



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ  
ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ –  
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΠΗΛΙΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Τσούβαλης Οδυσσέας

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Λουπασάκης,  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ  
ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ –  
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΠΗΛΙΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Τσούβαλης Οδυσσέας

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής,

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .....

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π. ....

(Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Αθανασιάς, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π. ....

(Υπογραφή)

Παρασκευάς Τσαγγαράτος, Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π. ....

(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη, για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την επιτυχή διεκπεραίωση της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Παρασκευά Τσαγγαράτο, Ε.Δ.Ι.Π. του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, για την πολύτιμη βοήθειά του, τη συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφερε, τις αμέτρητες ώρες που μου αφιέρωσε και τις γνώσεις που μου μετέφερε για τα θέματα της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Αθανασά, που δέχθηκε να συμμετάσχει στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την υποστήριξη και συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και ειδικότερα στον πατέρα μου, ο οποίος με την επιστημονική του κατάρτιση και εμπειρία, μου προσέφερε πολύτιμη βοήθεια και συμβουλές, τόσο κατά τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Τα κατολισθητικά φαινόμενα αποτελούν ένα είδος φυσικών καταστροφών μεγάλης σημασίας, όσον αφορά τη συχνότητα εκδήλωσής τους και τις επιπτώσεις που έχουν στην ανθρώπινη ζωή και την οικονομία. Η απεικόνιση σε χάρτες της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής αποτελεί σημαντική δράση στην προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ζωνοποιημένου χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με χρήση χωρικών προγνωστικών μοντέλων, και, πιο συγκεκριμένα, μέσω του μοντέλου Τυχαίου Δέντρου, για την περιοχή του νοτιοανατολικού Πηλίου και η επαλήθευση της προγνωστικής απόδοσης του μοντέλου.

Αρχικά, ορίστηκαν η βάση δεδομένων των 146 καταγεγραμμένων κατολισθήσεων στην περιοχή έρευνας και οι εννέα (9) παράμετροι που συμβάλουν στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, σύμφωνα με τις οποίες θα αναπτυχθεί το μοντέλο. Αυτές οι παράμετροι είναι: το υψόμετρο, οι μορφολογικές κλίσεις, η διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα, οι γεωλογικές ενότητες, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο. Η ανάλυση των γεωγραφικών χαρακτηριστικών των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Στη συνέχεια, μέσω στατιστικής ανάλυσης των παραμέτρων, εφαρμόστηκε η μέθοδος Λόγου Συχνότητας για τη δημιουργία ζωνοποιημένου χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας και την επιλογή 146 θέσεων ευστάθειας από τις ζώνες χαμηλής επιδεκτικότητας. Οι θέσεις ευστάθειας σε συνδυασμό με τις θέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων αποτέλεσαν τα αρχεία εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης του μοντέλου. Μετά την εκπαίδευση και βελτιστοποίηση του μοντέλου με βάση αυτά τα αρχεία εφαρμόστηκε η πρόγνωση για την περιοχή έρευνας και διαμορφώθηκε ο τελικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας, ο οποίος διακρίθηκε σε πέντε (5) ζώνες επιδεκτικότητας. Σύμφωνα με το μοντέλο Τυχαίου Δέντρου, οι ζώνες υψηλής και πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας καταλαμβάνουν το 52.9% της περιοχής έρευνας και το 36.7% του οδικού δικτύου βρίσκεται εντός αυτών. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της σπουδαιότητας των παραμέτρων, με τη σπουδαιότερη αυτών να είναι το υψόμετρο, που ακολουθείται από τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων και τις γεωλογικές ενότητες. Τέλος, επαληθεύτηκε η προγνωστική

απόδοση του μοντέλου μέσω του Δείκτη Ακρίβειας (Accuracy), με αποτελέσματα 0.9559 για το αρχείο εκπαίδευσης και 0.8506 για το αρχείο ελέγχου, και μέσω των Καμπύλων Λειτουργικού Χαρακτηριστικού Δείκτη, με αποτελέσματα 0.8763 για το αρχείο εκπαίδευσης και 0.8361 για το αρχείο ελέγχου.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα του φαινομένου των κατολισθήσεων όσον αφορά τις συνθήκες και τους παράγοντες εκδήλωσής του και είναι χρήσιμα για την αντιμετώπισή του και το σχεδιασμό μελλοντικών αναπτυξιακών έργων.

## Abstract

Landslides are a type of natural disaster of great importance, in terms of occurrence frequency and impact on human life and the economy. The depiction of landslide susceptibility of a region in map form constitutes an important piece of action towards confronting and treating this phenomenon.

The aim of this Diploma Thesis is the production and zoning of a landslide susceptibility map of the southeastern region of Mount Pelion, GREECE, using predictive spatial models. More specifically, the Random Forest algorithm is used, and an evaluation of the model's predictive performance is carried out as well.

Initially, a database of 146 recorded landslides was defined and the most important factors that contribute to the manifestation of landslides were selected, in accordance with which the model would be developed. These factors are: altitude, slope gradient, aspect gradient, profile curvature, plan curvature, curvature, geological units, distance from tectonic features and distance from the hydrographic network; all these factors were analyzed using Geographic Information Systems. After a statistical analysis of these factors and by applying the Frequency Ratio model, a landslide susceptibility map of the region was created and divided into susceptibility zones. From the two zones with the lowest susceptibility, 146 stable positions were defined, which, with the addition of the recorded landslide database, formed the model's train and test set. Following the training, optimization and implementation of the model, the final landslide susceptibility map of the region was created and divided into five (5) susceptibility zones. In accordance with the Random Forest model, the zones of high and very high susceptibility cover 52.9% of the region and 36.7% of the local road network. Moreover, through the factors' importance evaluation, it was deduced that the factor with the highest importance was the altitude, followed by the aspect gradient and the geological units. Finally, for the evaluation of the model's predictive performance, the value of the Accuracy Index was calculated equal to 0.9559 for the train set and equal to 0.8506 for the test set. Furthermore, the AUC value for the train set was found equal to 0.8763 and for the test set equal to 0.8361.

In conclusion, the results of this Diploma Thesis demonstrate the complexity of the landslide phenomenon in terms of conditions and factors contributing to its manifestation, and could be a valuable tool for its confrontation and for future planning of development projects.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή – Σκοπός εργασίας .....	17
1.1	Φυσικές καταστροφές .....	17
1.2	Κατολισθητικά Φαινόμενα.....	19
1.3	Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	22
2	Κατολισθήσεις .....	24
2.1	Ορισμός.....	24
2.2	Ταξινόμηση κατά Varnes .....	25
2.2.1	Καταπτώσεις (Falls) .....	27
2.2.2	Ανατροπές (Topples).....	28
2.2.3	Ολισθήσεις (Slides).....	28
2.2.4	Πλευρικές εξαπλώσεις (Spreads) .....	30
2.2.5	Ροές (Flows).....	32
2.2.6	Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite or complex slides).....	35
2.3	Ονοματολογία Κατολισθήσεων .....	35
2.4	Παράγοντες Κατολισθητικών Φαινομένων .....	37
2.5	Επιδεκτικότητα.....	40
2.6	Κατολισθήσεις στην Ελλάδα .....	40
3	Εργαλεία Ανάλυσης.....	47
3.1	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών – Γενικά στοιχεία – Ορισμός.....	47
3.1.1	Βασικά μέρη ενός Γ.Σ.Π. ....	48
3.1.2	Κατηγορίες δεδομένων.....	51
3.2	Μέθοδοι.....	52
3.2.1	Μοντέλο πρόβλεψης Λόγου Συχνότητας .....	52
3.2.2	Εξόρυξη Δεδομένων.....	53
3.2.3	Δέντρα Απόφασης .....	54

4	Περιγραφή Μεθοδολογίας .....	56
4.1	Περιγραφή της Προετοιμασίας και Επεξεργασίας Δεδομένων .....	57
4.1.1	Συλλογή Δεδομένων.....	57
4.1.2	Διαμόρφωση των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας .....	57
4.1.3	Διαμόρφωση των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης .....	58
4.1.4	Εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας και αξιολόγηση των μεταβλητών ως προς την προγνωστική τους ικανότητα .....	59
4.2	Περιγραφή της Εφαρμογής και Επαλήθευσης του Μοντέλου.....	59
4.2.1	Εκπαίδευση Μοντέλου .....	60
4.2.2	Πρόγνωση.....	60
4.2.3	Εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών μέσω του μοντέλου RF.....	61
4.2.4	Δημιουργία χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας .....	61
4.2.5	Επαλήθευση της προγνωστικής απόδοσης.....	61
5	Εφαρμογή Μεθοδολογίας .....	64
5.1	Συλλογή Δεδομένων – Εφαρμογή.....	64
5.2	Περιοχή Έρευνας .....	64
5.2.1	Μορφολογία .....	65
5.2.2	Γεωλογία .....	65
5.2.3	Τεκτονικά και Σεισμολογικά Χαρακτηριστικά .....	67
5.2.4	Υδρογραφικό Δίκτυο.....	68
5.2.5	Κλίμα.....	69
5.2.6	Χρήσεις Γης – Προστατευόμενες Περιοχές.....	69
5.2.7	Κατολισθητικά Φαινόμενα στην Περιοχή Έρευνας.....	70
5.3	Διαμόρφωση των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας – Εφαρμογή .....	72
5.3.1	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM).....	73
5.3.2	Θεματικό Επίπεδο Υψομέτρου.....	74
5.3.3	Θεματικό Επίπεδο Μορφολογικής Κλίσης Εδάφους .....	76



5.3.4	Θεματικό Επίπεδο Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων .....	78
5.3.5	Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων .....	81
5.3.6	Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων .....	83
5.3.7	Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας .....	86
5.3.8	Θεματικό Επίπεδο Γεωλογικών Ενοτήτων .....	89
5.3.9	Θεματικό Επίπεδο Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία.....	93
5.3.10	Θεματικό Επίπεδο Απόστασης από το Υδρογραφικό Δίκτυο.....	95
5.4	Ανάλυση των Θ.Ε.Π.....	98
5.4.1	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Υψομέτρου .....	98
5.4.2	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Μορφολογικών Κλίσεων .....	99
5.4.3	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων .....	100
5.4.4	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων .....	101
5.4.5	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων .....	101
5.4.6	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας .....	102
5.4.7	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Γεωλογικών Ενοτήτων .....	103
5.4.8	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία .....	105
5.4.9	Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Απόστασης από το Υδρογραφικό Δίκτυο.....	106
5.5	Διαμόρφωση των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης – Εφαρμογή.....	107
5.6	Εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας και αξιολόγηση των μεταβλητών ως προς την προγνωστική τους ικανότητα – Εφαρμογή.....	108
5.7	Εκπαίδευση Μοντέλου – Εφαρμογή.....	110
5.8	Πρόγνωση – Εφαρμογή.....	111
5.9	Εκτίμηση της Σπουδαιότητας των Μεταβλητών – Εφαρμογή.....	111

5.10	Δημιουργία Χάρτη Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας – Εφαρμογή .....	113
5.11	Επαλήθευση της Προγνωστικής Απόδοσης - Εφαρμογή.....	119
6	Συμπεράσματα .....	122
7	Βιβλιογραφία.....	126

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ταξινόμηση φυσικών καταστροφών (EM-DAT, 2016). .....	19
Εικόνα 2: Κατολίσθηση στο χωριό Pingdi της Κίνας που οδήγησε στο θάνατο 42 ανθρώπους τον Ιούλιο 2019 (aljazeera.com) .....	20
Εικόνα 3: Κατολίσθηση σε οικισμό της επαρχίας Μοι της Μιανμάρ που κατέστρεψε 16 κτήρια και σκότωσε 59 ανθρώπους τον Αύγουστο 2019 (bbc.com) .....	21
Εικόνα 4: Κατολίσθηση Παναγοπούλας στη Ν.Ε.Ο. Αθηνών – Πατρών, 1971 .....	43
Εικόνα 5: Κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας, 1963 .....	44
Εικόνα 6: Κατολίσθηση Μαλακάσας (άποψη Ε.Ο. Αθηνών – Λαμίας), 1995 .....	45
Εικόνα 7: Κατολίσθηση Μαλακάσας (άποψη σιδηροδρομικής γραμμής Αθηνών – Θεσσαλονίκης), 1995 .....	45
Εικόνα 8: Κατολίσθηση στην είσοδο του χωριού της Ζαγοράς (magnesianews.gr) .....	72

## Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 1: Κατολισθητικά φαινόμενα σε παγκόσμια κλίμακα την περίοδο 2006 – 2016 (NASA’s Open Data Portal).....	20
Χάρτης 2: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας .....	42
Χάρτης 3: Συχνότητα κατολισθητικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο (Βασιλειάδης, 2010).....	42
Χάρτης 4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους .....	74
Χάρτης 5: Θεματικό επίπεδο υψομέτρου .....	76
Χάρτης 6: Θεματικό επίπεδο μορφολογικής κλίσης εδάφους .....	78
Χάρτης 7: Θεματικό επίπεδο διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων.....	80
Χάρτης 8: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων ...	83
Χάρτης 9: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων .....	86
Χάρτης 10: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας.....	89
Χάρτης 11: Θεματικό επίπεδο γεωλογικών ενοτήτων .....	93
Χάρτης 12: Θεματικό επίπεδο απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία.....	95
Χάρτης 13: Θεματικό επίπεδο απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο .....	97
Χάρτης 14: Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	114
Χάρτης 15: Χωρική κατανομή του οδικού δικτύου στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	117

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατάπτωση βράχων (USGS, 2004).....	27
Σχήμα 2: Ανατροπή βράχων (USGS, 2004).....	28
Σχήμα 3: Περιστροφικές ολισθήσεις κατά Varnes (1978): (α) βραχώδους υποβάθρου, (β) γαιών.....	29
Σχήμα 4: Μεταθετικές ολισθήσεις (Varnes, 1978): (α) αποσαθρωμάτων, (β) εδαφικού τεμάχους .....	30
Σχήμα 5: Πλευρική εξάπλωση ασβεστολιθικών τεμαχών που υπέρκεινται μαλακότερων σχηματισμών (Varnes, 1978) .....	31
Σχήμα 6: Πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμου και ιλύος (Varnes, 1978) .....	31
Σχήμα 7: Σύνθετη ολίσθηση, πλευρική εξάπλωση ασβεστόλιθων και αναθόλωση υποκείμενων αργιλικών σχιστόλιθων.....	32
Σχήμα 8: Ροή κορημάτων (USGS, 2004).....	33
Σχήμα 9: Ροή γαιών (USGS, 2004).....	34
Σχήμα 10: Ερπυσμός (USGS, 2004) .....	34
Σχήμα 11: Σύνθετοι τύποι μετακίνησης κατά Κούκη και Σαμπατακάκη (2007): (α) καταπτώσεις και ροή κορημάτων, (β) ολίσθηση και ροή γαιών, (γ) ανατροπή και ολίσθηση.....	35
Σχήμα 12: Ονοματολογία περιστροφικής ολίσθησης (IAEG, Commission on Landslides, 1990).....	36
Σχήμα 13: Παράδειγμα μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς σε συνάρτηση με το χρόνο (WP/WLI, 1994).....	37
Σχήμα 14: Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων (WP/WLI, 1994).....	38
Σχήμα 15: Τα πέντε συστατικά μέρη ενός Γ.Σ.Π. (ESRI.com).....	49
Σχήμα 16: (1) Πραγματικός κόσμος, (2) Αναπαράσταση σε ψηφιδωτή μορφή (raster), (3) Αναπαράσταση σε διανυσματική μορφή (vector) (udemy.com) .....	52
Σχήμα 17: Γραφική απεικόνιση της δομής ενός Δέντρου Απόφασης (Τσαγγαράτος, 2012)	54
Σχήμα 18: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. υψομέτρου .....	75
Σχήμα 19: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. μορφολογικής κλίσης εδάφους (μοίρες) ...	77
Σχήμα 20: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων.....	79

Σχήμα 21: Καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων: (Α) θετικές τιμές καμπυλότητας, (Β) αρνητικές τιμές καμπυλότητας, (C) μηδενική τιμή καμπυλότητας. (arcgis.com).....	81
Σχήμα 22: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων .....	82
Σχήμα 23: Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων: (Α) θετικές τιμές καμπυλότητας, (Β) αρνητικές τιμές καμπυλότητας, (C) μηδενικές τιμές καμπυλότητας. (arcgis.com).....	84
Σχήμα 24: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων .....	85
Σχήμα 25: Καμπυλότητα: Παραδείγματα διαφορετικών συνδυασμών καμπυλότητας πρηνούς (arcgis.com).....	87
Σχήμα 26: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας.....	88
Σχήμα 27: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. γεωλογικών ενοτήτων .....	91
Σχήμα 28: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία (m).....	94
Σχήμα 29: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο....	96
Σχήμα 30: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. υψομέτρου.....	98
Σχήμα 31: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. μορφολογικών κλίσεων .....	99
Σχήμα 32: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων .....	100
Σχήμα 33: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων.....	101
Σχήμα 34: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων.....	102
Σχήμα 35: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας .....	103
Σχήμα 36: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. γεωλογικών ενοτήτων .....	104
Σχήμα 37: Ταξινόμηση των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία.....	106
Σχήμα 38: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο .....	107
Σχήμα 39: Αποτελέσματα εκτίμησης της προγνωστικής ικανότητας των μεταβλητών μέσω του αλγορίθμου LVQ .....	109

Σχήμα 40: Αποτελέσματα υπολογισμού των παραμέτρων ntree και mtry.....	110
Σχήμα 41: Ταξινόμηση μεταβλητών ως προς τη σπουδαιότητά τους σύμφωνα με τους δείκτες Mean Decrease Accuracy και Mean Decrease Gini .....	111
Σχήμα 42: Κατανομή έκτασης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	115
Σχήμα 43: Κατανομή κατολισθήσεων του αρχείου εκπαίδευσης στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	115
Σχήμα 44: Κατανομή κατολισθήσεων του αρχείου ελέγχου – επαλήθευσης στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	116
Σχήμα 45: Στατιστική κατανομή του οδικού δικτύου στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας.....	118
Σχήμα 46: Καμπύλη ROC του αρχείου εκπαίδευσης.....	119
Σχήμα 47: Καμπύλη ROC του αρχείου ελέγχου – επαλήθευσης.....	120

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978) .....	26
Πίνακας 2: Ταξινόμηση παραγόντων εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI, 1994) .....	39
Πίνακας 3: Πίνακας σύγκρισης .....	62
Πίνακας 4: Κατανομή χρήσεων γης .....	70
Πίνακας 5: Αποτελέσματα ανάλυσης πολυσυγγραμμικότητας.....	108
Πίνακας 6: Σύγκριση απόδοσης μοντέλων .....	120



# 1 Εισαγωγή – Σκοπός εργασίας

## 1.1 Φυσικές καταστροφές

Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν παγκόσμια μόνιμο πρόβλημα για την κοινωνία καθώς απειλούν συνεχώς την ομαλή λειτουργία της. Μια φυσική καταστροφή μπορεί να εκδηλωθεί και να εξελιχθεί καλύπτοντας εξαιρετικά μεγάλες εκτάσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι αδύνατον να προβλεφθεί ή να ελεγχθεί (Djalante, 2012). Οι επιπτώσεις των φυσικών καταστροφών είναι κρίσιμες καθώς επηρεάζουν βαθύτατα βασικούς τομείς της κοινωνίας, οι κυριότεροι των οποίων έχουν να κάνουν με την απώλεια ανθρώπινης ζωής και τις οικονομικές ζημιές. Σύμφωνα με στοιχεία της Παγκόσμιας Βάσης Δεδομένων Φυσικών Καταστροφών (Emergency Events Database) για το έτος 2019, καταγράφηκαν 396 φυσικές καταστροφές με 11.755 θανάτους, επηρεάζοντας 94,9 εκατομμύρια ανθρώπους και προκαλώντας οικονομικές ζημιές αξίας 103 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Για να ενταχθεί σε αυτή τη βάση δεδομένων μια καταστροφή, πρέπει να ισχύει ένα τουλάχιστον από τα παρακάτω κριτήρια:

- Να έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 10 θάνατοι.
- Να έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 100 πληγέντες.
- Να έχει κηρυχτεί κατάσταση έκτακτης ανάγκης.
- Να έχει γίνει έκκληση για διεθνή βοήθεια.

Μερικοί από τους ορισμούς της φυσικής καταστροφής είναι οι εξής:

- Τα στοιχεία εκείνα του φυσικού περιβάλλοντος που είναι βλαβερά για τον άνθρωπο και προκαλούνται από δυνάμεις ξένες και άγνωστες σε αυτόν.
- Η πιθανότητα εμφάνισης ενός δυνητικά καταστροφικού γεγονότος μέσα σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο και σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.
- Μία φυσική ή ανθρωπογενής γεωλογική κατάσταση ή φαινόμενο κατά την οποία παρουσιάζεται πραγματικός ή δυνητικός κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή ή τις περιουσίες.

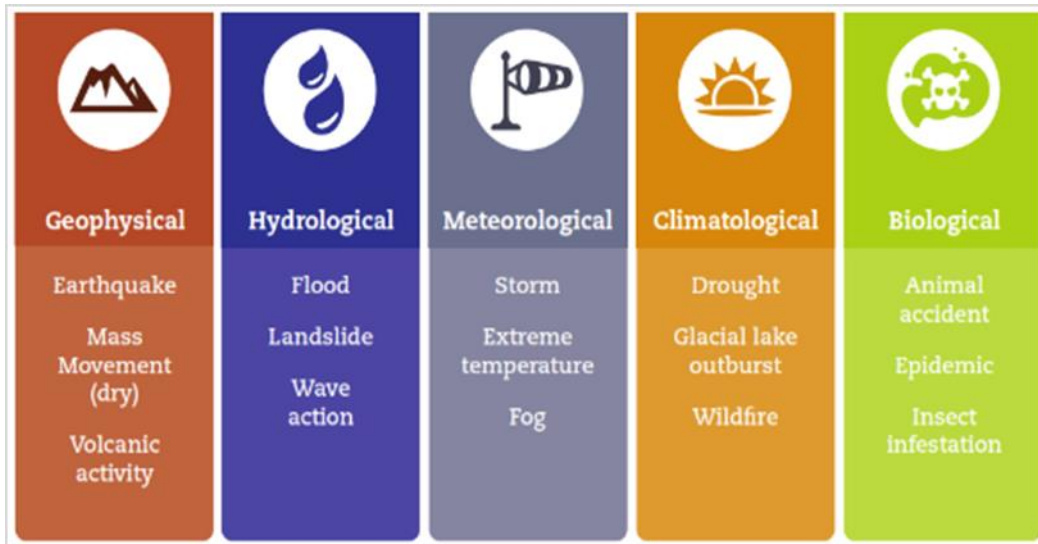
Ένας από τους πλέον αποδεκτούς ορισμούς δόθηκε το 2004 από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών για τη Διεθνή Στρατηγική Μείωσης των Καταστροφών (United Nations / International Strategy for Disaster Reduction- UN/ISDR, 2004): «Μια καταστροφή είναι ένα αιφνίδιο, καταστρεπτικό συμβάν που διαταράσσει σημαντικά μια κοινωνία ή ένα κοινωνικό

σύνολο, προκαλώντας ανθρώπινες, υλικές, οικονομικές ή/και περιβαλλοντικές απώλειες, οι οποίες υπερβαίνουν τη δυνατότητα της κοινωνίας ή του κοινωνικού συνόλου να τις αντιμετωπίσει».

Οι φυσικές καταστροφές κατηγοριοποιούνται βάσει του είδους του φυσικού κινδύνου που αποτέλεσε τη γενεσιουργό αιτία τους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization) και η Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Φυσικών Καταστροφών διακρίνουν τις φυσικές καταστροφές σε έξι (6) κατηγορίες (Εικόνα 1):

- Γεωλογικές, όπως οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι κατολισθήσεις ξηρής μάζας.
- Υδρολογικές, όπως οι πλημμύρες και οι κατολισθήσεις υγρής μάζας (π.χ. χιονοστιβάδες).
- Μετεωρολογικές, όπως οι θύελλες και οι καταιγίδες.
- Κλιματολογικές, όπως οι ακραίες θερμοκρασίες, οι ξηρασίες και οι δασικές πυρκαγιές.
- Βιολογικές, όπως επιδημίες που προκαλούνται από την έκθεση των ζωντανών οργανισμών σε παθογόνους μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες, ιοί).
- Κοσμικές, όπως πτώσεις μετεωριτών, αστεροειδών και διέλευση κομητών.

Αν και η εκδήλωσή κάθε μιας από τις παραπάνω κατηγορίες καταστροφών επηρεάζεται από διαφορετικές διεργασίες και εναυσματικούς παράγοντες, όλες εμφανίζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, όπως το γεγονός ότι εκδηλώνονται απρόβλεπτα, ραγδαία και με βίαιο τρόπο και ο μεγαλύτερος αριθμός των απωλειών και των ζημιών σημειώνεται μετά από την εκδήλωση του συμβάντος (Ηλία, 2013).



Εικόνα 1: Ταξινόμηση φυσικών καταστροφών (EM-DAT, 2016).

## 1.2 Κατολισθητικά Φαινόμενα

Οι κατολισθήσεις, οι οποίες ανήκουν στις κατηγορίες των γεωλογικών και υδρολογικών καταστροφών, αποτελούν ένα από τα βασικότερα είδη φυσικών καταστροφών. Αυτό οφείλεται στις σοβαρές επιπτώσεις που έχουν στην ανθρώπινη ζωή, στην οικονομία αλλά και στη συχνότητα του φαινομένου, η οποία έχει ανοδική πορεία τις τελευταίες δεκαετίες. Η επέκταση της ανθρώπινης παρέμβασης στο περιβάλλον, η αύξηση της ευπάθειας του εκτεθειμένου πληθυσμού λόγω της αστικοποίησης και των αλλαγών στη χρήση γης, καθώς και η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, συμβάλλουν στην ανοδική αυτή τάση (Χάρτης 1, Εικόνες 2 και 3).

Αν και χαρακτηρίζονται από υψηλή συχνότητα, οι κατολισθήσεις ταξινομούνται χαμηλά στις φυσικές καταστροφές όσον αφορά τη θνησιμότητα. Κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, μόλις το 1.4% του συνολικού αριθμού θανάτων από φυσικές καταστροφές παγκοσμίως οφείλεται σε κατολισθητικά φαινόμενα. Ωστόσο, θεωρείται ότι αυτό το ποσοστό υποεκτιμάται, καθώς οι κατολισθήσεις ερμηνεύονται συχνά ως αποτελέσματα της διαδικασίας ενεργοποίησης άλλων φαινομένων, όπως είναι οι σεισμικές δονήσεις, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι πλημμύρες. Συνεπώς, οι ανθρώπινες απώλειες και οι οικονομικές ζημιές που προκαλούν συνεκτιμώνται κατά την αποτίμηση των αποτελεσμάτων των κύριων φαινομένων.

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Φυσικών Καταστροφών, το 2019, από τις 396 καταγεγραμμένες φυσικές καταστροφές, οι 25 ήταν κατολισθήσεις. Αυτές οδήγησαν σε

727 θανάτους, με τους συνολικούς πληγέντες να ανέρχονται στις 200.000 και τις οικονομικές ζημιές στα 200 εκατομμύρια δολάρια.



*Χάρτης 1: Κατολισθητικά φαινόμενα σε παγκόσμια κλίμακα την περίοδο 2006 – 2016  
(NASA's Open Data Portal)*



*Εικόνα 2: Κατολίσθηση στο χωριό Ringdi της Κίνας που οδήγησε στο θάνατο 42 ανθρώπους  
τον Ιούλιο 2019 (aljazeera.com)*



*Εικόνα 3: Κατολίσθηση σε οικισμό της επαρχίας Μοι της Μιανμάρ που κατέστρεψε 16 κτήρια και σκότωσε 59 ανθρώπους τον Αύγουστο 2019 (bbc.com)*

Η αντιμετώπιση και βέλτιστη διαχείριση των κατολισθητικών φαινομένων και των επιπτώσεων τους αποτελούν καίρια ζητήματα που απασχολούν το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας και του ευρύτερου κοινωνικού συνόλου. Βασικά στάδια στην αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η έγκαιρη αναγνώριση του κινδύνου και η προετοιμασία και κατάστροση στρατηγικών και δράσεων πρόληψης του φαινομένου και μετρίασης των επιπτώσεών του. Σύμφωνα με τους Guzzetti et al. (1999) οι επενδύσεις για την πρόβλεψη και πρόληψη των κατολισθήσεων είναι πιο αποδοτικές από τις επενδύσεις για τα μέτρα αποκατάστασης και μείωσης των επιπτώσεών τους.

Δράσεις που συμβάλουν στην αντιμετώπιση και την ορθή διαχείριση των κατολισθητικών φαινομένων είναι οι εξής:

- Πρόβλεψη της χωρικής και χρονικής εκδήλωσης της κατολίσθησης
- Αξιολόγηση των οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων
- Λήψη προστατευτικών μέτρων
- Δημιουργία κατάλληλων υποδομών
- Ενημέρωση και επιμόρφωση των ανθρώπων

- Έγκαιρη προειδοποίηση στην περίπτωση πιθανής ή επιβεβαιωμένης εκδήλωσης κατολίσθησης

Βασικό στοιχείο όλων αυτών των δράσεων είναι η αναγνώριση του κινδύνου εκδήλωσης μιας κατολίσθησης, κατά την οποία συναξιολογούνται όλα τα φυσικά στοιχεία που καθορίζουν τόσο την πιθανή θέση εκδήλωσης, όσο και την έκταση και την ένταση του φαινομένου (Τσαγγαράτος, 2012). Η απεικόνιση σε χάρτες των κατολισθητικών φαινομένων μιας περιοχής, αλλά και η εκτίμηση του βαθμού επιδεκτικότητας, επικινδυνότητας και διακινδύνευσης με την εφαρμογή προγνωστικών μοντέλων, αποτελούν δύο ακόμα κρίσιμες δράσεις στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος.

