη και τους οχτώ παράγοντες, αφού πρώτα κάθε επίπεδο πολλαπλασιάστηκε με τον αντίστοιχο κύριο συντελεστή βαρύτητας. Ο δεύτερος χάρτης προέκυψε με υπέρθεση των επαναταζινομημένων επιπέδων λαμβάνοντας υπόψη επτά παράγοντες, εξαιρώντας τον παράγοντα που αφορά στην απόσταση από το οδικό δίκτυο. Βεβαίως για τη δημιουργία του δεύτερου χάρτη έγινε στάθμιση των επιπέδων με νέους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψε από τον συνδυασμό των επτά υπολοίπων παραγόντων. Ο δεύτερος χάρτης δημιουργήθηκε για να εξεταστεί κατά πόσο ο παράγοντας της απόστασης από το οδικό δίκτυο ελέγχει το αποτέλεσμα, δεδομένου ότι το αρχείο των κατολισθήσεων στο οποίο βασίστηκε η μεθοδολογία αφορά σε καταγραφές κατολισθήσεων πλησίον του οδικού δικτύου.

Ακολούθησε κατηγοριοποίηση των δύο χαρτών σε πέντε κλάσεις πολύ χαμηλής (ΠΧ), χαμηλής (Χ), μέτριας (Μ), υψηλής (Υ) και πολύ υψηλής (ΠΥ) επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ο πρώτος χάρτης επιδεκτικότητας (8 παράγοντες) και στο σχήμα 2.7 ο δεύτερος χάρτης (7 παράγοντες). Στους χάρτες έγινε υπέρθεση 250 κατολισθήσεων οι οποίες, όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο, χαρτογραφήθηκαν από δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η διερεύνηση σχετικά με την επίδραση του οδικού δικτύου στα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.6. Κατηγοριοποιημένος χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (8 παράγοντες).



Σχήμα 2.7. Κατηγοριοποιημένος χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (7 παράγοντες).

2.3.3.4. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα αξιοπιστίας των ποιοτικών στατιστικών μεθόδων είναι η χρήση βάσεων δεδομένων που δεν έχουν ελεγχθεί. Στην περίπτωση που κατά τον έλεγχο μιας βάσης δεδομένων παρατηρηθεί υψηλός βαθμός απόκλισης από την πραγματικότητα, η καταγραφής και η αποτύπωση της πραγματικότητας θεωρείται απαραίτητη.

Παραδοσιακά αξιόπιστες πηγές θεωρούνταν οι αεροφωτογραφίες, οι μετρήσεις πεδίου και κυρίως κατάλογοι προγενέστερων καταγραφών. Ειδικά στην περίπτωση των παλαιότερων καταγραφών όπου η γεωγραφική θέση των κατολισθήσεων ήταν κυρίως περιγραφική, ελλείψη της τεχνολογίας εντοπισμού γεωγραφικής θέσης. Συνεπώς οι βάσεις δεδομένων που έχουν προκύψει από παλαιότερες καταγραφές αποκλίνουν από την πραγματικότητα, μειώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτές.

Για τους προαναφερόμενους λόγους κρίθηκε σκόπιμη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσης εργασίας, με βάση υπάρχουσες κατολισθήσεις πέραν του καταλόγου του ΙΓΜΕ, που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου LSI. Για την αξιολόγηση χαρτογραφήθηκαν 250 υφιστάμενες κατολισθήσεις, που φαίνονται ευκρινώς στις δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης που διαθέτει η εφαρμογή GoogleEarth και διατίθεται με ελεύθερη πρόσβαση στο κοινό.

Για κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε πραγματική θέση κατολίσθησης έγινε εξαγωγή της αντίστοιχης κλάσης των δύο χαρτών. Στον κατηγοριοποιημένο χάρτη επιδεκτικότητας που δημιουργήθηκε συνυπολογίζοντας όλους τους παράγοντες, από τις 250 κατολισθήσεις οι 217 χωροθετούνται εντός περιοχών υψηλής ή πολύ υψηλής επιδεκτικότητας, οι 32 σε περιοχές μέσης κλάσης και μόνο 1 σε περιοχή χαμηλής κλάσης. Στον κατηγοριοποιημένο χάρτη επιδεκτικότητας που δημιουργήθηκε συνυπολογίζονται εντός περιοχών υψηλής ή πολύ υψηλής επιδεκτικότητας, οι 32 σε περιοχές μέσης κλάσης και μόνο 1 σε περιοχή χαμηλής κλάσης. Στον κατηγοριοποιημένο χάρτη επιδεκτικότητας, από τις 250 κατολισθήσεις οι 217 οι 250 κατολισθήσεις συνυπολογίζοντας τους επτά παράγοντες, από τις 250 κατολισθήσεις οι 224 χωροθετούνται εντός περιοχών υψηλής ή πολύ υψηλής ή πολύ υψηλής επιδεκτικότητας, οι 15 σε περιοχές μέσης κλάσης και μόνο 1 σε περιοχή χαμηλής κλάσης.

Περισσότερο από το 85% και στις δύο περιπτώσεις σχετίστηκε με κλάση από Υ έως ΠΥ, συνεπώς τα αποτελέσματα τις παρούσας εργασίας, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή του δείκτη επιδεκτικότητας κατολίσθησης θεωρούνται αξιόπιστα και για τις δύο περιπτώσεις χαρτών, οπότε και έγιναν αποδεκτά.

2.3. Διακινδύνευση ΕΣΜΗΕ σε κατολίσθηση

Ο χάρτης επιδεκτικότητας των εδαφών σε κατολίσθηση, που δημιουργήθηκε από την μεθοδολογία που αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάζει ενδεικτικά τον βαθμό της έκθεσής τους στον κίνδυνο των κατολισθήσεων (σχήμα 2.8i-v).

Διευκρινίζεται ότι η μεθοδολογική προσέγγιση που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, όπως συμβαίνει άλλωστε σε όλες τις προτεινόμενες τεχνικές μοντελοποίησης των φυσικών φαινομένων που προτείνονται στην διεθνή βιβλιογραφία, επιδέχεται μεθοδολογικούς περιορισμούς (Leroi, 1997). Η κλίμακα, η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων που αποτελούν επίπεδα παραγόντων επηρεάζουν ισχυρά τους συντελεστές βαρύτητας και ως εκ τούτου και το τελικό αποτέλεσμα που είναι ο χάρτης επιδεκτικότητας των εδαφών σε κατολίσθηση. Σε σημαντικό βαθμό η μέθοδος επηρεάζεται και από τα δεδομένα των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων, βάσει των οποίων γίνεται ο συσχετισμός των κατηγοριών των παραγόντων και η απόδοση των συντελεστών βαρύτητας. Ο τρόπος καταγραφής των θέσεων των κατολισθήσεων πολλές φορές οδηγεί σε εσφαλμένες γεωγραφικές συντεταγμένες, ιδιαίτερα στην περίπτωση των παλαιότερων καταγραφών όπου δεν γινόταν με χρήση συστημάτων εντοπισμού θέσης. Ένας επίσης περιορισμός προκύπτει από το είδος της κατηγορίας των κατολισθήσεων που χρησιμοποιήθηκε, που στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αφορούν σε ολισθήσεις πλησίον του οδικού δικτύου. Κατά συνέπεια ο παράγοντας της απόστασης από το οδικό δίκτυο είναι λογικό να αναδειχθεί ως ένας από τους παράγοντες με τον υψηλότερο συντελεστή βαρύτητας.

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, είναι ευλογοφανές ότι η εκτίμηση της επικινδυνότητας, η περιγραφή της οποίας ακολουθεί, είναι ενδεικτική σε εθνική κλίμακα και σε κάθε περίπτωση δεν αποτελεί στοιχείο που να τεκμηριώνει τον κίνδυνο που διατρέχει το ΕΣΜΗΕ από τις κατολισθήσεις. Για τον ακριβή προσδιορισμό του κινδύνου πρέπει να εστιάζει σε τοπικό επίπεδο αφού πρώτα καμφθούν οι προαναφερόμενοι περιορισμοί.

Λιγότερο από το 10% των στοιχείων συνολικά σε εθνικό επίπεδο βρίσκονται σε περιοχές ΠΟΥ κλάσης, ωστόσο λόγο των περιορισμών που προαναφέρθηκαν το πραγματικό ποσοστό εκτιμάται ότι είναι σαφώς μικρότερο. Σε επίπεδο νομού, τα περισσότερα στοιχεία του ΕΣΜΗΕ που βρίσκονται σε περιοχές ΠΥ κλάσεις εντοπίζονται στο νομό Αιτωλοακαρνανίας και Άρτας (σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8. Χάρτης έκθεσης στοιχείων ΕΣΜΗΕ σε περιοχές ΠΥ κλάσης σε επίπεδο νομού.

Ο αρμόδιος φορέας συντήρηση και αποκατάστασης των βλαβών του ΕΣΜΗΕ κατανέμει τις εργασίες σε επτά Περιφερειακούς Τομείς που προσεγγίζουν τα γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας και ως εκ τούτου η αξιολόγηση του κινδύνου σε περιφερειακό επίπεδο ακολουθεί σε γενικές γραμμές αυτή την διαμερισματοποίηση (σχήματα 2.9-2.12).

Συγκεκριμένα, ο τομέας Πελοποννήσου παρουσιάζει σαφή διαφοροποίηση ως προς τις κλάσεις μεταξύ ανατολικής, δυτικής και βόρειας Πελοποννήσου (σχήμα 2.9). Πιο συγκεκριμένα, στην ανατολική Πελοπόννησο το ΕΣΜΗΕ διέρχεται από περιοχές που κατατάχθηκαν κυρίως στις κλάσεις πολύ χαμηλής και χαμηλής επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση.



Σχήμα 2.9. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Πελοπόννησο.

Τοπικά στην περιοχή μεταξύ Μεγαλόπολης-Σπάρτης εντοπίζονται περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής κλάσης. Αυτές βρίσκονται στους πρόποδες των πλαγιών του Ταϋγέτου με ανατολικό προσανατολισμό. Οι υψηλές κλάσεις οφείλονται αφενός μεν στον υψηλό συντελεστή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, που ξεπερνά τα 1000mm, αφετέρου δε στην απόσταση από το χαρτογραφημένο ρήγμα της Σπάρτης. Το ρήγμα δύναται να προκαλέσει σεισμό μεγαλύτερο του 6,5M_w (SHARE, 2013). Η γεωλογική μελέτη που έγινε το 1991 από τους Armijo et al., αναφορικά με το σεισμός του 464 π.Χ. που εικάζεται ότι κατάστρεψε την αρχαία Σπάρτη, είχε

έντασή του θα πρέπει να ήταν περίπου 7,2 βαθμοί της κλίμακας M₈. Στις περιοχές που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη του 1km από τον καθρέφτη του ρήγματος, αυξάνεται ο κίνδυνος από σεισμική κατολίσθηση, ενώ δεν είναι τυχαίο ότι στην περιοχή ο παράγοντας απόσταση από ρήγμα έλαβε το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας.

Στην Β. Πελοπόννησο, περιοχές μεταξύ Πάτρας-Αιγίου, παρουσιάζουν υψηλή έως και πολύ υψηλή επιδεκτικότητα. Επισημαίνεται ότι στο τμήμα αυτό εκτελούνται έργα για την κατασκευή του αυτοκινητόδρομο της Ολυμπίας Οδού, και ως εκ τούτου το ανάγλυφο της περιοχής έχει δεχθεί έντονη ανθρωπογενή παρέμβαση. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή κυμαίνεται από 800mm έως 1000mm με σχετικά υψηλό συντελεστή βαρύτητας ως προς την εκδήλωση του φαινομένου. Επιπροσθέτως, στην ευρύτερη περιοχή είναι χαρτογραφημένα ενεργά ρήγματα που υπό προϋποθέσεις μπορούν να προκαλέσουν σεισμό μεγαλύτερο του 6,5M_w.

Στην Δυτική Πελοπόννησο, σε περιοχές μεταξύ Πύργου-Μεγαλόπολης και Πύργου-Πάτρας, εντοπίζονται περιοχές που κατατάσσονται στην υψηλή και πολύ υψηλή κλάση. Οι υψηλή κατάταξη μπορεί να αποδοθεί στους Νεογενείς σχηματισμούς της περιοχής, κυρίως μαργαϊκής σύστασης, που έχουν σχετικά υψηλό συντελεστή βαρύτητας. Σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.4, το φαινόμενο ενισχύεται σε περιοχές με υψηλό μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης, καθώς οι μάργες χάνουν τη συνοχή τους υπό την επίδραση του νερού. Οι πυρκαγιές του 2007 έχουν αυξήσει τα κατολισθητικά περιστατικά στην περιοχή με μεγαλύτερη παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης σε κατολίσθηση.

Στον τομέα Δυτικής Ελλάδας, καταγράφεται η υψηλότερη συχνότητα περιοχών με υψηλή και πολύ υψηλή επιδεκτικότητα. Οι περιοχές μεταξύ Άρτας-Ιωαννίνων, Άρτας-Καρδίτσας και Αγρινίου-Λαμίας (σχήμα 2.10). Σε αυτές τις περιοχές κυρίαρχο ρόλο παίζει ο παράγοντας της βροχόπτωσης, όπου λαμβάνει την μέγιστη τιμή της, συνδυαστικά με την δυσμενή γεωτεκτονική θέση και τη λιθολογία. Τα εδάφη στην εν λόγω περιοχή δομούνται από το πολυπτυχωμένο υπόβαθρο της Πίνδου και από τον σχηματισμό του φλύσχη, που ως επιμέρους κατηγορίες παραγόντων χαρακτηρίζονται από τους υψηλότερους συντελεστές βαρύτητας. Στον εν λόγω τομέα κατολισθήσεις αναμένονται περισσότερο μετά από έντονη και παρατεταμένη βροχόπτωση, χωρίς να αποκλείονται οι καταπτώσεις βράχων σε περίπτωση σεισμού.



Σχήμα 2.10. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Δυτική Ελλάδα.