### 1.3 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Στη σημερινή εποχή της πληροφορίας, η συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία μεγάλων όγκων δεδομένων αποτελεί δημοφιλή πρακτική σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Ο προγραμματισμός, η κλιματολογία και η επιστήμη του marketing είναι ορισμένοι από τους χώρους οι οποίοι βασίζονται σε πολυπληθή δεδομένα για την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων προς την επίτευξη των στόχων τους. Παρομοίως, και στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών, και πιο συγκεκριμένα των κατολισθήσεων, τέτοιες μέθοδοι συνεισφέρουν σημαντικά στην προσπάθεια για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου και την καλύτερη εκτίμηση της εξέλιξής του.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας γεωλογικών σχηματισμών με χρήση προγνωστικών χωρικών μοντέλων, σύμφωνα με τις μεθόδους Εξόρυξης Δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης, και η αξιολόγησή τους. Πιο αναλυτικά, θα εφαρμοστεί στην περιοχή του Νοτιοανατολικού Πηλίου η μέθοδος Τυχαίου Δέντρου (Random Forest), η οποία ανήκει στις μεθόδους Ήπιας Υπολογιστικής. Μέσω της εφαρμογής της μεθόδου Τυχαίου Δέντρου, θα δημιουργηθεί χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας με διαβαθμισμένες ζώνες και, επιπλέον, θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

Η πρωτοτυπία της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται στη διαμόρφωση μιας μεθοδολογικής προσέγγισης που αποσκοπεί στην πλέον αποδοτική διαχείριση και αξιοποίηση χωρικών δεδομένων που σχετίζονται με τα κατολισθητικά φαινόμενα. Επιπρόσθετα, κατά την ανάπτυξη και εφαρμογή του μοντέλου, γίνεται χρήση κατάλληλων υπολογιστικών διαδικασιών με σκοπό τον έλεγχο των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών ως

προς την ικανότητά τους για πρόβλεψη, οδηγώντας έτσι στη βελτιστοποίηση της ακρίβειας του μοντέλου.

Ο παραγόμενος με τον τρόπο αυτόν χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας αποτελεί ένα εν δυνάμει κρίσιμο και αναγκαίο εργαλείο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από τους αρμόδιους φορείς για τον εντοπισμό περιοχών υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας και τη διαμόρφωση στρατηγικών και δράσεων αντιμετώπισης και διαχείρισης των κατολισθητικών φαινομένων.

## 2 Κατολισθήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους ορισμούς και στις ταξινομήσεις των κατολισθήσεων διαχρονικά, καθώς και στη σχετική ονοματολογία. Επιπλέον, παραθέτονται στοιχεία για τους παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων και την κατολισθητική επιδεκτικότητα και παραδείγματα καταγεγραμμένων κατολισθήσεων στην Ελλάδα.

### 2.1 Ορισμός

Δια μέσου των χρόνων, ο όρος «κατολίσθηση» έχει αποδοθεί με διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος ορισμός από τον Terzaghi (1950) περιγράφει ως κατολίσθηση μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού (residual) εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους κινείται προς τα κάτω και προς τα έξω. Ακολούθως οι Zaruba και Mencl (1969) όρισαν την κατολίσθηση ως μια γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια, ενώ σύμφωνα με τους Skempton & Hutchinson (1969), ο γενικευμένος όρος «κατολίσθηση» περιλαμβάνει όλες τις προς τα κάτω κινήσεις κατά μήκος ενός εδαφικού ή βραχώδους πρανούς, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κυρίως ως αποτέλεσμα διατμητικής αστοχίας στα όρια της κατολισθαίνουσας μάζας. Ο Varnes (1978) χρησιμοποιεί τον όρο «μετακίνηση μαζών» (mass movements) αντί του όρου κατολίσθηση και σε αυτόν περιλαμβάνει κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή καθώς και ερπυσμό. Με τον ορισμό αυτό δεν περιλαμβάνονται στις κατολισθήσεις φαινόμενα όπως οι καθιζήσεις, οι χιονοστιβάδες και οι μετακινήσεις πάγου. Κατά τον Κουμαντάκη (1985), με τον γενικό όρο «κατολισθήσεις» αποδίδονται οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων, ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρανή ορυγμάτων υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα. Σύμφωνα με τον Cruden (1991), κατολίσθηση ορίζεται η προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου, κορημάτων ή γαιών σε ένα πρανές, ορισμός ο οποίος έχει υιοθετηθεί από την Ομάδα Εργασίας για την Παγκόσμια Καταγραφή των Κατολισθήσεων (Working Party on the World Landslide Inventory - WP/WLI 1991).



## 2.2 Ταξινόμηση κατά Varnes

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί πολλά συστήματα ταξινόμησης των κατολισθητικών φαινομένων, τα οποία βασίζονται είτε στην αξιολόγηση του αποτελέσματος και των επιπτώσεων δραστηριοποίησης του φαινομένου, είτε στην ανάλυση των συνθηκών και των διεργασιών που οδηγούν στη δραστηριοποίησή του.

Τα πρώτα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων προτάθηκαν από τον Sharpe (1938) και από τον Varnes (1958) και βασίζονταν στον τύπο και στην ταχύτητα κίνησης, στον τύπο του υλικού, καθώς και στην περιεχόμενη υγρασία. Με παρόμοιο τρόπο, οι Zaguba και Mencl (1967, 1976) κατέταξαν τις κατολισθήσεις ανάλογα με τον χαρακτήρα των πετρωμάτων και κυρίως τον τύπο της μετακίνησης, εκφράζοντας όμως τις απόψεις της Τσέχοσλοβάκισης Σχολής, βασιζόμενοι στις ιδιομορφίες της γεωλογικής δομής των χωρών τους. Οι ταξινομήσεις κατά Skempton & Hutchinson (1969) κατατάσσουν το είδος των κατολισθητικών φαινομένων προσεγγίζοντας το πρόβλημα από μια μηχανική θεώρηση, ενώ ο Ersinke (1973) ταξινόμησε τις κατολισθήσεις με βάση την ενεργότητά τους και κατά συνέπεια με βάση τις επιπτώσεις που πιθανώς να έχουν σε τεχνικά έργα.

Σήμερα η ταξινόμηση κατά Varnes είναι η πλέον αποδεκτή διεθνώς, καθώς είναι αρκετά ευέλικτη και προσαρμόζεται εύκολα στις εκάστοτε συνθήκες. Χρησιμοποιείται για την περιγραφή όλων των εδαφικών μετακινήσεων που μπορούν να παρατηρηθούν σε πρανή, εκτός των εδαφικών υποχωρήσεων και των καταρρεύσεων.

Σύμφωνα με τον Varnes, τα κριτήρια με βάση τα οποία κάθε κατολίσθηση μπορεί να περιγραφεί και να ταξινομηθεί είναι (Πίνακας 1):

- Ο τύπος της μετακίνησης
- Το είδος του μετακινούμενου υλικού

Ανάλογα με τον τύπο της μετακίνησης, οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε:

- Καταπτώσεις (Falls)
- Ανατροπές (Topples)
- Ολισθήσεις (Slides)
- Πλευρικές εξαπλώσεις (Spreads)
- Ροές (Flows)
- Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (Composite or complex slides)

Ανάλογα με τον τύπο του υλικού που μετακινείται, οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε αυτές που εκδηλώνονται:

- Στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock), δηλαδή σε κάθε σκληρό συνεκτικό πέτρωμα (βράχος ή ημίβραχος)
- Στα επιφανειακά εδάφη (engineering soils), δηλαδή σε χαλαρά ή ασθενώς συνδεδεμένα συσσωματώματα ορυκτών και πετρωμάτων. Τα εδάφη διακρίνονται περαιτέρω σε:

Γαίες: εδαφικά υλικά τα οποία με βάση τη μηχανική τους ταξινόμηση περιέχουν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% άμμο, ιλύ και άργιλο.

Κορήματα: εδαφικά υλικά που περιέχουν σε ποσοστό έως και 80% χαλίκια, κροκάλες, λατύπες, ογκόλιθους, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό τους αποτελείται από λεπτομερή υλικά.

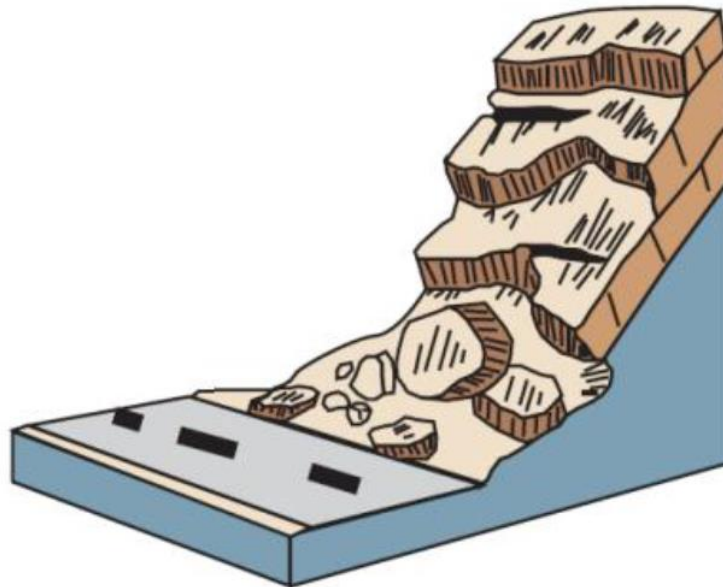
Πίνακας 1: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978)

Τύπος Κίνησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού		
		Βραχώδες υπόβαθρο	Μηχανικά εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση		Κατάπτωση βράχων	Κατάπτωση κορημάτων	Κατάπτωση γαιών
Ανατροπή		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Πλευρική Εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ερπυσμός εδάφους	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

### 2.2.1 Καταπτώσεις (Falls)

Ως κατάπτωση ορίζεται η αποκόλληση τμήματος βραχομάζας ή/και συνεκτικού εδάφους, σε απότομο πρανές και κατά μήκος μιας επιφάνειας, χωρίς ή με ελάχιστη διατμητική μετατόπιση (Σχήμα 1). Ακολουθεί η ελεύθερη πτώση του τμήματος της βραχομάζας με κύλιση ή αναπήδηση. Η μετακίνηση είναι από πολύ έως και εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατό να έχουν προηγηθεί μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα. Το φαινόμενο των καταπτώσεων είναι συνηθισμένο στα απότομα πρανή πολύ συνεκτικών εδαφών ή βράχων, τα οποία υποσκάπτονται από την ενέργεια θαλάσσιων κυμάτων ή το ρεύμα των ποταμών ή ακόμα και από την ανθρώπινη επέμβαση.

Σε αυτήν την κατηγορία μετακινήσεων διακρίνονται (3) περιπτώσεις καταπτώσεων. Αρχικά, στην περίπτωση των καταπτώσεων βράχων (rock falls), η μάζα που μετακινείται είναι μάζα βράχων οι οποίοι αποσπάστηκαν από μια περιοχή του υποβάθρου. Στην περίπτωση των καταπτώσεων κορημάτων (debris falls), η μάζα που μετακινείται είναι κορήματα, δηλαδή θραύσματα που έχουν δημιουργηθεί πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης. Τέλος, η κατάπτωση γαιών (earth falls) αποτελεί ένα πολύ σπάνιο φαινόμενο, και κατά βάση σχετίζεται με άλλους τύπους μετακίνησης.

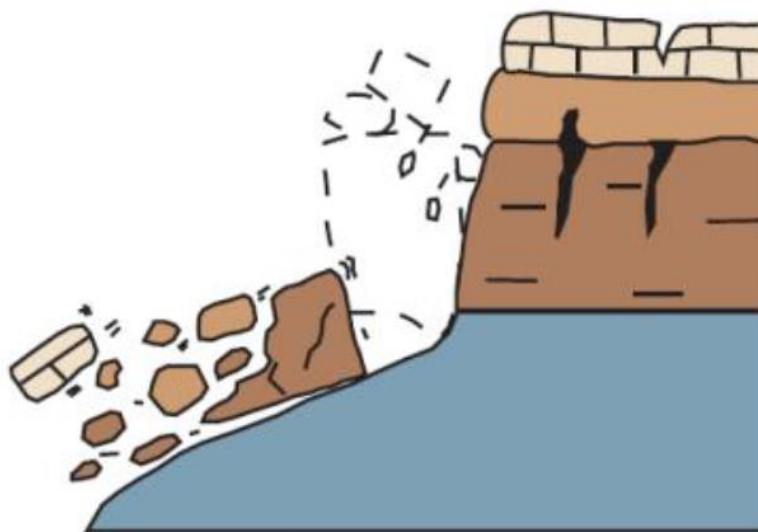


Σχήμα 1: Κατάπτωση βράχων (USGS, 2004)

### 2.2.2 Ανατροπές (Topples)

Ως ανατροπή ορίζεται μία προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας γύρω από σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας (Σχήμα 2). Προκαλείται κυρίως από τη βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός), το οποίο γεμίζει τις ασυνέχειες και τις ρωγμές. Η ανατροπή της μάζας εξελίσσεται συνήθως σε πτώση ή ολίσθηση, ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και της μετακινούμενης μάζας, καθώς και από την επιφάνεια αποκόλλησης. Η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή στα αρχικά στάδια και να μετατραπεί σε εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια.

Το φαινόμενο εκδηλώνεται κυρίως σε βραχώδη πρανή, ενώ η ανατροπή κορημάτων και γαιών είναι ένα σπάνιο φαινόμενο, το οποίο, όταν εμφανιστεί, οφείλεται κατά κύριο λόγο σε υποσκαφή της βάσης του πρανούς λόγω φυσικών διεργασιών (π.χ. διάβρωση) ή σε ανθρώπινη παρέμβαση (π.χ. λατομεία).



Σχήμα 2: Ανατροπή βράχων (USGS, 2004)

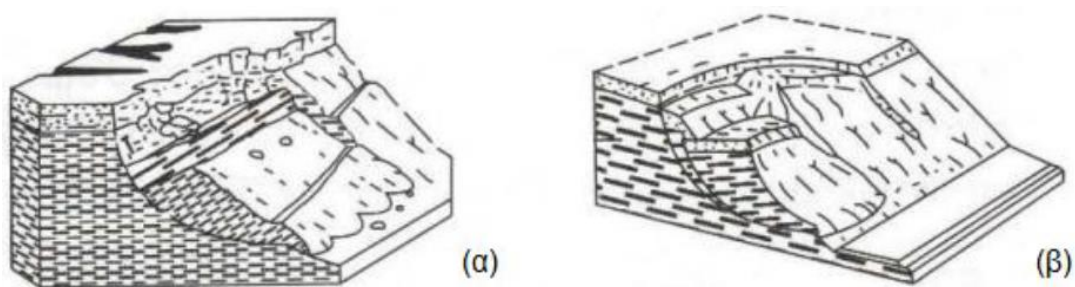
### 2.2.3 Ολισθήσεις (Slides)

Ως ολίσθηση ορίζεται μία μετακίνηση που προϋποθέτει διατμητική παραμόρφωση - μετατόπιση και στη συνέχεια διατμητική θραύση του υλικού κατά μήκος μίας ή περισσοτέρων επιφανειών, εντός των ορίων μιας σχετικά στενής ζώνης. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική ή ακαριαία, ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής της διατμητικής

τάσης. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι επίπεδη ή κυκλική, και σε βραχώδεις σχηματισμούς ταυτίζεται με καλά διαμορφωμένες επιφάνειες ασυνεχειών. Τέλος, η μετακινούμενη μάζα μπορεί να παραμείνει ενιαία κατά την ολίσθηση ή να διαχωριστεί σε μικρότερες ανεξάρτητα κινούμενες μάζες. Οι ολισθήσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις περιστροφικές (rotational) και τις μεταθετικές (translational).

### 2.2.3.1 Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides)

Οι περιστροφικές ολισθήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος κοίλων προς τα πάνω επιφανειών, με μικρή παραμόρφωση στο σώμα της μετακινούμενης μάζας (Σχήμα 3). Το ανώτερο τμήμα της μετακινούμενης μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω με μια μικρή κάμψη προς τα πίσω λόγω της περιστροφικής κίνησης, ενώ στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση. Εκδηλώνονται συνήθως σε ομοιογενή εδαφικά υλικά και συνήθως το μήκος τους είναι 3-7 φορές το βάθος τους (Skempton & Hatchinson, 1969). Επίσης, μπορούν να εκδηλωθούν σε έντονα κατακερματισμένες βραχομάζες, δηλαδή σε πρηνή που λόγω του έντονου κατακερματισμού της βραχομάζας είναι σαν να δομούνται από αδρομερή εδαφικά υλικά. Η πιο συνηθισμένη περιστροφική ολίσθηση είναι η κάθιση (slump) με μικρή παραμόρφωση, η οποία αποτελεί ίσως και το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών σε φυσικά ή τεχνητά πρηνή.

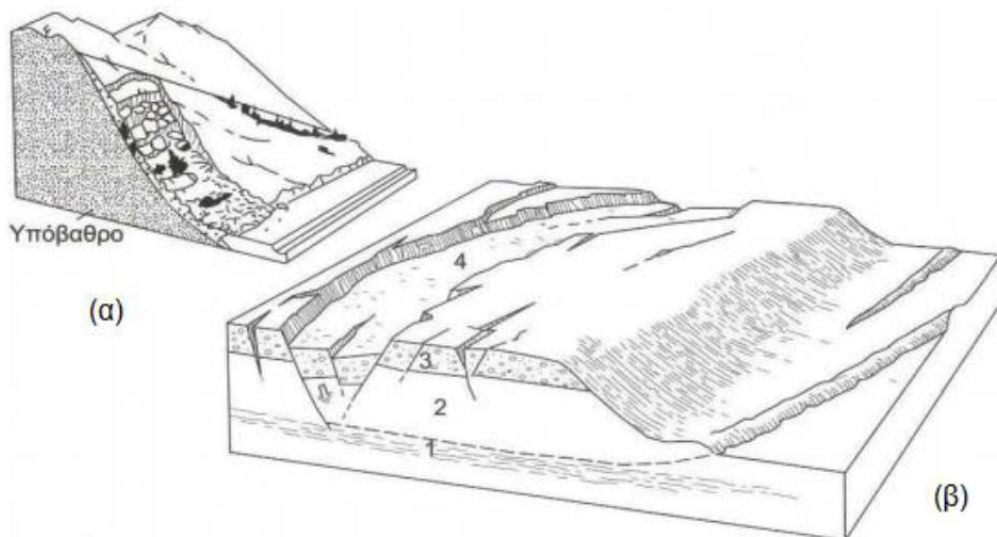


Σχήμα 3: Περιστροφικές ολισθήσεις κατά Varnes (1978): (α) βραχώδους υποβάθρου, (β) γαιών

### 2.2.3.2 Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides)

Ως μεταθετική ολίσθηση ορίζεται η μετακίνηση μάζας προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω, κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση (Σχήμα 4). Η βασική διαφορά της μεταθετικής από την περιστροφική ολίσθηση είναι ότι, εξαιτίας της μορφής της επιφάνειας ολίσθησης, η πρώτη δεν έχει την τάση σταδιακής εξισορρόπησης της ασταθούς μάζας. Οι μεταθετικές

ολισθήσεις είναι γενικά πιο αβαθείς από τις περιστροφικές και συνήθως το μήκος τους υπερβαίνει το δεκαπλάσιο του βάθους τους (Skempton και Hatchinson, 1969). Σε βραχώδεις σχηματισμούς, ο σημαντικότερος παράγοντας για την εκδήλωση μεταθετικών ολισθήσεων είναι η ύπαρξη ασυνεχειών (όπως ρήγματα, διακλάσεις, ρωγμές κ.α.) και η επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται από τις επιφάνειες αυτών. Σε εδαφικούς σχηματισμούς, η επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται από στρωματογραφικές μεταβάσεις ή από μεταβολές στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και η κίνηση συνήθως ελέγχεται από την λιθολογία των υποκείμενων εδαφικών στρωμάτων. Στους βραχώδεις σχηματισμούς, οι μεταθετικές ολισθήσεις που γίνονται κατά μήκος μιας συγκεκριμένης ασυνέχειας ονομάζονται ολισθήσεις τεμάχους (block slides) κατά Panet (1969) ή επίπεδες ολισθήσεις (planar slides) κατά Hoek & Bray (1977). Όταν η ολίσθηση γίνεται πάνω σε δύο τεμνόμενες επιφάνειες ασυνεχειών, τότε καλείται σφηνοειδής ολίσθηση (wedge failures).



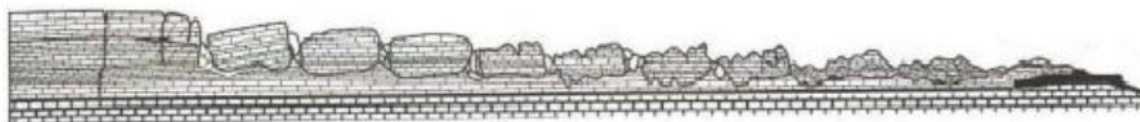
Σχήμα 4: Μεταθετικές ολισθήσεις (Varnes, 1978): (α) αποσαθρωμάτων, (β) εδαφικού τεμάχους

#### 2.2.4 Πλευρικές εξαπλώσεις (Spreads)

Ως πλευρικές εξαπλώσεις ορίζονται οι κινήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από πλευρική διάταση ενός συμπαγούς πετρώματος ή μιας συμπαγούς μάζας εδάφους που υπέρκειται ασθενών μηχανικών υλικών. Οι μετακινήσεις αυτές, διευκολύνονται από την παρουσία διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών. Διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες.

#### 2.2.4.1 Εξάπλωση τεμαχών (block spreads)

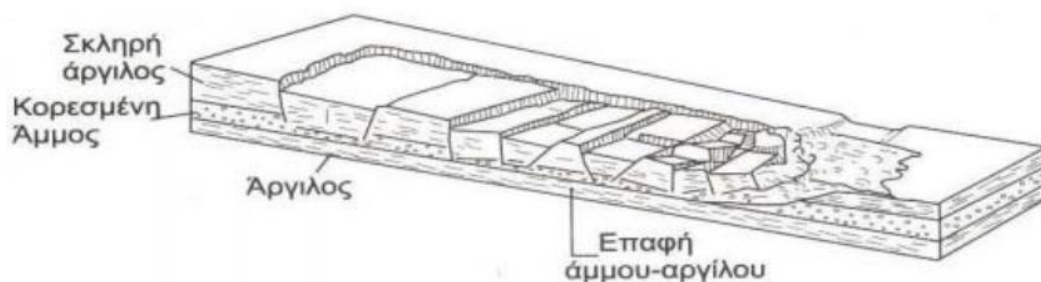
Εκδηλώνονται σε βραχώδεις σχηματισμούς, οι οποίοι υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, και διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές (Σχήμα 5). Τα τεμάχια του υπερκείμενου σχηματισμού συνθλίβουν το υποκείμενο στρώμα και συχνά καλύπτουν με αυτόν τον τρόπο τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα χωρίς να διαμορφώνεται καλώς καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης, και τις περισσότερες φορές είναι εξαιρετικά αργή.



Σχήμα 5: Πλευρική εξάπλωση ασβεστολιθικών τεμαχών που υπέρκεινται μαλακότερων σχηματισμών (Varnes, 1978)

#### 2.2.4.2 Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads)

Εκδηλώνονται κυρίως σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες, οι οποίες έχασαν την αντοχή τους και η δομή τους έχει καταστραφεί. Η βαθμιαία θραύση ξεκινά από μια μικρή περιοχή και στη συνέχεια επεκτείνεται προς τα πίσω έως τη στέψη της αστοχίας με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα, χωρίς προειδοποίηση (Σχήμα 6). Τα αποσπώμενα τεμάχια αρχικά καθιζάνουν με ή χωρίς περιστροφή και στη συνέχεια μπορεί να εκδηλωθεί εξώθηση και ροή του ρευστοποιημένου υλικού και των υπερκείμενων τεμαχίων. Αίτια εκδήλωσης των φαινομένων αυτών είναι η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων (έντονες βροχοπτώσεις και λιώσιμο χιονιού), οι σεισμικές δονήσεις και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (εκσκαφές και επιβολή φορτίσεων).



Σχήμα 6: Πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμου και ιλύος (Varnes, 1978)

### 2.2.4.3 Σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις (complex spreads)

Πρόκειται για έντονες παραμορφώσεις (κάμψη) σε οριζόντια σκληρά και διερρηγμένα πετρώματα που υπέρκεινται παχιών στρωμάτων σκληρών ρωγματωμένων αργίλων ή μαλακών σχιστόλιθων (Σχήμα 7). Τα φαινόμενα αυτά συνοδεύονται από έντονες παραμορφώσεις και ανύψωση του υποβάθρου (αναθόλωση). Έχουν καταγραφεί διάφορα είδη σύνθετων εξαπλώσεων, χωρίς όμως να έχει διευκρινιστεί επαρκώς ο μηχανισμός της συγκεκριμένης μετακίνησης.



Σχήμα 7: Σύνθετη ολίσθηση, πλευρική εξάπλωση ασβεστόλιθων και αναθόλωση υποκείμενων αργιλικών σχιστόλιθων

### 2.2.5 Ροές (Flows)

Εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά, με την μετακινούμενη μάζα να υφίσταται έντονες παραμορφώσεις, και μπορούν να είναι υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές. Διαφέρουν από τις ολισθήσεις ως προς την απουσία καλά διαμορφωμένων επιφανειών ολίσθησης και την έντονη παραμόρφωση της μετακινούμενης μάζας. Διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες.

#### 2.2.5.1 Ροές βραχώδους υποβάθρου (rock flow)

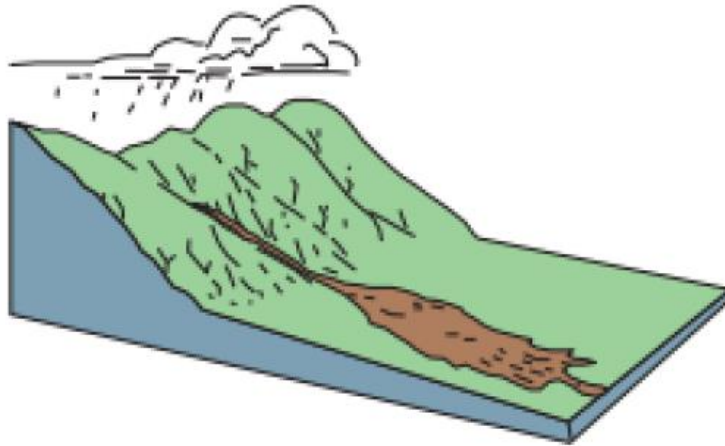
Είναι εξαιρετικά αργές παραμορφώσεις, οι οποίες κατανέμονται μεταξύ πολλών ασυνεχειών, χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας. Τέτοιες μετακινήσεις προέρχονται από πτυχώσεις, κάμψεις, διογκώσεις ή άλλες εκδηλώσεις πλαστικής παραμόρφωσης.

#### 2.2.5.2 Ροές κορημάτων (debris flow)

Ονομάζονται έτσι οι μετακινήσεις ξηρών έως υγρών εδαφικών αδρομερών υλικών (Σχήμα 8). Η ταχύτητα και η μορφή της ροής κορημάτων διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό και σε λεπτομερή υλικά. Η παραμόρφωση της μετακινούμενης



μάζας είναι πολύ έντονη και οι επιφάνειες ολίσθησης δεν είναι ορατές, με αποτέλεσμα το όριο ανάμεσα στη μετακινούμενη μάζα και στο υλικό που δε μετακινείται να είναι σαφές και να εντοπίζεται εύκολα. Στην περίπτωση ροής χωρίς την παρουσία νερού που συμβαίνει σε πρηνή με απότομες κλίσεις, ονομάζεται «ξηρή ροή κορημάτων». Όταν υπάρχει εξαιρετικά γρήγορη ροή κορημάτων, που εκδηλώνεται σε υλικά με αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό τα οποία συμπαρασύρουν μεγάλη ποσότητα χαλαρών υλικών, το φαινόμενο ονομάζεται «χιονοστιβάδα κορημάτων» (debris avalanche).



Σχήμα 8: Ροή κορημάτων (USGS, 2004)

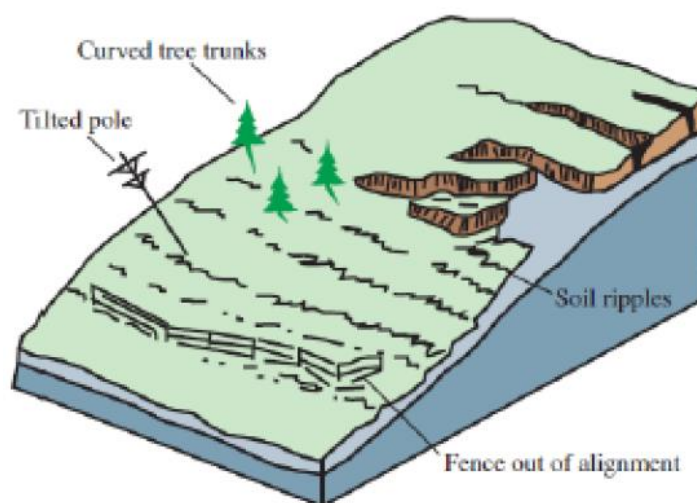
#### 2.2.5.3 Ροές γαιών (earth flow)

Είναι ροές εδαφικών υλικών με περιεκτικότητα σε άμμο, ιλύ και άργιλο τουλάχιστον 50% (Σχήμα 9). Ουσιαστικά στις περισσότερες περιπτώσεις πρόκειται για ροές του μανδύα αποσάθρωσης (ροές αποσαθρωμάτων). Η ταχύτητα και η μορφή της ροής γαιών διαφοροποιείται, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό των υλικών αλλά και με την περιεκτικότητά τους σε λεπτομερή υλικά. Με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, οι κινήσεις είναι εξαιρετικά γρήγορες και αναφέρονται ως ροές λάσπης ή λασποροές (mud flow). Οι αργές ροές που εκδηλώνονται στα επιφανειακά στρώματα του εδαφικού μανδύα ή στον μανδύα αποσάθρωσης των πετρωμάτων χαρακτηρίζονται από τον Varnes ως ερπυσμοί (creep).



Σχήμα 9: Ροή γαιών (USGS, 2004)

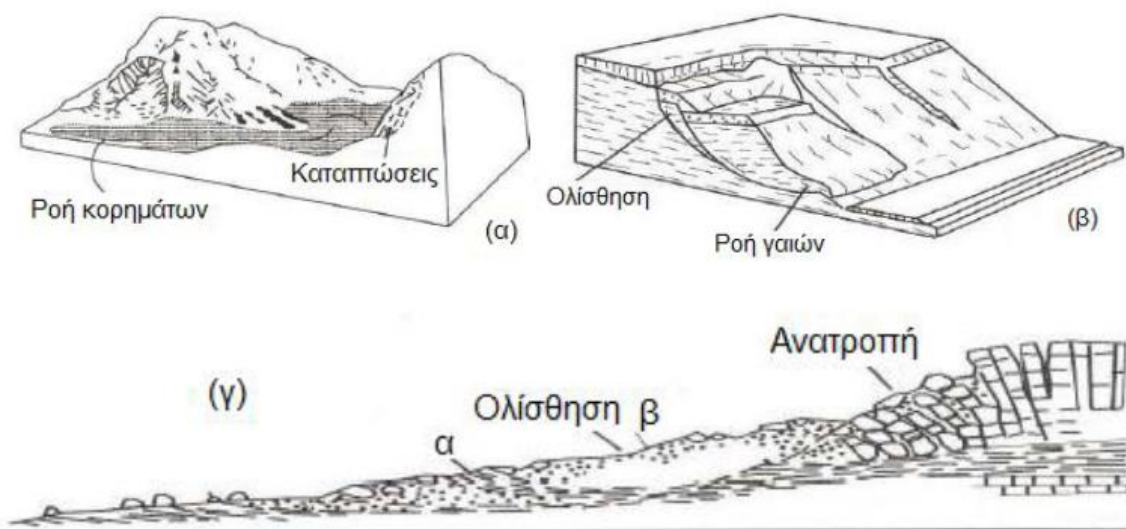
Οι ερπυσμοί είναι γενικά ένα επιφανειακό φαινόμενο, το οποίο εξελίσσεται συνεχώς και έτσι προκαλεί παραμορφώσεις με συνεχή τρόπο (Σχήμα 10). Η μετακίνηση προσβάλλει μεγάλη έκταση και εντοπίζεται σε μικρό βάθος λίγων δεκάδων εκατοστών, αλλά μερικές φορές μπορεί να φτάσει τα 2-3m. Στο σώμα των μετακινούμενων μαζών συνήθως εμφανίζονται κυματοειδείς παραμορφώσεις και πιθανά απουσιάζουν ρωγμές και αποκολλήσεις. Το φαινόμενο μπορεί να αναγνωριστεί από την κάμψη κορμών δέντρων, την κλίση στύλων ή ακόμα και από τη σχετική θέση των θραυσμάτων κάποιου χαρακτηριστικού γεωλογικού ορίζοντα.



Σχήμα 10: Ερπυσμός (USGS, 2004)

### 2.2.6 Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite or complex slides)

Πρόκειται για συνδυασμό των μετακινήσεων που περιεγράφηκαν παραπάνω (Σχήμα 11), οι οποίες εκδηλώνονται είτε ταυτόχρονα στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας (Composite slides), είτε κατά τα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης (complex slides).



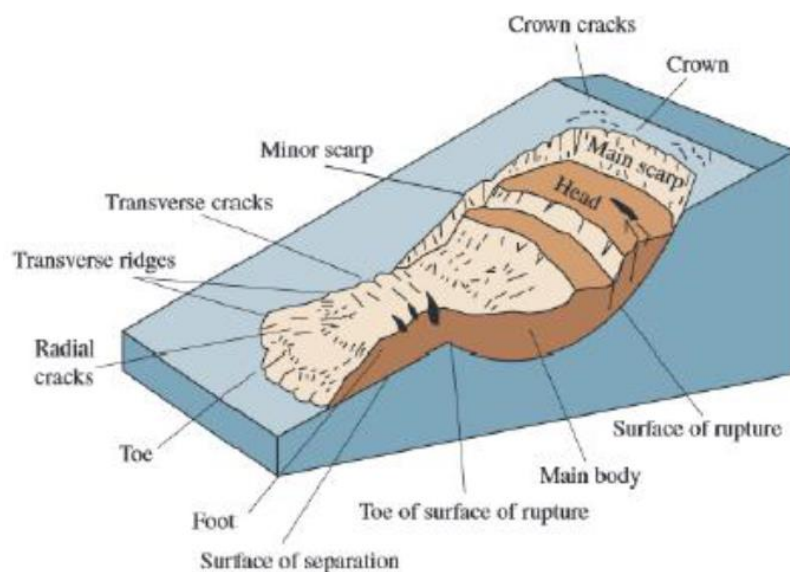
Σχήμα 11: Σύνθετοι τύποι μετακίνησης κατά Κούκη και Σαμπατακάκη (2007): (α) καταπτώσεις και ροή κορημάτων, (β) ολίσθηση και ροή γαιών, (γ) ανατροπή και ολίσθηση

### 2.3 Ονοματολογία Κατολισθήσεων

Το 1978 ο Varnes πρότεινε ένα διάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ιδεατό σχέδιο μιας περιστροφικής ολίσθησης και, με αυτό, μια ορολογία για τα διάφορα τμήματα της κατολίσθησης, η οποία αποτέλεσε τη βάση για την περιγραφή μιας κατολισθητικής κίνησης. Το 1990 η Διεθνής Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας (International Association of Engineering and Environment, IAEG) πρότεινε ένα πρότυπο διάγραμμα βασισμένο σε αυτό του Varnes, στο οποίο διακρίνονται τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης. Στη συνέχεια περιγράφονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μιας περιστροφικής ολίσθησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007, Λουπασάκης 2015, Σχήμα 12):

- Στέψη (Crown): Το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού πρανούς, πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.
- Κεφαλή (Head): Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης μεταξύ της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

- Κύρια κατακρήμνιση (Main scarp): Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης (στέψη), που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- Δευτερεύουσα κατακρήμνιση (Minor scarp): Μικρότερη κατακρήμνιση στο σώμα της μάζας που έχει ολισθήσει και έχει προέλθει από διαφορικές κινήσεις αυτής.
- Κύριο σώμα (Main body): Η μετακινούμενη μάζα μεταξύ κύριας κατακρήμνισης και του πόδα της κατολίσθησης που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης.
- Επιφάνεια ολίσθησης (Surface of rupture): Η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης κάτω από τη μετακινούμενη μάζα της κατολίσθησης, πάνω στην οποία έγινε η κατολίσθηση.
- Επιφάνεια διαχωρισμού (Surface of separation): Το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα της κατολίσθησης.
- Πόδας (Foot): Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και το οποίο υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας εδάφους.
- Απόληξη (Toe): Το κατώτερο, συνήθως κυρτό όριο της μετακινούμενης μάζας. Απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κύρια κατακρήμνιση.
- Εγκάρσιες ρωγμές (Transverse cracks): Ρωγματώσεις εγκάρσια στη κύρια διεύθυνση της κίνησης, μεταξύ κύριου σώματος και ποδός.
- Ακτινωτές ρωγμές (Radial cracks): Ρωγματώσεις που σημειώνονται στον πόδα της κατολίσθησης.



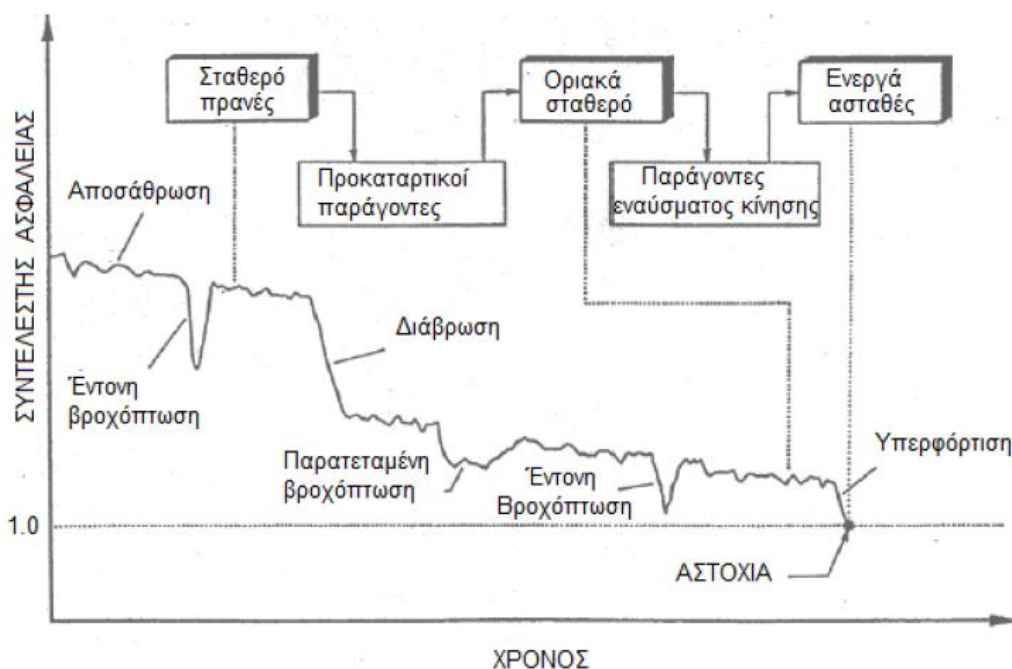
Σχήμα 12: Ονοματολογία περιστροφικής ολίσθησης (IAEG, Commission on Landslides, 1990)

## 2.4 Παράγοντες Κατολισθητικών Φαινομένων

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης προκαλείται από την συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Ορισμένοι απ' αυτούς επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα και επηρεάζουν την ισορροπία του πρανούς, θέτοντας τη μάζα σε οριακή κατάσταση ισορροπίας (landslide causes), ενώ άλλοι επιδρούν περιοδικά και αποτελούν το έναυσμα για την εκδήλωση του φαινομένου (triggering factors). Σύμφωνα με την WP /WLI της UNESCO, η χρήση του όρου "αίτια κατολισθήσεων" δεν είναι σωστή. Θεωρεί ότι περισσότερο ακριβής είναι η χρήση των όρων "συνθήκες και διεργασίες που οδηγούν στην αλλαγή της σταθερότητας του πρανού".

Από πλευράς ευστάθειας, ένα πρανές διέρχεται από τρία στάδια (Σχήμα 13):

- Σταθερό, το οποίο μπορεί και αντιστέκεται σε όλες τις δυνάμεις αποσταθεροποίησης,
- Οριακά σταθερό, που κάποια στιγμή αναμένεται η εκδήλωση αστάθειας από την επίδραση των δυνάμεων αποσταθεροποίησης,
- Ενεργά ασταθές, όπου οι δυνάμεις αποσταθεροποίησης προκαλούν συνεχείς ή περιοδικές μετακινήσεις.



Σχήμα 13: Παράδειγμα μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού σε συνάρτηση με το χρόνο (WP/WLI, 1994)

Όσον αφορά την προέλευση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων, αυτοί ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες (Popescu, 2002, Σχήμα 14):

- Εδαφικές συνθήκες, που αναφέρονται στα γενικά χαρακτηριστικά των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών.
- Γεωμορφολογικές διεργασίες, που αναφέρονται στις μεταβολές της γεωμορφολογίας του εδάφους.
- Φυσικές διεργασίες, που αναφέρονται στον ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο και μπορούν να εκτιμηθούν με την εγκατάσταση οργάνων, όπως πιεζόμετρα, σειсмоγράφοι, βροχόμετρα, κ.τ.λ.
- Ανθρωπογενείς διεργασίες, που αφορούν την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην ευρύτερη περιοχή.

Λεπτομερέστερα παραδείγματα των διαφόρων κατηγοριών των παραγόντων αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 14: Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων (WP/WLI, 1994)

Πίνακας 2: Ταξινόμηση παραγόντων εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI, 1994)

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ		ΕΛΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ		
ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΑΥΣΜΑΤΟΣ		1	Πλαστικό, χαμηλής αντοχής, υλικό	
		2	Ευαίσθητο υλικό	
		3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση	
		4	Αποσαθρωμένο υλικό	
		5	Διατημένο υλικό	
		6	Ρωγματομένο ή διακλασμένο υλικό	
		7	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)	
		8	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)	
		9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα	
		10	Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία	
			ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
			11	Τεκτονική ανύψωση
			12	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών
			13	Επίδραση παγετώνων
			14	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρानούς
			15	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρानούς
			16	Διάβρωση της βάσης του πρानούς από παγετώνα
			17	Διάβρωση των πλευρών του πρानούς
			18	Εσωτερική διάβρωση
			19	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέγη του πρανούς
			20	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση, κ.τ.λ.)
			ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
			21	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση
			22	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
			23	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
			24	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
			25	Σεισμοί
			26	Εκρήξεις ηφαιστειών
			27	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστειών
			28	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
			29	Αποσάθρωση λόγω παγετού
			30	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
			ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
			31	Εκσκαφές στη βάση (πόδι) του πρानούς
			32	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέγη του πρανούς
			33	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμειυτήρες
			34	Άρδευση
			35	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
			36	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές, κ.τ.λ.)
			37	Αποψίλωση
		38	Λατομεία και μεταλλεία	
		39	Δημιουργία χωματερών	
		40	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, κ.τ.λ.)	

## 2.5 Επιδεκτικότητα

Ως κατολισθητική επιδεκτικότητα (Landslide susceptibility) ορίζεται η δυνατότητα να συμβεί μία κατολίσθηση σε μία περιοχή, βάσει των τοπικών συνθηκών (γεωλογία, γεωμορφολογία, φυσικές διεργασίες κτλ.) που επικρατούν (Brabb, 1984). Η επιδεκτικότητα δεν αναφέρεται στον παράγοντα χρόνου εμφάνισης του φαινομένου, δηλαδή στο πότε και πώς θα συμβεί, ούτε και στο μέγεθος της αναμενόμενης κατολίσθησης. Η βασική θεώρηση της επιδεκτικότητας προς κατολίσθηση περιλαμβάνει τη χωρική κατανομή των παραγόντων εκδήλωσης του φαινομένου, με σκοπό την εκτίμηση ζωνών επιρρεπών προς κατολίσθηση, χωρίς καμία χρονική αναφορά (Radbruch 1970). Η επιδεκτικότητα μπορεί επίσης να συμπεριλάβει μία περιγραφή της ταχύτητας και της έντασης των υπαρχόντων ή των δυνητικών κατολισθήσεων.

## 2.6 Κατολισθήσεις στην Ελλάδα

Στον Ελληνικό χώρο το ιστορικό κατολισθητικών φαινομένων είναι πλούσιο, με ορισμένα από αυτά να έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Με βάση καταγραφές που έχουν γίνει από τους αρμόδιους κρατικούς φορείς, διαπιστώνεται ότι τη μεταπολεμική περίοδο έχουν εκδηλωθεί στην Ελλάδα πάνω από 500 κατολισθήσεις. Ο αριθμός αυτός αφορά κατολισθήσεις κατά μήκος του οδικού δικτύου και μέσα σε οικιστικούς χώρους ή εν πάσει περιπτώσει με κάποια οικονομική ή κοινωνική επίπτωση, επομένως ο συνολικός αριθμός θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Παράγοντες που μπορεί να συμβάλλουν στα πολυάριθμα αυτά φαινόμενα μπορεί να είναι οι μεγάλες μορφολογικές κλίσεις των πρανών, η έντονη τεκτονική παραμόρφωση, οι έντονες κλιματολογικές συνθήκες και διαφοροποιήσεις και η υψηλή σεισμικότητα που χαρακτηρίζει τον Ελληνικό χώρο, καθώς και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στο περιβάλλον.

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι ο Ελληνικός χώρος σε σχέση με την κατολισθησιμότητά του μπορεί να διακριθεί σε τρεις ζώνες (Χάρτης 2). Συγκεκριμένα:

- I. Ζώνη Δυτικής Ελλάδας: η λιθολογική σύσταση και δομή αυτού του μέρους της Ελλάδας την καθιστά επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα. Συναντώνται χαλαρές τεταρτογενείς αποθέσεις, νεογενείς αποθέσεις και φλυσικά ιζήματα. Μειωμένη ευστάθεια παρατηρείται και στα μικρού πάχους καλύμματα ασβεστολιθικής – κερατολιθικής σύστασης που βρίσκονται πάνω από μαλακούς σχηματισμούς μέσω επιπεύσεων και επωθήσεων, κινήσεις οι οποίες φανερώνουν τις έντονες εφαπτομενικές κινήσεις που έλαβαν χώρα κατά το παρελθόν. Επιπλέον σε

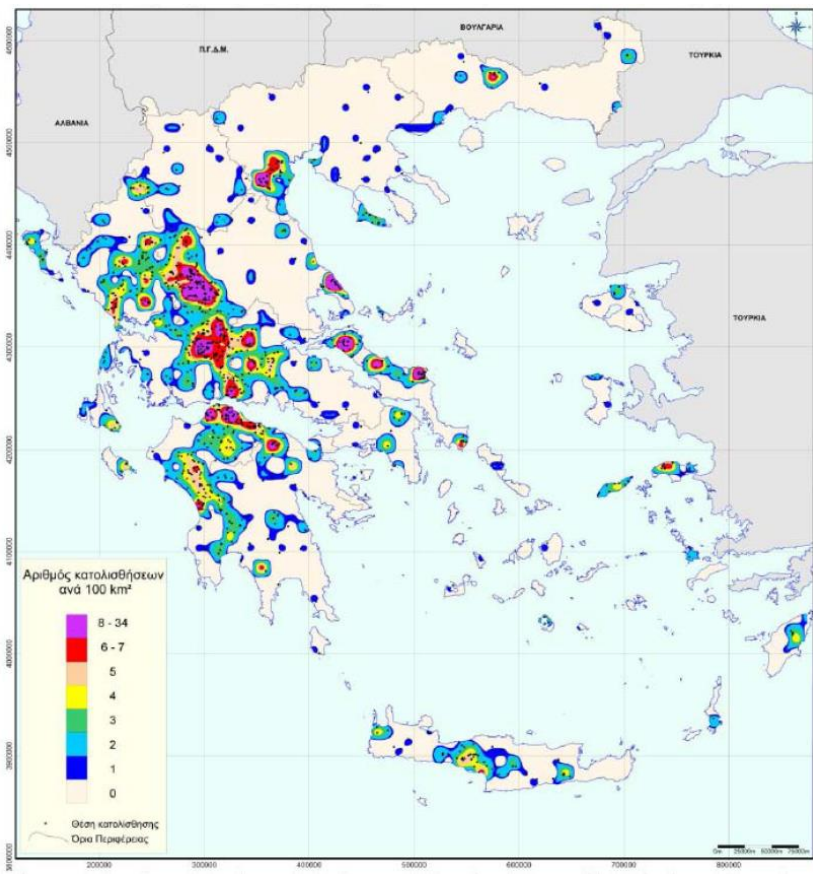


ασβεστολιθικά – κερατολιθικά πρηνή είναι δυνατό να σημειωθούν καταπτώσεις βράχων λόγω της έντονης και πολυσχιδούς διάρρηξής τους, ενώ σε σχηματισμούς φλύσχη οι κατολισθήσεις οφείλονται στην έντονη τεκτονική καταπόνηση αλλά και στην εναλλαγή οριζόντων στη σύστασή τους, η οποία οδηγεί σε ύπαρξη διαφορετικών φυσικοχημικών δεικτών και υδρολογικής συμπεριφοράς.

- II. Κεντρική Ελλάδα: τα κατολισθητικά φαινόμενα είναι ανάλογα με αυτά που εμφανίζονται στη Δυτική Ελλάδα, κατά τόπους όμως είναι πιο έντονα λόγω του έντονου μορφολογικού ανάγλυφου και της εξέλιξης των σχηματισμών που απαντώνται στη περιοχή. Στη ζώνη αυτή, τα μεγαλύτερα προβλήματα εντοπίζονται στα ιζήματα της γεωτεκτονικής ζώνης Ωλονού – Πίνδου λόγω της συστάσεώς τους, των πολυπτυχωμένων δομών και της έντονης μορφολογίας. Και εδώ, ευπαθείς σχηματισμοί είναι αυτοί του φλύσχη και οι ΑνωΚρητιδικοί μεταβατικοί σχηματισμοί προς αυτόν, τα νεογενή ιζήματα και οι χαλαρές αποθέσεις Τεταρτογενούς.
- III. Ανατολική Ελλάδα: στο τμήμα αυτό, οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι καλύτερες. Το μεγαλύτερο μέρος καταλαμβάνεται από συμπαγή και συνεκτικά πετρώματα (προαλπικό υπόβαθρο με μεταμορφωμένα και ημι – μεταμορφωμένα πετρώματα) μεγάλου πάχους και με ομοιόμορφη κατανομή φυσικοχημικών ιδιοτήτων, με συνέπεια να παρατηρείται καλύτερη ευστάθεια των σχηματισμών αυτών. Οι νεότερης ηλικίας σχηματισμοί που υπέρκεινται (φλύσχης, τεταρτογενείς αποθέσεις, νεογενή) εμφανίζουν μικρότερης εκτάσεως κατολισθητικές κινήσεις. Τοπικά, μπορεί να εκδηλωθούν καταπτώσεις βράχων σε συμπαγή πετρώματα (μάρμαρα, σχιστόλιθοι) κυρίως λόγω του έντονου μορφολογικού ανάγλυφου, της έντονης διάρρηξής και της περιοδικής φόρτισης από τάσεις που οφείλονται σε παγετό ή άλλες φορτίσεις. Θραύσεις και ολισθήσεις είναι δυνατό να εντοπιστούν και στο μανδύα αποσάθρωσης των σχηματισμών του υποβάθρου.



Χάρτης 2: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας



Χάρτης 3: Συχνότητα κατολισθητικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο (Βασιλειάδης, 2010)

Στον παραπάνω Χάρτη 3 παρατηρείται ότι η περιοχή του Νοτιοανατολικού Πηλίου, η οποία αποτελεί την περιοχή έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ανήκει στις περιοχές με υψηλή και πολύ υψηλή συχνότητα κατολισθητικών φαινομένων.

Ορισμένα παραδείγματα κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο είναι τα εξής:

1. Κοινότητα Βαλιμής (νομός Αχαΐας): στην περιοχή αυτή εντοπίζονται κατολισθητικά φαινόμενα από το 1910, τα οποία οδήγησαν σε σταδιακή εγκατάλειψη του χωριού.
2. Οικισμός Συλίβαινα (νομός Αχαΐας): τα κατολισθητικά φαινόμενα του έτους 1913 οδήγησαν στο θάνατο 4 ανθρώπων και στην ολοκληρωτική καταστροφή του οικισμού.
3. Περιοχή Πλατάνου (νομός Αχαΐας): αποτελεί σύνθετη κατολίπηση, στην οποία συναντώνται παλιά και νέα κατολισθητικά φαινόμενα τα οποία προκαλούν αστοχίες στη Νέα Εθνική Οδό Πατρών – Αθηνών (Κάβουρα Α. Π., 2013).
4. Περιοχή Παναγοπούλας (νομός Αχαΐας): το πρώτο κατολισθητικό φαινόμενο της περιοχής εκδηλώθηκε το 1971 και προκάλεσε σοβαρά προβλήματα αφού οδήγησε σε αποκοπή του συγκοινωνιακού άξονα Πατρών – Αθηνών (Εικόνα 4). Παρά τα μέτρα προστασίας που ελήφθησαν, η περιοχή συνέχισε να προκαλεί αστοχίες στο οδικό δίκτυο (1983, 1994, 1997). Σήμερα, για τη σταθεροποίηση των πρανών έχει κατασκευαστεί διάφραγμα έγχυτων πασσάλων αντιστήριξης στο κάτω άκρο της Νέας Εθνικής Οδού Πατρών – Αθηνών (Κάβουρα Α. Π., 2013).



*Εικόνα 4: Κατολίπηση Παναγοπούλας στη Ν.Ε.Ο. Αθηνών – Πατρών, 1971*

5. Νομός Ευρυτανίας: παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο με μεγάλες κλίσεις πρανών καθώς επίσης και έντονες βροχοπτώσεις, παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση πολυάριθμων κατολισθητικών φαινομένων. Περιοχές στις οποίες εκδηλώθηκαν κατολισθήσεις είναι το Μικρό Χωριό Καρπενησίου, όπου η κατολίσθηση του 1963 προκάλεσε το θάνατο 13 ανθρώπων και την καταστροφή του χωριού(Εικόνα 5), η Αγία Παρασκευή (2000) και το χωριό Προυσός, όπου αφορά επανεργοποιημένη κατολίσθηση (Ρίσβα Ι. Γ., 2012).



*Εικόνα 5: Κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας, 1963*

6. Περιοχή Μαλακάσας (νομός Αττικής): η κατολίσθηση που έλαβε χώρα το 1995 κατέστρεψε τμήμα του οδικού άξονα της Εθνικής Οδού Αθηνών – Λαμίας καθώς και τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής Αθήνας – Θεσσαλονίκης (Εικόνες 6 και 7) προκαλώντας σημαντική οικονομική επιβάρυνση στην εθνική οικονομία με ποσά άνω του 1 δισεκατομμυρίου δραχμών.



*Εικόνα 6: Κατολίσθηση Μαλακάσας (άποψη Ε.Ο. Αθηνών – Λαμίας), 1995*



*Εικόνα 7: Κατολίσθηση Μαλακάσας (άποψη σιδηροδρομικής γραμμής Αθηνών – Θεσσαλονίκης), 1995*

7. Περιοχή Τσάκωνα (νομός Αρκαδίας): η κατολίσθηση εντοπίστηκε στη Νέα Εθνική Οδό Τρίπολης – Καλαμάτας, με τις πρώτες ενδείξεις μετακίνησης να εντοπίζονται το 2000 μετά την ολοκλήρωση κατασκευής του οδικού δικτύου και με τελικό αποτέλεσμα το 2003 όπου έλαβε χώρα η πλήρης ενεργοποίηση της κατολίσθησης, η

οποία προκάλεσε διακοπή της κυκλοφορίας από το συγκεκριμένο σημείο του οδικού άξονα. Η αστοχία αυτή αποτελεί σύνθετη μεταθετική ολίσθηση και αφορά τη μεγαλύτερη αστοχία που έπληξε συγκοινωνιακό δίκτυο της χώρας μας με μήκος 1.300m και πλάτος 300m (Καρακουλάκης Σ., Παπαδόπουλος Ν., 2012) .

8. Χωριό Αγίας Άννας (Νομός Ευβοίας): το 2003 εκδηλώθηκε εκτεταμένη κατολίσθηση σε σχηματισμούς αργιλοϊλυωδών μαζών στα νότια περιθώρια του χωριού, από την οποία προκλήθηκαν υλικές ζημιές σε κτίσματα, επαρχιακό οδικό δίκτυο και στο νεκροταφείο του χωριού (Καρακουλάκης Σ., Παπαδόπουλος Ν., 2012) .

### 3 Εργαλεία Ανάλυσης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εκτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας στην περιοχή του νοτιοανατολικού Πηλίου, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία ανάλυσης που αφορούν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, στατιστικές μεθόδους ανάλυσης και μεθόδους εξόρυξης δεδομένων και μηχανικής μάθησης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα στοιχεία για τα εν λόγω εργαλεία.

#### 3.1 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών – Γενικά στοιχεία – Ορισμός

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.), *Geographic Information Systems (GIS)* αποτελούν σύνθετα συστήματα που απαρτίζονται από εργαλεία συλλογής, αποθήκευσης, ανάκτησης, ανάλυσης και απόδοσης χωρικών και μη – χωρικών δεδομένων.

Πρώτη χρήση του όρου έγινε τη δεκαετία του '60 από τον Άγγλο Γεωγράφο R. Tomlinson, για την περιγραφή ενός Συστήματος Ανάλυσης Χαρτογραφικών Δεδομένων, που αναπτύχθηκε για την Καναδική κυβέρνηση και αφορούσε τη διαχείριση δεδομένων χρήσεων γης (*Canada Geographic Information System, CGIS*). Παρά την από τότε συνεχή εξέλιξη τους και την ανάπτυξη των εφαρμογών τους, δεν υπάρχει ένας σαφής και κοινά αποδεκτός ορισμός για το τι ακριβώς είναι τα Γ.Σ.Π. Παρόλα αυτά, όλοι οι ορισμοί και θεωρήσεις που έχουν διατυπωθεί μοιράζονται κοινά στοιχεία, γεγονός που οφείλεται στην εκτεταμένη ποικιλομορφία του πεδίου, το οποίο έχει πολλές εφαρμογές και αλληλεπιδράσεις με άλλους επιστημονικούς τομείς.

Όλες οι διαφορετικές ιδέες που έχουν κατά καιρούς εκφραστεί για τα Γ.Σ.Π. και τις εφαρμογές τους μπορούν να συμπυκνωθούν σε τρεις ξεχωριστές ομάδες, οι οποίες είναι αλληλένδετες μεταξύ τους (Κουτσόπουλος, 2005).

Η πρώτη ομάδα, η οποία χαρακτηρίζεται ως Διαχειριστική Προσέγγιση, στοχεύει στη δημιουργία και διαχείριση χωρικών δεδομένων και χωρίζεται σε δυο υποομάδες: στην Χαρτογραφική Προσέγγιση, που εστιάζει κυρίως στα χαρτογραφικά χαρακτηριστικά των Γ.Σ.Π., καθώς και στην Πληροφορική Προσέγγιση, η οποία δίνει έμφαση στην ικανότητά τους να διαχειρίζονται βάσεις δεδομένων. Η δεύτερη ομάδα αναφέρεται ως Προσέγγιση Χωρικής Ανάλυσης και υποστηρίζει τη σπουδαιότητα της Γεωγραφικής Χωρικής Ανάλυσης. Τέλος η τρίτη ομάδα αναφέρεται στη Σχεδιαστική Προσέγγιση, η οποία εστιάζει

την προσοχή της στο γεγονός ότι τα Γ.Σ.Π. έχουν τη δυνατότητα να βοηθούν στην επίλυση χωρικών προβλημάτων.

### 3.1.1 Βασικά μέρη ενός Γ.Σ.Π.

Σύμφωνα με τους Marble, Calkins & Peuquet (1985), ένα Γ.Σ.Π. πραγματεύεται δεδομένα χώρου και χρόνου και υποστηρίζεται από μηχανικό υπολογιστικό εξοπλισμό και κατάλληλο λογισμικό, ενώ συνίσταται από τέσσερα (4) κύρια υποσυστήματα:

- ένα υποσύστημα εισαγωγής δεδομένων, που συγκεντρώνει και προ – επεξεργάζεται χωρικά στοιχεία, προερχόμενα τις περισσότερες φορές από διαφορετικές πηγές πληροφόρησης,
- ένα υποσύστημα αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων, που οργανώνει τα χωρικά στοιχεία με τρόπο που να επιτρέπει την εύκολη ανάκτηση δεδομένων, την επικαιροποίηση και την επεξεργασία τους,
- ένα υποσύστημα διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων, το οποίο αποτελεί το κεντρικό εργαλείο του Γ.Σ.Π.,
- ένα υποσύστημα παραγωγής δεδομένων εξόδου, όπου τα δεδομένα παρουσιάζονται με διάφορες μορφές (χάρτες, πίνακες, αναφορές).