Στην ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου οι κατολισθήσεις στο σχηματισμό του φλύσχη είναι ένα σύνηθες φαινόμενο, ιδιαίτερα μετά από τις παρατεταμένες βροχοπτώσεις που χαρακτηρίζουν την περιοχή κατά τη χειμερινή περίοδο. Αν και οι παράγοντες βροχόπτωση και λιθολογία

λαμβάνουν τους μέγιστους συντελεστές βαρύτητας, δεν αποκλείεται να προκληθούν και καταπτώσεις βράχων μετά από σεισμό. Πρόσφατα μετά τον σεισμό μεγέθους 5,3 στην περιοχή των Ιωαννίνων, σημειώθηκαν αρκετές καταπτώσεις βράχων διακόπτοντας τις μεταφορές στο επαρχιακό οδικό δίκτυο.

Περιοχές πολύ υψηλής επιδεκτικότητας αναδείχθηκαν επίσης στη Λευκάδα και την Κεφαλονιά, όπου καταγράφονται συστηματικά κατολισθήσεις μετά από τους ισχυρούς σεισμούς που πλήττουν την περιοχή των Ιονίων νήσων. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν περιοχές δυτικά του Αθανίου στο νοτιοδυτικό άκρο της Λευκάδας και στις νότιες απολήξεις του Αίνου στη νήσο της Κεφαλονιάς.

Στον τομέα της Στερεάς Ελλάδας (σχήμα 2.11) αναδείχθηκαν κυρίως περιοχές χαμηλής έως πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας. Προβλήματα από την εκδήλωση κατολισθήσεων καταγράφονται στην περιοχή της Βόρειας Εύβοιας και του Πηλίου. Αν και στην περιοχή του Πηλίου η εκδήλωση των κατολισθήσεων παρουσιάζεται εντονότερη στην ευρύτερη περιοχή της Ταγκαράδας, προβλήματα φαίνεται να αντιμετωπίζουν περιοχές νοτιοανατολικά του Βόλου στη θέση Άγιος Βλάσιος, που κατατάσσονται στη μέση και τοπικά στην υψηλή κλάση.

Στις περιοχές αυτές οι κατολισθήσεις καταγράφονται μετά από έντονες ή παρατεταμένες βροχοπτώσεις σε περιοχές που αναπτύσσεται μανδύας αποσάθρωσης. Σύμφωνα με τον χάρτη επιδεκτικότητας οι περισσότερες περιοχές κατατάσσονται στη μέση κλάση επιδεκτικότητας και τοπικά στην υψηλή. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και στους χαμηλούς συντελεστές της αντίστοιχης κατηγορίας. Επίσης η λιθολογία στην περιοχή του Πηλίου λαμβάνει χαμηλούς συντελεστές, ελλείψη δεδομένων για το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης.

Στην Εύβοια οι περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας είναι πολύ περιορισμένες Στην βόρεια Εύβοια όπου έχουν χαρτογραφηθεί ολισθήσεις στην περιοχή της Αγ. Άννας και στο Ελληνικό, οι περιοχές κατατάχθηκαν τοπικά σε μέσης επιδεκτικότητας εδάφη. Η συγκεκριμένη περιοχή καλύπτεται κυρίως από Νεογενείς σχηματισμούς, με πολύ χαμηλότερα ύψη βροχής συγκριτικά με την Δυτική Ελλάδα και για αυτό το λόγο έλαβε χαμηλούς συντελεστές βαρύτητας.



Σχήμα 2.11. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα.

Στον τομέα της Βόρειας Ελλάδας (Μακεδονία-Θράκη) το μεγαλύτερο ποσοστό των εκτάσεων χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλής έως χαμηλής επιδεκτικότητας (σχήμα 2.12). Αυτό οφείλεται στη λιθολογία της περιοχής και στα χαμηλές τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Ιδιαίτερα οι κατηγορίες του παράγοντας της λιθολογίας στην εν λόγω περιοχή λαμβάνουν αρνητικό συντελεστή βαρύτητας. Η εκδήλωση κατολίσθησης στον τομέα αυτό έχει τοπικό χαρακτήρα όπως και στην περίπτωση του προαναφερόμενου περιφερειακού τομέα.

Τα κατολισθητικά φαινόμενα στη συγκεκριμένη περιοχή οφείλονται σε τοπικές συνθήκες και δεν μπορούν εύκολα να προβλεφθούν, λόγω των περιορισμών που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή της παρούσας παραγράφου. Ωστόσο, τοπικά αναδείχθηκαν ορισμένες περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας, όπου όντως έχουν καταγραφεί κατολισθήσεις που έχουν ήδη προκαλέσει μηχανικές βλάβες σε στοιχεία του ΕΣΜΗΕ.

Συγκριμένα, υψηλή επιδεκτικότητα σημειώνεται στις ορεινές περιοχές νότια της λίμνης Πολυφύτου, όπου χαρτογραφούνται μη συνεκτικά Νεογενή ιζήματα. Πλέον αυτού το ανάγλυφο της περιοχής δέχεται έντονη ανθρωπογενή επίδραση από τις λατομικές δραστηριότητες εξόρυξης λιγνίτη. Ουσιαστικά, οι εκσκαφές στον πόδα δημιουργούν τεχνητά πρανή με σχεδόν κατακόρυφη κλίση, προκαλώντας την αστοχία των υπερκείμενων χαλαρών ιζημάτων και την ολίσθησή τους με γρήγορους ρυθμούς σημειώνοντας προοδευτική διεύρυνση της κατολίσθησης. Στην περιοχή του Σχολαρίου Χαλκιδικής, όπου πρόσφατα εκδηλώθηκαν κατολισθήσεις, ο χάρτης παρουσιάζει τοπικά υψηλή επιδεκτικότητα.

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή σε περιφερειακό επίπεδο, στην Κρήτη αναδείχθηκαν περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας μεταξύ Ηρακλείου-Μοιρών και Ιεράπετρας-Σητείας. Οι υψηλές κλάσεις οφείλονται στο απότομο και ανάγλυφο, το οποίο ελέγχεται από ρήγματα, συνδυαστικά με την υψηλή ετήσια βροχόπτωση, στις ορεινές περιοχές, αλλά και την λιθολογία. Σε κεντρικές περιοχές του νομού Ρεθύμνου, εκτός ενδιαφέροντος ως προς το εκτιθέμενο αντικείμενο, αναδείχθηκαν ως περιοχές υψηλής επιδεκτικότητας οι οποίες έχουν ήδη διερευνηθεί με παρόμοια μέθοδο (Kouli et al., 2009) λόγω εκτεταμένων κατολισθητικών φαινομένων.



Σχήμα 2.12. Χάρτης επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση στην Βόρεια Ελλάδα και την Κρήτη.

3. Άνεμοι ισχυρών εντάσεων

3.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά της γήινης ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα της Γής είναι μια λεπτή εκτεταμένη ζώνη αερίων, που περιβάλει την Γη και αναπτύσσεται περίπου στα πρώτα 30km από την επιφάνεια. Μέσα στην ατμόσφαιρα συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα, τα οποία είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων διεργασιών, που καθορίζονται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία και γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο μέσω των μετεωρολογικών φαινομένων.

Τα σημαντικότερα στρώματα για τη μετεωρολογία και το κλίμα είναι η τροπόσφαιρα και η στρατόσφαιρα. Η περιοχή της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια μέχρι το ύψος των 11km περιέχει τον καιρό που γνωρίζουμε και αναδεύεται καλά από τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα αέρος (Ahrens, 1999). Αυτή η περιοχή του κυκλοφορούντος αέρα που εκτείνεται από την επιφάνεια μέγρι εκεί όπου ο αέρας σταματά να ψυγραίνεται σε συνάρτηση με το ύψος λέγεται τροπόσφαιρα. Μετά τα 11km η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα σταματά να ελαττώνεται. Η περιοχή που η θερμοκρασία του αέρα παραμένει σταθερή μετά του ύψους ονομάζεται ισοθερμική ζώνη. Η βάση αυτής της ζώνης ορίζει την κορυφή της τροπόσφαιρας και την απαρχή ενός άλλου στρώματος της στρατόσφαιρας. Το όριο που διαχωρίζει την τροπόσφαιρα από την στρατόσφαιρα, καλείται τροπόπαυση. Το ύψος της τροπόπαυσης ποικίλει, τόσο κατά γεωγραφικό πλάτος, όσο και εποχιακά. Γενικά, η τροπόπαυση βρίσκεται υψηλότερα το καλοκαίρι και χαμηλότερα τον χειμώνα σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη. Σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη (30°-40°), η τροπόπαυση διακόπτεται και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, παρατηρείται δε ανάμειξη με στρατοσφαιρικό αέρα και αντιστρόφως. Τα σημεία στα οποία διακόπτεται η τροπόπαυση, σημειώνουν και τις θέσεις των τροποσφαιρικών ρευμάτων ανέμου που είναι υψηλοί άνεμοι περιφερόμενοι σε δαιδαλώδη στενά (αέρινα κανάλια) με ταχύτητες πάνω από 190 km/h (Ahrens, 1999).

Η κατάσταση της ατμόσφαιρας, δηλαδή ο καιρός, μεταβάλλεται διαρκώς σε συνάρτηση της θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και υγρασίας του αέρα, των σύννεφων, των καταιονισμών και της ορατότητας (Ahrens, 1999; Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015). Ο αέρας αποτελεί ένα μείγμα αμέτρητων δισεκατομμυρίων ατόμων και μορίων, τα οποία δεν κινούνται όλα με την ίδια ταχύτητα, κατά μέτρο και διεύθυνση, αλλά ότι κάποια από αυτά κινούνται ταχύτερα από τα υπόλοιπα. Τα μόρια του αέρα κατακρατούνται κοντά στη Γη λόγω της βαρύτητας, που τα έλκει προς τα κάτω συμπιέζοντάς τα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η πυκνότητα του αέρα να είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια και να ελαττώνεται σταδιακά με την αύξηση του ύψους.

Η ατμοσφαιρική πίεση, η ατμοσφαιρική πυκνότητα και η θερμοκρασία του αέρα αποτελούν παραμέτρους που αλληλεπιδρούν και συσχετίζονται (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015). Η θερμοκρασία του αέρα είναι το μέτρο μέτρησης της μέσης κινητικής του ενέργειας, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες μέσες ταχύτητες. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας καθ' ύψος εκφράζεται με την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα (Φλόκας, 1997) και είναι περίπου 0,65 °C/100 m (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015).Σε συνθήκες ίδιας θερμοκρασίας και στρώματος ατμόσφαιρας ο ζεστός υγρός αέρας είναι ελαφρύτερος από τον ζεστό ξηρό αέρα, λόγω του βάρους των μορίων του. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη επίδραση στον καιρό καθώς ο ελαφρύτερος ζεστός υγρός αέρας ανεβαίνει στην ατμόσφαιρα γρηγορότερα, όπου μετατρέπεται σε σταγονίδια βροχής για να ξαναπέσουν σε μορφή βροχής.

Οι μετεωρολόγοι κατατάσσουν την κυκλοφορία του αέρα ανάλογα με το μέγεθος της σύμφωνα με τις λεγόμενες κλίμακες κίνησης. Η μικροκλίμακα κίνησης αέρα είναι η μικρότερη και έχει διάμετρο έως μερικά μέτρα με δυνατότητα κίνησης των φύλλων των δέντρων ή σκόνης ή χαρτιών και με διάρκεια λίγα λεπτά της ώρας το μέγιστο. Η μεσοκλίμακα κίνησης αέρα έχει διάμετρο από μερικά έως εκατοντάδες χιλιόμετρα και διαρκεί από μερικές ώρες έως και ολόκληρη ημέρα. Η μεσοκλίμακα περιλαμβάνει τοπικούς ανέμους, καταιγίδες, ανεμοστρόβιλους και μερικές τοπικές καταιγίδες. Τέλος, οι κυκλοφορίες αέρα (κυκλώνες και αντικυκλώνες) γύρω από τα υψηλά και χαμηλά βαρομετρικά συστήματα περιλαμβάνονται στην συνοπτική κλίμακα με εύρος εκατοντάδων ή χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων. Οι μεγαλύτερες μορφές αέρα φαίνονται στην υδρόγειο κλίμακα και συχνά η συνοπτική και υδρόγειος κλίμακες αναφέρονται ως μεσοκλίμακα.

3.1.2. Κίνηση ανέμων

Ο ατμοσφαιρικός αέρας που περιβάλει τη γη βρίσκεται σε διαρκή κίνηση. Οι παράγοντες εκείνοι που δημιουργούν και διαμορφώνουν όλες αυτές τις κινήσεις είναι η ηλιακή ενέργεια που προσλαμβάνει, τόσο η ατμόσφαιρα, όσο και η επιφάνεια του εδάφους, η ανομοιογένεια του αναγλύφου του εδάφους και η περιστροφική κίνηση της γης περί του άξονά της.

Οι κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα παρουσιάζουν διάφορες κατευθύνσεις και διαφορετικό τρόπο δημιουργίας τους. Οι μετακινήσεις του αέρα κατά την οριζόντια έννοια ονομάζονται άνεμοι. Ουσιαστικά, με τον όρο άνεμο νοείται κάθε ρεύμα ατμοσφαιρικού αέρα που έχει κάποια σχετική κίνηση ως προς το έδαφος και δη η οριζόντια συνιστώσα της κίνησης (Φλόκας, 1997). Εκτός από τις οριζόντιες κινήσεις του αέρα, υπάρχουν και κινήσεις αυτού προς τα πάνω ή κάτω. Οι κινήσεις του ανέμου προς τα πάνω λέγονται ανοδικές ή ανοδικοί άνεμοι, ενώ οι τα κάτω καθοδικές ή καθοδικοί άνεμοι. Στις ατμοσφαιρικές κινήσεις η κάθετη συνιστώσα συγκριτικά με την οριζόντια είναι πολύ μικρή, εκτός από εξαιρέσεις όπως οι καταβατικοί άνεμοι και οι σίφωνες που αναφέρονται στην επόμενη παράγραφο.

Στα επιφανειακά στρώματα της ατμόσφαιρας ο άνεμος παρουσιάζει πολλές μεταβολές, τόσο στη διεύθυνση, όσο και στην έντασή του, εξαιτίας της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας, των στροβιλοειδών κινήσεων και της τριβής με το ανάγλυφο του εδάφους. Έτσι, ενώ ο άνεμος παρουσιάζει κατά μέσο όρο, την ίδια ένταση και διεύθυνση για μερικές ώρες, είναι δυνατό μέσα σε λίγα λεπτά να αλλάξει διεύθυνση και ένταση σε μεγάλο βαθμό. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο ισχυρότεροι είναι οι στροβιλισμοί και μεγαλύτερες οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Ο άνεμος γίνεται πιο σταθερός, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που πνέει από το έδαφος.

Στον χάρτη του σχήματος 3.2.-1 παρουσιάζεται η μέση ετήσια ένταση τον ανέμων σε εθνική κλίμακα. Τα δεδομένα προέρχονται από το ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) και διατίθενται με ελεύθερη πρόσβαση στον ιστότοπο της PAE (www.rae.gr). Αν και οι τιμές αφορούν τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, ωστόσο δίνουν πληροφορία σχετικά με τη χωρική κατανομή του αιολικού δυναμικού της χώρας και μπορούν να διακριθούν περιοχές υψηλών εντάσεων.



Σχήμα 3.1. Χάρτης μέσης ετήσιας έντασης αν
έμου(πηγή: www.rae.gr).

3.1.3. Άνεμοι ισχυρών εντάσεων-Σίφωνες

3.1.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά και παράγοντες δημιουργίας σιφώνων.

Σίφωνας στην μετεωρολογία ονομάζεται μια ταχέως περιστρεφόμενη στήλη ανέμου που οφείλεται σε πολύ χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση στο κέντρο της στήλης και η οποία αποφύεται από τη βάση τεράστιων καταιγιδοφόρων νεφών. Συνήθως είναι μικρής διαμέτρου και σύντομης χρονικής διάρκειας, ωστόσο αποτελεί έντονο μετεωρολογικό φαινόμενο που αποφέρει καταστροφές μικρής έκτασης αλλά δυνητικά μεγάλης έντασης. Πολλές φορές συγχέονται με το φαινόμενο των ανεμοστρόβιλοι, ωστόσο διαφέρουν ως προς τις γενεσιουργές αιτίες και συνήθως είναι μεγαλύτερης έντασης.

Οι σίφωνες, όπως και οι καταιγίδες, είναι ατμοσφαιρικές διαταραχές, που δημιουργούνται, όταν στην ατμόσφαιρα επικρατεί σε μεγάλο βαθμό αστάθεια του αέρα. Ουσιαστικά, είναι μια ισχυρή στροβιλιζόμενη στήλη αέρα που προβάλει από καταιγιδοφόρα νέφη, με τη μορφή σωληνοειδούς προεκβολής νέφους. Ο στροβιλισμός του ατμοσφαιρικού αέρα στη μικρή, σχετικά, αυτή στήλη, διαμέτρου μερικών δεκάδων μέτρων, που παρουσιάζει μικρή πίεση στο κέντρο, διενεργείται, κατά την ορθή φορά στο βόρειο και κατά την ανάδρομη στο νότιο ημισφαίριο.

Διακρίνονται σε σίφωνες ξηράς (tornadoes) και σε σίφωνες θάλασσας (water spouts). Ο σίφωνας ξηράς είναι ένας γιγάντιος στρόβιλος αέρα, εξαιρετικής σφοδρότητας, με τη μορφή «προβοσκίδας», που εκτείνεται από τη βάση κάποιου καταιγιδοφόρου νέφους, και πολλές φορές φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους (Φλόκας, 1997). Συνοδεύονται συνήθως από καταιγίδες, βροχές και χαλάζι, φαινόμενα που οφείλονται κυρίως σε καταιγιδοφόρο νέφος.

Δημιουργούνται πάνω από την ξηρά, όταν ο καιρός χαρακτηρίζεται από μεγάλη ατμοσφαιρική αστάθεια. Η ταχύτητα του ανέμου, στην κεντρική περιοχή, φτάνει τα 100m/sec, και σε εξαιρετικές περιπτώσεις τα 200m/sec. Οι σίφωνες ξηράς μετακινούνται με μικρή, σχετικά, ταχύτητα, η οποία κυμαίνεται από 8m/sec έως 20m/sec, και εξαρτάται από το μητρικό νέφος cumulonimbus. Η οριζόντια έκταση των σιφώνων ξηράς είναι, κατά μέσο όρο, περίπου 250 m. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι η μεγάλη πτώση της τιμής της ατμοσφαιρικής πίεσης, από την περιφέρεια προς το κέντρο του σίφωνα, που μπορεί να φτάσει και τα 25mb δημιουργώντας εξαιρετικά μεγάλη βαροβαθμίδα. Το γεγονός αυτό αποτελεί και τη βασική αιτία της μεγάλης σφοδρότητας του ανέμου που επικρατεί μέσα στο σίφωνα.

Προξενούν μεγάλες καταστροφές πάνω από τις περιοχές που διέρχονται, λόγω των θυελλωδών ανέμων και της εξαιρετικής πτώσης της τιμής της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η τροχιά τους έχει μικρό σχετικά μήκος, κατά μέσο όρο περίπου 10km, κατά συνέπεια η πιθανότητα να περάσουν πάνω από ορισμένες περιοχές είναι μικρή. Σ' εξαιρετικές περιπτώσεις, η τροχιά τους μπορεί να φθάσει τα 200km. Στις περιπτώσεις αυτές, οι σίφωνες ξηράς παρουσιάζουν μια τάση ανασχηματισμού, με την δημιουργία νέων «προβοσκίδων», οι οποίες αντικαθιστούν τις παλιές.

Οι σίφωνες ξηράς παρατηρούνται σε πολλές περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα στις πεδινές περιοχές των νότιων τμημάτων των Η.Π.Α. με συχνότητα εμφάνισης περίπου 140 το χρόνο. Μικρότερης έντασης και συχνότητας σίφωνες, παρατηρούνται και στις εύκρατες περιοχές, στη διάρκεια των περιόδων Απριλίου-Μαΐου και Οκτωβρίου-Νοεμβρίου. Η διάρκεια ζωής των σιφώνων ξηράς κυμαίνεται από 4 έως 5 ώρες και παρατηρούνται σε όλες τις ώρες της ημέρας, με μέγιστη συχνότητα αργά το απόγευμα.

Οι σίφωνες θάλασσας επίσης δημιουργούνται κάτω από καταιγιδοφόρα νέφη και συνήθως φθάνουν μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ υπάρχει περίπτωση να μην συνοδεύονται από καταιγιδοφόρο νέφος. Εξαιτίας της βίαιης κίνησης, που επικρατεί στο εσωτερικό του σίφωνα, πολλές φορές μεταφέρονται, κατακόρυφα, μεγάλες μάζες θαλασσινού νερού μαζί με το περιεχόμενό τους. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες σχηματίζονται είναι ίδιες με εκείνες που δημιουργούν τους σίφωνες ξηράς. Η διάρκεια ζωής τους είναι μικρή και κυμαίνεται από 10 έως 30min. Οι σίφωνες της θάλασσας είναι μικρότεροι σε μέγεθος από τους αντίστοιχους της ξηράς, με τη διάμετρο τους, σπάνια, να φτάνει τα 150m.

Γενικά οι σίφωνες είναι συνηθέστεροι στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, όπου συναντώνται οι θερμές και υγρές τροπικές αέριες μάζες με ψυχρά πολικά μέτωπα. Επίσης είναι δυνατόν να σχηματιστούν στην περίπτωση ύπαρξης αέρα μεγάλης αστάθειας και υγρασίας. Η πλέον ευνοϊκή αστάθεια για το σχηματισμό τους, είναι μια αρκετά ισχυρή κατακόρυφη πτώση της θερμοκρασίας με το ύψος, με ταυτόχρονο εγκλωβισμό λανθάνουσας θερμότητας στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας και η αύξηση της μάζας του αέρα που ανυψώνεται βίαια.

Οι μηχανισμοί ανύψωσης αέριων μαζών μπορεί να είναι θερμικοί (ηλιακή ακτινοβολία, καταιγίδες) ή δυναμικοί (ψυχρά μέτωπα). Ειδικότερα, λόγω της εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας το μεσημέρι, προκαλείται υπερθέρμανση κοντά στο έδαφος, επαυξάνοντας την

ανοδική τάση και γι' αυτό οι σίφωνες συνήθως εμφανίζονται αργά το απομεσήμερο, λίγη ώρα μετά την μεγαλύτερη θερμοκρασία του 24-ώρου.

Μία σημαντική πηγή ενέργειας, είναι αυτή των καταιγίδων κατά τη διάρκεια των οποίων αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης των υδρατμών. Αυτό το πρόσθετο ποσό της θερμότητας ενισχύει τα βίαια ανοδικά ρεύματα, επειδή ο θερμότερος αέρας είναι ελαφρύτερος και επομένως ανυψώνεται σαν αερόστατο.

Για τους σίφωνες, τα ευνοϊκότερα ψυχρά μέτωπα είναι εκείνα που σχηματίζονται μεταξύ θαλάσσιας πολικής και θαλάσσιας τροπικής μετακινούμενης αέριας μάζας, οπότε ο ψυχρός αέρας εισχωρεί κυριολεκτικά μέσα στον θερμό αέρα, σε μικρό ύψος από την επιφάνεια. Ο ψυχρός αέρας υπερκαλύπτει και εγκλωβίζει τον θερμό αέρα προκαλώντας ακραία ανισορροπία και αστάθεια στην ατμόσφαιρα. Ο θερμός αέρας ανερχόμενος με μεγάλη ταχύτητα, διαφεύγει προς τα πάνω υπό μορφή τεράστιας φυσαλίδας, με συνέπεια τη δημιουργία σφοδρού ανοδικού ρεύματος και την πτώση της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σημείο ανύψωσης. Την ίδια στιγμή ισχυρά ρεύματα αέρα από αντίθετες κατευθύνσεις συναντώνται προσδίνοντας στην ανοδική στήλη μια περιστροφική κίνηση. Η ανοδική κίνηση στο κέντρο του κάτω μέρους της ροής αέρα προς τον άξονα περιστροφής προκαλεί σημαντική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μέσα στην στροβιλιζόμενη στήλη. Λόγω της ανοδικής διαφυγής του θερμού αέρα επέρχεται πτώση στην πίεση του αέρα με αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού των σιφώνων και του ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από αυτούς.

3.1.3.2. Χαρακτηριστικά σιφώνων στην Ελλάδα

Καταγεγραμμένα ιστορικά περιστατικά καταδεικνύουν ότι οι ανεμστρόβιλοι δεν είναι ένα πρόσφατα εμφανιζόμενο καιρικό φαινόμενο στον ελλαδικό χώρο (Livadas,1954; Kyriazopoulos and Livadas, 1975; Flocas, 1992; Sioutas, 2003; Matsagouras et al., 2014). Σύμφωνα με μελέτη του Ματσαγγούρα (2014), που αναφέρεται στη χρονική περίοδο 1709-2012, στην Ελλάδα καταγράφτηκαν 612 γεγονότα σιφώνων με σημαντικές επιπτώσεις τόσο σε δομικά στοιχεία, σε καλλιέργειες όσο και σε ανθρώπινα θύματα. Συγκεκριμένα, αναφέρει 114 τραυματισμούς και 29 θανάτους ανθρώπων.

Η πρώτη επιστημονική εργασία σχετικά με τους σιφώνες στην Ελλάδα δημοσιεύτηκε το 2003 από τον μετεωρολόγο Σιούτα Μ. (Sioutas, 2003), συντονιστή της ομάδας παρακολούθησης σιφώνων στην Ελλάδα, ενώ χρειάστηκε περισσότερο από μια δεκαετία για την εξαγωγή επιστημονικών συμπερασμάτων που αφορούν στους σίφωνες στην Ελλάδα και στην συσχέτισή τους με άλλες χώρες της Ευρώπης και των ΗΠΑ (Sioutas and Keul, 2007; Nastos and Matsangouras, 2010; Sioutas, et al., 2013).

Από την ανάλυση των καταγραφών της ομάδας παρακολούθησης, την τελευταία δεκαπενταετία παρατηρείται αύξηση της μέσης ετήσιας συχνότητα εμφάνισης των σιφώνων (Sioutas, 2011; Sioutas et al., 2015). Το 27% των γεγονότων αφορούσαν σε σίφωνες ξηράς, το 53% σε υδροσίφωνες και το 20% σε νέφος σίφωνα. Η αύξηση του φαινομένου, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, όξυνε το ενδιαφέρον των μελετητών και οδήγησε, πέραν της χωρικής και χρονικής ανάλυσης, σε περεταίρω μελέτη του φαινομένου. Πλέον, υπάρχει πλήθος δημοσιεύσεων που επικεντρώνεται στον προσδιορισμός των συνθηκών που συμβάλουν στη δημιουργία σιφώνων στην Ελλάδα στην μοντελοποίηση και πρόβλεψη του φαινομένου (ενδ. Sioutas and Keul, 2007; Keul et al., 2009; Sioutas, 2011; Nastos and Matsangouras, 2012; Nastos and Matsangouras, 2014a; Mantsagouras et al., 2014; Mantsagouras et al., 2017).

Σύμφωνα με τη διατριβή του Ματσαγγούρα (2014), στην Ελλάδα το χρονικό διάστημα 1709-2012 καταγράφτηκαν 612 γεγονότα σιφώνων με σημαντικές επιπτώσεις τόσο σε δομικά στοιχεία, σε καλλιέργειες όσο και σε ανθρώπινα θύματα. Συγκεκριμένα, αναφέρει 114 τραυματισμούς και 29 θανάτους ανθρώπων. Σχεδόν κατά το ήμισυ οι σίφωνες εκδηλώθηκαν στο προ-μετωπικό περιβάλλον, στο θερμό τομέα του ψυχρού μετώπου, με τη θέση του ψυχρού μετώπου να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 50km. Το 30% περίπου των γεγονότων εκδηλώθηκε μετά τη διέλευση του μετώπου, στον ψυχρό τομέα του ψυχρού μετώπου, ενώ δεν έχει εντοπιστεί συσχέτιση μεταξύ θερμού μετώπου και εκδήλωσης σίφωνα.