Κάθε ένα από τα υποσυστήματα αυτά λειτουργεί παράλληλα και σε συνέχεια με τα υπόλοιπα, ενώ, σύμφωνα με τον Bolstad (2005), η σωστή και αποδοτική λειτουργία ενός ολοκληρωμένου Γ.Σ.Π. στηρίζεται σε πέντε (5) βασικά συστατικά (Σχήμα 15): τα Μηχανικά Υπολογιστικά Συστήματα, τα Λογισμικά Υπολογιστικά Συστήματα, τις Μεθόδους και τα πρωτόκολλα Εφαρμογής, το Ανθρώπινο Δυναμικό και τα διαθέσιμα Δεδομένα.





Σχήμα 15: Τα πέντε συστατικά μέρη ενός Γ.Σ.Π. (ESRI.com)

**Μηχανικό Υπολογιστικό Σύστημα:** Αποτελείται από την κεντρική μονάδα, το λειτουργικό σύστημα, τη μνήμη και τα αποθηκευτικά μέσα, καθώς και τα διάφορα περιφερειακά συστήματα, εκτυπωτές, σαρωτές, εξωτερικά αποθηκευτικά μέσα, συσκευές εντοπισμού GPS, κ.α. Οι προδιαγραφές και οι δυνατότητες του Μηχανικού Υπολογιστικού Συστήματος επηρεάζουν την ταχύτητα επεξεργασίας, την ευκολία χρήσης καθώς και τη μορφή της εξόδου του συστήματος.

**Λογισμικό Υπολογιστικό Σύστημα:** Σε ό,τι αφορά το λογισμικό σύστημα, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί ένα Γ.Σ.Π. κατηγοριοποιούνται σε πέντε (5) κατηγορίες (Burrough & MacDonnell, 1998):

1. αλγόριθμοι εισαγωγής και επαλήθευσης στοιχείων (*Data Acquisition*), οι οποίοι αποτελούν το βασικό εργαλείο του *υποσυστήματος εισαγωγής δεδομένων*, και επιτρέπουν το μετασχηματισμό και τη διαμόρφωση των αρχικών αναλογικών ή και ψηφιακών δεδομένων σε δεδομένα κατάλληλης μορφής,
2. αλγόριθμοι αποθήκευσης και διαχείρισης στοιχείων (*Data Management*), που αποτελούν βασικά εργαλεία του *υποσυστήματος αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων*, μέσω των οποίων δομούνται και οργανώνονται τα διαμορφωμένα δεδομένα,
3. αλγόριθμοι μετασχηματισμού στοιχείων (*Manipulation and Analysis*), οι οποίοι αποτελούν βασικό εργαλείο του *υποσυστήματος διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων*, όπου πραγματοποιούνται διεργασίες προεπεξεργασίας (*Preprocessing*) και ανάλυσης των διαμορφωμένων δεδομένων,

4. αλγόριθμοι ερωτημάτων και αναζητήσεων, οι οποίοι αποτελούν το δεύτερο βασικό εργαλείο του *υποσυστήματος διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων*, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται δυναμική επικοινωνία μεταξύ χρηστών και υπολογιστικού προγράμματος,
5. αλγόριθμοι παρουσίασης (*Product Generation*), οι οποίοι αποτελούν βασικά εργαλεία του *υποσυστήματος παραγωγής δεδομένων εξόδου*, και οι οποίοι αποδίδουν τις παραγόμενες πληροφορίες, με τη μορφή πινάκων, μαθηματικών συναρτήσεων, στατιστικών δεικτών, ιστογραμμάτων, γραφημάτων, στατικών και δυναμικών εικόνων αλλά κυρίως μέσω χαρτογραφικών προϊόντων.

Κατά τον Κουτσόπουλο (2002), θα πρέπει να προστεθεί μια επιπλέον κατηγορία αλγορίθμων, μέσω των οποίων επιχειρείται Ανάλυση Χώρου, δηλαδή διεργασιών όπου πραγματοποιείται η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση φαινομένων στο χώρο.

**Ανθρώπινο δυναμικό:** Το ανθρώπινο δυναμικό συμμετέχει αλληλοεπιδρώντας δυναμικά με το Γ.Σ.Π.. Ο διαχειριστής του συστήματος, ο ειδικός τεχνικός, ο τελικός χρήστης και ο καταναλωτής, αποτελούν κατά βάση το συστατικό ενός ολοκληρωμένου Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, που καθορίζει το αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός Γ.Σ.Π., καθώς επεμβαίνει σε όλα τα στάδια της διαδικασίας, από τη διαμόρφωση του στόχου, την επιλογή των μηχανικών υπολογιστικών συστημάτων, των λογισμικών υπολογιστικών συστημάτων, των διαδικασιών και των μεθόδων εφαρμογής, τη διαχείριση και επεξεργασία, καθώς και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

**Διαδικασίες και Μέθοδοι Εφαρμογής:** Οι μέθοδοι εφαρμογής αναφέρονται στα διαχειριστικά πρότυπα, στα πρωτόκολλα πρόσβασης, στις αρχές και στους κανόνες καθώς και στις κατευθυντήριες γραμμές, τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή της τεχνολογίας των Γ.Σ.Π..

**Διαθέσιμα Δεδομένα:** Είναι σαφές ότι η ποιότητα και η ποσότητα των δεδομένων καθορίζουν την αξία του αποτελέσματος. Θα πρέπει να είναι σε ψηφιακή μορφή και συνήθως προκύπτουν με ψηφιοποίηση αναλογικών δεδομένων (π.χ. τυπωμένοι χάρτες) ή με τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων με χρήση ψηφιακών μεθόδων αποτύπωσης χώρου (αποτύπωση με συστήματα εντοπισμού θέσης, GPS, Τηλεπισκόπηση κ.α.).

### 3.1.2 Κατηγορίες δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα Γ.Σ.Π. διακρίνονται ως προς τη φύση τους σε χωρικά (spatial), στα οποία η βασική πληροφορία είναι η θέση τους στο χώρο με βάση κάποιο σύστημα αναφοράς, και στα ποιοτικά ή περιγραφικά (descriptive), τα οποία αναφέρονται στις ιδιότητες κάποιων χωρικών θέσεων. Με βάση τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η καταχώριση και επεξεργασία των χαρτογραφικών στοιχείων, τα δεδομένα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι τα διανυσματικά (Vector) και τα ψηφιδωτά (Raster, Σχήμα 16). Τα δυο αυτά είδη απεικόνισης διαφέρουν τόσο λειτουργικά, όσο και σε ότι έχει να κάνει με τις ιδιότητές τους.

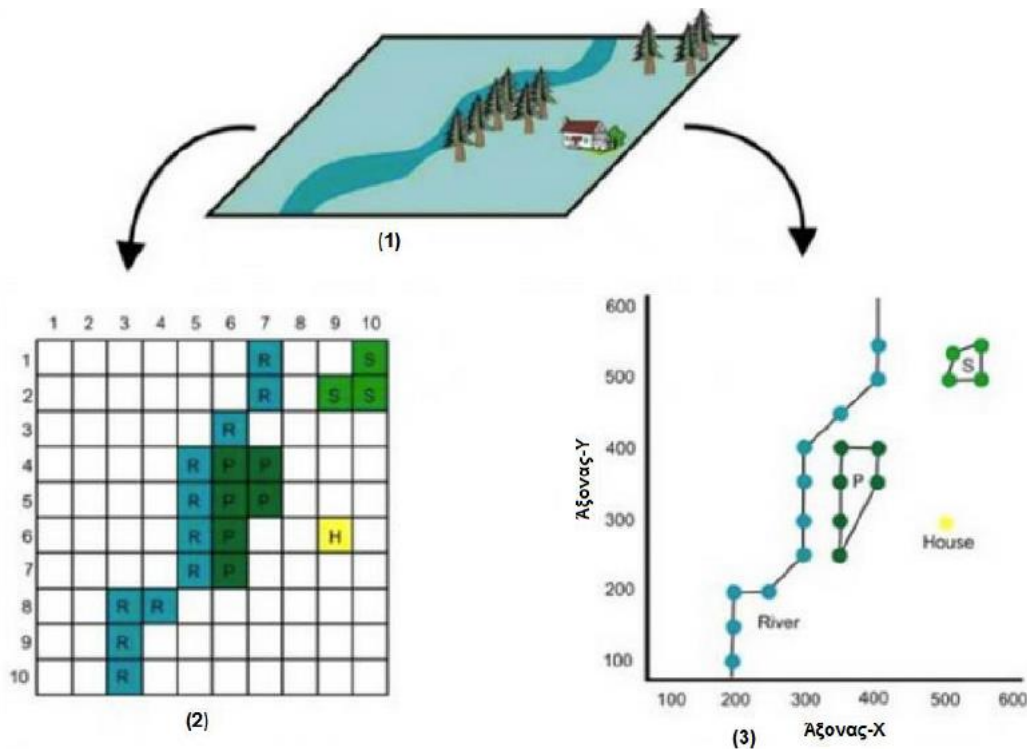
#### 3.1.2.1 Διανυσματικά δεδομένα

Τα διανυσματικά δεδομένα ή vector data αναπαριστούν τις γεωγραφικές οντότητες ως σημεία, γραμμές ή πολύγωνα, με τις συντεταγμένες να προσδιορίζουν το σχήμα και τη θέση της γεωγραφικής οντότητας. Η θεμελιώδης μονάδα είναι το «διάνυσμα» το οποίο έχει συγκεκριμένη αρχή και τέλος, με συντεταγμένες (x,y), μέτρο, διεύθυνση και φορά. Μεμονωμένα σημεία σε μια τέτοιου είδους οργάνωση αναπαρίστανται με διανύσματα μηδενικού μήκους, ενώ οι επιφάνειες (πολύγωνα) εκφράζονται από ένα σύνολο διαδοχικών διανυσμάτων. Η μεθοδολογία αναπαράστασης γεωγραφικών δεδομένων με τα βασικά γραφικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, πολύγωνα), ονομάζεται “διανυσματικό μοντέλο”. Τέτοια μοντέλα θεωρούνται κατάλληλα για την περιγραφή φαινομένων που έχουν σαφή οριζόμενα όρια ή για την αναπαράσταση φυσικών φαινομένων, αν και εφ’ όσον θεωρηθούν διακριτά.

#### 3.1.2.2 Ψηφιδωτά δεδομένα

Τα ψηφιδωτά δεδομένα ή raster data αναπαριστούν τις γεωγραφικές οντότητες ως πλέγμα φατνίων (pixels), τα οποία αποτελούν τη θεμελιώδη μονάδα. Ένα σύνολο φατνίων συνιστά ένα μητρώο (κάνναβο). Κάθε φατνίο προσδιορίζεται από το ζεύγος συντεταγμένων γραμμής – στήλης του αντίστοιχου κάνναβου που εκφράζεται ως στοιχείο ενός πίνακα, και έναν αριθμό που προσδιορίζει το είδος ή την τιμή του χαρακτηριστικού που απεικονίζει. Το μέγεθος του φατνίου ορίζει την ανάλυση του ψηφιδωτού δεδομένου. Επομένως η προσέγγιση αυτή ορίζει ένα κανονικό αλλά αυθαίρετο σύστημα πολυγώνων για την αποθήκευση γεωγραφικών στοιχείων. Το μοντέλο αναπαράστασης των γεωγραφικών οντοτήτων με τη χρήση ψηφιδών ονομάζεται “ψηφιδωτό μοντέλο” ή “μοντέλο κάνναβου”.

Τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για την περιγραφή φαινομένων ή παραμέτρων που παρουσιάζουν μια συνέχεια στο χώρο.



Σχήμα 16: (1) Πραγματικός κόσμος, (2) Αναπαράσταση σε ψηφιδωτή μορφή (raster), (3) Αναπαράσταση σε διανυσματική μορφή (vector) (udemy.com)

## 3.2 Μέθοδοι

### 3.2.1 Μοντέλο πρόβλεψης Λόγου Συχνοτήτων

Το μοντέλο του Λόγου Συχνοτήτων (Frequency Ratio - FR) είναι μια στατιστική διμεταβλητή μέθοδος, η οποία, βασιζόμενη στις χωρικές συσχετίσεις μεταξύ της κατανομής των κατολισθήσεων και των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωσή τους, εκτιμάει το βαθμό της μεταξύ τους συσχέτισης. Χαρακτηρίζεται από εύκολη εφαρμογή σε περιπτώσεις που διατίθεται ολοκληρωμένη βάση δεδομένων κατολισθήσεων με πολλούς παράγοντες, κάτι που έχει ως συνέπεια την ευρύτατη χρήση του.

Το FR υπολογίζεται για κάθε κατηγορία (κλάση) όλων των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη, διαιρώντας το λόγο των κατολισθήσεων με το λόγο των εκτάσεων.

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(S_i,j)}{\sum N_{pix}(S_i,j)}}{\frac{N_{pix}(N_i,j)}{\sum N_{pix}(N_i,j)}} \quad (1)$$

όπου  $N_{pix}(S_{i,j})$  είναι το πλήθος των φατνίων κατολίσθησης στην κατηγορία (κλάση)  $j$  του παράγοντα  $i$ , και  $N_{pix}(N_{i,j})$  είναι το συνολικό πλήθος των φατνίων στην ίδια κατηγορία. Όταν η τιμή του δείκτη  $FR$  είναι ίση με 1 (μέση τιμή), αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα των κατολισθήσεων στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι ανάλογη με το μέγεθος της κατηγορίας. Στην περίπτωση που η τιμή είναι μεγαλύτερη του 1, τότε υπάρχει μια υψηλή συσχέτιση, ενώ όταν η τιμή είναι μικρότερη από 1 υποδεικνύεται μικρή συσχέτιση (Choi et al., 2012).

Η συνολική τιμή της κατολισθητικής επιδεκτικότητας για κάθε φατνίο του τελικού επιπέδου, προκύπτει αθροίζοντας τις τιμές του  $FR$  των εξεταζόμενων παραγόντων.

$$LSI = \sum_{i=1}^n FR_{i,j} \quad (2)$$

όπου  $FR_{i,j}$  είναι η τιμή  $FR$  για την κατηγορία  $j$  του παράγοντα  $i$ , και  $n$  είναι ο αριθμός των παραγόντων.

### 3.2.2 Εξόρυξη Δεδομένων

Ως Εξόρυξη Δεδομένων ορίζεται η διαδικασία μέσω της οποίας αναλύεται ένα σύνολο δεδομένων για την εξαγωγή γνώσης με την μορφή κανόνων και την αναγνώριση μοτίβων ή προτύπων που ενδεχομένως υπάρχουν στα δεδομένα (Τσαγγαράτος, 2012).

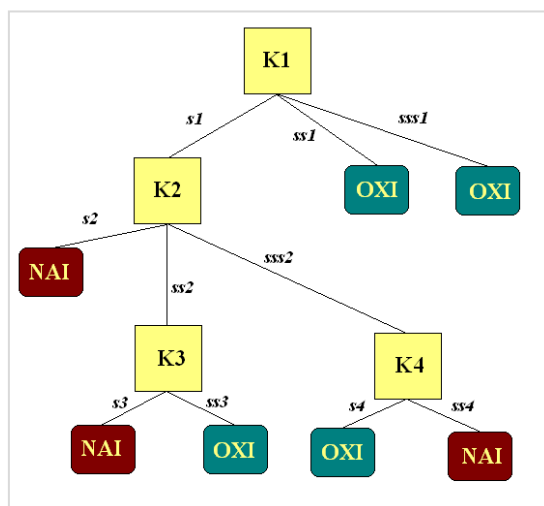
Η Εξόρυξη Δεδομένων αποτελεί υποσύνολο της Ανακάλυψης Γνώσης από Βάσεις Δεδομένων (Knowledge Discovery in Databases, KDD), η οποία περιγράφεται ως η συνολική διαδικασία συλλογής, αποθήκευσης, προ - επεξεργασίας, ανάλυσης, μοντελοποίησης και ελέγχου ενός συνόλου δεδομένων.

Στη σημερινή εποχή της πληροφορίας, η ανάγκη των μεγάλων όγκων δεδομένων να μετατραπούν σε γνώση θέτει την Εξόρυξη Δεδομένων, που χαρακτηρίζεται από άμεση διαθεσιμότητα και πρόσβαση σε μεγάλα σύνολα δεδομένων, ως έναν δυναμικό επιστημονικό τομέα με ευρεία εφαρμογή. Μέθοδοί της βρίσκουν εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, στο χώρο του Marketing, στον ασφαλιστικό τομέα, στην πρόληψη και στη διασφάλιση των ηλεκτρονικών συναλλαγών, στην ανεύρεση κακόβουλων μηνυμάτων στο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, καθώς και στον κατασκευαστικό τομέα για την εύρεση ελαττωμάτων και βλαβών για το σχεδιασμό, τον προγραμματισμό και τις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου.

### 3.2.3 Δέντρα Απόφασης

Τα Δέντρα Απόφασης αποτελούν τα πιο γνωστά μοντέλα κατηγοριοποίησης και περιλαμβάνουν τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους στην Εξόρυξη Δεδομένων, εξαιτίας της δυνατότητάς τους να αναπαριστούν κανόνες, οι οποίοι μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητοί από τον άνθρωπο (Βουμβουλάκης, 2010). Οι κανόνες αυτοί αποτυπώνονται σε μια γλώσσα προσπέλασης βάσεων δεδομένων, σε μια φυσική γλώσσα για την καλύτερη κατανόηση από τους ανθρώπους και έχουν τη μορφή της δομής «Εάν-Τότε» (If-Then) (Κωτσιαντής, 2005).

Χρησιμοποιούν μια γραφική απεικόνιση, που μοιάζει με μια κλασική δενδρική δομή (Σχήμα 17). Σε αυτή τη μορφή δέντρου συμπεριλαμβάνονται πιθανές αποφάσεις, καθώς και αποτελέσματα και παράγοντες επιρροής (Κωτσιαντής, 2005). Ο πρώτος κόμβος που βρίσκεται στην κορυφή ονομάζεται ρίζα και ακολουθούν οι εσωτερικοί κόμβοι, που αποκαλούνται κόμβοι ελέγχου ή ενδιάμεσοι κόμβοι και καταλήγουν στους τερματικούς κόμβους. Η ρίζα και κάθε εσωτερικός κόμβος του δένδρου αποτελεί μια μεταβλητή, κάθε κλαδί/σύνδεση δυο κόμβων προσδιορίζεται από μια συνθήκη ή τιμή για τη μεταβλητή του εσωτερικού κόμβου και τέλος κάθε τερματικός κόμβος προσδιορίζεται από την κλάση (NAI, OXI).



Σχήμα 17: Γραφική απεικόνιση της δομής ενός Δέντρου Απόφασης (Τσαγγαράτος, 2012)

Στην εξόρυξη δεδομένων, ένα δέντρο απόφασης είναι ένα προγνωστικό μοντέλο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει τους ταξινομητές καθώς και τα μοντέλα παλινδρόμησης. Όταν ένα δέντρο απόφασης χρησιμοποιείται για διαδικασίες κατάταξης, είναι πιο κατάλληλο να αναφέρεται ως ένα δέντρο ταξινόμησης. Όταν χρησιμοποιείται για

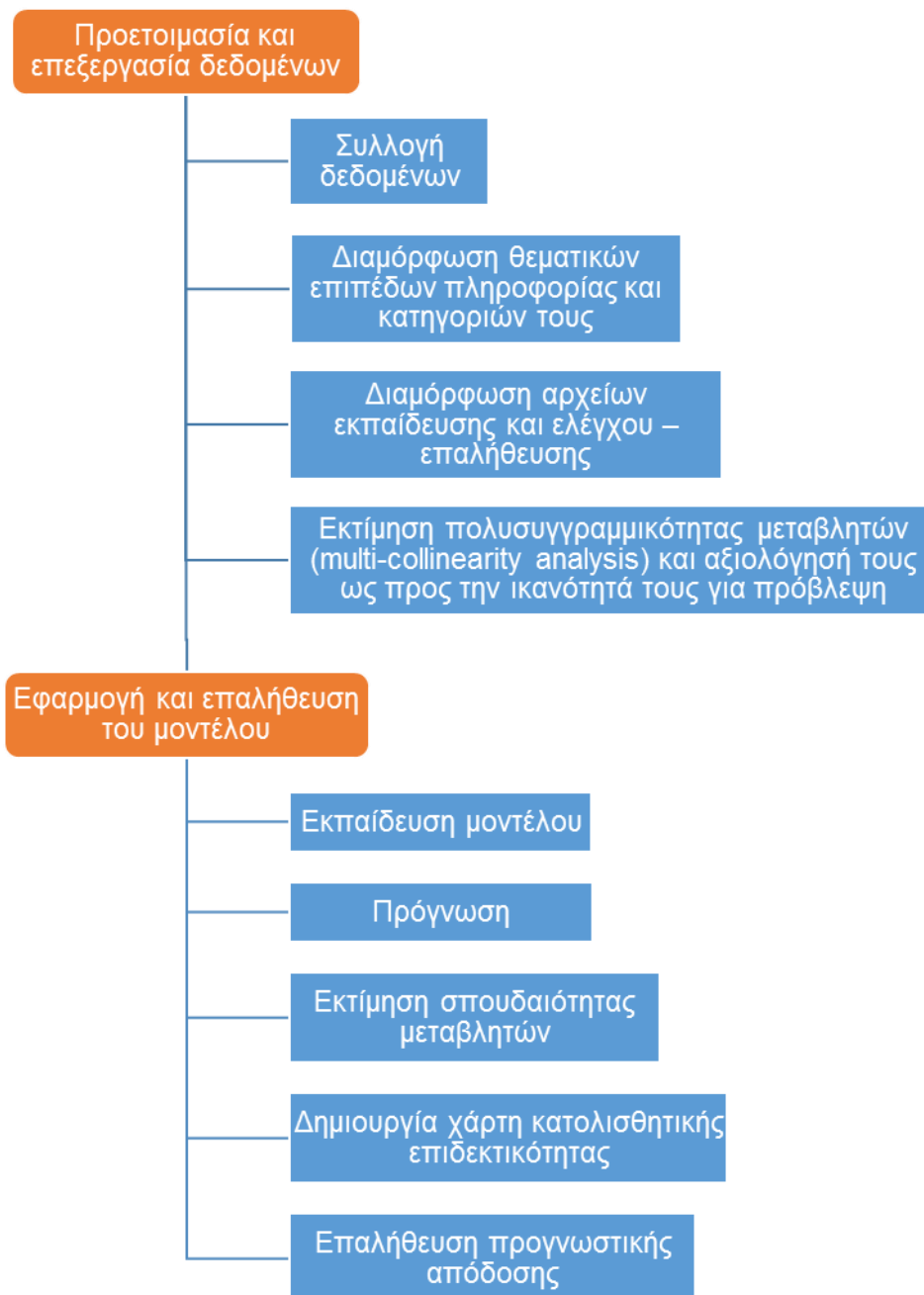
διαδικασίες παλινδρόμησης, είναι πιο κατάλληλο να αναφέρεται ως δέντρο παλινδρόμησης. Τα δέντρα ταξινόμησης χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση ενός αντικειμένου ή ενός γεγονότος σε ένα προκαθορισμένο σύνολο κατηγοριών με βάση τις αξίες των χαρακτηριστικών του. Τα δέντρα ταξινόμησης συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμοσμένους τομείς όπως τα οικονομικά, το μάρκετινγκ, η ιατρική και η μηχανική.

Η χρήση ενός δέντρου απόφασης είναι μια πολύ δημοφιλής τεχνική στην εξόρυξη δεδομένων. Κατά την άποψη πολλών ερευνητών, τα δέντρα απόφασης είναι δημοφιλή λόγω της απλότητάς τους αλλά και της διαφάνειάς τους. Συνήθως, τα δέντρα ταξινόμησης αναπαρίστανται γραφικά ως ιεραρχικές δομές, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την ερμηνεία σε σχέση με άλλες τεχνικές. Αν το δέντρο κατάταξης γίνει περίπλοκο (δηλαδή έχει πολλούς κόμβους), στη συνέχεια, η απλή, γραφική αναπαράστασή του γίνεται άχρηστη. Για σύνθετα δέντρα ταξινόμησης πρέπει να αναπτυχθούν διαφορετικές γραφικές διαδικασίες για απλούστευση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Για την κατασκευή ενός Δέντρου Απόφασης απαιτείται ένα σύνολο εκπαίδευσης  $N$  ταξινομημένων καταστάσεων, οι οποίες ταξινομούνται σε  $m$  κλάσεις και προσδιορίζονται από ένα συγκεκριμένο αριθμό μεταβλητών  $n$ , καθώς και ένα σύνολο ελέγχου, για να αξιολογήσει την απόδοση του μοντέλου.

## 4 Περιγραφή Μεθοδολογίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βασίζεται στην εφαρμογή μεθόδων Μηχανικής Μάθησης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου Τυχαίου Δένδρου (Random Forest). Η αναπτυχθείσα μεθοδολογική προσέγγιση διακρίνεται σε δύο κύριες φάσεις: τη φάση προετοιμασίας και επεξεργασίας των δεδομένων και τη φάση εφαρμογής και επαλήθευσης του μοντέλου. Αυτές οι φάσεις διακρίνονται σε επιμέρους βήματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.





## 4.1 Περιγραφή της Προετοιμασίας και Επεξεργασίας Δεδομένων

Η φάση της προετοιμασίας και επεξεργασίας των δεδομένων διακρίνεται σε τέσσερα βήματα: τη συλλογή των δεδομένων, τη διαμόρφωση των θεματικών επιπέδων πληροφορίας και των κατηγοριών τους, τη διαμόρφωση των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης και την εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας των μεταβλητών (multi-collinearity analysis) και την αξιολόγησή τους ως προς την ικανότητά τους για πρόβλεψη.

### 4.1.1 Συλλογή Δεδομένων

Το πρώτο βήμα αφορά τη συλλογή οποιασδήποτε χρήσιμης πληροφορίας για την ανάπτυξη και την εφαρμογή της επιλεγμένης μεθοδολογίας. Πιο συγκεκριμένα, συλλέγονται δεδομένα σχετικά με την περιοχή έρευνας, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τη γεωλογία, την τεκτονική, τα σεισμικά και κλιματικά δεδομένα, τα κατολισθητικά φαινόμενα, κ.α.

### 4.1.2 Διαμόρφωση των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας

Σε αυτή τη φάση διαμορφώνονται τα Θεματικά Επίπεδα Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.) κάθε παραμέτρου, καθώς και οι σχετικές κλάσεις – κατηγορίες για κάθε Θ.Ε.Π., μέσω των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και πιο συγκεκριμένα του λογισμικού ArcGIS της E.S.R.I. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν και θα αξιολογηθούν οι εξής παράμετροι: το υψόμετρο, οι μορφολογικές κλίσεις του εδάφους, η διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση της κλίσης, κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης και η καμπυλότητα των πρηνών, η γεωλογία, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο. Η επιλογή των παραμέτρων βασίστηκε σε πλήθος παλαιότερων εργασιών και μελετών με θέμα τη διερεύνηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, τόσο στην περιοχή έρευνας όσο και σε άλλες περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

Τα Θ.Ε.Π. του υψομέτρου, των μορφολογικών κλίσεων, της διεύθυνσης των μορφολογικών κλίσεων, της καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση της κλίσης, κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης και της καμπυλότητας των πρηνών, και της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο, διαμορφώθηκαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μέσω εργαλείων του ArcGIS. Τα Θ.Ε.Π. των γεωλογικών ενοτήτων και της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία διαμορφώθηκαν από την ψηφιοποίηση των φύλλων του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος, με την αποτύπωση των συνόρων των γεωλογικών σχηματισμών, των ρηγμάτων (ενεργών και ανενεργών), των επωθήσεων και των επιπτώσεων.

Η διαμόρφωση των κλάσεων – κατηγοριών κάθε Θ.Ε.Π. πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των φυσικών διαστημάτων ή την κατασκευή κλάσεων που έχουν φυσικό νόημα και που ορίζονται από τον ερευνητή. Όσον αφορά τα Θ.Ε.Π. απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία και το υδρογραφικό δίκτυο, οι ζώνες επιρροής που διαμορφώνονται εκατέρωθεν των στοιχείων βασίζονται σε προηγούμενες μελέτες και εργασίες με αντικείμενο τη δημιουργία χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Σε κάθε Θ.Ε.Π. πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση για τον προσδιορισμό των ποσοστών της κάθε κλάσης και των ποσοστών των κατολισθήσεων σε κάθε κλάση.

#### 4.1.3 Διαμόρφωση των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης

Στη συνέχεια, μέσω των στατιστικών στοιχείων που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, προσδιορίζεται ο λόγος συχνοτήτων κάθε κλάσης και διαμορφώνονται οι χάρτες για κάθε Θ.Ε.Π. Αφού κανονικοποιηθούν οι τιμές του λόγου συχνοτήτων σε κλίμακα 0 – 1, διαμορφώνονται εκ νέου τα πλεγματικά αρχεία που αντιστοιχούν σε κάθε Θ.Ε.Π. Ο συνδυασμός τους παράγει το χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής με βάση τη μέθοδο Λόγου Συχνοτήτων. Ο εν λόγω χάρτης ζωνοποιείται σε πέντε (5) κλάσεις μέσω της μεθόδου ταξινόμησης των φυσικών διαστημάτων – ορίων (natural breaks):

- Πολύ χαμηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Χαμηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Μέτρια κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα

Από τις παραπάνω ζώνες διαχωρίζονται οι δύο πρώτες (πολύ χαμηλή και χαμηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα) και από αυτές προκύπτει, μέσω εργαλείου του ArcGIS, το αρχείο θέσεων ευστάθειας. Ο αριθμός των θέσεων είναι ίδιος με τον αριθμό των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων για να αποφευχθούν φαινόμενα μεγαλύτερης επιρροής ενός αποτελέσματος απέναντι στο άλλο, στη διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου. Οι θέσεις ευστάθειας και οι θέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων, εμπλουτισμένες με τις τιμές του λόγου συχνοτήτων για κάθε παράμετρο, διανέμονται ισομερώς σε ένα μεγαλύτερο αρχείο εκπαίδευσης (train) και ένα μικρότερο αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης (test).

#### 4.1.4 Εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας και αξιολόγηση των μεταβλητών ως προς την προγνωστική τους ικανότητα

Στο τελευταίο βήμα της προετοιμασίας και επεξεργασίας των δεδομένων γίνεται χρήση του αρχείου εκπαίδευσης για την εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας των μεταβλητών και την αξιολόγησή τους ως προς την προγνωστική τους ικανότητα, διεργασίες οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω του λογισμικού R Studio 4.0.2.