Αν και οι ειδικοί δεν συμφωνούν πάντα ως προς τη μέση συνοπτική κατάσταση των ημερών εμφάνισης σιφώνων και την κατεύθυνση τους οι άνεμοι που φαίνεται να κυριαρχούν κατά την εκδήλωση του φαινομένου είναι είτε ΝΑ ή ΒΔ (Sioutas, 2011; Matsangouras et al., 2017). Οι ερευνητές συμφωνούν ότι η σύνθετη μορφολογία της Ελλάδας δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για τη δημιουργία ανεμοστροβίλων (Sioutas, 2003; Matsagouras et al., 2014). Συγκεκριμένα, οι αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου WRF-ARW κατέδειξαν ότι η τοπογραφία σε περιοχές της ανατολικής Ελλάδας έπαιξε σημαντικό ρόλο

διπλασιάζοντας τις τιμές των διαγνωστικών δεικτών, ενώ στη δυτική Ελλάδα δεν έπαιξε τόσο σημαντικό ρόλο ή σχεδόν καθόλου ρόλο στην εξέλιξη των τιμών των διαγνωστικών παραμέτρων. (Ματσαγγούρας, 2014).

3.1.3.3. Κατανομή σιφώνων στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, το φαινόμενο των σιφώνων παρουσιάζεται εντονότερα στην ΒΔ Πελοπόννησο, ακολουθώντας κατερχόμενα ρεύματα που διέρχονται από την Κέρκυρα ενώ οι σίφωνες θαλάσσης εμφανίζουν μεγάλη συχνότητα στην Κρήτη (Sioutas, 2003; Sioutas and Keul, 2007; Matsangouras et al., 2014).

Σύμφωνα με τον Sioutas (2003), το έτος 2002 στην Ελλάδα είχε καταγραφεί ρεκόρ ανεμοστρόβιλων υπό μορφή σιφώνων ξηράς και θάλασσας. Συνολικά 40 περιπτώσεις ανεμοστρόβιλων, 27 εκ των οποίων σίφωνες θάλασσας, σημειώθηκαν σε όλη τη χώρα (σχήμα 3.2). Στην μελέτη σημειώνεται ως αξιοσημείωτο ότι τον Σεπτεμβρίου 2002 σε διάστημα 90 λεπτών παρατηρήθηκαν 13 σίφωνες θάλασσας στο Κρητικό πέλαγος.



Σχήμα 3.2. Γεωγραφική κατανομή σιφώνων [•] και υδροσιφώνων[•] Ιανουάριος 2000-Σεπτέμβριος 2002 (Sioutas 2003).

Την δεκαπενταετία 2000-2014 καταγράφτηκαν ασθενείς έως και ισχυροί σίφωνες σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας όπως στη Μακεδονία, Ρόδο, Αττική και στη Μεσσηνία (σχήμα 3.3.β). Η υψηλότερη συχνότητα σε σίφωνες με ισχυρή ένταση σημειώνεται στην ΒΔ Πελοπόννησο με 2,4 γεγονότα ανά έτος (σχήμα 3.3.α).



Σχήμα 3.3. (a)Χάρτης ετήσιας συχνότητας σιφώνων και (β) γεωγραφική κατανομή σιφώνων για την, τα στοιχεία αφορούν στην περίοδο 2000-2014 (αναπαραγωγή από Sioutas et al., 2015).

Η μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης για στο χρονικό διάστημα 2000-2012 είναι περίπου 42 γεγονότα ανά έτος και μέση ετήσια χωρική συχνότητα εμφάνισης περί τα 3 γεγονότα ανά 100km² (Matsangouras et al., 2014). Ως επιδεικτικότερη περιοχή εμφάνισης είναι η δυτική Ελλάδα με 19 σίφωνες ανά έτος. Οι σίφωνες ξηράς εμφανίζουν μέση ετήσια συχνότητα προσεγγιστικά 3 γεγονότα ανά έτος στη ΒΔ Πελοπόννησο, ενώ οι υδροσίφωνες 10 γεγονότα ανά έτος με μεγαλύτερη συχνότητα στη βόρεια Κρήτη και 7 γεγονότα ανά έτος στην Κέρκυρα.

Σύμφωνα με τους Mantsagouras et al., 2014 η εποχική κατανομή των σιφώνων αναδεικνύει τη φθινοπωρινή περίοδο ως την επικρατέστερη εποχή εμφάνισης τους. Συγκεκριμένα ο Οκτώβριος είναι ο μήνας με τη μέγιστη συχνότητα εμφάνισης σιφώνων ξηράς και ακολουθεί ο Νοέμβριος με εξαίρεση την περιοχή της Μακεδονίας που παρουσιάζει μέγιστο τον Ιούνιο και τον Ιούλιο. Αντίστοιχα για τους σίφωνες θαλάσσης η μηνιαία κατανομή των ημερών εμφάνισης παρουσιάζει ως συχνότερο μήνα εμφάνισης τον Οκτώβριο και στη συνέχεια ο Σεπτέμβριος. Κατά την φθινοπωρινή περίοδο, η μέση συνοπτική κατάσταση των ημερών εμφάνισης των σιφώνων στη δυτική Ελλάδα, χαρακτηρίζεται από μία εκτεταμένη διαταραχή κατά μήκος της κεντρικής και νότιας Ιταλίας και στη μέση στάθμη θάλασσας παρατηρείται μία κλειστή κυκλωνική κυκλοφορία στον κόλπο του Τάραντα (Matsangouras et al., 2014).

Όσον αφορά στην ωριαία κατανομή μιας ημέρας, το 75% των σιφώνων αναπτύχθηκαν από τις 8π.μ. έως τις 3μ.μ.. Συγκεκριμένα η ημερήσια διακύμανση των σιφώνων ξηράς παρουσιάζει μέγιστο από τις 11π.μ. έως τις 1μ.μ., σε αντίθεση με την ημερήσια διακύμανση των υδροσιφώνων που παρουσιάζει δύο μέγιστα, από 7π.μ. έως 9π.μ. και 2μ.μ. έως 3μ.μ. (Ματσαγγούρας, 2014).

3.1.3.4. Ένταση σιφώνων στην Ελλάδα

Οι σίφωνες ταξινομούνται με κλίμακες που βασίζονται στην πρακτική εκτίμηση των καταστροφών που προκαλούν. Στην Ελλάδα, όπως και στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης, χρησιμοποιείται από το 1975, η Κλίμακα TORRO (πίνακας 3.1). Ξεκινά από τους Τ0, για εξαιρετικά ασθενείς σίφωνες και φτάνει στους T11, οι πλέον καταστρεπτικοί στην παγκόσμια ιστορία.

Η επικρατέστερη ένταση σιφώνων για τα 612 καταγράφτηκαν στην Ελλάδα το χρονικό διάστημα 1709-2012, περίπου για το 30%, ήταν της κατηγορίας T4 της κλίμακας TORRO

(Ματσαγγούρας, 2014). Σύμφωνα με τον Siouta (2003) το χρονικό διάστημα 2000-2002 οι περισσότεροι σίφωνες είχαν ένταση T4 (αντίστοιχη της F2 Fujita Scale). Έντεκα περιστατικά σιφώνων χαρακτηρίστηκαν ως «δυνατοί» (T4-T6). Συγκεκριμένα, ένας σίφωνας ξηράς κατατάχθηκε στην κατηγορία T6 (αντίστοιχη της F3) και τέσσερεις στην κατηγορία T5 (αντίστοιχη της F2) και έξι στην κατηγορία (αντίστοιχη της F2). Για το χρονικό διάστημα 2000-2014 η ένταση και η συχνότητα των σιφώνων ξηράς παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 (Sioutas et al., 2015).

Πίνακας. 3.1. Κλίμακα TORRO κατά Meaden 1976 (πηγή: http://www.torro.org.uk) με περιγραφή ζημιών κλίμακας Fujita (πηγή: http://www.spc.noaa.gov/)						
Κατηγορία m/sec		km/h	Περιγραφή ζημιών σε αντιστοιχία με την ενισχυμένη κλίμακα Fujita			
Ασθενείς	Т0	17 - 24	63 - 87	Μικρές ζημιές (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου F0): Κεραμίδια αποσπώνται από ορισμένες στέγες. Κάποιες βλάβες σε υδρορροές ή πλαίσια. Κλαδιά σπάζουν από τα δέντρα. Δέντρα με ρηχές ρίζες πέφτουν.Όσοι σίφωνες καταγράφονται επίσημα χωρίς να αφήνουν ζημιές (π.χ. όσοι παραμένουν σε ανοιχτό πεδίο, χωρίς κτίρια και βλάστηση) ταξινομούνται πάντα ως EF0.		
	T1	25 - 32	88 - 116			
	T2	33 - 41	117 - 148	Μέτριες ζημιές (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου EF1): Στέγες απογυμνώνονται σοβαρά Κυνιτά σπίτια ανατόπονται ή παθαίνουν μεγάλες ζημίες. Αποσπόνται		
	T3	42 - 51	149 - 184	εξωτερικές θύρες. Παράθυρα και άλλες γυάλινες κατασκευές σπάζουν.		
Ισχυροί	T4	52 - 61	185 - 220	Σημαντικές ζημιές (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου F2): Αποσπώνται στέγες από ισχυρές κατασκευές. Μετατοπίζονται θεμέλια του πλαισίου σπιτιών. Κινητά σπίτια		
	Т5	62 - 72	221 - 260	καταστρέφονται ολοσχερώς. Μεγάλα δέντρα σπάζουν ή ξεριζώνονται. Ελαφρά αντικείμενα εκτοξεύονται με δύναμη. Αυτοκίνητα σηκώνονται από το έδαφος.		
	T6	73 - 83	261 - 299	Σοβαρές ζημιές (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου F3): Ολόκληρα τμήματα ισχυρών κατασκευών καταστρέφονται. Σοβαρές ζημιές σε μεγάλα κτίρια, όπως εμπορικά κέντρα. Καταστροφή πυλώνων του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τρένα ανατρέπονται. Δέντρα αποφλοιώνονται. Βαρέα οχήματα σηκώνονται από το έδαφος και εκτοξεύονται. Οικοδομές με αδύναμες βάσεις εκσφενδονίζονται σε κάποια απόσταση.		
	T7	84 - 95	300 - 342	Ακραία έως σχεδόν ολική καταστροφή (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου F4): Ισχυρές κατασκευές και ολόκληρα σπίτια με ισχυρούς σκελετούς ισοπεδώνονται εντελώς. Αυτοκίνητα μετατρέπονται σε αεριωθούμενα βλήματα και εκτοζεύονται σε σημαντική απόσταση. Γενικώς, δημιουργούνται μεγάλα αεριωθούμενα βλήματα.		
	T8	96 - 107	343 - 385			
Βίαιοι / Σφοδροί	Т9	108 - 120	386 - 432	Απίστευτη καταστροφή (αντίστοιχες ζημιές του επιπέδου >F5): Κτίρια με ισχυρούς		
	T10	121 - 134	433 - 482	σκελετούς ξεριζώνονται από τα θεμέλια και εκτοξεύονται σε μεγάλες αποστάσεις για να διαλυθούν στον αέρα. Αντικείμενα μεγέθους αυτοκινήτων και τραίνων μετατρέπονται σε αεριωθούμενα βλήματα και εκτοξεύονται σε αποστάσεις πάνω		
	T11	135 - 143	483 - 515	απο 100 μετρα. Κατασκευές με ενισχύσεις από ατσάλι παθαίνουν μεγάλες ζημιές. Τεράστια κτίρια, όπως ουρανοζύστες, υφίστανται σημαντικές κατασκευαστικές παραμορφώσεις, με μαζική καταστροφή των εξωτερικών τους χώρων. Η άσφαλτος		
	T12	144 - 156	516 - 563	ζεκολλαει απο τους δρόμους.		



Σχήμα 3.4. Συνδυαστικός χάρτης ετήσιας συχνότητας και έντασης σιφώνων ξηράς την περίοδο 2000-2014 (αναπαραγωγή από Sioutas et al., 2015).

3.1.4. Ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα

Οι διάφορες διακυμάνσεις της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου είναι πιο έντονες πάνω από την ξηρά, γιατί πάνω από αυτή οι αναταρακτικές κινήσεις και το ανάγλυφο δημιουργούν στροβίλους που άλλοτε επιταχύνουν και άλλοτε ελαττώνουν την ένταση του ανέμου.

Τα κύματα όρους ή ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα (Lee-side wind) είναι άνεμοι που παρατηρούνται στην υπήνεμη πλευρά βουνών (Klemp and Lilly, 1975; Durran 1986; Helmis et al., 2000). Σχηματίζονται όταν συμβαίνει υπερπήδηση του όρους από ένα ρεύμα αέρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ταλαντώσεων και διάδοση του ατμοσφαιρικού κυματισμού σε μεγάλη απόσταση προς την υπήνεμη πλευρά του όρους (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Στις περιπτώσεις αρκετά ψηλών βουνών, η ένταση του ανέμου στην υπήνεμη πλευρά μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές και είναι δυνατή η δημιουργία, κοντά στο έδαφος και κάτω από την κορυφή του κύματος όρους, μια εξαιρετικά στροβιλώδους στάσιμης κλειστής κυκλοφορίας (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5. Συγκέντρωση ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά ορέων (πηγή: The Met. Office, 1993)

Τα κύματα όρους είναι πολύ επικίνδυνο φαινόμενο διότι συνοδεύονται από ισχυρούς κατακόρυφους ανέμους που μπορεί να υπερβαίνουν τα 80kn (42m/s ή 152km/h) (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Το φαινόμενο στην Ελλάδα έχει καταγραφεί από την ΕΜΥ σε περιοχές

όπως η Πίνδος, Θεσσαλία, Ανατολική Πελοπόννησος, Πήλιο, Εύβοια και Κρήτη, κυρίως λόγω προβλημάτων που προκαλούνται στις αερομεταφορές.

Σύμφωνα με τους (Koletsis et al., 2009) στην περιοχή των Ιωαννίνων κατά τη διάρκεια ανεμοκαταιγίδας τύπου leeside τον Μάρτιο του 1998, σημειώθηκε η πιο έντονη ανεμοκαταιγίδα τις τελευταίας δεκαετίας στην ΝΔ Ελλάδα. Οι άνεμοι, εντάσεως περί τα 30m/s ή 108km/h σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου, προκάλεσαν βλάβες σε στέγες, ξερίζωμα δέντρων και βλάβες στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και πλημμύρες πλησίον της λίμνης. Σύμφωνα με τους ερευνητές η σφοδρότητα του ανέμου αποδόθηκε στην αλληλεπίδραση μιας μετακινούμενες αέριες μάζας από τα ΒΑ με το όρος Μιτσικέλι. Η επίδραση της τοπογραφίας ήταν καθοριστική στην ανάπτυξη των ισχυρών ανέμων που έπληξαν την περιοχή. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται απόσπασμα από την προσομοίωση του φαινομένου.



Σχήμα 3.6. Μοντέλο προσομοίωσης ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά στο όρος Μιτσικέλι, κατά τη διάρκεια της ανεμοκαταιγίδας του 1998 (πηγή: Koletsis et al. 2009)

Παρόμοιο μοντέλο αλλά πιο απλοποιημένο παρατίθεται στο σχήμα 3.7, όπου σημειώνονται οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με την τοπογραφία του όρους.



Σχήμα 3.7. Μοντέλο προσομοίωσης ρευματογραμμών στην υπήνεμη πλευρά, η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανέμου σε m/sec (πηγή: The Met. Office, 2017)

Οι προϋποθέσεις για την δημιουργία των ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων είναι:

- ο άνεμος να πνέει με ταχύτητα 20kn (13m/s ή 47km/h) ή και περισσότερο στην κορυφή της οροσειράς με αυξανόμενη ταχύτητα πάνω από αυτή.
- ο άνεμος να πνέει με μικρή καθ' ύψος απόκλιση στη διεύθυνση και με γωνία μικρότερη των 30° ως προς την κάθετη προς την οροσειρά κατεύθυνση
- να υπάρχει ένα ευσταθές στρώμα αέρα μεταξύ της οροσειράς και μερικών χιλιάδων ποδών υψηλότερα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα ενδεχομένως θα μπορούσαν να ερμηνεύσουν μηχανικές βλάβες στοιχείων του ΕΣΜΗΕ, με περαιτέρω αναφορά στην επόμενη παράγραφο.

3.2. Διακινδύνευση του ΕΣΜΗΕ από σίφωνες ξηράς και ορογραφικά κύματα

Οι χάρτες που παρατίθενται στην παρούσα παράγραφο είναι ενδεικτικοί της επικινδυνότητας και του κινδύνου που αφορούν στα φαινόμενα των σιφώνων και των ορθογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων, καθώς επιδέχονται περιορισμούς από τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν. Συγκεκριμένα για τους σίφωνες ξηράς αναφέρεται ότι τα διαθέσιμα δημοσιευμένα δεδομένα εν επιτρέπουν την πλήρη και σαφή εικόνα εκδήλωσης του φαινομένου στον ελλαδικό χώρο. Το φαινόμενο δεν καταγράφεται από μετεωρολογικά όργανα μέτρησης, αλλά αποσπασματικά βάσει μαρτυριών τα τελευταία 15 έτη περίπου, γεγονός που από μόνο του θέτει περιορισμούς ως προς την πλήρη αποτύπωση της χωρικής και χρονικής κατανομής του φαινομένου.



Σχήμα 3.8. Χάρτης επικινδυνότητας σιφώνων ξηράς ανά νομό (επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων παραγράφου 3.1.3 από Sioutas et al., 2015).

Στον χάρτη του σχήματος 3.8 ομαδοποιήθηκαν και ταξινομήθηκαν τα βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με την χωρική κατανομή των σιφώνων ξηράς ισχυρής έντασης, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Διακρίθηκαν τέσσερεις κλάσεις από πολύ υψηλής (ΠΥ) έως και πολύ χαμηλής (ΠΧ), ενώ για τους νομούς όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα δεν ελήφθησαν υπόψη στην ταξινόμηση. Παρατηρώντας τον χάρτη επικινδυνότητας εκδήλωσης σιφώνων ξηράς στην Ελλάδα, διαπιστώνεται ότι ΒΔ Πελοπόννησος και ιδιαίτερα ο νομός Ηλείας χαρακτηρίζονται ως νομός πολύ υψηλής επικινδυνότητας. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την βιβλιογραφία ο χαρακτηρισμός δεν αφορά όλη την έκταση του νομού αλλά περιοχές που βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή.

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δημοσιευμένα δεδομένα, ως προς την συχνότητα εμφάνισης και την ταχύτητα του ανέμου, η εν λόγω περιοχή πλήττεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σιφώνων 2,4/έτος, κατηγορίας T6-7. Οι ταχύτητες αυτής της κατηγορίας ξεπερνούν τα 260km/h και σύμφωνα με την κλίμακα TORRO δύναται να προκαλέσουν καταστροφή μόνο σε στοιχεία του Συστήματος Μεταφοράς αλλά και σε οποιοδήποτε φυσικό ή τεχνικό στοιχείο της περιοχής. Άλλες περιοχές καταγραφής σιφώνων κατηγορίας T6-7 της κλίμακας TORRO, αλλά με μικρότερη συχνότητα εμφάνισης, είναι η Θεσσαλονίκη, περιοχές της Θεσσαλίας και τις Αχαΐας, τα νησιά του Ιονίου και η Ρόδος.

Λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των εκτιθέμενων στοιχείων ο κίνδυνος υποβιβάζεται στην εν λόγω περιοχή, κατά μια κλάση (σχήμα 3.9). Αντίστοιχα στο νομό Αττικής, λόγω της υψηλής πυκνότητας των εκτιθέμενων στοιχείων, ο κίνδυνος μπορεί να θεωρηθεί μέσης κλάσης, όπου βέβαια η ένταση των σιφώνων είναι μικρότερης κατηγορίας και θεωρητικά δεν μπορεί να προκαλέσει σημαντική μηχανική βλάβη όπως κάμψη πυλώνα. Η περιοχή της Ρόδου αναδείχθηκε ως πολύ υψηλής κλάσης κινδύνου, ωστόσο σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή υπεισέρχονται μεθοδολογικοί περιορισμοί. Η τιμή που καθόρισε την κλάση κινδύνου επηρεάστηκε από την περιορισμένη έκταση του νομού, η οποία ελέγχει την πυκνότητα άρα και την διακινδύνευση στην περιοχή. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί υπερεκτιμημένη, συγκριτικά με τους υπόλοιπους νομούς, χωρίς να αποκλείεται η πρόκληση βλάβης από σίφωνα ξηράς εφόσον στην περιοχή έχει καταγραφεί ήδη ένα γεγονός της κατηγορίας T6-7.



Σχήμα 3.9. Χάρτης κινδύνου σιφώνων ξηράς ανά νομό.

Όσον αφορά στα ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα υπάρχουν πολύ συγκεκριμένες περιοχές στην Ελλάδα όπου πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εκδήλωση του φαινομένου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών ανέμων. Οι περιοχές αυτές επισημαίνονται στον χάρτη του σχήματος 3.10 με κόκκινες ελλείψεις, όπου με γκρι σκιά σημειώνονται οι περιοχές που δυνητικά ικανοποιούν τα δύο από τα τρία κριτήρια δημιουργίας ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων.

Τα κοινά χαρακτηριστικά των περιοχών είναι η κατεύθυνση των ισχυρών ανέμων που πνέουν, κυρίως Β ή ΒΑ (ενδεικτικά τον μήνα Ιανουάριο), ως προς τον προσανατολισμό του αναγλύφου

κατά μήκος του άξονα της οροσειράς και του προσανατολισμού των πρανών στην υπήνεμη πλευρά της οροσειράς.

Μη λαμβάνοντας κανείς υπόψη το μηχανισμό κίνησης των ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων, η υπήνεμη πλευρά θα έπρεπε να θεωρηθεί ως προστατευμένη από ισχυρούς ανέμους λόγω της τοπογραφίας, συνεπώς και τα εγκατεστημένα στοιχεία του δικτύου. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τον μηχανισμό ανάπτυξης των ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων τότε ενδεχομένως να εξηγείται η ανάπτυξη ισχυρών ανέμων στην υπήνεμη πλευρά και ενδεχόμενες μηχανικές βλάβες σε εγκαταστάσεις επ' αυτής. Όπως φαίνεται και στα σχήματα της παραγράφου 3.1.4 οι ρευματογραμμές συμπυκνώνονται στους πρόποδες της υπήνεμης πλευράς της οροσειράς και η ένταση του ανέμου δύναται να διπλασιαστεί συγκριτικά με αυτή στη κορυφή της οροσειράς αναπτύσσοντας παράλληλα την χαρακτηριστική στροβιλώδη κυκλοφορία τύπου rotor. Επιπροσθέτως, ο παγετός που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου και δη σε περιοχές με προσανατολισμό πρανών του αναγλύφου προς τα δυτικά, που μπορεί να επιδεινώσει την κατάσταση μειώνοντας την απαιτούμενη ένταση ανέμου για πρόκληση βλάβης.

Όλα τα προαναφερόμενα σχετικά με τα ορογραφικά ατμοσφαιρικά κύματα δεν βασίζονται ούτε σε μετρήσεις στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ή της βιβλιογραφίας, επίσης δεν προέκυψαν από δημοσιευμένα αριθμητικά μοντέλα προσομοιώσεις των εν λόγω περιοχών. Αποτελούν αποτέλεσμα απλής κριτικής σκέψης που προέκυψε από τη μελέτη των βιβλιογραφικών πηγών στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και για αυτό το λόγο δεν παρατίθενται ως συμπέρασμα στο κεφάλαιο που ακολουθεί.


Σχήμα 3.10. Χάρτης μέσης ετήσιας έντασης ανέμου(πηγή: www.rae.gr) με υπέρθεση περιοχών (γκρι) που πληρούν τις μορφολογικές προϋποθέσεις ανάπτυξης ορογραφικών ατμοσφαιρικών κυμάτων (βέλη: κατεύθυνση πνοής ανέμου τον μήνα Ιανουάριο, πηγή Φλόκας 1997).

4. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Ερμηνεύοντας τον τελικό κατηγοριοποιημένο χάρτη ως προς τη μέθοδο, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Σε εθνική κλίμακα η κλάση πολύ υψηλής επιδεκτικότητας καταλαμβάνει το 9% της περιοχής μελέτης, η υψηλής επιδεκτικότητας σε ποσοστό 15%, η μέσης επιδεκτικότητας σε ποσοστό 23%, η χαμηλής επιδεκτικότητας σε ποσοστό 29% και τέλος η κλάση πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας σε ποσοστό 24%. Συνεπώς το 24% της χώρας χαρακτηρίστηκε από υψηλές και πολύ υψηλές τιμές του συντελεστή LSI.

• Το γεωγραφικό διαμέρισμα με το μεγαλύτερο ποσοστό εκτάσεων υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας είναι η Δυτική Ελλάδα και ακολουθεί η Πελοπόννησος.

Από τον υπολογισμός της πυκνότητας κατολισθήσεων για κάθε μια κλάση προκύπτουν τα εξής:

Όσον αφορά στον παράγοντα λιθολογία οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στο φλύσχη και τον ασβεστόλιθο Πίνδου 8^η και 1^η κλάση, αυτό ενδεχομένως σχετίζεται με την έκταση του δεύτερου αλλά σε κάθε περίπτωση το ίδιο επαληθεύεται και από την βιβλιογραφία οπότε δεν τίθεται θέμα αμφισβήτησης.

• Όσον αφορά στον παράγοντα κλίση οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στη 2^{η} και 3^{η} κλάση (10° - 30°), αυτό ενδεχομένως σχετίζεται με τις κλίσεις που αναπτύσσει ο σχηματισμός του φλύσχη όπου χωροθετούνται οι περισσότερες κατολισθήσεις.

• Όσον αφορά στον παράγοντα απόσταση από το οδικό δίκτυο οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στην 1^{η} και 2^{η} κλάση, αναμενόμενο καθώς το ίδιο επαληθεύεται και από την βιβλιογραφία.

 Όσον αφορά στον παράγοντα πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στην 3^η και 4^η κλάση, αυτό δεν σχολιάζεται στην βιβλιογραφία. Όσον αφορά στον παράγοντα απόσταση από τα ρήγματα οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στην 1^η και 2^η κλάση, αναμενόμενο καθώς το ίδιο επαληθεύεται και από την βιβλιογραφία.

Όσον αφορά στον παράγοντα υψόμετρο οι μεγαλύτεροι συντελεστές βαρύτητας αναδείχθηκαν στην 5^η και 3^η κλάση, με την πρώτη να αντιστοιχεί σε υψόμετρα 800-1.000m αντίστοιχα.

Όσον αφορά στον παράγοντα χρήσης γης με μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας αναδείχθηκαν η 3^η κλάση, που αντιστοιχεί στο ανθρωπογενές περιβάλλον, που χαρακτηρίζεται ως παράδοξο ως προς την ερμηνεία του φαινομένου άλλα εξηγείται λόγω της μικρής έκτασης που καταλαμβάνει η συγκεκριμένη κατηγορία. Κανονικά θα έπρεπε να εξαιρεθεί ωστόσο δεν φάνηκε να επηρεάζει τον τελικό χάρτη.

Όσον αφορά στην αξιοπιστία της μεθόδου αναφέρεται ότι η αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων που αποτελούν επίπεδα παραγόντων και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά επηρέασε σημαντικά τους συντελεστές βαρύτητας και ως εκ τούτου και τους τελικούς χάρτες επικινδυνότητας κατά συνέπεια και τον εκτιμώμενο κίνδυνο. Στον ίδιο βαθμό η μέθοδος επηρεάζεται και από τον τρόπο καταγραφής των δεδομένων συσχέτισης, που στην συγκεκριμένη περίπτωση περιορίζονται σε κατολισθήσεις πλησίον του οδικού δικτύου, για τις οποίες πιθανότατα ο προσδιορισμός θέσης δεν έγινε με συστήματα εντοπισμού θέσης ακριβείας.