Αρχικά, για τον έλεγχο της πολυσυγγραμμικότητας των μεταβλητών και για την εκτίμηση της ενδεχόμενης συσχέτισης μεταξύ τους, φορτώνεται στο R Studio το αρχείο εκπαίδευσης και υπολογίζονται, μέσω βιβλιοθηκών και εργαλείων του λογισμικού, δύο δείκτες: ο συντελεστής διόγκωσης (VIF - Variance Inflation Factor) και ο συντελεστής ανεκτικότητας (TOL - Tolerance Index).

Ο VIF καθορίζει την ταχύτητα με την οποία αυξάνεται η διακύμανση ενός εκτιμητή όταν υπάρχει πολυσυγγραμμικότητα. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει, τόσο πιο ισχυρή είναι η πολυσυγγραμμικότητα, και για το λόγο αυτό η τιμή του δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10.

Ο δεύτερος συντελεστής (TOL) είναι αντίστροφος του VIF. Εάν η τιμή του είναι κάτω από 0,2 δηλώνει ισχυρή συσχέτιση, ενώ κοντά στο 1 δηλώνει αδύνατη συσχέτιση.

Από αυτούς τους δυο δείκτες διαπιστώνεται η ύπαρξη ή όχι πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των μεταβλητών που αναλύονται, όπου στην πρώτη περίπτωση (ύπαρξη πολυσυγγραμμικότητας) έχει σας αποτέλεσμα τον αποκλεισμό των μεταβλητών αυτών από περαιτέρω ανάλυση.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας πάλι το αρχείο εκπαίδευσης, οι μεταβλητές αξιολογούνται ως προς την ικανότητά τους για πρόβλεψη. Για την αξιολόγηση αυτή χρησιμοποιείται το μοντέλο Learning Vector Quantization (LVQ), από το οποίο προκύπτει ένα γράφημα στο οποίο παρουσιάζεται η προγνωστική δύναμη της κάθε μεταβλητής.

## 4.2 Περιγραφή της Εφαρμογής και Επαλήθευσης του Μοντέλου

Η δεύτερη φάση της μεθοδολογίας διακρίνεται σε πέντε βήματα: την εκπαίδευση του μοντέλου RF, την πρόγνωση, την εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών με βάση το μοντέλο RF, τη δημιουργία του χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας και την επαλήθευση της προγνωστικής απόδοσης με τη χρήση καμπυλών ROC και του δείκτη ακρίβειας (accuracy).

#### 4.2.1 Εκπαίδευση Μοντέλου

Στο πρώτο βήμα της εφαρμογής και επαλήθευσης του μοντέλου πραγματοποιείται η εκπαίδευσή του μοντέλου RF για τη βελτιστοποίηση της προγνωστικής του ικανότητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου υπολογίζονται δύο μεταβλητές: η μεταβλητή *ntree*, η οποία αντιπροσωπεύει το βέλτιστο αριθμό δέντρων που θα χρησιμοποιήσει το μοντέλο και η μεταβλητή *mtry*, η οποία αντιπροσωπεύει το βέλτιστο αριθμό παραμέτρων που θα ελέγχονται ανά δένδρο. Το αρχείο εκπαίδευσης διακρίνεται σε δύο υπο-αρχεία: ένα πολύ μεγαλύτερο υπο-αρχείο εκπαίδευσης (περίπου το 90% του αρχικού αρχείου εκπαίδευσης) και ένα πολύ μικρότερο υπο-αρχείο ελέγχου. Το λογισμικό R Studio, χρησιμοποιώντας τα δύο υπο-αρχεία, ελέγχει κάθε πιθανό συνδυασμό αριθμού δέντρων και μεταβλητών και υπολογίζει τις επιθυμητές τιμές. Αυτή η διεργασία εκτελείται με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου υπερ-μοντελοποίησης – υπερ-προσαρμογής, όπου το μοντέλο έχει διαμορφωθεί βασισμένο υπερβολικά στο αρχείο εκπαίδευσης και αδυνατεί να παράξει σωστά αποτελέσματα για θέσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά αυτών του αρχείου εκπαίδευσης.

#### 4.2.2 Πρόγνωση

Στο επόμενο βήμα, τα Θ.Ε.Π. μετατρέπονται, μέσω του λογισμικού ArcGIS, σε μορφή ASCII (American Standard Code for Information Interchange), μορφή η οποία αποτελεί τα απλούστερα αρχεία εισαγωγής δεδομένων. Περιλαμβάνονται στοιχεία που αφορούν στον αριθμό των στηλών και γραμμών του διανυσματικού αρχείου, των συντεταγμένων που προσδιορίζουν τη χωρική διασπορά του, στο μέγεθος του φατνίου (*cell size*) και στην τιμή που αντιστοιχεί σε φατνία χωρίς περιεχόμενο. Για να εισαχθούν τα δεδομένα στο R Studio, εκτελείται σχετική ρουτίνα λογισμικού, η οποία διαμορφώνει το σύνολο των Θ.Ε.Π. σε αρχεία με κατάλληλη μορφή, για να είναι εφικτή η περαιτέρω ανάλυση.

Κατόπιν, εφαρμόζοντας εκ νέου το μοντέλο που διαμορφώθηκε κατά τη φάση της εκπαίδευσης και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτής της φάσης, πραγματοποιείται η εκτίμηση του βαθμού επιδεκτικότητας κάθε φατνίου. Το μοντέλο δεν παράγει αποτελέσματα της μορφής ΝΑΙ – ΟΧΙ (κατολίσθηση – ευστάθεια) στους τελικούς κόμβους, αλλά για κάθε φατνίο προσδιορίζεται μία τιμή μεταξύ 0 και 1, όπου το 0 αντιστοιχεί σε θέσεις πλήρους ευστάθειας και το 1 σε θέσεις με σίγουρη εκδήλωση κατολίσθησης, με την τιμή 0.5 να αποτελεί το σημείο διαχωρισμού.

#### 4.2.3 Εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών μέσω του μοντέλου RF

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών μέσω του υπολογισμού των δεικτών Mean Decrease Accuracy και Mean Decrease Gini.

Ο δείκτης Mean Decrease Accuracy χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων του μοντέλου Random Forest. Όσο μειώνεται η ακρίβεια του μοντέλου λόγω του αποκλεισμού μιας μεταβλητής, τόσο πιο σημαντική είναι η μεταβλητή. Επομένως, οι μεταβλητές που έχουν αυξημένη τιμή του δείκτη Mean Decrease Accuracy είναι πιο σημαντικές.

Ο δείκτης Mean Decrease Gini μετράει τον τρόπο με τον οποίο η κάθε μεταβλητή συνεισφέρει στην ομοιογένεια των κόμβων του μοντέλου. Κάθε φορά που χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη μεταβλητή για το διαχωρισμό ενός κόμβου, υπολογίζεται ο συντελεστής Gini για τους εσωτερικούς κόμβους (Kuhn et al., 2008). Ο συντελεστής Gini μετρά το επίπεδο «καθαρότητας» των δειγμάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε έναν κόμβο (Ewers et al., 2014). Οι μεταβλητές που εμφανίζουν μείωση στο συντελεστή Gini, καταλήγουν σε κόμβους με υψηλότερη «καθαρότητα» (Kuhn et al., 2008).

#### 4.2.4 Δημιουργία χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Στη συνέχεια, το αρχείο που προκύπτει μεταφέρεται στο ArcGIS και, μέσω σχετικού εργαλείου του λογισμικού, μετατρέπεται στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Ο χάρτης αυτός διακρίνεται σε πέντε (5) κλάσεις μέσω της μεθόδου ταξινόμησης των φυσικών διαστημάτων – ορίων (natural breaks), έτσι ώστε να είναι διακριτή η διαβάθμιση της περιοχής ως προς το δείκτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Οι πέντε κλάσεις, από την χαμηλότερη προς την υψηλότερη είναι οι εξής:

- Πολύ χαμηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Χαμηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Μέτρια κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα
- Πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα

#### 4.2.5 Επαλήθευση της προγνωστικής απόδοσης

Στο τελευταίο στάδιο επαληθεύεται η χωρική προγνωστική απόδοση του μοντέλου μέσω της διαμόρφωσης Πίνακα Σύγχυσης (Confusion Matrix) και υπολογισμού του δείκτη Accuracy

και των Καμπυλών Λειτουργικού Χαρακτηριστικού Δείκτη (Receiver Operating Characteristic, ROC).

Η πρώτη μέθοδος επαλήθευσης βασίζεται στη διαμόρφωση ενός Πίνακα Σύγκυσης (Πίνακας 3), ο οποίος περιέχει πληροφορίες σχετικά με την πραγματική ταξινόμηση των κατολισθητικών συμβάντων και την προβλεπόμενη ταξινόμηση που πραγματοποιήθηκε από το μοντέλο.

Πίνακας 3: Πίνακας σύγκυσης

Προβλεπόμενη Κατάσταση		
	Ασταθές	Σταθερό
Ασταθές	Αληθώς θετικό (TP)	Αληθώς αρνητικό (TN)
Σταθερό	Ψευδώς θετικό (FP)	Ψευδώς αρνητικό (FN)
Χαρακτηρισμός	Περιγραφή	
<b>Αληθώς θετικό</b> (True Positive, TP)	Η θέση εκτιμάται ότι είναι θέση κατολίσθησης και πράγματι είναι	
<b>Ψευδώς θετικό</b> (False Positive, FP)	Η θέση εκτιμάται ότι είναι θέση κατολίσθησης ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι	
<b>Αληθώς αρνητικό</b> (True Negative, TN)	Η θέση εκτιμάται ότι δεν είναι θέση κατολίσθησης και πράγματι δεν είναι	
<b>Ψευδώς αρνητικό</b> (False Negative, FN)	Η θέση εκτιμάται ότι δεν είναι θέση κατολίσθησης ενώ στην πραγματικότητα είναι	

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 3 και με δεδομένα εισόδου τα αρχεία εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης, υπολογίζεται ο δείκτης ακρίβειας (Accuracy) από την παρακάτω εξίσωση:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

Όσο πιο υψηλός είναι ο δείκτης Accuracy, τόσο πιο μεγάλη είναι η προγνωστική απόδοση του μοντέλου.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των Καμπυλών Λειτουργικού Χαρακτηριστικού Δείκτη, υπολογίζεται ο λόγος του εμβαδού της περιοχής που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη, AUC, (Area Under Curve) προς το εμβαδό ολόκληρου του διαγράμματος. Η καμπύλη

απεικονίζει το αθροιστικό ποσοστό των κατολισθήσεων σε συνάρτηση με το αθροιστικό ποσοστό των ζωνών επιδεκτικότητας στις οποίες εντοπίζονται. Όσο πιο υψηλός είναι ο λόγος των εμβαδών, τόσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των κατολισθήσεων που έχουν ταξινομηθεί σωστά στις ζώνες υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας, και άρα τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου. Στην πράξη η τιμή AUC κυμαίνεται από 0,5 (τυχαία προσαρμογή) έως 1 (τέλεια προσαρμογή), ενώ αν πάρει τιμές μικρότερες του 0,5 το μοντέλο θεωρείται αποτυχημένο. Ο λόγος που υπολογίζεται αναμένεται να είναι μικρότερος του δείκτη Accuracy, καθώς προκύπτει από τη χωρική κατανομή της πρόγνωσης του μοντέλου (δηλαδή τον τελικό χάρτη) και όχι μόνο από τα γνωστά δεδομένα των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης.

## 5 Εφαρμογή Μεθοδολογίας

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως αυτή αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, και τα αποτελέσματά της, καθώς και ορισμένα στοιχεία για την περιοχή έρευνας.

### 5.1 Συλλογή Δεδομένων – Εφαρμογή

Το πρώτο βήμα αφορά τη συλλογή οποιασδήποτε χρήσιμης πληροφορίας για ανάπτυξη και εφαρμογή της επιλεγμένης μεθοδολογίας. Οι πηγές των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα μεθοδολογία είναι οι εξής:

- Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), το οποίο παρέχει τα φύλλα Βόλος, Ζαγορά – Συκή και Αργαλαστή του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:50.000.
- Το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο παρέχει τη βάση δεδομένων των 146 καταγεγραμμένων κατολισθήσεων στην περιοχή έρευνας.
- Ο διαδικτυακός ιστότοπος <http://download.geofabrik.de/>, που μέσω του OpenStreetMap project παρέχει χαρτογραφικά δεδομένα και δεδομένα που αφορούν τη χωρική κατανομή των οικισμών και το οδικό δίκτυο για όλες τις χώρες του κόσμου.
- Ο διαδικτυακός ιστότοπος <http://www.opendem.info/>, ο οποίος παρέχει παγκόσμια δεδομένα ισοϋψών καμπυλών ανά 25m, μέσω των οποίων ήταν εφικτή η δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.
- Πλήθος μελετών και εργασιών που έχουν συνταχθεί για την υπό μελέτη περιοχή και σχετίζονται με κατολισθητικά φαινόμενα, για την άντληση πληροφοριών και την επιλογή των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν.

### 5.2 Περιοχή Έρευνας

Η Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας καταλαμβάνει το νοτιοανατολικό τμήμα της Θεσσαλίας με έκταση 2.636 τετρ. χλμ. Ο πληθυσμός της ανέρχεται περίπου στους 207.000 κατοίκους και πρωτεύουσά της είναι ο Βόλος. Η Π.Ε. Μαγνησίας είναι η τέταρτη πιο ανεπτυγμένη βιομηχανικά περιοχή της Ελλάδας, μετά τις Π.Ε. Αττικής, Θεσσαλονίκης και Αχαΐας. Η αγροτική παραγωγή της αποτελείται από σχετικά μεγάλη ποικιλία προϊόντων και το εισόδημα από το εμπόριο, τον τουρισμό, τις μεταφορές, την αλιεία κλπ. είναι αξιόλογο. Η οικονομία της Π.Ε. Μαγνησίας βασίστηκε στη δημιουργία και στην ανάπτυξη της πόλης



και του λιμανιού του Βόλου, που έγινε το συγκοινωνιακό, εμπορικό και βιομηχανικό κέντρο ολόκληρης της Θεσσαλίας. Στην Π.Ε. Μαγνησίας, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιφερειακές ενότητες της Θεσσαλίας, οι δεντροκαλλιέργειες αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ένα τρίτο των καλλιεργειών και αποτελούνται κατά τα τρία τέταρτα από ελιές και κατά το υπόλοιπο από αμυγδαλιές, μηλιές, αχλαδιές κλπ.

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται εντός της Π.Ε. Μαγνησίας και εκτείνεται εντός των ορίων των Καλλικρατικών Δήμων Βόλου, Ζαγοράς – Μουρεσίου και Νοτίου Πηλίου. Καλύπτει τις Δημοτικές Ενότητες Βόλου, Νέας Ιωνίας, Ιωλκού, Μακρυνίτσας, Πορταριάς, Αγριάς, το νότιο τμήμα της Δ.Ε. Ζαγοράς, τις Δ.Ε. Μουρεσίου, Μηλέων, Αφετών, Αργαλαστής και το βορειοανατολικό τμήμα της Δ.Ε. Σηπιάδος. Η περιοχή έρευνας υπάγεται στο 8<sup>ο</sup> υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας, όπως αυτά έχουν οριστεί από τον Νόμο 1739/87.

### 5.2.1 Μορφολογία

Το ανάγλυφο του νομού Μαγνησίας είναι ποικιλόμορφο και διαμορφώνεται βασικά από τους ορεινούς όγκους Μαυροβουνίου – Πηλίου και του βόρειου τμήματος της Όθρυος, μεταξύ των οποίων σχηματίζονται οι πεδιάδες του Αλμυρού και του Βόλου Βελεστίνου, τις οποίες χωρίζει η χαμηλή βουνοσειρά του Χαλκοδονίου. Το Πήλιο, το βασικό βουνό του νομού Μαγνησίας, έχει επίμηκες σχήμα με τον μεγάλο άξονα να έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Το μήκος αυτού του άξονα φτάνει τα 30χλμ ενώ το πλάτος του δεν ξεπερνά τα 8χλμ. Η υψηλότερη κορυφή του βρίσκεται προς τη Βόρεια πλευρά του βουνού στη θέση Πουριανός Σταυρός με ύψος 1624μ. Ανατολικά το Πήλιο βρέχεται από το Αιγαίο πέλαγος και ΝΔ από τη θάλασσα του Παγασητικού. Οι ακτές του Πηλίου, ευρισκόμενες εντός μεγάλων ρηξιγενών ζωνών, παρουσιάζονται πολυσχιδείς σχηματίζοντας μεγάλο αριθμό ακρωτηρίων και μικρών ή μεγάλων κόλπων ή όρμων (Γαλανάκης, 1997). Το έντονο μορφολογικό ανάγλυφο που παρατηρείται έχει προέλθει από γεωδυναμικά φαινόμενα που έχουν δράσει κατά το παρελθόν αλλά και λόγω νεότερων τεκτονικών κινήσεων. Λόγω του ενεργού τεκτονισμού, το ανάγλυφο μεταβάλλεται έντονα από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι ύψος πολλών εκατοντάδων μέτρων.

### 5.2.2 Γεωλογία

Η ευρύτερη περιοχή του Βόλου και της χερσονήσου της Μαγνησίας ανήκει στην Πελαγονική ζώνη που αποτελεί ζώνη των Εσωτερικών Ελληνίδων. Η Πελαγονική ζώνη αποτελείται από Παλαιοζωικά κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του ηπειρωτικού φλοιού της

παλιάς Κιμμερικής ηπείρου, μέσα στα οποία διείσδυσαν γρανιτικά σώματα του Άνω Λιθανθρακοφόρου. Περμοτριάδικά μετακλαστικά ιζήματα και ανθρακικά πετρώματα Τριαδικού-Ιουρασικού αποτέθηκαν στα ηπειρωτικά περιθώρια της ζώνης και πάνω σε αυτά επωθήθηκαν οι οφιολιθικές μάζες προερχόμενες από τις εκατέρωθεν ωκεάνιες λεκάνες της Τηθύος (Χατζηπέτρος, 2006). Τα πετρώματα της Πελαγονικής ζώνης έχουν επηρεαστεί από δύο φάσεις μεταμόρφωσης: Η ερκύνια αμφοβολιτική φάση στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και η πρασινοσχιστολιθική φάση Ιουρασικού-Κρητιδικού στα πετρώματα Άνω Παλαιοζωικού-Ιουρασικού. Στο Ανώτερο Κρητιδικό-Ηώκαινο πραγματοποιείται η οριστική ανάδυση της Ζώνης (Χατζηπέτρος, 2006).

Πιο συγκεκριμένα, για τη γεωλογία της περιοχής μελέτης παρατηρούνται τα εξής:

Τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα που αποτελούν το υπόβαθρο από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι βιοτιτιτικοί ορθο-γενέσιοι, μιγματικοί γενέσιοι, ταινιωτοί βιοτιτιτικοί παραγενέσιοι, αμφιβολίτες και αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, γρανατούχοι διμαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και τέλος εναλλαγές αμφιβολιτικών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, επιδοτιτικών σχιστολίθων με παρεμβολές απλιτογενέσιων.

Οι γενεσιωμένοι πλουτωνίτες του Άνω Λιθανθρακοφόρου παρεμβάλλονται μέσα στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του υποβάθρου. Πρόκειται για παρόμοιας σύστασης και υφής παλιούς γρανίτες και χαλαζιακούς μονζονίτες με πορφυριτικούς κρυστάλλους αστρίων. Οι γρανίτες αυτοί έχουν προκαλέσει φαινόμενα μεταμόρφωσης επαφής. Εμφανίζονται γενεσιωμένοι και συμπτυχωμένοι με τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα.

Πάνω από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και τους γρανιτικούς όγκους βρίσκεται μια μετα-κλαστική ιζηματογενής ακολουθία πάχους περίπου 200m και τα πετρώματα που τη συνιστούν είναι φυλλίτες, μεταπελίτες, μετα-αρκόζες, χλωριτικοί και σερικιτικοί σχιστόλιθοι, μετα-ψαμμίτες, χαλαζιακά μετα-κροκαλοπαγή, παρεμβολές φακών ερυθρωπών και ταφρών ανακρυσταλλωμένων ασβεστολίθων, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, μετά-ρυόλιθοι, μετά-βασάλτες και μετά-τόφοι. Τα πετρώματα αυτά είναι ηλικίας Περμοτριάδικης και εμφανίζονται κατά μήκος του δυτικού περιθωρίου της Πελαγονικής Ζώνης.

Τα ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού-Ιουρασικού είναι δύο διαφορετικά καλύμματα που αποτέθηκαν στα δύο περιθώρια, ανατολικό και δυτικό της Πελαγονικής στη διάρκεια Τριαδικού-Ιουρασικού. Το δυτικό κάλυμμα είναι αυτόχθονο και αποτέθηκε πάνω στα μετακλαστικά ιζήματα του Περμοτριάδικου. Αποτελείται από ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, λευκούς πλακώδεις με ελάχιστες παρεμβολές πληλιτικών ενστρώσεων. Το

ανατολικό κάλυμμα είναι παρά-αυτόχθονο, δηλαδή αρχικά αποτέθηκε στο ανατολικό τμήμα της Πελαγονικής προς τη ζώνη της Αλμωπίας και στη συνέχεια επωθήθηκε προς τα δυτικά πάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο στο οποίο βρίσκεται σήμερα χωρίς παρεμβολές κλαστικών ιζημάτων. Το ανατολικό κάλυμμα συνίσταται από ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μάρμαρα, σιπολίνες και δολομίτες και χαρακτηρίζεται καθαρά νηρητικό.

Οι οφιολιθικές μάζες στην Πελαγονική είναι τοποθετημένες στα δύο περιθώρια της ζώνης. Οι οφιολίθοι μαζί με τα συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας, επωθήθηκαν πάνω στα Τριαδικοϊουρασικά ανθρακικά καλύμματα.

Τα επικλυσιογενή ιζήματα Μέσου- Άνω Κρητιδικού τοποθετήθηκαν, μετά την είκλυση της θάλασσας, με ασυμφωνία πάνω στα προϋπάρχοντα ανθρακικά πετρώματα των Τριαδικοϊουρασικών καλυμμάτων ή με επικλυσιογενή ασυμφωνία πάνω από τους οφιολίθους και τα συνοδά ιζήματα. Η στρωματογραφική διάρθρωση από τα βαθύτερα προς τα ανώτερα στρώματα είναι ως εξής:

1. κροκαλοπαγή, μικρολατυποπαγή και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι
2. μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι
3. συμπαγής ασβεστόλιθος με απολιθώματα
4. φλύσχης αρχικά σχιστώδης ασβεστιτικός που στη συνέχεια εξελίσσεται σε ασβεστοπηλιτικό-ψαμμιτικό και καταλήγει σε πηλιτικο-κροκαλοπαγή.

### 5.2.3 Τεκτονικά και Σεισμολογικά Χαρακτηριστικά

Η περιοχή της Μαγνησίας εμφανίζεται έντονα τεκτονισμένη, με πλούσια νεοτεκτονική δράση (Πιτιλάκης κ.ά., 2010). Τα διαρρηκτικά συστήματα που κατακερμάτισαν έντονα την περιοχή λειτούργησαν μετά την ολοκλήρωση του αλπικού κύκλου ορογένεσης, σχηματίζοντας συστήματα τεκτονικών κεράτων και βυθισμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρείται το βύθισμα του Αλμυρού – Παγασητικού και το τεκτονικό κέρα της Όθρυος με γενική διεύθυνση Α-Δ, το τεκτονικό κέρα του Πηλίου με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και το βύθισμα του δίαυλου Ωρεών – Τρικεριού με διεύθυνση ΑΒΑ – ΔΝΔ. Οι κύριες διευθύνσεις των τεκτονικών ρηγμάτων της περιοχής ακολουθούν τις εξής τέσσερις κύριες ομάδες (Γαλανάκης, 1997): ΒΑ – ΝΔ, ΑΒΑ – ΔΝΔ (ρήγμα Νέας Αγχιάλου), ΔΒΔ – ΑΝΑ, ΒΒΔ – ΝΝΑ.

Σύμφωνα με τον Πιτιλάκη (2010), η τεκτονική της ευρύτερης περιοχής είναι παρόμοια με την τεκτονική του νοτίου Αιγαίου, με κανονικά εφελκυστικά ρήγματα με μικρή οριζόντια

συνιστώσα. Οι κύριες νεοτεκτονικές δομές της περιοχής είναι η σεισμική ζώνη της Νέας Αγχιάλου, των Φαρσάλων και του Πηλίου. Το ρήγμα της Νέας Αγχιάλου είναι αυτό που προκάλεσε το σεισμό μεγέθους 6,5 Ρίχτερ τον Ιούλιο του 1980. Οι πηγές που μπορούν να προκαλέσουν τους μεγαλύτερους σεισμούς στην περιοχή είναι το ρήγμα της Ν. Αγχιάλου, των Φαρσάλων και του Πηλίου (Πιτιλάκης κ.ά., 2010).

Η Π.Ε. Μαγνησίας στο σύνολο της βρίσκεται σε ζώνη υψηλής σεισμικής δράσης. Ο μεγαλύτερος γνωστός σεισμός στο Νομό ήταν τον Μάρτιο του 1957 στο Βελεστίνο με μέγεθος 6,8, ενώ μακροσεισμικά έχει μετρηθεί για το 1905 σεισμός μεγέθους 10 της κλίμακας Mercalli. Στην περιοχή έχουν καταγραφεί 12 σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο του 6, ενώ έχουν αναφερθεί 5 θύματα από σεισμούς για το χρονικό διάστημα 1743-1980 (Μουτσοκάπας κ.ά., 2010).

#### 5.2.4 Υδρογραφικό Δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της Μαγνησίας αποστραγγίζει λεκάνες απορροής με έκταση περίπου 1.506 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η πυκνότητα του δικτύου είναι υψηλή, ιδιαίτερα στις λεκάνες που αποτελεί βασικό πέτρωμα ο σχιστόλιθος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή περατότητα. Η πυκνότητα του δικτύου μειώνεται στα βόρεια και βορειοδυτικά της χερσονήσου όπου επικρατούν τα μακροπερατά μάρμαρα και μικροπερατοί ιζηματογενείς σχηματισμοί (NAM, 2005).

Το υδρογραφικό δίκτυο εκβάλλει στα δυτικά στον Παγασητικό κόλπο και στα ανατολικά στο Αιγαίο. Το επίμηκες σχήμα του Πηλίου και το έντονο ανάγλυφο της περιοχής έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου σε μικρούς και επιμήκεις χείμαρρους, οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγές. Οι διευθύνσεις των υδροκριτικών γραμμών και πολλοί κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου ακολουθούν παράλληλη διεύθυνση με τη διεύθυνση προσφάτων ρηγμάτων, και σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται. Οι έντονες μορφολογικές κλίσεις του Πηλίου, σε συνδυασμό με τον ευδιάβρωτο σχιστόλιθο που κυριαρχεί και διαβρώνεται έντονα κατά βάθος, δεν έχουν επιτρέψει τη δημιουργία ποτάμιων αναβαθμίδων (Γαλανάκης, 1997). Οι απότομες μορφολογικές κλίσεις, το μικρό μήκος των ρεμάτων και η επικράτηση του σχετικά αδιαπέρατου σχιστόλιθου προκαλούν ταχεία εκφόρτιση των ρεμάτων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την εκδήλωση πλημμυρών στις χαμηλές παράκτιες περιοχές που βρίσκονται πάνω σε προσχώσεις και δεν υπάρχει καθορισμένη κοίτη για την απορροή των ρεμάτων (Αγριά, Κάτω Λεχώνια και Μηλίνα) (ANEM, 2012). Η πλειοψηφία των ρεμάτων του υδρογραφικού δικτύου της Μαγνησίας δεν χαρακτηρίζονται

από συνεχή ροή αλλά παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα χειμαρικότητας. Ορισμένα ρέματα τροφοδοτούνται από πηγές όπως το Κακόρεμα, Μέγα, Φελούκα, Κισσιώτικο, Βρύχωνας, Κουφάλας, Κακοσκάλι και Πλατανόραμα (Βαβίζος κ.ά., 1996). Το μοναδικό ποτάμι που διατρέχει τον νομό Μαγνησίας είναι ο Ποταμός Ενιπέας, ο οποίος αποτελεί φυσικό όριο με τον νομό Λαρίσης.

#### 5.2.5 Κλίμα

Το κλίμα της Μαγνησίας παρουσιάζει αρκετές διαφοροποιήσεις στις διάφορες περιοχές της, γενικά όμως είναι εύκρατο, επειδή η περιοχή δέχεται την ευεργετική επίδραση της θάλασσας. Οι βροχοπτώσεις δεν είναι μεγάλες (500 – 600 χιλιοστά)· εξαίρεση αποτελεί το ανατολικό Πήλιο.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μελέτη της NAM (2005), η περιοχή του Πηλίου με τα παράλια της παρουσιάζει σημαντικές και απότομες αλλαγές του κλίματος λόγω της έντονης εναλλαγής του ανάγλυφου. Το μικροκλίμα επίσης υφίσταται διαφοροποιήσεις λόγω της έντονης τοπογραφίας και των ισχυρών ανέμων που συνήθως προέρχονται από το Αιγαίο Πέλαγος. Στην περιοχή μπορούν να διακριθούν δυο υπό-περιοχές με διαφορετικούς κλιματικούς παράγοντες:

- Το βόρειο και το ανατολικό τμήμα του Πηλίου, όπου το κλίμα κυμαίνεται από παραθαλάσσιο ως ορεινό. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, η σχετική υγρασία και το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι υψηλότερα, ενώ οι άνεμοι που επικρατούν είναι οι Βόρειοι (ΕΑΑ, σταθμοί Ζαγοράς και Μακρυνίτσας).
- Στο νότιο και δυτικό τμήμα του Πηλίου, όπου η θερμοκρασία παρουσιάζεται ελαφρώς υψηλότερη, ενώ η σχετική υγρασία και το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι χαμηλότερα. Οι άνεμοι που επικρατούν είναι Βόρειοι από τον Οκτώβριο ως τον Απρίλιο και Νότιοι κατά τους θερινούς μήνες (ΕΑΑ, σταθμός Αργαλαστής).

#### 5.2.6 Χρήσεις Γης – Προστατευόμενες Περιοχές

Οι μεταβολές του ανάγλυφου και οι μεγάλες υψομετρικές διαφορές στο νομό διαμορφώνουν τέσσερις κατηγορίες τοπίου (Βαβίζος κ.ά. 1996):

- Ορεινό τοπίο με κυρίαρχη τη δασική βλάστηση.
- Ημιορεινό τοπίο, όπου παρατηρείται μίξη χαμηλής και αραιής δασικής βλάστησης με φρυγανότοπους και με καλλιέργειες.
- Αγροτικό τοπίο με κυρίαρχες τις δενδρώδεις καλλιέργειες.