Με δεδομένα όλα τα προαναφερόμενα η εξαγωγή των γενικών συμπερασμάτων σχετικά με την επιδεκτικότητα των περιοχών ενδιαφέροντος σε κατολίσθηση διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Στην Ανατολική Πελοπόννησο αναδείχθηκαν περιοχές που κατατάχθηκαν στις κλάσεις πολύ χαμηλής και χαμηλής επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση. Τοπικά μεταξύ Μεγαλόπολης-Σπάρτης αναδείχθηκαν περιοχές υψηλής κλάσης που οφείλονται στην υψηλή τιμή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και στο πρανές που έχει δημιουργηθεί από το ρήγμα της Σπάρτης και δύναται να προκαλέσει σεισμό μεγαλύτερο του 6,5M_w, σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Σε περίπτωση ενεργοποίησης του ρήγματος και γένεση σεισμού μεγάλου μεγέθους μπορεί να προκληθούν κατολισθήσεις στην ευρύτερη περιοχή και κυρίως κατά μήκος του ίχνους του.

- Στην Β. Πελοπόννησο περιοχές μεταξύ Πάτρας-Αιγίου παρουσιάζουν υψηλή έως και πολύ υψηλή επιδεκτικότητα. Στο τμήμα αυτό εκτελούνται έργα για την κατασκευή του αυτοκινητόδρομο της Ολυμπίας Οδού, και ως εκ τούτου το ανάγλυφο της περιοχής έχει δεχθεί έντονη ανθρωπογενή παρέμβαση. Επίσης πρόεκυψαν άκομα δύο εναυσματικοί παράγοντες, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή είναι υψηλό και στην ευρύτερη περιοχή είναι χαρτογραφημένα ενεργά ρήγματα που υπό προϋποθέσεις μπορούν να προκαλέσουν σεισμό μεγαλύτερο του 6,5M_w.
- Στην Δυτική Πελοπόννησο περιοχές μεταξύ Πύργου-Μεγαλόπολης και Πύργου-Πάτρας αναδείχθηκαν περιοχές που κατατάσσονται στην υψηλή και πολύ υψηλή κλάση. Στην πρώτη περίπτωση χαρτογραφούνται Νεογενείς σχηματισμούς, μαργαϊκής κυρίως σύστασης και ταυτόχρονα υψηλό μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης.
- Στην Δυτική Ελλάδα καταγράφεται η μεγαλύτερη συχνότητα περιοχών με υψηλή και πολύ υψηλή επιδεκτικότητα. Περιοχές μεταξύ Άρτας-Ιωαννίνων, Άρτας-Καρδίτσα και Αγρινίου-Λαμίας σημειώνεται η μέγιστη πυκνότητα κατολισθήσεων στον Ελλαδικό χώρο. Κυρίαρχο ρόλο παίζει ο παράγοντας της βροχόπτωσης, συνδυαστικά με την δυσμενή γεωτεκτονική θέση και τη λιθολογία. Κατολισθήσεις αναμένονται περισσότερο μετά από έντονη και παρατεταμένη βροχόπτωση, χωρίς να αποκλείονται οι καταπτώσεις βράχων σε περίπτωση σεισμού. Επίσης, στην περιοχή Ιωαννίνων-Μετσόβου αναδείχθηκαν περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας. Αν και οι παράγοντες βροχόπτωση και λιθολογία λαμβάνουν τους μέγιστους συντελεστές βαρύτητας, δεν αποκλείεται να προκληθούν και καταπτώσεις βράχων μετά από σεισμό, όπως συνέβη πρόσφατα μετά τον σεισμό μεγέθους 5,3 στην περιοχή των Ιωαννίνων.
- Στη νήσο της Λευκάδας και της Κεφαλονιάς όπου καταγράφονται συστηματικά κατολισθήσεις, μετά από τους ισχυρούς σεισμούς, αναδείχθηκαν τοπικά περιοχές πολύ υψηλή επιδεκτικότητας, με χαρακτηριστικότερες την περιοχή δυτικά του Αθανίου στο νοτιοδυτικό άκρο της Λευκάδας και τις νότιες απολήξεις του Αίνου στη νήσο της Κεφαλονιάς.
- Στην Στερεά Ελλάδα και την Εύβοια οι περιοχές κατατάχθηκαν κατά κύριο λόγο σε κλάσεις χαμηλής έως πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας. Προβλήματα από την εκδήλωση κατολισθήσεων καταγράφονται τοπικά στην περιοχή της Βόρειας Εύβοιας και του Πηλίου τα οποία αναμένονται κυρίως μετά από έντονες βροχοπτώσεις, ωστόσο δεν αποκλείονται και οι σεισμικές κατολισθήσεις από ενεργοποίηση ρήγματος των Σποράδων.
- Στην Βόρεια Ελλάδα το μεγαλύτερο ποσοστό των εκτάσεων χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλής έως χαμηλής επιδεκτικότητας, εφόσον οι περισσότεροι παράγοντες έλαβαν

αρνητικούς συντελεστές βαρύτητας. Η εκδήλωση κατολίσθησης στον τομέα αυτό έχει τοπικό χαρακτήρα. Στην Δυτική Μακεδονία υψηλή επιδεκτικότητα σημειώθηκε τοπικά στις ορεινές περιοχές νότια της λίμνης Πολυφύτου, όπου χαρτογραφούνται μη συνεκτικά Νεογενή ιζήματα. Πλέον αυτού το ανάγλυφο της περιοχής δέχεται έντονη ανθρωπογενή επίδραση από τις λατομικές δραστηριότητες εξόρυξης λιγνίτη.

 Στην Κρήτη περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας αναδείχθηκαν σε περιοχές μεταξύ Ηρακλείου-Μοιρών και Ιεράπετρας-Σητείας, κυρίως λόγω του έντονου αναγλύφου και της υψηλής βροχόπτωσης στις ορεινές περιοχές.

Όσον αφορά στο φαινόμενο των σιφώνων, που σύμφωνα με την βιβλιογραφία παρουσιάζει αυξητική τάση στην Ελλάδα, διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η ΒΔ Πελοπόννησος διατρέχει τον υψηλότερο κίνδυνο λόγω ισχυρών σιφώνων συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές της χώρας
- Στην εν λόγω περιοχή καταγράφεται η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σιφώνων
 2,4/έτος, κατηγορίας T6-7.
- Από την μελέτη της βιβλιογραφία προκύπτει ότι οι ταχύτητες στην περιοχή της Πελοποννήσου δύναται να προκαλέσουν καταστροφή στοιχείων του ΕΣΜΗΕ, ωστόσο λόγω της πολύ χαμηλής πυκνότητας των στοιχείων και της μικρής έκτασης του φαινομένου ο κίνδυνος για μηχανικές βλάβες περιορίζεται σημαντικά.
- Καταστροφή πυλώνα από σίφωνα (κατηγορίας T6-7) μπορεί να συμβεί και σε άλλες περιοχές της χώρας, αλλά με πολύ μικρότερες πιθανότητες, αυτές περιοχές κοντά στην παράκτια ζώνη της Θεσσαλονίκης, της Αχαΐας, τα νησιά του Ιονίου και τη Ρόδο.

Προτάσεις:

Στις περιοχές πολύ υψηλής επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση όπου διέρχονται οι ΓΜ του ΕΣΜΗΕ προτείνεται παρακολούθηση του φαινομένου. Συγκεκριμένα για τη βελτίωση της ποιότητας των αξιολογήσεων κινδύνου κατολισθήσεων προτείνεται:

- Εκτίμηση κινδύνου κατολισθήσεων ποσοτικά και ποιοτικά σε τοπική και περιφερειακή κλίμακα, στις περιοχές που αναδείχθηκαν ως υψηλής επικινδυνότητας.
- Για την εκτίμηση του κινδύνου στο μέλλον είναι απαραίτητη η τήρηση καταλόγου των κατολισθητικών γεγονότων και η απογραφή των βασικών χαρακτηριστικών τους

(αιτίας, έκτασης της βλάβης) καθώς και η καταγραφή οποιασδήποτε εξέλιξης του φαινομένου ακόμα και σε γειτονικές περιοχές.

 Χρήση GIS και δημιουργία δυναμικών χαρτών επιδεκτικότητας των εδαφών σε κατολίσθηση όπου θα σημειώνεται η θέση του υφιστάμενου Συστήματος Μεταφοράς, ώστε να πληροφορείτε ο μελετητής μηχανικός που σχεδιάζει νέες χαράξεις ΓΜ για την πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων.

5. Βιβλιογραφία

- Ahrens, G.D., 1999. Βασικές Αρχές Μετεωρολογίας-Μια Πρόσκληση στην Ατμόσφαιρα. 2η Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστέρι-Αθήνα.
- Aleman M., 2001. Rescuers flee aftershocks—search resumes for hundreds in El Salvador. The Denver Post, Denver, Colorado, 15 January: p. 1A, 18A
- Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives», Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Alexander, D., 1993. Natural Disasters. UCL Press, London, 632 p.
- Angeli, M.G., Gasparetto, P., Menotti, R.M., Pasuto, A., Silvano, S., 1994. A system of monitoring and warning in a complex landslide in Northeastern Italy. Landslide News 8, 12-15.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2, 3–14.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. 2007. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 637–650.
- Armijo, R., Lyon-Caen, H., and Papanastassiou, D., 1991. «A possible normal-fault rupture for the 464 BC Sparta earthquake». Nature 351: 137-139. Ανακτήθηκε στις 2009-10-18.
- Baltzer A., 1875. Über bergstürze in den Alpen. Verlag der Schabelitz'schen buchhandlung (C. Schmidt), Zurich, 50p.
- Bates P.D., 2004. Remote sensing and flood inundation modelling. Hydrol Process. 18:2593–2597.
- Bathrellos, G.D., Kalivas, D.P., Skilodimou H.D., 2009. Landslide susceptibility mapping models, applied to natural and urban planning, using G.I.S. Jou. Estudios Geológicos 65,1, 49–65.
- Biolchi S.; Furlani S.; Devoto S.; Gauci R.; Castaldini D.; Soldati M. 2016. Geomorphological identification, classification and spatial distribution of coastal landforms of Malta (Mediterranean Sea) – Journal of Maps, 12,1, 1744-5647.
- Bird, J.F., Bommer, J.J., 2004. Earthquake losses due to ground failure. Engineering Geology 75, 147–179.

- Borgatti L., Soldati M., Carton A., Corsini A., Gallupo A., Ghinoi A., Marchetti M., Oddone E., Panizza M., Pasuto A., Pellegrini G.B., Schiavon E., Siorpaes C., Surian N., Tagliavini F., 2004. Geomorphology and slope instability in the Dolomites (Northern Italy): from Lateglacial to recent geomorphological evidence and engineering geological applications. Memorie des crittive della carta geologica d' Italia, 63,4, 0536-0242.
- Borgatti, L., Soldati, M., 2010. Landslides as a geomorphological proxy for climate change: A record from the Dolomites (northern Italy). Geomorphology, 120, 56–64.
- Brabb E.E., Harrod, B.L., 1989 Landslides: extent and economic significance. Proceedings of the 28th International Geological Congress: Symposium on Landslides. Washington DC, 17 July 1989, 385 pp.
- Brunsden D., Rrior D.B., 1984. Slope Instability, Chichester, John Wiley & Sons Ltd.
- Bull W.B., 1964. Alluvial fans and near-surface subsidence in Western Fresno County, California, U.S. Geological Survey Professional Paper 437-A. U.S. Geological Survey, Denver, CO
- Buma, J., Dehn, M., 1998. A method for predicting the impact of climate change on slope stability. Environmental Geology 35, 190–196.
- Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2002. Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin, CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication, n. 2116.
- Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. Natural Hazards, 20, 2-3, 117-135.
- Catani F, Casagli N, Ermini L, Righini G, Menduni G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River Basin. Landslide 2: 329–342.
- Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T., Wang, G., 2010. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Geomorphology 118, 225–238.
- Coates, D. R., 1977, Landslide perspectives, in D. R. Coates, ed., Reviews in engineering geology, v. 3, Landslides: Boulder, Colo., Geological Society of America, 3-21.
- Cooper R.G., 2007. Mass Movements in Great Britain, Geological Conservation Review Series, No. 33, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, 348 pp.

- Corsini A., Pasuto a., Soldati M., 2004. Landslides and Climate Change in the Alps Since the Late-Glacial: Evidence of Case Studies in the Dolomites (Italy). In Landslides in Research, Theory and Practice.
- Croizer, M.J., 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment. Croom Helm, 17 London.
- Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 43: 27. doi:10.1007/BF02590167
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Shuster,
 R.L. (eds) Landslides: Investigation and Mitigation. Transp Res Board, Spec Rep 247, 36-75.
- Dai, F., Xu, C., Yao, X., Xu, L., Tu, X., Gong, Q., 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China. J Asian Earth Sci 40, 883–895.
- Dehn, M., Buma, J., 1999. Modelling future landslide activity based on general circulation models. Geomorphology, 30, 175-187.
- Dehn, M., Burger, G., Buma, J., Gasparetto, P., 2000. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. Engineering Geology 55, 3, 193–204.
- Devoto S.; Forte E.; Mantovani M.; Mocnick A.; Pasuto A.; Piacentini D.; Soldati M., 2013. Integrated Monitoring of Lateral Spreading Phenomena Along the North-West Coast of the Island of Malta, Landslide Science and Practice, Springer-Verlag Berlin Heidelberg DEU, 2, 235-241.
- Diakakis M., 2011. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece. Natural Hazards, 56, 3, 803-814.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. & M.-L. Ibsen (Eds.) 1996. Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Wiley & Sons, Chichester.
- Dikau, R., Schrott, L., 1999. The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. Geomorphology 30, 1-12
- Doutsos, T., Kokkalas S., 2001. Stress and deformation in the Aegean region. Journal of Structural Geology, 23, 455-472.

- Durran, D.R., 1986. Another look at downslope windstorms. Part I: On the development of supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid J. Atmos. Sci., 43, pp. 2527–2543.
- Erskine, C.F., 1973, Landslides in the vicinity of the Fort Randall Reservoir, South Dakota: U.S. Geological Survey Professional Paper 675, 64.
- Faccioli E., 1995. Induced Hazards: Earthquake triggered Landslides, Proceedings 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France,1-24.
- Feng, X., Guo A., 1985. Earthquake landslides in China. In proceedings, 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo: Japan Landslide society, 339-346.
- Ferretti A., Prati C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geosiensce and Remote Sensing, 39, 1, 8-20.
- Flocas, A.A., 1992. Lessons of Meteorology and Climatology (in Greek), 296–299.
- Gallousi, C., Koukouvelas, I., 2006. The interactions of tectonics and surface processes: impact of landslide-dominated catchments on landscape evolution, NW Corinth Gulf (Greece). In: Koukouvelas, I. (Ed), Proceedings of the 11th International Symposium on Natural and Human Induced Hazards, Patras, Greece.
- Gallousi, C., Koukouvelas, I.K., 2007. Quantifying geomorphic evolution of earthquaketriggered landslides and their relation to active normal faults. An example from the Gulf of Corinth, Greece. Tectonophysics 440, 85–104.
- Galve, J.P.; Tonelli, C.; Gutierrez, F.; Lugli, S.; Vescogni, A.; Soldati, M. 2015. New insights into the genesis of the Miocene collapse structures of the island of Gozo (Malta, central Mediterranean Sea) – Journal of the Geological Society, 172, 336.
- Garcia-Aristizabal, A., W. Marzocchi G. Woo, A. Reveillere, J. Douglas, G. Le Cozannet, F. Rego, C. Colaco, K. Fleming, M. Pittore, S. Tyagunov, S. Vorogushyn, F. Nadim, B. V. Vangelsten, W. ter Horst 2012. Review of existing procedures for multi-hazard assessment, Deliverable D3.1., New methodologies for multihazard and multi-risk assessment methods for Europe (MATRIX).
- Gioti E., Riga C., Kalogeropoulos K., Chalkias C., 2012. Construction of a GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data, Proceedings of 4th international workshop of the EARSeL SIG "Geological Applications" titled Remote Sensing and Geology.

- Goudie A.S., 2010. Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Eds. Alcantara-Ayala I., Goudie A.S., Cambridge University Press.
- Gournellos T., Chalkias C., Tsagas D., 2006. Landslide susceptibility Zonation of Greece using Fuzzy Logic and GIS, Geographies, 12, 114-126.
- Greenway D.R., 1987. Vegetation and slope stability. In: Anderson MG, Richards KS (eds) Slope stability. Wiley, New York, 187–230.
- Guzzetti F., 2002. Landslide hazard assessment and risk evaluation: overview, limits and prospective. 3rd MITCH Workshop Floods, Droughts and Landslides: Who plans, who pays. 24-26 November 2002, Potsdam, Germany.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M. & Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. Geomorphology, 31, 181-216.
- Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Rossi M., Valigi D., 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth and Planetary Science Letters, 279, 222–229.
- Haq M, Akhtar M, Muhammad S, Paras S, Rahmatullah J., 2012. Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: a case study of Sindh province, Pakistan. Egypt J Remote Sens Space Sci. 15:135–141.
- Harp, E.L., Jibson, R.W., 1996. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake. Bull Seismol Soc Am 86, S319–S332.
- Haugerud, R.A., Harding, D.J., Johnson S.Y., Harless J.L., Weaver C.S., Brian L.S, 2003. High-resolution LiDAR topography of the Puget Lowland, Washington-A Bonanza for earth science: GSA Today, Geological Society of America, 4–10.
- Heim A., 1932. Landslides and human lives (Bergsturz and Menschenleben). In: Skermer, N. (ed) Bi-Tech Publishers, Vancouver, BC, 196.
- Helmis C.G., Flocas H.A., Kalogiros J.A., Asimakopoulos D.N., 2000. Strong downslope winds and application of hydraulic-like theory J. Geophys. Res., 105, pp. 18039–18051
- Hervás, J., Barredo, J.I., Rosin, P.L., Pasuto, A., Mantovani, F., Silvano, S., 2003. Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. Geomorphology 54, 63–75.
- Highland L.M., Bobrowsky, P., 2008. The landslide handbook-A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

- Huang R., Li Y., 1992. Logical model of slope stability prediction in the three gorges reservoir area, China. In: Proceedings of the sixth international symposium on landslides-Glissements de terrain, Balkema, Christchurch, 977–981.
- Hungr I., Leroueil S., Picarelli L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, DOI 10.1007/s10346-013-0436-y.
- Hutchinson J.N., 1987. Mechanism producing large displacements in landslides on preexisting shears. Mem. Soc Geol of China 9, 175–200.
- Hutchinson J.N., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides (Ed: Bonnard, C.), 1, 3-35. Rotterdam: Balkema
- Hutchinson J.N., 1995 Keynote paper: Landslide hazard assessment. Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, 36, 6, 1897–1910.
- Jaafari A, Najafi A, Pourghasemi HR, Rezaeian J, Sattarian A., 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. Int J Environ Sci Technol. 11, 909–926.
- Jibson, R.W., Keefer, D.K., 1993. Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone. Geological Society of America Bulletin 105, 521-536.
- Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A., 1998. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps—An example from the Los Angeles, California, area. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-113, 17 p., 2 pl.
- Kappes, M. S., Keiler M.K., von Elverfeld, Glade T., 2012. Challenges of Analyzing Multihazard Risk: A Review, Natural Hazards 64 (2): 1925–1958. doi:10.1007/s11069-012-0294-2.
- Karymbalis E., Chalkias C., Ferentinou M., Maistrali A., 2011: Flood Hazard evaluation in small catchments based on quantitative geomorphology and GIS modeling: The case of Diakoniaris torrent (W. Peloponnese, Greece), in Lambrakis et al. (eds) Advances in the research of Aquatic Environment, Springer –Verlag, Environmental Earth Sciences Series, I, 137-146.

- Karymbalis, E., Katsafados, P., Chalkias, C., Gaki-Papanastassiou, K., 2012. An integrated study for the evaluation of natural and anthropogenic causes of flooding in small catchments based on geomorphological and meteorological data and modeling techniques: The case of the Xerias torrent (Corinth, Greece), Zeitschrift für Geomorphologie, 56, 1, 45–67.
- Katsafados, P., Mavromatidis, E., Papadopoulos, A., Pytharoulis, I., 2011. Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on sea surface temperature. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp. 1233-1246.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin 95, 406-421.
- Keefer, D.K., Wilson, R.C., 1989. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In: Landslides in a Semi-arid Environment. Inland Geological Society, Riverside, CA, 2, 118-149.
- Keefer, D.K., Manson, M.W., 1998. Regional distribution and characteristics of landslides generated by the earthquake. In: Keefer, D.K. (Ed.), The Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989—Landslides. U.S. Geological Survey Professional Paper 1551-C, pp. C7-C32.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslide caused by earthquakes—A historical review. Surveys in Geophysics 23, 473-510.
- Keller E.A.; Blodgett R.H., 2005. Natural Hazards: Earth's Processes as Hazards, Disasters, and Catastrophes. Prentice Hall.
- Keul A.G., Sioutas M.V., Szilagyi W., 2009. Prognosis of central-eastern Mediterranean waterspouts. Atmos. Res. 93, 1–3, 426–436.
- Klemp J.B., Lilly D.K., 1975. The dynamics of wave-induced downslope winds J. Atmos. Sci., 32, pp. 320–339
- Koletsis I., Lagouvardos K., Kotroni V., Bartzokas A., 2009. Numerical study of a downslope windstorm in Northwestern Greece. Atmospheric Research, 94, 178–193.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. Geomorphology 74, 17 28.

- Koukis G., Rozos D., 1982. Geotechnical conditions and landslide movements in the Greek territory in relation to the geological structure and geotectonic evolution. Mineral Wealth 16, 53 69.
- Koukis G., Ziourkas C., 1991. Slope instability phenomena in Greece: a statistical analysis. Bull IAEG 43,47–60.
- Koukis G., Tsiambaos G., Sabatakakis N., 1994. Slope movements in the Greek territory: a statistical approach. In: Proceedings of 7th international IAEG congress, Balkema, Rotterdam, pp 4621–4628
- Koukis, G., Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 1996. Landslides in Greece: Research evolution andquantitative analysis. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. Balkema, Rotterdam, 1935–1940.
- Koukis G., Rozos D., Hatzinakos J., 1997. Relationship between rainfall and landslides in the formations of Achaia county, Greece. Proc. of International Symposium of I.A.E.G. in Engineering Geology and the Environment, A.A. Balkema, 1, 793-798, Rotterdam.
- Koukis G., Sabatakakis N., Nikolaou N., Loupasakis C., 2005. Landslide hazard zonation in Greece. Proceedings of the Open Symposium on landslide risk analysis and sustainable disaster management by International Consortium on Landslides, Washington, USA, 13– 14 October 2005, Chapter 37:291 – 296.
- Koukis G., Sabatakakis N., Ferentinou M., Lainas S., Alexiadou X., Panagopoulos A., 2009. Landslide phenomena related to major fault tectonics: rift zone of Corinth Gulf, Greece. Bull. Eng. Geol. and the Env., 215-229.
- Koukis, G., Sabatakakis, N., Nikolaou, N., Loupasakis, C., 2005. Landslides hazard zonation in Greece. Proc of open symp. on landslides risk analysis and sustainable disaster management by International Consortium on Landslides, Washington USA, Chapt 37 pp 291-296.
- Koukouvelas, I., Gallousi, C., Tsodoulos, I., Spanos D., et al., 2006. Correletion between tectonics and mass wasting in Central Greece. In: Koukouvelas, I. (Ed), Proceedings of the 11th International Symposium on Natural and Human Induced Hazards, Patras, Greece.
- Koukouvelas, I.K., Doutsos, T., 1996. Implications of structural segmentation during earthquakes: The 1995 Egion earthquake, Gulf of Corinth, Greece. J. Struct. Geol. 18, 1381-1388.

- Koukouvelas, I.K., Mpresiakas, A., Sokos, E., Doutsos, T., 1996. The tectonic setting and earthquake ground hazards of the 1993 Pyrgos earthquake, Peloponnese, Greece. J. Geol. Soc. London 152, 39-49.
- Kouli,M., Soupios,P. and Vallianatos,F., 2009: Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. Environ. Geol., 57, 483-497.
- Kyriazopoulos, V., Livadas, G., 1975. Pract. Meteorol., 296-298.
- Lee S., Choi J., Min K., 2004a. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. Int J Remote Sens 25,11, 2037–2052.
- Lee S., Ryu J., Won J., Park H., 2004b. Determination and application of the weight for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. Eng Geol 71, 289–302.
- Lee S., Talib J.A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. Environmental Geology 47: 982–990.
- Leroi E., 1997. Landslide risk mapping: problems, limitation and developments. In Landslide Risk Assessment, Cruden D, Fell R (eds). Balkema: Rotterdam; 239–250.
- Leroueil S., Locat J., Vaunat J., Picarelli L., Lee H., Faure R., 1996. Geotechnical characterization of slope movements. In: Senneset K (ed) Landslides. Balkema, Rotterdam 1, 53–74.
- Leroueil, S., Locat, J., Seve, G., Picarelli, L., Faure, R.M., 2001. Slopes and Mass Movements. In Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, R.K. Rowe Ed., Kluwer Academic Publishers.
- Liu Z., Nadim F., Garcia-Aristizabal A., Mignan A., Fleming K., Luna B., 2015. A three-level framework for multi-risk assessment. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 9(2), 59-74. doi: 10.1080/17499518.2015.1041989
- Livadas, G., 1954. Fish rain in western Macedonia. Meteorologika, No. 2, Publ. Met. Inst. Univ. Thess., Thessaloniki.
- Luzi L., Pergalani F., 2000. A correlation between slope failures and accelerometric parameters: the 26 September 1997 earthquake (Umbria–Marche, Italy). Soil Dyn Earthquake Eng 20, 301–313.

- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., Mastellone M. L., Di Ruocco A., 2012 "Basic Principles of Multi-risk Assessment: A Case Study in Italy, Natural Hazards 62, 2: 551–573.
- Marzorati, S., Luzi, L., Amicis, M.D., 2002. Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, 7, 565-577.
- Matsangouras I.T., Nastos P.T., Bluesteinb H.B., Sioutas M.V., 2014. A climatology of tornadic activity over Greece based on historical records. International Journal of Climatology, 34, 2538-2555.
- Matsangouras I.T., Nastos P.T., Bluesteinb H.B., Pytharoulis I., Papachristopouloua K., Migliettae M.M., 2017. Analysis of waterspout environmental conditions and of parentstorm behaviour based on satellite data over the southern Aegean Sea of Greece. International Journal of Climatology, 37, 1022-1039.
- Metternich G., Hurni L., Gogu R., 2005. Remote Sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. Remote Sensing of Environment, 98, 2-3, 284-303.
- Moel H.D., Vliet M.V., Aerts J.C.J.H., 2014. Evaluating the effect of flood damage-reducing measures: a case study of the unembanked area of Rotterdam, the Netherlands. Reg Environ Change. 14, 895–908.
- Montgomery D.R., Schmidt K.M., Dietrich W.E., Greenberg H.M., 2000. Forest clearing and regional landsliding in the Pacific Northwest. Geology 28, 311–314.
- Morgenstern N.R., Tschalenko J.S., 1967. Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. Géotechnique 17, 309–328.
- Morgenstern N.R., 1992. The evaluation of slope stability: a 25 year perspective. In: Seed R.B., Boulanger R.W. (eds). Stability and performance of slopes and embankments, ASCE Geotechnical Special Publication 31, 1, 1–26.
- Morton D.M., Alvares R.M., Campbell R.H., 2003. Preliminary Soil-Slip Susceptibility Maps, Southwestern California, US Geological Survey Open-File Report 03-17.
- Muzik I., 1996. Flood modeling with GIS-derived distributed unit hydrographs. Hydrologic Processes 10: 1401-1409.
- Nastos P.T, Matsangouras I.T., 2010. Tornado activity in Greece within the 20th century. Adv. Geosci. 26: 49–51.