- Αγροτικό με κυρίαρχες τις αροτραίες καλλιέργειες (πεδινές περιοχές).

Το ορεινό τμήμα του νομού καταλαμβάνει το 32% της συνολικής έκτασής του, το ημιορεινό το 47% , ενώ το πεδινό το 21%.

Οι βοσκότοποι αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του νομού Μαγνησίας, με τις καλλιέργειες να είναι η δεύτερη σε έκταση κατηγορία και τα δάση η τρίτη. Τα ποσοστά των εκτάσεων κάθε κατηγορίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 4: Κατανομή χρήσεων γης*

Χρήσεις γης	Ποσοστό Έκτασης (%)
<b>Καλλιέργειες</b>	34.1
<b>Βοσκότοποι (δημόσιοι, κοινοτικοί, ιδιωτικοί)</b>	19.2
<b>Δάση</b>	41.5
<b>Οικισμοί – Οδικό Δίκτυο</b>	4.1
<b>Νερά</b>	0.9
<b>Λοιπά</b>	0.2

Το όρος Πήλιο, η παραλία του οικισμού Χόρτου, η Βυζίτσα, το Τρίκερι και η Τσαγκαράδα έχουν χαρακτηριστεί ως Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους με τις αντίστοιχες Υπουργικές Αποφάσεις Φ31/24512/1858/3.5.76, 10988/16.5.67, Φ31/2206/201/19.4.76, 10977/16.5.67, 10977/16.5.67. Επίσης πολύ σημαντικό θεωρείται ότι το όρος Πήλιο με τις παρακείμενες ζώνες έχει συμπεριληφθεί στο Ευρωπαϊκό συνεκτικό οικολογικό δίκτυο ειδικών ζωνών "Natura 2000". Η οικολογική αξία της περιοχής οφείλεται στην ποικιλία βιοτόπων με καλή έως άριστη δομή και κατάσταση διατήρησης που υποστηρίζουν πλούσιες σε είδη κοινωνίες. Η περιοχή συνδυάζει την πυκνή δασική και μακία βλάστηση, καθώς και τους παράκτιους και θαλάσσιους βιότοπους του Αιγαίου (NAM, 2005).

#### 5.2.7 Κατολισθητικά Φαινόμενα στην Περιοχή Έρευνας

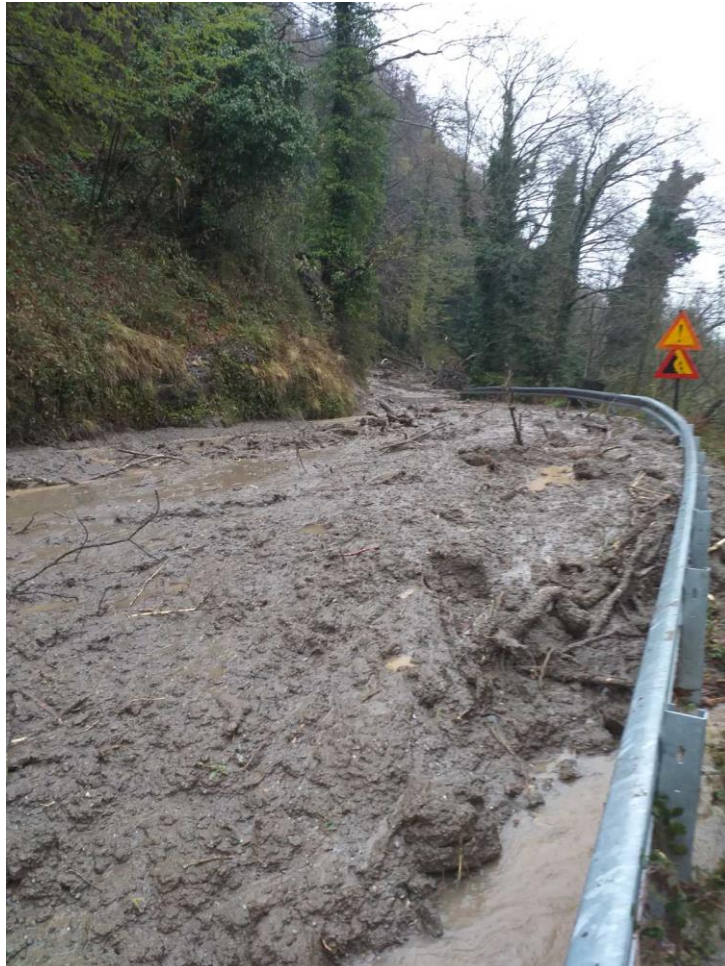
Η Π.Ε. Μαγνησίας και ιδιαίτερα η περιοχή του Δήμου Ζαγοράς-Μουρεσίου, πλήττεται συχνά από κατολισθητικά φαινόμενα, με σοβαρά οικονομικά επακόλουθα και κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Κατολισθήσεις εκδηλώνονται τόσο στους οικισμούς, προκαλώντας σοβαρές ζημιές σε κατοικίες, δημοτικούς δρόμους και υποδομές, όσο και στο

επαρχιακό οδικό δίκτυο, με αποτέλεσμα τη δυσχέρεια ή και διακοπή της κυκλοφορίας των οχημάτων και την αποκοπή των οικισμών. Τέλος, ποικίλης κλίμακας κατολισθήσεις εκδηλώνονται και σε αγροτικές περιοχές, με επιπτώσεις στις καλλιέργειες αλλά και σε δασικές εκτάσεις (Ε.Α.Γ.Μ.Ε., 2019).

Σύμφωνα με το αρχείο του ΙΓΜΕ, τα τελευταία 60 χρόνια έχουν καταγραφεί στην περιοχή του Δήμου Ζαγοράς – Μουρεσίου περισσότερες από 130 θέσεις κατολισθήσεων ποικίλης κλίμακας, φαινόμενα τα οποία σε πολλές θέσεις επαναλαμβάνονται ή εξελίσσονται υπό ευνοϊκές συνθήκες (π.χ. έντονες βροχοπτώσεις). Ειδικότερα:

- Τον Νοέμβριο του 1986, ακολουθώντας έντονη βροχόπτωση, σημειώθηκαν μεγάλης κλίμακας κατολισθητικά φαινόμενα που έπληξαν κυρίως τον οικισμό της Ζαγοράς, αλλά και τους οικισμούς Μακρυνράχη, Κισσό, Πουρί, Ανήλιο, Αγ. Δημήτριο, Μούρεσι, Ξορύχι και Τσαγκαράδα. Στους εν λόγω οικισμούς καταγράφηκαν 63 σπίτια με ζημιές (ορισμένα ολικώς κατεστραμμένα). Επιπλέον των ζημιών στους οικισμούς, σημειώθηκαν και εκτεταμένες κατολισθήσεις στο επαρχιακό οδικό δίκτυο της περιοχής.
- Το 2003, στα πλαίσια της μελέτης του Ι.Γ.Μ.Ε. «Γεωτεχνική μελέτη κατολισθητικών φαινομένων κατά μήκος των οδικών αξόνων των Δήμων Μουρεσίου και Ζαγοράς» καταγράφηκαν 104 κατολισθήσεις κατά μήκος του οδικού δικτύου της περιοχής, οι οποίες μελετήθηκαν και για κάθε θέση προτάθηκαν συγκεκριμένα μέτρα αντιμετώπισης των φαινομένων.
- Τον Φεβρουάριο του 2018, ισχυρές βροχοπτώσεις είχαν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση ή την επανενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων σε ολόκληρη την έκταση του Δήμου Ζαγοράς – Μουρεσίου. Οι κατολισθήσεις οδήγησαν στην αποκοπή του δημοτικού και επαρχιακού οδικού δικτύου, προκαλώντας τη διακοπή λειτουργίας των σχολείων του Δήμου για διάστημα μεγαλύτερο των δύο εβδομάδων, προβλήματα τροφοδοσίας των κατοίκων, καθώς και διακοπή νερού και ηλεκτρικού ρεύματος λόγω βλάβης των δικτύων. Πολλά κτίρια, τα περισσότερα μόνιμες ή εξοχικές κατοικίες, υπέστησαν βλάβες και αρκετά χαρακτηρίστηκαν ακατάλληλα ή κατεδαφιστέα από τη Διεύθυνση Αποκατάστασης Επιπτώσεων Φυσικών Καταστροφών (ΔΑΕΦΚ). Παράλληλα, τα έντονα κατολισθητικά φαινόμενα προκάλεσαν πολλές άλλες καταστροφές (μετακινήσεις πρανών, καταπτώσεις δέντρων, καταστροφή τεχνικών έργων, υποσκαφές επιχωμάτων και ρωγμάτωση οδοστρωμάτων, συσσώρευση φερτών υλικών κλπ.).

- Το Μάρτιο του 2020, ισχυρές βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις προκάλεσαν την εκδήλωση ή την επανενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή της Ζαγοράς, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στους οικισμούς και στο οδικό δίκτυο. Η μεγαλύτερη κατολίσθηση σημειώθηκε στην είσοδο του χωριού της Ζαγοράς (Εικόνα 8).



*Εικόνα 8: Κατολίσθηση στην είσοδο του χωριού της Ζαγοράς (magnesianews.gr)*

### 5.3 Διαμόρφωση των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας – Εφαρμογή

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρατίθενται πληροφορίες και σχετικοί χάρτες για τα Θεματικά Επίπεδα Πληροφόρησης (Θ.Ε.Π.) των εννιά (9) παραμέτρων που επιλέχθηκαν προς αξιολόγηση στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι χάρτες κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS 10.3 της E.S.R.I. Αναλυτικά, τα παραγόμενα Θ.Ε.Π. αφορούν τα εξής:

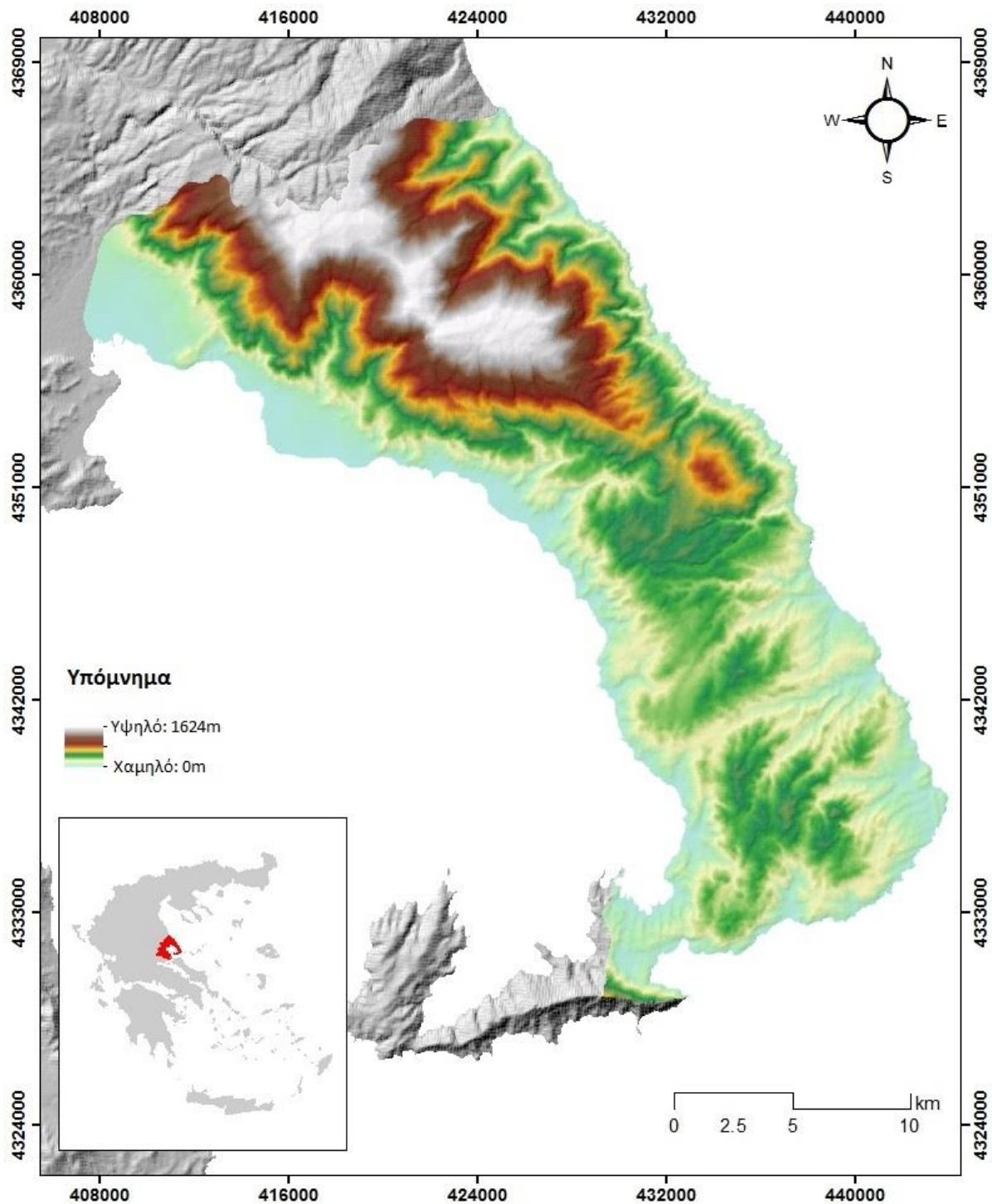
- Θ.Ε.Π. Υψομετρικού ανάγλυφου, που διακρίνεται σε πέντε (5) κατηγορίες υψομετρικού ανάγλυφου.



- Θ.Ε.Π. Μορφολογικών κλίσεων, που διακρίνεται σε έξι (6) κατηγορίες μορφολογικών κλίσεων.
- Θ.Ε.Π. Διεύθυνσης των μορφολογικών κλίσεων, που διακρίνεται σε εννέα (9) κατηγορίες διεύθυνσης των μορφολογικών κλίσεων.
- Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, που διακρίνεται σε τρεις (3) κατηγορίες καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων.
- Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, που διακρίνεται σε τρεις (3) κατηγορίες καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων.
- Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας, που διακρίνεται σε τρεις (3) κατηγορίες καμπυλότητας.
- Θ.Ε.Π. Γεωλογικών σχηματισμών, που διακρίνεται σε τριάντα πέντε (35) κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών.
- Θ.Ε.Π. Απόστασης από Τεκτονικά Στοιχεία, που διακρίνεται σε τρεις (3) κατηγορίες απόστασης από Τεκτονικά Στοιχεία.
- Θ.Ε.Π. Απόστασης από το Υδρογραφικό δίκτυο, που διακρίνεται σε τέσσερις (4) κατηγορίες απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

### 5.3.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)

Στο πρώτο στάδιο παραγωγής χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας δημιουργήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model, Χάρτης 4), το οποίο αποτελεί το πιο σημαντικό επίπεδο πληροφορίας από το οποίο μπορούν να δημιουργηθούν ψηφιακά διάφορες τοπογραφικοί παράμετροι (Ladas et al. 2007). Πρόκειται για ένα αρχείο ψηφιδωτής μορφής (raster) με δεδομένα υψομέτρου, το οποίο έχει διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m και κατασκευάστηκε μέσω δεδομένων που προήλθαν από τον διαδικτυακό ιστότοπο <http://www.opendem.info/>.



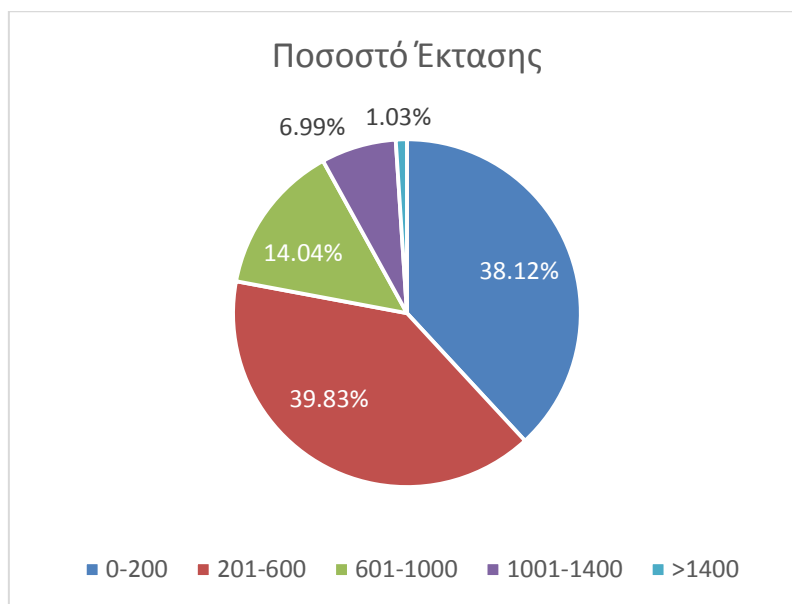
Χάρτης 4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

### 5.3.2 Θεματικό Επίπεδο Υψομέτρου

Ως υψόμετρο χαρακτηρίζεται η διαφορά μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου σε μια περιοχή. Στην περιοχή μελέτης κυμαίνεται από 0m, δηλαδή το επίπεδο της θάλασσας, έως 1624m. Το υψόμετρο μιας περιοχής από μόνο του δεν αποτελεί άμεσο παράγοντα εκδήλωσης κατολισθήσεων, ωστόσο σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως

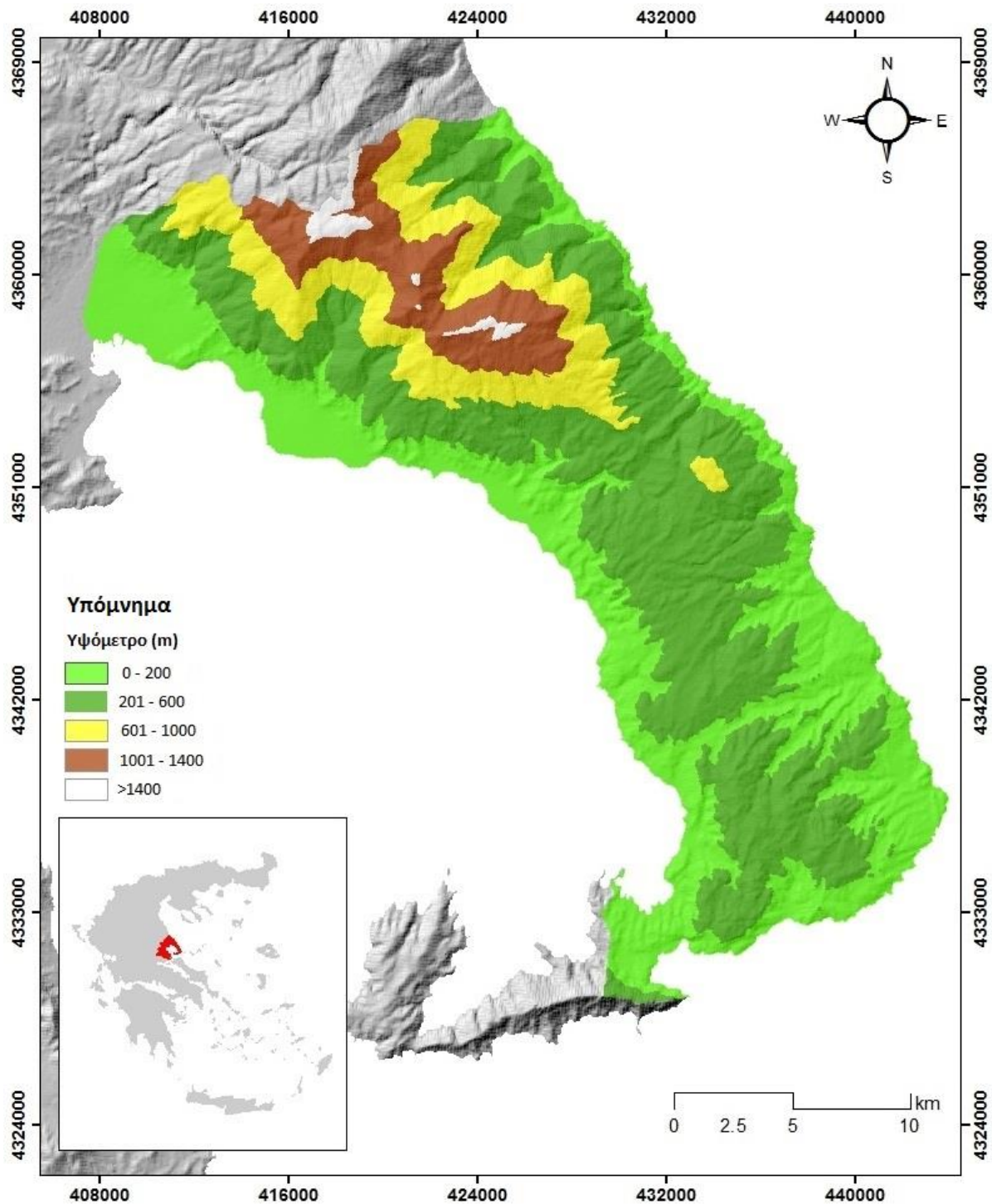
η τεκτονική, οι διαδικασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης καθώς και η βροχόπτωση, συμβάλλει στην εκδήλωση αστοχιών σε πρανή, επηρεάζοντας το Ισοζύγιο Ισορροπίας (Rozos et al., 2011). Για παράδειγμα, σχηματισμοί που βρίσκονται σε υψηλότερα σημεία εκτίθενται σε μη ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες και είναι πιο επιρρεπείς σε αστοχία.

Το Θεματικό Επίπεδο Υψομέτρου της περιοχής προέκυψε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατινίου) 25x25m. Το εξεταζόμενο ΘΕΠ κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε (5) κλάσεις: 0-200m, 201-600m, 601-1000m, 1001-1400m, και υψόμετρα μεγαλύτερα από 1400m, η στατιστική κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 18 και η χωρική κατανομή στο Χάρτη 5.



Σχήμα 18: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. υψομέτρου

Από τη στατιστική επεξεργασία του εξεταζόμενου ΘΕΠ προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη έκταση στη περιοχή καταλαμβάνουν περιοχές με υψόμετρο 201-600m (39.83%) και οι περιοχές με υψόμετρο 0-200m την αμέσως μικρότερη έκταση (38.12%).

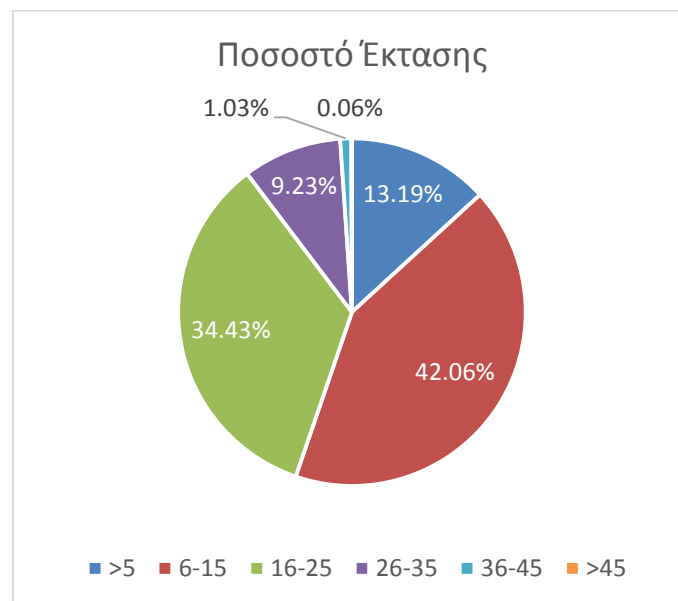


Χάρτης 5: Θεματικό επίπεδο υψομέτρου

### 5.3.3 Θεματικό Επίπεδο Μορφολογικής Κλίσης Εδάφους

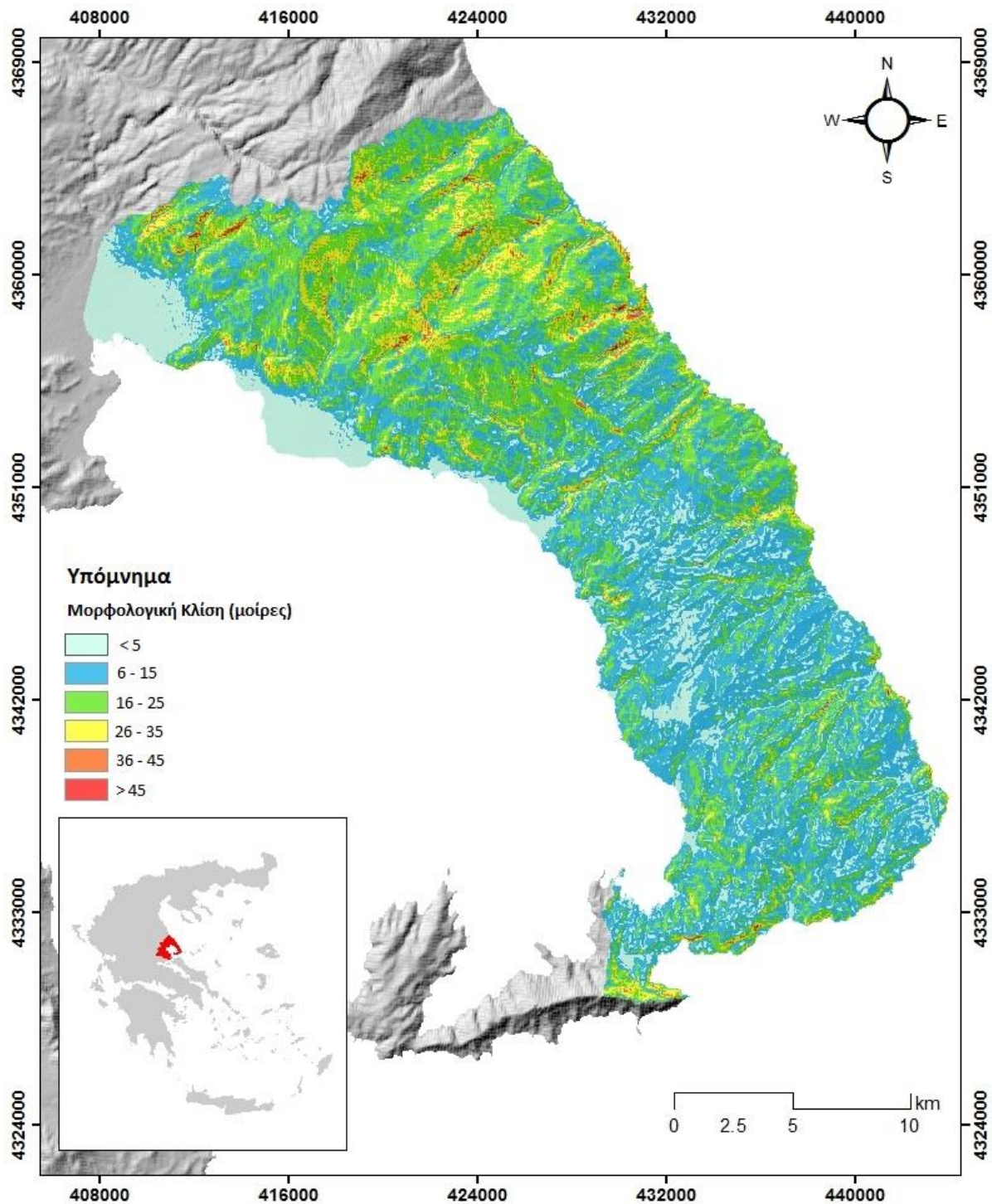
Η κλίση του εδάφους είναι παράγοντας ελέγχου της σταθερότητας ενός πρανούς, σε συνδυασμό πάντα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που το δομούν, και για το λόγο αυτό μια ψηφιακή εικόνα κλίσεων αποτελεί θεμελιώδες τμήμα του μοντέλου εκτίμησης της επικινδυνότητας.

Το Θεματικό Επίπεδο Μορφολογικών Κλίσεων της περιοχής παράχθηκε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m. Πρόκειται για αρχείο ψηφιδωτής μορφής (raster), στο οποίο κάθε φατνίο απεικονίζει τη γωνία κλίσης των πρανών για κάθε σημείο του χάρτη. Το εξεταζόμενο ΘΕΠ κατηγοριοποιήθηκε σε έξι (6) κλάσεις: κλίσεις μικρότερες των 5°, 6°-15°, 16°-25°, 26°-35°, 36°-45° και κλίσεις μεγαλύτερες των 45°, η στατιστική κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 19 και η χωρική κατανομή στο Χάρτη 6.



Σχήμα 19: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. μορφολογικής κλίσης εδάφους (μοίρες)

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου ΘΕΠ προκύπτει ότι την μεγαλύτερη έκταση στη περιοχή καταλαμβάνουν περιοχές της δεύτερης (6°-15°) και της τρίτης (16°-25°) κατηγορίας με σχετικά ήπιο μορφολογικό ανάγλυφο (42.06% και 34.43% αντίστοιχα).



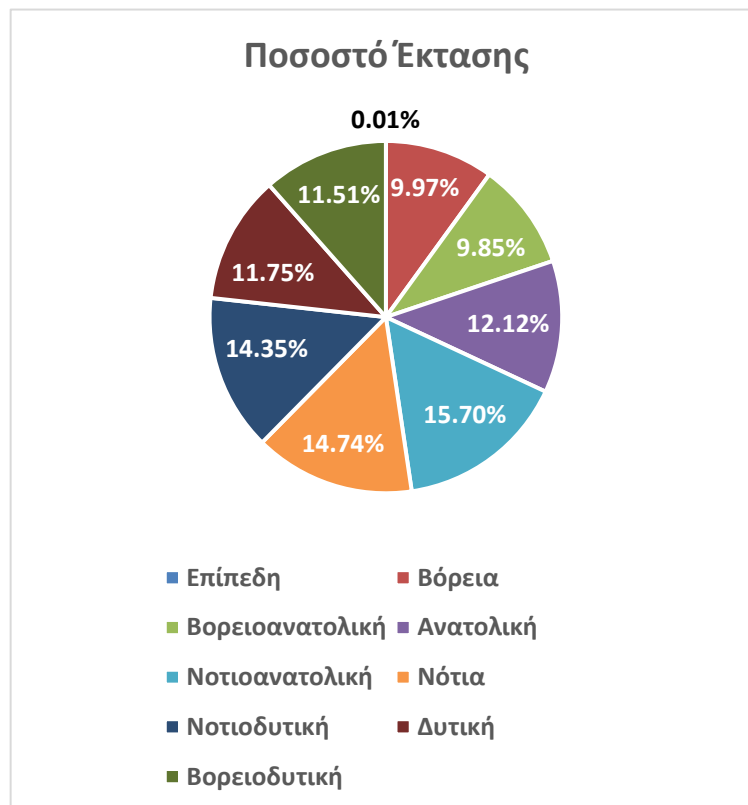
Χάρτης 6: Θεματικό επίπεδο μορφολογικής κλίσης εδάφους

#### 5.3.4 Θεματικό Επίπεδο Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων

Ο προσανατολισμός των πρανών παίζει καθοριστικό ρόλο στο είδος βλάστησης που αναπτύσσεται σε αυτά, καθώς από αυτόν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η ποσότητα ηλιακής ενέργειας που δέχονται. Έτσι επηρεάζονται έμμεσα και άλλοι παράγοντες, όπως η κατανομή της βλάστησης καθώς και ο βαθμός κορεσμού του εδάφους (Ladas et al. 2007, Yalcin et al.