- Nastos P.T., Matsangouras I.T., 2012. Composite mean and anomaly of synoptic conditions for tornadic days over north Ionian Sea (NW Greece). In Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Helmis CG, Nastos PT (eds). Springer: Berlin and Heidelberg, Germany, 639–645.
- Nastos P.T., Matsangouras I.T., 2014a. Analysis of synoptic conditions for tornadic days over western Greece. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14,9, 2409-2421.
- Nastos P.T., Matsangouras I.T., 2014b. Seasonal analysis of composite mean and anomaly of synoptic conditions during waterspout days over north Cretan Sea, Greece. In COMECAP 2014 Book of e-contributions. Proceedings 12th International Conference of Meteorology, Climatology and Physics of the Atmosphere, Kanakidou M, Mihalopoulos N, Nastos P (eds). Herakleio, Greece, Crete University Press, 299–303.
- Newman, M.E.J., 2005. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law: Contemporary Physics, v. 46, p. 323-351.
- Nichol J., Wong M. S., 2005. Detection and interpretation of landslides using satellite images, Land Degradation & Development, 16, 3, 243–255.
- Olshansky R.B., 1996. Planning for hillside development, American Planning Association Planning Advisory Service Report no. 466, 50.
- Owen, L.A., Kamp, U.K., Khattak, G.A., Harp, E.L., Keefer, D.K., Bauer, M.A., 2008. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake. Geomorphology 94, 1–9.
- Paciello, A., Rinaldis, D., Romeo, R., 2000. Incorporating ground motion parameters related to earthquake damage into seismic hazard analysis, Proc. 6th Int. Conf. on Seismic Zonation: Managing Earthquake Risk in the 21st Century, Oakland, CA, 321–326.
- Papanikolaou, I.D., Lekkas, E.L., Roberts, G.P., McGuire, B., Fountoulis, I.G., Parcharidis, I. & Foumelis, M., 2010. The 2009 L' Aquila earthquake: Findings and implications. AON BENFIELD UCL Hazard Research Centre, Department of Earth Sciences, Event Science report 02, University College London, 31p.
- Parcharidis I., Vassilakis E., Cooksley G. & Metaxas C., 2003. Sesmically-triggered landslide risk, assessment. In EarthquakeGeodynamics: seismic case studies, edited by E. Lekkas, WIT Press. p. 119-127.
- Parcharidis I., Kourkouli P., Karymbalis E., Foumelis M., Karathanassi V., 2011. Time series SAR Interferometry for ground deformation monitoring over small-scale tectonically

active deltaic environment (Mornos, Central Greece). Journal of Coastal Research (doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00106.1).

- Parcharidis, I., Benekos G., Derdelakos, K., Bountzouklis, C., Neokosmidis, S., Gkartzou, E., Drakatou M.L., 2015. Co-seismic surface deformation measured at Cefalonia Island during the period 28/1-8/2/2014 by high resolution SAR Interferometry, https://huaremotesensingteam.wordpress.com.
- Pasuto, A., Silvano, S., Bozzo, G.P., 1993. The Tessina landslide (Belluno, Italy). In: Panizza,
 M., Soldati, M., Barani, D. (Eds.), Proc. First European Intensive Course on Applied Geomorphology, Pubblicazioni Istituto di Geologia, Universita' degli Studi di Modena, Italy, pp. 63 69.
- Patel D.P., Srivastava P.K., 2013. Flood hazards mitigation analysis using remote sensing and GIS: correspondence with town planning scheme. Water Resour Manag. 27, 2353–2368.
- Petley D., 2010. Landslide Hazards. In: Geomorphological Hazards and Disaster Prevention, Alcantara-Ayala I., Goudie, A.S., (Eds.), Cambridge University Press, 63-73.
- Petley, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides, Geology, doi:10.1130/G33217.1.
- Pierson T.C., 2005. Hyperconcentrated flow-transitional process between water flow and debris flow. In: Jakob M, Hungr O (eds) Debris flows and related phenomena, Springer, Heidelberg, 8, 159–196.
- Polemio M, Sdao F., 1999. The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (southern Apennines, Italy). Eng Geol 53, 3–4, 297–309.
- Pradhan B, Hagemann U, Shafapour Tehrany M, Prechtel N., 2014. An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image. Comput Geosci. 63, 34–43.
- Prestininzi, A., Romeo, R., 2000. Earthquake-induced ground failures in Italy. Engineering Geology 58, 387–397.
- Reichenbach P., Galli M., Cardinali M., Guzzetti F., Ardizzone F., 2004. Geomorphological mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. In: Glade T., Anderson M.G., Crozier M.J. (eds.) Landslide risk assessment. John Wiley, 429-468.

- Ren, Z., Lin, A., 2010. Co-seismic landslides induced by the 2008 Wenchuan magnitude 8.0 earthquake, as revealed by ALSO PRISM and AVNIR2 imagery data. Int J Remote Sens 31, 3479–3493.
- Ren, Z., Zhang, Z., Dai, F., Yin, J., Zhang, H., 2013. Co-seismic landslide topographic analysis based on multi-temporal DEM—A case study of the Wenchuan earthquake. SpringerPlus 2, 544.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J., Chandler, R.J., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980– 1997. Soil Dynamic Earthquake Engineering 18, 325–346.
- Rosser N.J., Petley D.N., Lim M., Dunning S.A., Allison R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 363–375.
- Rozos D., Bathrellos D.G., Skilodimou D.H., 2010. Landslide Suseptibility Mapping of the Northeastern part of Achaia Perfecture using Analytical Hierarchical process and GIS techniques. Bulletin of the Geological Society of Greece, 2010 Proceedings of the 12th International Congress Patras, May, 2010.
- Sabatakakis N., Koukis G., Vassiliades E. Lainas S., 2013. Landslide susceptibility zonation in Greece, Natural Hazards, 65(1), 523 543, doi: 10.1007/s11069-012-0381-4.
- Saha A.K., Gupta R.P., Arora M.K., 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. Int J Remote Sens 23, 2, 357–369.
- Sanyal J., Lu X.X., 2009. Ideal location for flood shelter: a geographic information system approach. Flood Risk Manag. 2:262–271.
- Sassa K., 1996. Prediction of earthquake induced landslides. In: Senneset, K. (Ed.), Landslides. Balkema, Rotterdam, 115–132.
- Schuster, R.L., 1996a. Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Editors), Landslides: Investigation and Mitigation. National Academic Press, Washington, DC., Special Report, 247, 12-36.
- Schuster, R.L., 1996b. The 25 most catastrophic landslides of the 20th century, in Chacon, Irigaray and Fernandez (eds.), Landslides, Proc. Of the 8th International Conf. & Field Trip on Landslides, Granada, Spain, 27-28 Sept. Rotterdam: Balkema.

- Schuster R.L., Highland L.M., 2007. The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 1–27.
- Sdao F., Simeone V., 2007. Mass movements affecting Goddess Mefitis sanctuary in Rossano di Vaglio (Basilicata, southern Italy). J Cult Herit 8, 1, 77–80.
- Sharpe C.F.S., 1938. Landslides and related phenomena. Columbia University Press, NY, 1370.
- Sioutas M.V., 2003. Tornadoes and waterspouts in Greece. Atmos. Res. 67-68, 645-656.
- Sioutas M.V., Keul A.G., 2007. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment. Atmos. Res. 83: 542–557.
- Sioutas M.V., 2011. A tornado and waterspout climatology for Greece. Atmos. Res. 100: 344–356.
- Sioutas M, Szilagyi W, Keul A., 2013. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: environment and predictability. Atmos. Res. 123, 167–179.
- Sioutas M., Ntafis S., Papavasileiou G., Doe R.K., 2015. Tornado occurrence in GreceQ Influencing variables and spatiotemporal distributions. Proceedings of 8th ECSS, Austria.
- Skempton A.W., Hutchinson J.N., 1969. Stability of natural slopes and embankment foundations. In: Proceedings, 7th. International conference of soil mechanics and foundation engineering, Mexico, State of the Art volume, 291–340.
- Stini J., 1910. Die Muren. Verlag der Wagner'shen Universitätsbuchhandlung, Innsbruck (Debris flows, English translation by M. Jakob and N. Skermer, 1997, EBA Engineering Consultants, Vancouver, Canada, 106p).
- Strobl RO, Forte F., Lonigro T., 2012. Comparison of the feasibility of three flood-risk extent delineation techniques using Geographic Information System: case study in Tavoliere delle Puglie, Italy. Flood Risk Manag. 5, 245–257.
- Taylor J., Davies M., Clifton D., Ridley I., Biddulph P., 2011. Flood management: prediction of microbial contamination in largescale floods in urban environments. Environ Int. 37, 1019–1029.
- Tehrany M.S., Pradhan B., Jebur M.N., 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. J Hydrol. 512, 332–343.

- Terzaghi K., 1950. Mechanics of landslides (Berkey volume). Geological Society of America, New York, pp 83–124
- Tselentis, G.A., Danciu, L., Gkika, F., 2005. Empirical Arias Intensity attenuation relationships for seismic hazard analysis of Greece, ERES Conference, Greece.
- United Nations, 2004. UN report says world urban population of 3 billion today expected to reach 5 billion by 2030. UN press release, Department of Economic and Social Affairs.
- Vahidnia M.H., Alesheikh A.A., Alimohammadi A., Hosseinali F., 2010. A GIS-based neurofuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping. Comput Geosci. 36:1101–1114.
- Vallance J.W., 2005. Volcanic debris flows. In: Jakob M, Hungr O (eds) Debris flows and related phenomena, vol 10. Springer, Heidelberg, 247–271.
- Varnes D.J., 1954. Landslide types and processes. In: Eckel EB (ed) Landslides and engineering practice, special report 28. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, DC, 20–47.
- Varnes D.J., 1958. Landslide and Processes. In: Eckel, E.B., (Ed.), Landslides and Engineering Practice, Highway Research Board, Special Rept. 29, pp. 20-47.
- Varnes D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- Varnes D.J., Savage W., (eds.) 1996. The Slumgullion earth flow: a large-scale natural laboratory. U.S. Geological Survey Bulletin 2130.
- Vietmeier J., Wagner W., Dikau R., 1999. Monitoring moderate slope movements (landslides) in the southern French Alps using differential SAR interferometry. Proc. 2nd Int. Workshop on ERS SAR Interferometry "FRINGE'99". Liege, Belgium.
- White I, Kingston R, Barker A., 2010. Participatory geographic information systems and public engagement within flood risk management. Flood Risk Manag. 3:337–346.
- Wieczorek G.F., 1996. Landslide Triggering Mechanisms. Landslides: Investigations and 2 Mitigation, Eds. K.A. Turner and R.L. Schuster, 76–88, Transportation Research Board, 3 Washington, D.C.

- Wilson R.C., Keefer D.K., 1985. Predicting Areal Limits of earthquake induced Landsliding. In: Ziony (ed.) Earthquake Hazards in the Los Angeles region – An earth science perspective U.S.G.S. Professional Paper 1360, 317-345.
- WP/ WLI., 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 47, 53-57.
- WP/WLI, 1995, International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslides Inventory. Working group on Rate of Movement (Chairman: Bonnard, C.) A Suggested Method for Describing the Rate of Movement of a Landslide: Bull. IAEG 52, 72-78.
- Yiping H. Beighley R.E., 2006. GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California, Earth Surface Processes and Landforms, Earth Surf. Process. Landforms 33, 380 –393.
- Zaruba Q., Mencl V., 1969. Landslides and their control. Elsevier, New York, 205 p.
- Zaruba Q., Mencl V., 1976. Engineering Geology. Elsevier, Amsterdam, pp. 504.
- Βασιλειάδης Ε.Α., 2010. Ζωνοποίηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων στον Ελληνικό χώρο: Δημιουργία και εφαρμογή μοντέλων με γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Γκίκα Φ., 2005. Ανάπτυξη Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Κατολισθητικών Φαινομένων, Εφαρμογή Διώρυγα Κορίνθου. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Γκουρνέλλος Θ., Χαλκιάς Χ., Τσαγκάς Δ., 2006: «Επιδεκτικότητα Εκδήλωσης Κατολισθήσεων για τον Ελληνικό Χώρο – Ανάλυση με τη Χρήση Κανόνων Ασαφούς Λογικής και Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων», περιοδικό Γεωγραφίες, 12, 114-127.
- Ζιακόπουλος Δ., Φραγκούλη., 2015. Το εγχειρίδιο του μετεωρολόγου-προγνώστη. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Αθήνα.
- Ζιούρκας Κ., 1989. Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Καρτάλης Κ., 1999. Μετεωρολογία. Εισαγωγή στο Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον, Τόμος Α, Το Φυσικό Περιβάλλον. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

- Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η., 2015. Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα (www.kallipos.gr).
- Κούκης Γ., Ζιούρκας Κ., 1989. Κατολισθητικές κινήσεις στον Ελληνικό χώρο Στατιστική Θεώρηση, Ορυκτός Πλούτος 58: 39-58.
- Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2007. Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Λέκκας Ε., 2000. Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές. Εκδόσεις ACCESS, Αθήνα.
- Ματσαγγούρας Ι.Θ., 2014. Η δυναμική της ατμόσφαιρας στην εμφάνιση σιφώνων στον ελλαδικό χώρο με την χρήση αριθμητικού μοντέλου καιρού μέσης – κλίμακας WRF. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Πολυκρέτης Χ., Φερεντίνου Μ., Χαλκιάς Χ., 2013. Η χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολισθήσεων, Πρακτικά 1ου Συνέδριο Χωρικής Ανάλυσης:, Αθήνα.
- Φερεντίνου Μ., 2004, Εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ.
- Φερεντίνου Μ., Χαλκιάς Χ., 2012. Προκαταρτική ανάλυση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθήσεων με βάση τη χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας –Εφαρμογή σε περιφερειακή κλίμακα, Γεωγραφίες, No 19, 41-58.
- Φλόκας Α., 1997. Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Β' Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.