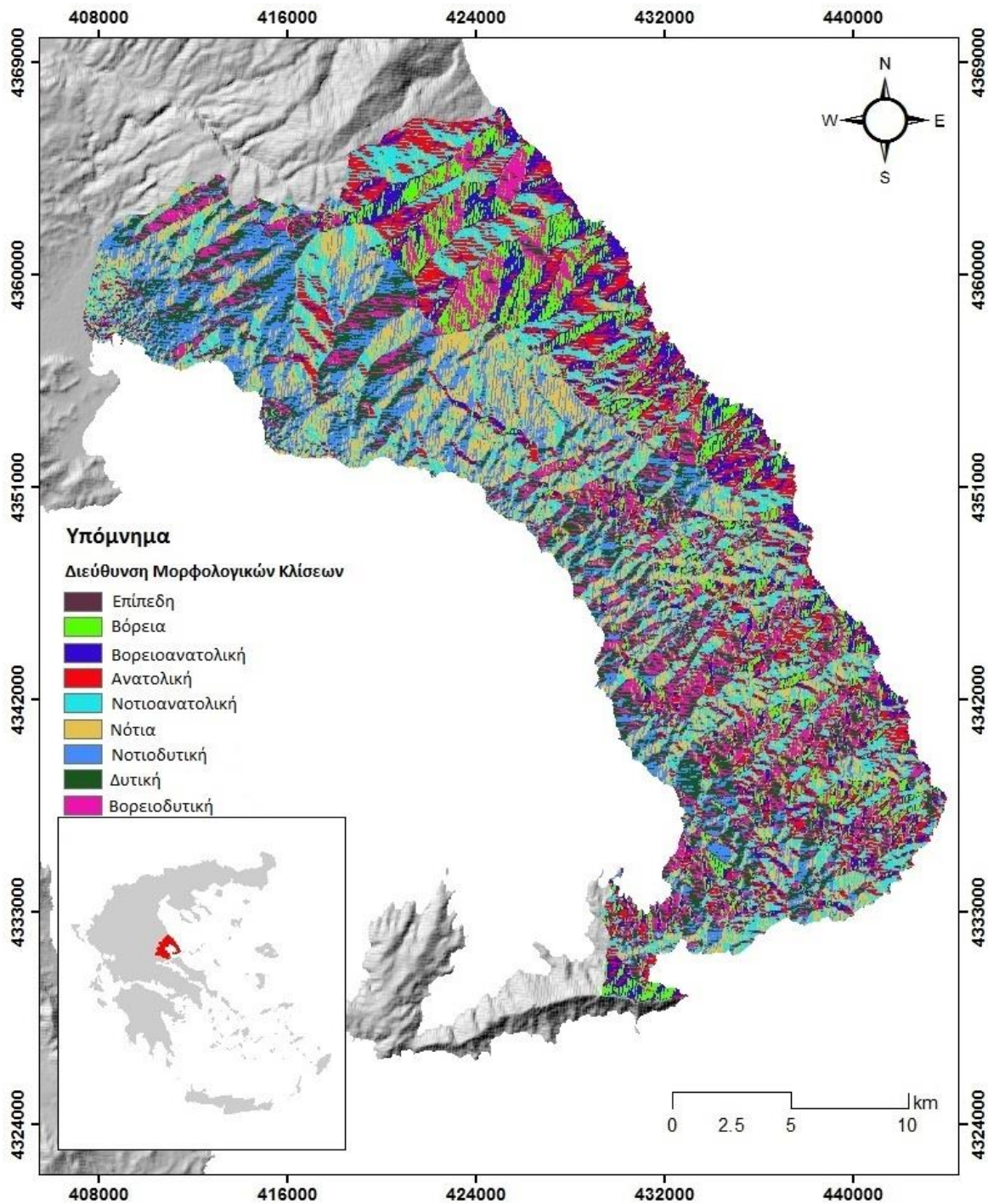
2011). Στο βόρειο ημισφαίριο, στα μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (όπου βρίσκεται και η Ελλάδα), γενικά θεωρείται ότι τα πρηνή που έχουν προσανατολισμό Β και ΒΔ είναι πιο επιρρεπή στην εκδήλωση κατολισθήσεων, λόγω των ψυχρότερων συνθηκών και της περισσότερης σκιάς, που ευνοούν τη συσσώρευση και τη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους (Guzzetti et al., 1999). Αντίθετα η συχνότητα των αστοχιών στα πρηνή με προσανατολισμό Α και ΝΑ, είναι χαμηλότερη, ως αποτέλεσμα της μειωμένης υγρασίας.

Το Θεματικό Επίπεδο Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων της περιοχής παράχθηκε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, και είναι σε ψηφιδωτή μορφή (raster). Το παραγόμενο ΘΕΠ ταξινομήθηκε σε εννέα (9) κλάσεις: Επίπεδη (-1°), Βόρεια (0-22,5°/337,5°-360°), Βορειοανατολική (22,5°-67,5°), Ανατολική (67,5°-112,5°), Νοτιοανατολική (112,5°-157,5°), Νότια (157,5°-202,5°), Νοτιοδυτική (202,5°-247,5°), Δυτική (247,5°- 292,5°), Βορειοδυτική (292,5°- 337,5°) (για τις επίπεδες περιοχές του DEM (κλίση 0°), ο προσανατολισμός δεν ορίζεται και παίρνει τιμή -1). Η στατιστική κατανομή των εννέα αυτών κλάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 20 και η χωρική τους κατανομή στο Χάρτη 7.



Σχήμα 20: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου Θ.Ε.Π. προκύπτει ότι οι μορφολογικές κλίσεις με Νοτιοανατολική διεύθυνση καλύπτουν τη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής έρευνας (15.70%) με τις κλίσεις με Νότια και Νοτιοδυτική διεύθυνση να έχουν τις αμέσως μικρότερες εκτάσεις (14.74% και 14.35% αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται από την οριοθέτηση της περιοχής έρευνας στο Νοτιοανατολικό τμήμα του ορεινού όγκου του Πηλίου.



Χάρτης 7: Θεματικό επίπεδο διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων

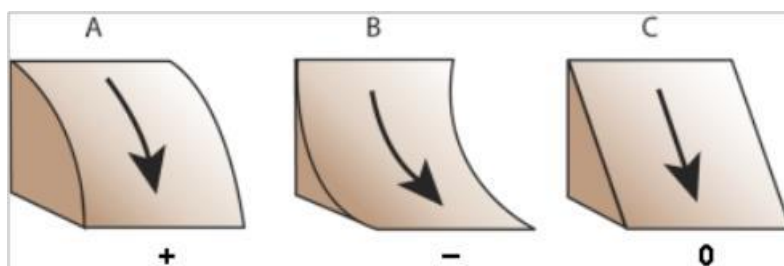


### 5.3.5 Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων

Η γεωμετρία του πρσανούς είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας ελέγχου της σταθερότητάς του σε συνδυασμό πάντα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που το δομούν. Επομένως η καμπυλότητα των πρσανών επηρεάζει το μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας. Η καμπυλότητα ορίζεται ως η πρώτη παράγωγος της κλίσης και μετράει την κοιλότητα ή την κυρτότητα ενός πρσανούς.

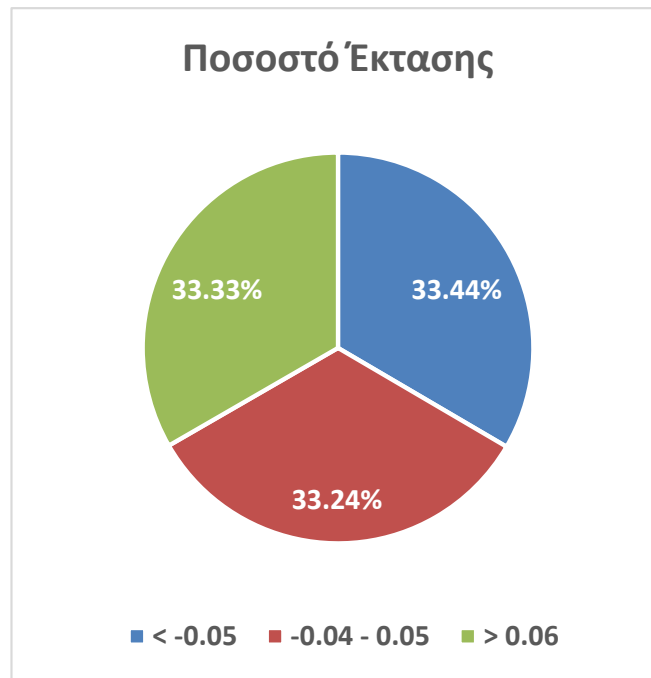
Η καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων (profile curvature) περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της κλίσης στο κάθετο επίπεδο μιας γραμμής ροής. Αποτελεί επομένως σημαντική παράμετρο καθώς δίνει πληροφορίες για τη μεταβολή της ταχύτητας ροής, καθώς και για τις διεργασίες μεταφοράς και απόθεσης των ιζημάτων.

Οι θετικές τιμές καμπυλότητας αντιστοιχούν σε επιφάνεια έχει τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ οι αρνητικές τιμές σε επιφάνεια που έχει τα κοίλα προς τα πάνω (Σχήμα 21). Η μηδενική τιμή καμπυλότητας αντιστοιχεί σε επιφάνεια με σταθερή κλίση (γραμμική επιφάνεια).



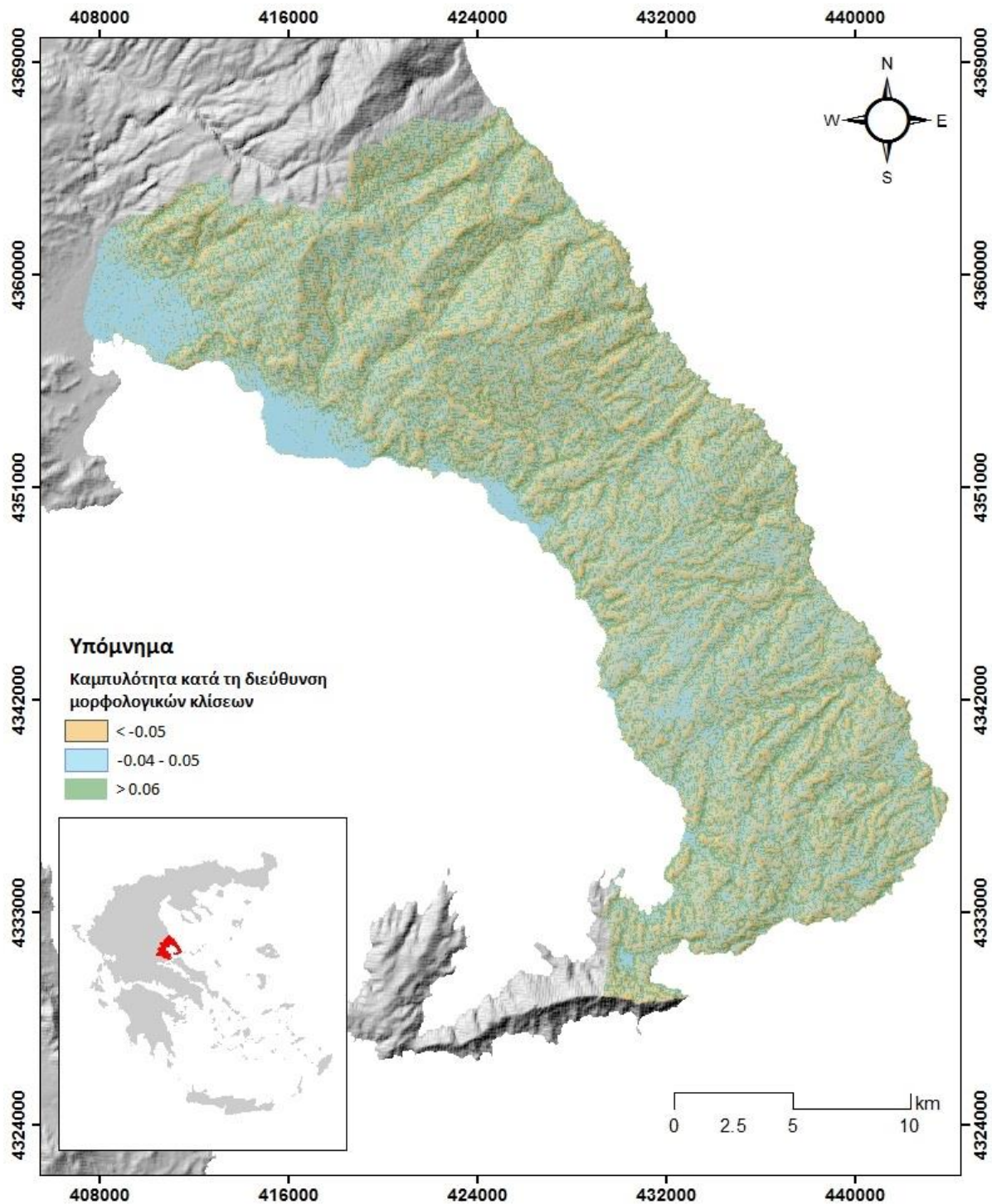
Σχήμα 21: Καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων: (A) θετικές τιμές καμπυλότητας, (B) αρνητικές τιμές καμπυλότητας, (C) μηδενική τιμή καμπυλότητας. (arcgis.com)

Το Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση των Μορφολογικών Κλίσεων της περιοχής παράχθηκε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, και είναι σε ψηφιδωτή μορφή (raster). Το παραγόμενο ΘΕΠ ταξινομήθηκε σε τρεις (3) κλάσεις: επιφάνειες με αρνητικές τιμές ( $< -0.05$ ) δηλαδή με τα κοίλα προς τα πάνω, επιφάνειες με τιμές που τείνουν στο 0 ( $-0.05 - 0.04$ ), δηλαδή γραμμικές επιφάνειες και επιφάνειες με θετικές τιμές ( $> 0.05$ ) δηλαδή με τα κοίλα προς τα κάτω. Η στατιστική κατανομή των τριών αυτών κλάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 22 και η χωρική τους κατανομή στο Χάρτη 8.



*Σχήμα 22: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων*

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου Θ.Ε.Π. προκύπτει ότι οι τρεις κλάσεις καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων καταλαμβάνουν συνολικά περίπου το ίδιο ποσοστό του χώρου της περιοχής έρευνας.

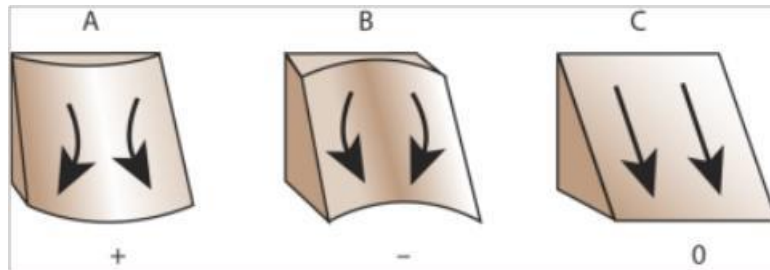


Χάρτης 8: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων

### 5.3.6 Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων

Η καμπυλότητα κάθετα στη Διεύθυνση των Μορφολογικών Κλίσεων (plan curvature) αποτελεί τη δεύτερη βασική ορθογώνια συνιστώσα της καμπυλότητας. Η μελέτη της είναι εξίσου σημαντική καθώς οι τιμές της ορίζουν τη σύγκλιση ή απόκλιση των γραμμών ροής των υδάτων, άρα και τη συγκέντρωσή τους.

Οι θετικές τιμές καμπυλότητας αντιστοιχούν σε επιφάνεια που είναι κυρτή πλευρικά (έχει τα κοίλα προς τα μέσα), ενώ οι αρνητικές τιμές σε επιφάνεια που είναι κοίλη πλευρικά (έχει τα κοίλα προς τα έξω, Σχήμα 23). Η μηδενική τιμή καμπυλότητας αντιστοιχεί σε γραμμική επιφάνεια.



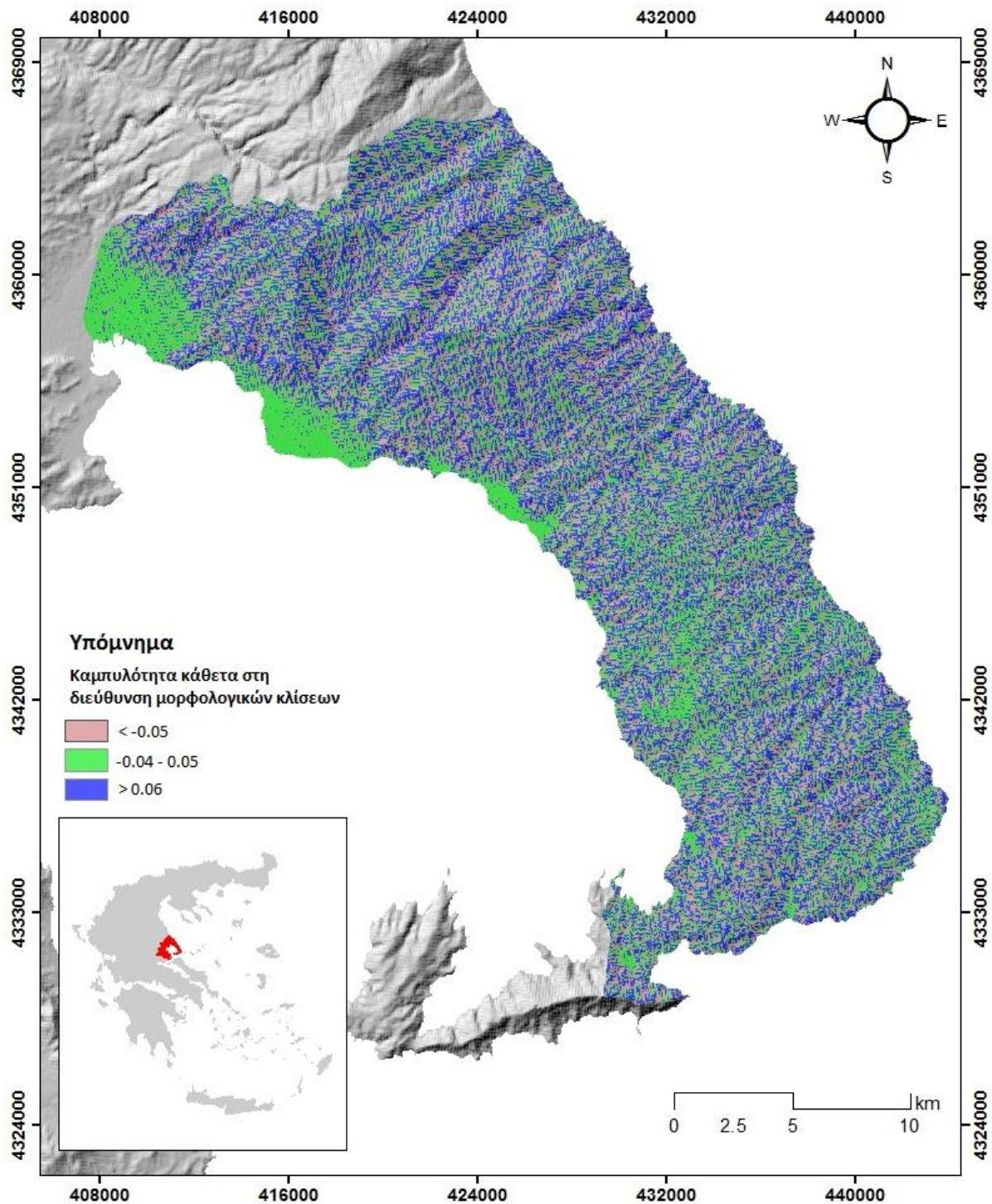
Σχήμα 23: Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων: (A) θετικές τιμές καμπυλότητας, (B) αρνητικές τιμές καμπυλότητας, (C) μηδενικές τιμές καμπυλότητας. (*arcgis.com*)

Το Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση των Μορφολογικών Κλίσεων της περιοχής παράχθηκε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, και είναι σε ψηφιδωτή μορφή (raster). Το παραγόμενο ΘΕΠ ταξινομήθηκε σε τρεις (3) κλάσεις: επιφάνειες με αρνητικές τιμές ( $< -0.05$ ) δηλαδή κοίλες πλευρικά, επιφάνειες με τιμές που τείνουν στο 0 ( $-0.05 - 0.04$ ) δηλαδή γραμμικές επιφάνειες και επιφάνειες με θετικές τιμές ( $> 0.05$ ) δηλαδή κυρτές πλευρικά. Η στατιστική κατανομή των τριών αυτών κλάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 24 και η χωρική τους κατανομή στο Χάρτη 9.



*Σχήμα 24: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων*

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου Θ.Ε.Π. προκύπτει ότι οι τρεις κλάσεις καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων καταλαμβάνουν συνολικά περίπου το ίδιο ποσοστό του χώρου της περιοχής έρευνας, όπως προηγουμένως και οι κλάσεις καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων.

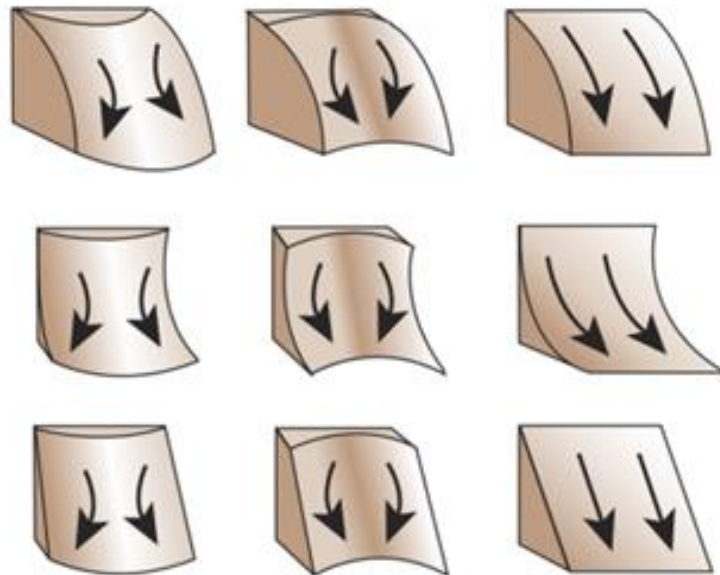


Χάρτης 9: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων

### 5.3.7 Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας

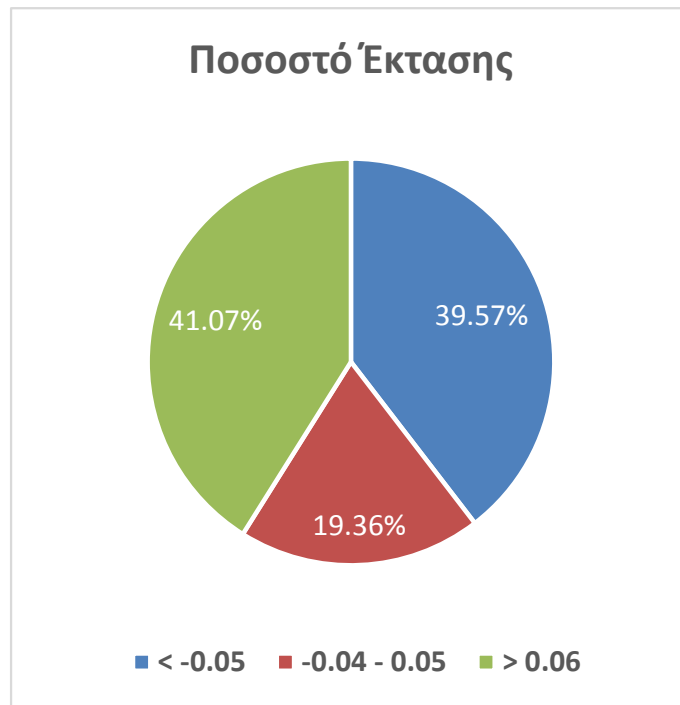
Η καμπυλότητα ενός πρानούς αποτελείται από το συνδυασμό της καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων και την καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων. Η καμπυλότητα είναι μία ακόμα σημαντική παράμετρος προς εξέταση καθώς οι δύο συνιστώσες της μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικά

αποτελέσματα όταν συνδυαστούν, επηρεάζοντας τη ροή των υδάτων με πολλούς διαφορετικούς τρόπους (Σχήμα 26).



Σχήμα 25: Καμπυλότητα: Παραδείγματα διαφορετικών συνδυασμών καμπυλότητας πρανούς (arcgis.com)

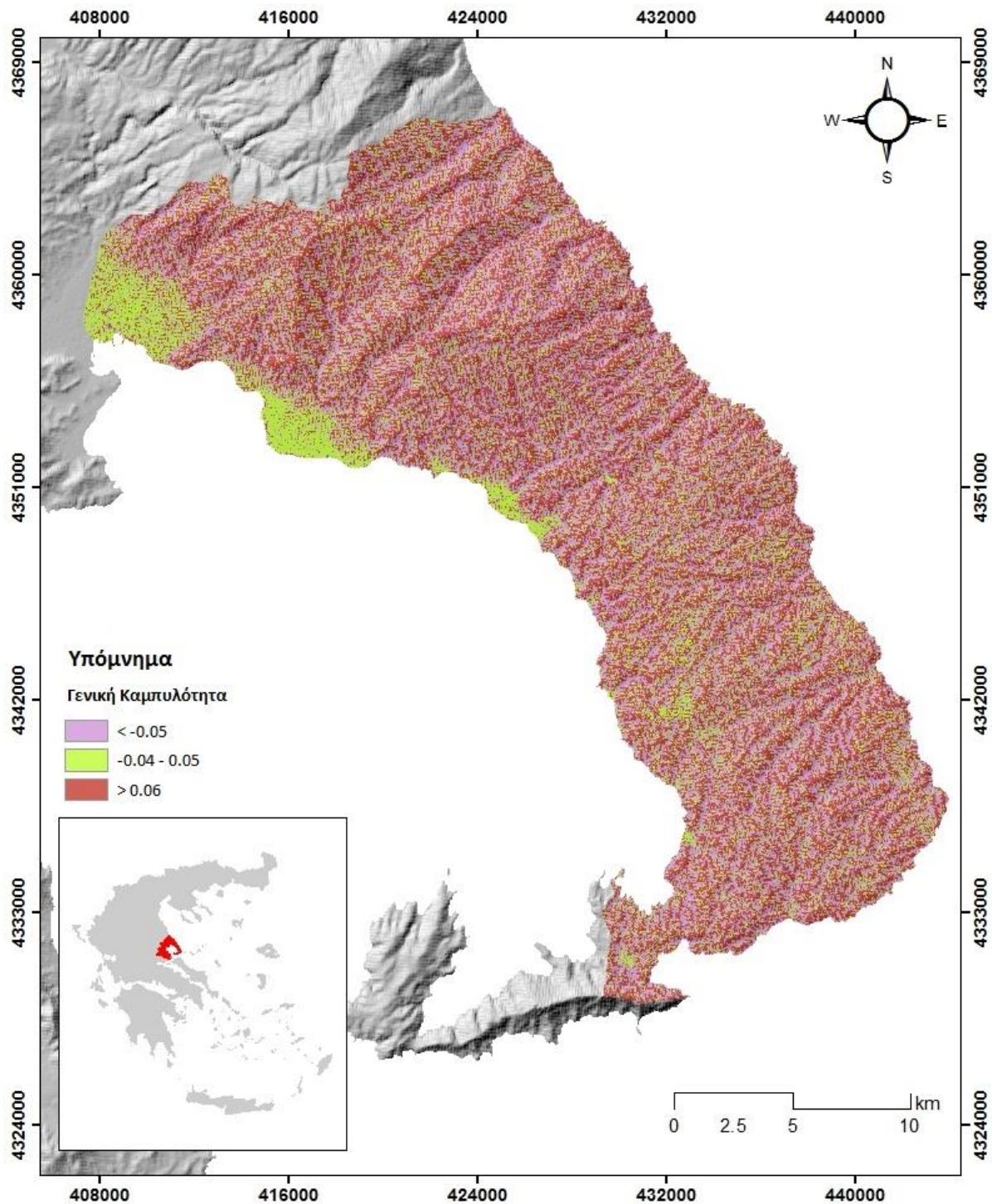
Το Θεματικό Επίπεδο Καμπυλότητας της περιοχής παράχθηκε από το διαθέσιμο DEM, με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, και είναι σε ψηφιδωτή μορφή (raster). Το παραγόμενο ΘΕΠ ταξινομήθηκε σε τρεις (3) κλάσεις: επιφάνειες με αρνητικές τιμές ( $< -0.05$ ) δηλαδή κοίλες, επιφάνειες με τιμές που τείνουν στο 0 ( $-0.05 - 0.04$ ) δηλαδή γραμμικές επιφάνειες και επιφάνειες με θετικές τιμές ( $> 0.05$ ) δηλαδή κυρτές. Η στατιστική κατανομή των τριών αυτών κλάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 27 και η χωρική τους κατανομή στο Χάρτη 10.



Σχήμα 26: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. καμπυλότητας

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου Θ.Ε.Π. προκύπτει ότι η κλάση με τιμές καμπυλότητας που τείνουν στο 0 καλύπτει πολύ μικρότερη έκταση (19.36%) από τις κλάσεις με αρνητικές και θετικές τιμές καμπυλότητας (39.57% και 41.07% αντίστοιχα).



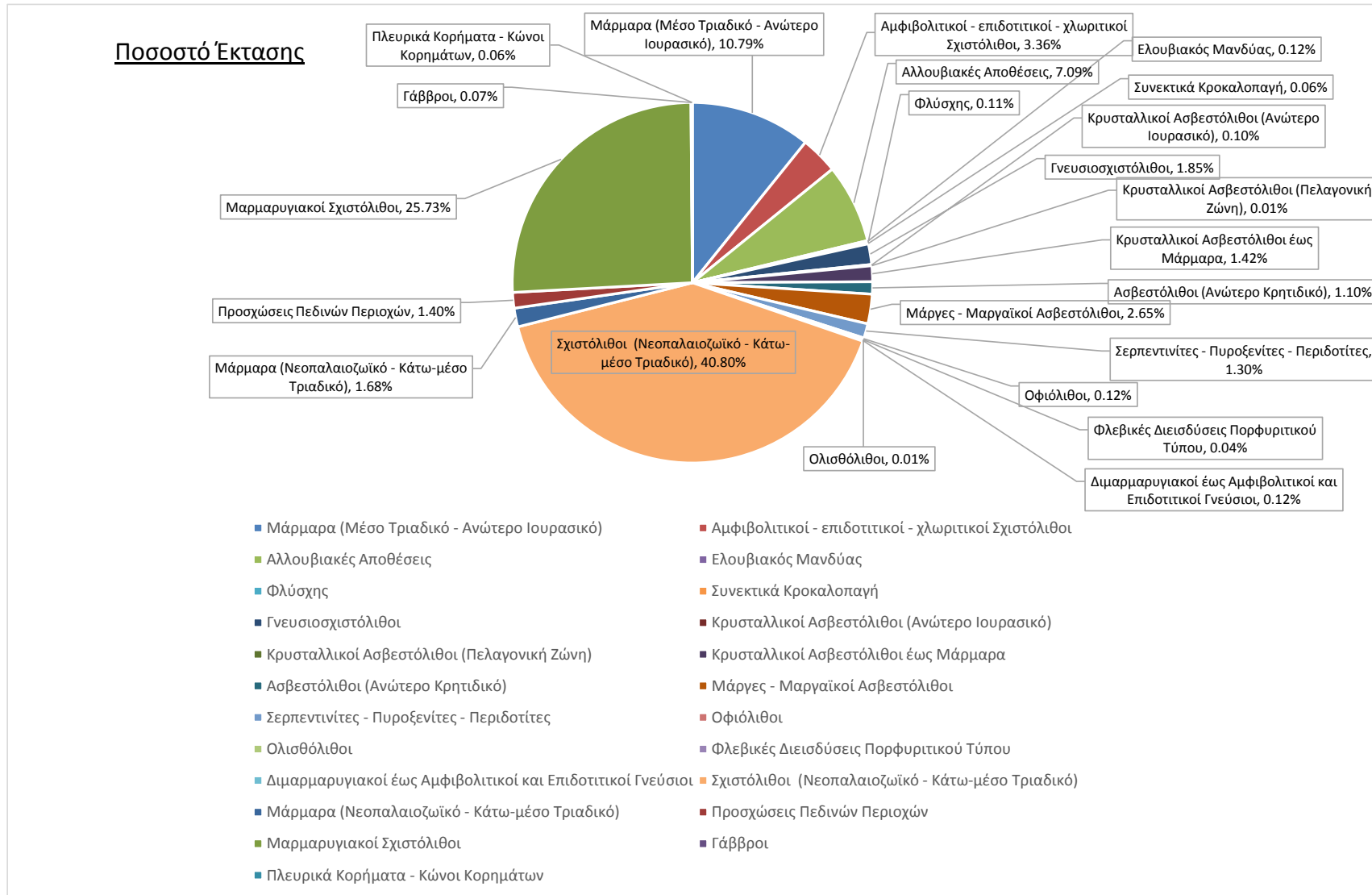


Χάρτης 10: Θεματικό επίπεδο καμπυλότητας

### 5.3.8 Θεματικό Επίπεδο Γεωλογικών Ενοτήτων

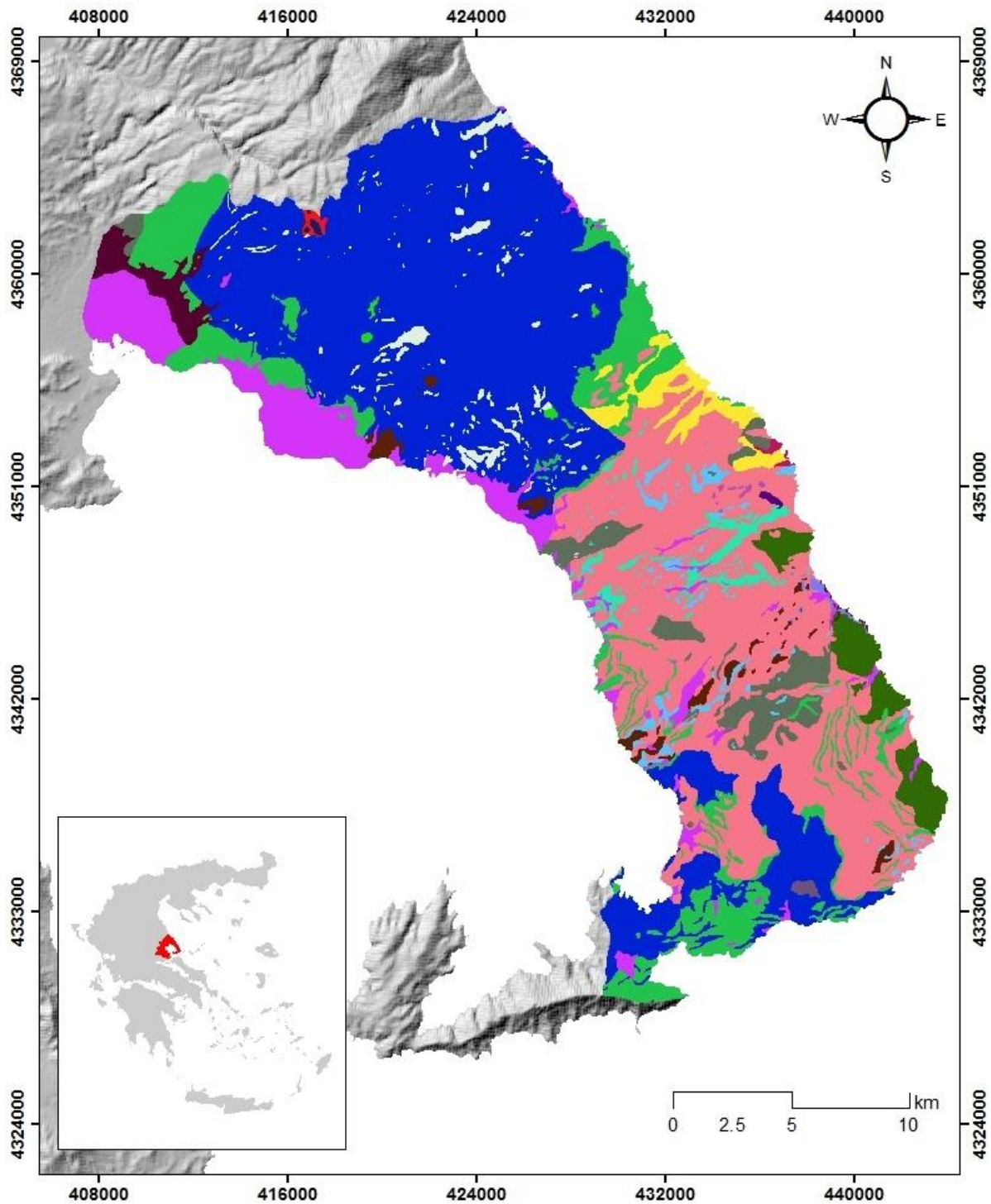
Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελεί μια από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Για τη δημιουργία του Θεματικού Επιπέδου των Γεωλογικών Ενοτήτων ψηφιοποιήθηκαν τρία φύλλα (Βόλος, Ζαγορά – Συκή, Αργαλαστή) του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.























Στο αρχείο που δημιουργήθηκε, το οποίο έχει ψηφιδωτή μορφή (raster), δεν πραγματοποιήθηκε ενοποίηση των γεωλογικών ενοτήτων σε ομάδες, αλλά η κάθε μια μελετήθηκε ξεχωριστά ως προς τη σχέση της με την εμφάνιση κατολισθήσεων. Το παραγόμενο ΘΕΠ αποτελείται από τριανταπέντε (35) γεωλογικές ενότητες (κλάσεις), η στατιστική κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 28 και η χωρική κατανομή στο Χάρτη 11.



Σχήμα 27: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. γεωλογικών ενοτήτων

Από τη στατιστική κατανομή των γεωλογικών ενοτήτων είναι εμφανές πως τη μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή έρευνας καλύπτουν οι σχιστόλιθοι του Νεοπαλαιοζωϊκού και Κάτω-μέσο Τριαδικού (40.8%), ενώ μεγάλη έκταση καλύπτουν και οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι της Πελαγονικής Ζώνης (25.73%).



<b>Υπόμνημα</b>	
<b>Γεωλογικές Ενότητες</b>	
	Αμφιβολιτικοί - επιδοτιτικοί - χλωριτικοί Σχιστόλιθοι
	Αλλουβιακές Αποθέσεις
	Ελουβιακός Μανδύας
	Φλύσχη
	Συνεκτικά Κροκαλοπαγή
	Γνευσιοσχιστόλιθοι
	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (Ανώτερο Ιουρασικό)
	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (Πελαγονική Ζώνη)
	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι έως Μάρμαρα
	Ασβεστόλιθοι (Ανώτερο Κρητιδικό)
	Μάργες - Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι
	Σερπεντινίτες - Πυροξενίτες - Περιδοτίτες
	Οφιόλιθοι
	Ολισθόλιθοι
	Φλεβικές Διεισδύσεις Πορφυριτικού Τύπου
	Διμαρμαρυγικοί έως Αμφιβολιτικοί και Επιδοτιτικοί Γνεύσιοι
	Σχιστόλιθοι (Νεοπαλαιοζωϊκό - Κάτω-μέσο Τριαδικό)
	Μάρμαρα (Νεοπαλαιοζωϊκό - Κάτω-μέσο Τριαδικό)
	Προσχώσεις Πεδινών Περιοχών
	Μαρμαρυγικοί Σχιστόλιθοι
	Γάββροι
	Μάρμαρα (Μέσο Τριαδικό - Ανώτερο Ιουρασικό)
	Πλευρικά Κορήματα - Κώνοι Κορημάτων

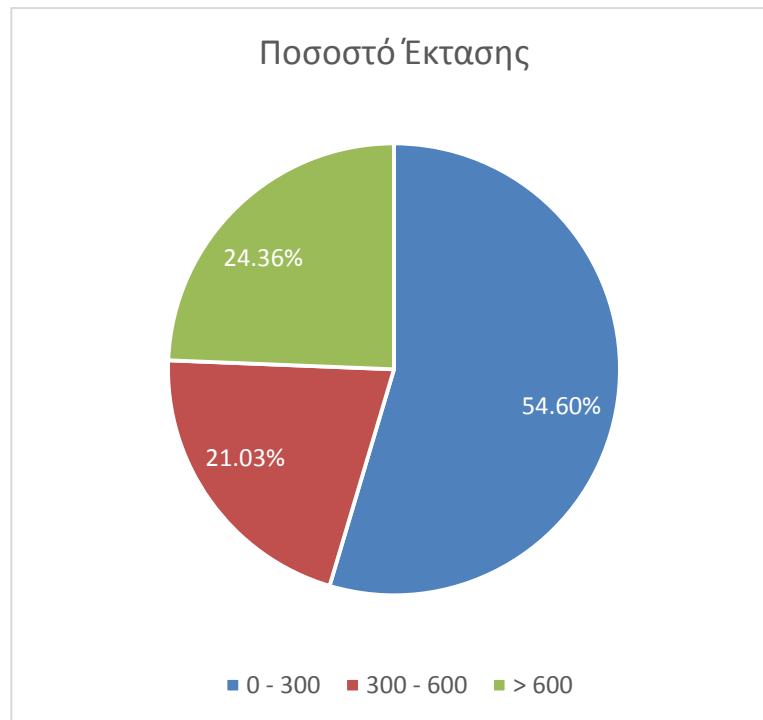
*Χάρτης 11: Θεματικό επίπεδο γεωλογικών ενότητων*

### 5.3.9 Θεματικό Επίπεδο Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία

Τα τεκτονικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής συνδέονται άμεσα με την εκδήλωση κατολισθήσεων. Η παρουσία μιας ρηξιγενούς ζώνης που οφείλεται στη δράση τεκτονικών δυνάμεων, προκαλεί μείωση της διατμητικής αντοχής των πετρωμάτων μέσω της υποβάθμισης των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας, φέρνοντας σε επαφή σχηματισμούς διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών, δημιουργώντας επιφάνειες ασυνέχειας και επιδρώντας στις υδρογεωλογικές συνθήκες και στη μορφολογία (Τσαγγαράτος, 2012). Επομένως, περιοχές γειτονικές σε τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα, επιπεύσεις, επωθήσεις) παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα αστοχίας.

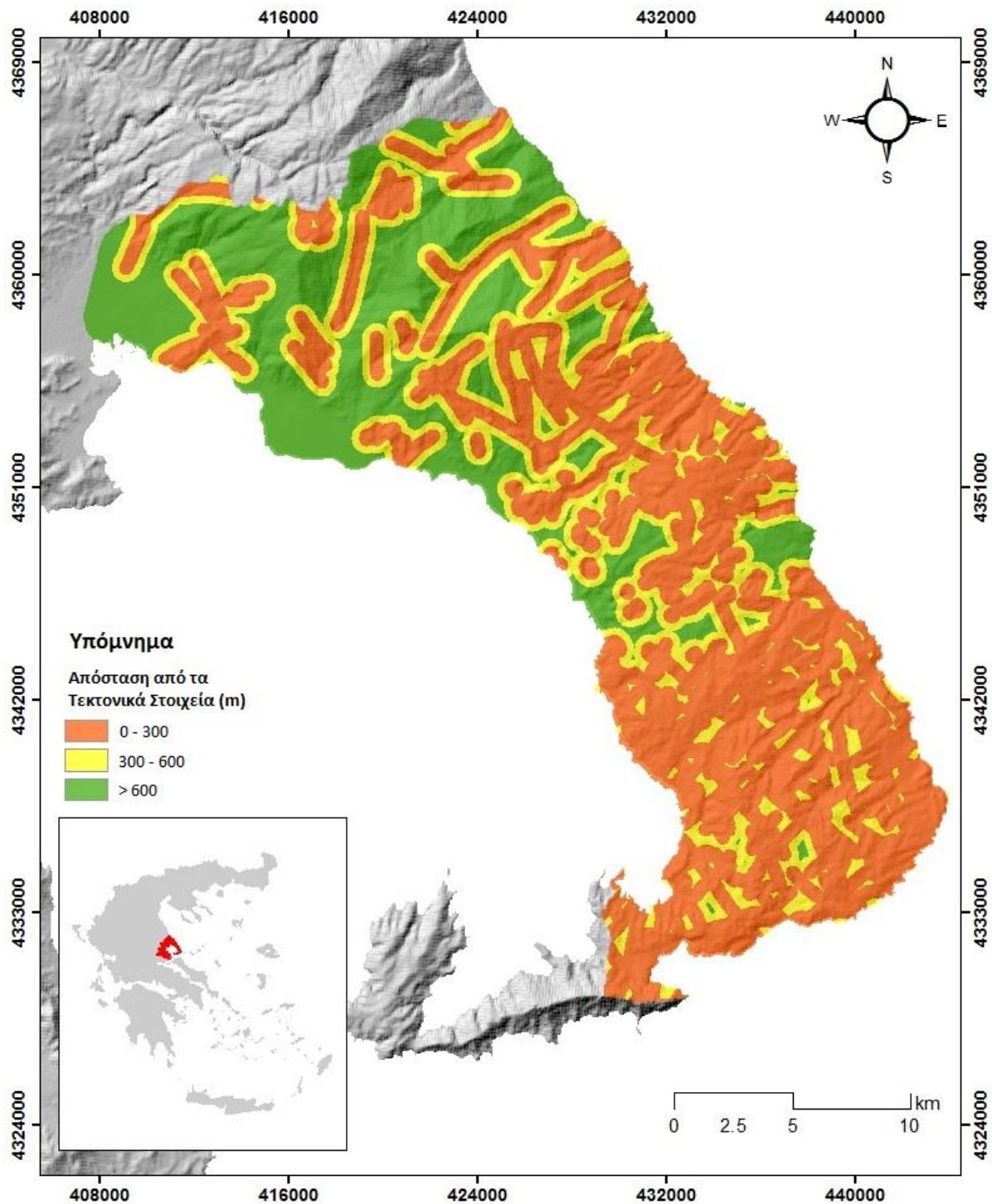
Για τη δημιουργία του Θεματικού Επιπέδου της Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν τα ψηφιοποιημένα φύλλα του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος που δημιουργήθηκαν και για το Θεματικό Επίπεδο Γεωλογικών Ενοτήτων. Στο παραγόμενο

ΘΕΠ, ψηφιδωτής μορφής (raster) με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, δημιουργήθηκαν τρεις (3) ζώνες επιρροής (buffer zones) που περιγράφουν την απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία: απόσταση μικρότερη των 300m, απόσταση μεταξύ 300 και 600m και απόσταση μεγαλύτερη των 600m. Η στατιστική τους κατανομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 29 και η χωρική τους κατανομή στην περιοχή έρευνας στο Χάρτη 12.



Σχήμα 28: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία (m)

Παρατηρείται ότι πάνω από τη μισή έκταση της περιοχής έρευνας εντάσσεται στην πρώτη κατηγορία (απόσταση μικρότερη των 300m), γεγονός που δικαιολογείται από την πυκνή ύπαρξη πολυάριθμων τεκτονικών στοιχείων στην περιοχή.

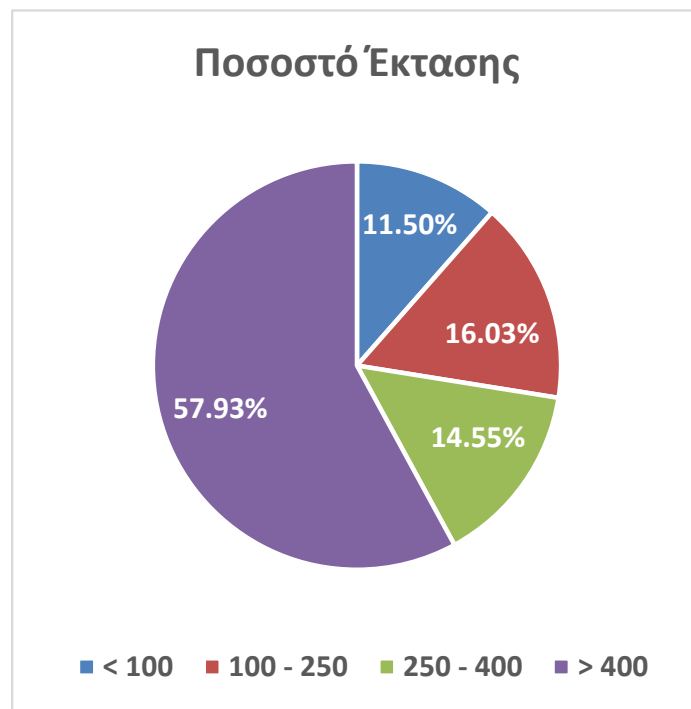


*Χάρτης 12: Θεματικό επίπεδο απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία*

### 5.3.10 Θεματικό Επίπεδο Απόστασης από το Υδρογραφικό Δίκτυο

Η παρουσία νερού αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό παράγοντα εκδήλωσης κατολισθήσεων, τόσο λόγω της διαβρωτικής ικανότητας ποταμών και χειμάρρων που προκαλούν υποσκαφές και στη συνέχεια μετακινήσεις των ασταθών μαζών, όσο και λόγω του βαθμού κορεσμού του εδάφους που επηρεάζει άμεσα την ευστάθεια του πρανούς.

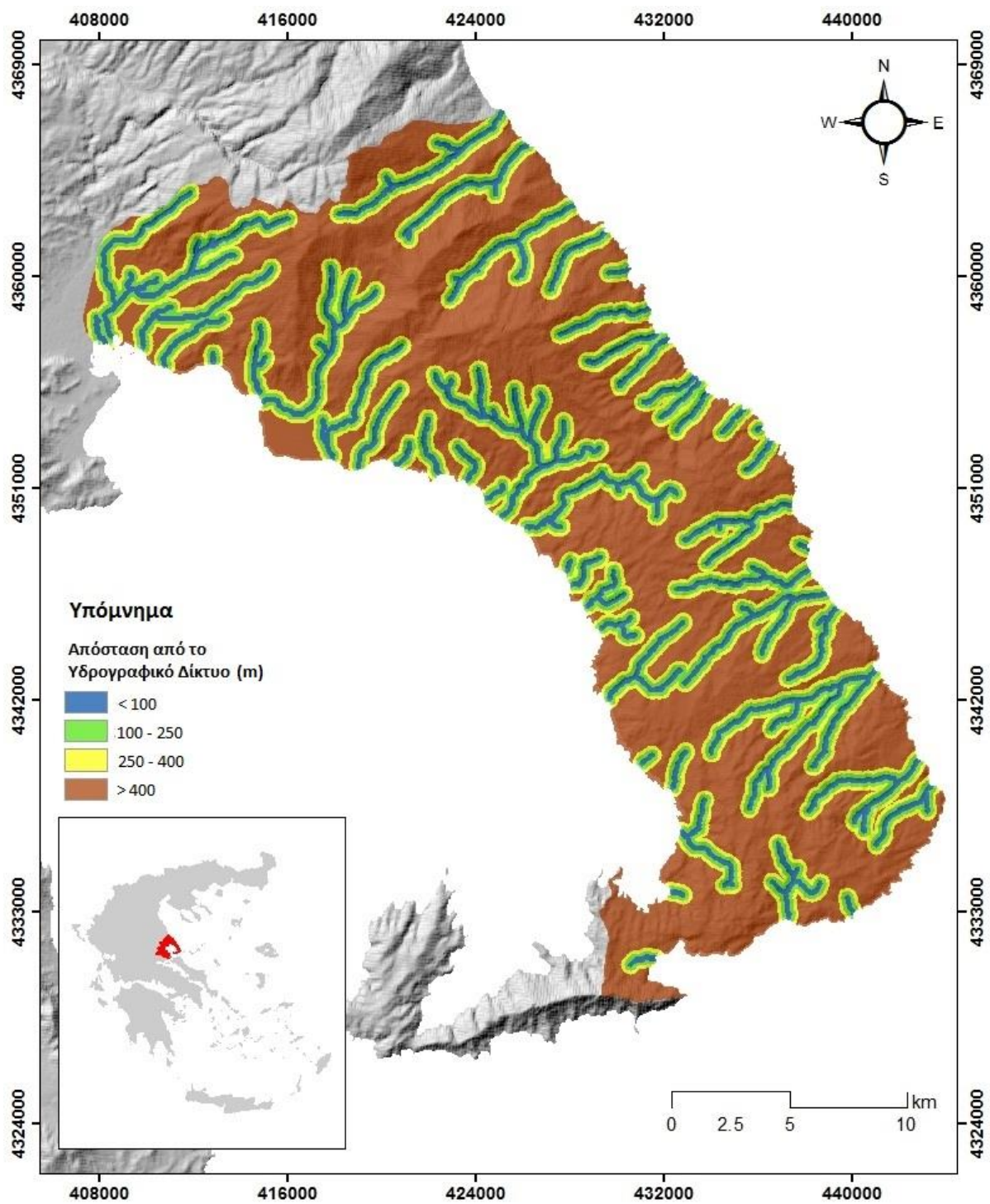
Στο παραγόμενο Θ.Ε.Π. ψηφιδωτής μορφής (raster) με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου (φατνίου) 25x25m, δημιουργήθηκαν τέσσερις (4) ζώνες επιρροής (buffer zones) που χαρακτηρίζουν την απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο: απόσταση μικρότερη των 100m, απόσταση μεταξύ 100 και 250m, απόσταση μεταξύ 250 και 400m και απόσταση μεγαλύτερη των 400m. Η στατιστική τους κατανομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 30 και η χωρική τους κατανομή στο Χάρτη 13.



Σχήμα 29: Κατανομή έκτασης κλάσεων Θ.Ε.Π. απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο

Από τη στατιστική επεξεργασία του παραγόμενου Θ.Ε.Π. προκύπτει ότι πάνω από τη μισή έκταση της περιοχής έρευνας ανήκει στην κλάση με αποστάσεις μεγαλύτερες των 400m από το υδρογραφικό δίκτυο (57.93%).





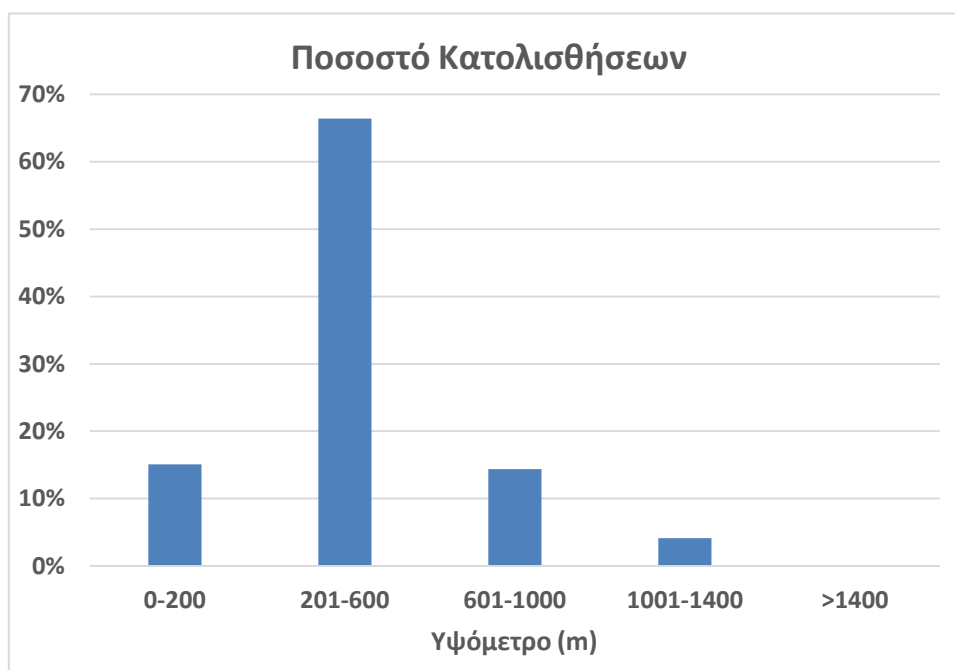
Χάρτης 13: Θεματικό επίπεδο απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο

## 5.4 Ανάλυση των Θ.Ε.Π.

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα δεδομένα του κάθε παραγόμενου Θ.Ε.Π. σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των κατολισθητικών φαινομένων στις κλάσεις τους.

### 5.4.1 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Υψομέτρου

Στο Σχήμα 31 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Υψομέτρου, αναφορικά με τις πέντε (5) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.



Σχήμα 30: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. υψομέτρου

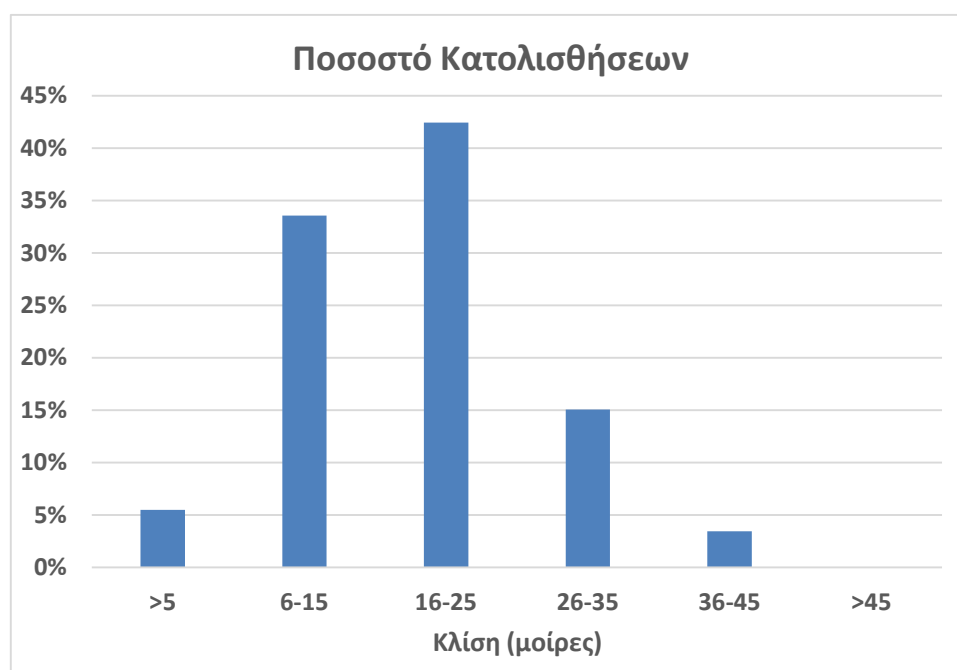
Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων εντοπίζεται στη δεύτερη κλάση με υψόμετρο 201 – 600m (66.44%), η οποία κατέχει και τη μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή έρευνας (39.83%, Σχήμα 18).

Ο μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων που παρατηρείται στις περιοχές της δεύτερης κατηγορίας μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στις περιοχές αυτές αναπτύσσεται μεγάλο τμήμα του οδικού δικτύου, καθώς και πληθώρα οικισμών. Τα στοιχεία αυτά υποδηλώνουν εκτενείς ανθρωπογενείς δραστηριότητες που συχνά συνοδεύονται από την εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων, καθώς και εύκολη προσβασιμότητα για την καταγραφή των φαινομένων. Αντίθετα, στις κλάσεις με τα μεγαλύτερα υψόμετρα παρατηρείται σταδιακή μείωση του ποσοστού των κατολισθήσεων. Βασική αιτία της

μείωσης αυτής μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι στα μεγάλα υψόμετρα συναντώνται υγιή και συμπαγή πετρώματα, καθώς και λεπτός μανδύας αποσάθρωσης, χαρακτηριστικά τα οποία δεν ευνοούν την εκδήλωση αστοχιών. Επιπλέον, στις περιοχές αυτές ο αριθμός των οικισμών είναι μικρότερος σε σχέση με τις παράκτιες περιοχές και το οδικό δίκτυο λιγότερο ανεπτυγμένο. Έτσι, η ανθρωπογενής παρέμβαση στο έδαφος είναι μειωμένη και η παρατήρηση και η καταγραφή κατολισθήσεων σε αυτά τα υψόμετρα δεν είναι εύκολη.

#### 5.4.2 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Μορφολογικών Κλίσεων

Στο Σχήμα 32 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Μορφολογικών Κλίσεων, αναφορικά με τις έξι (6) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.



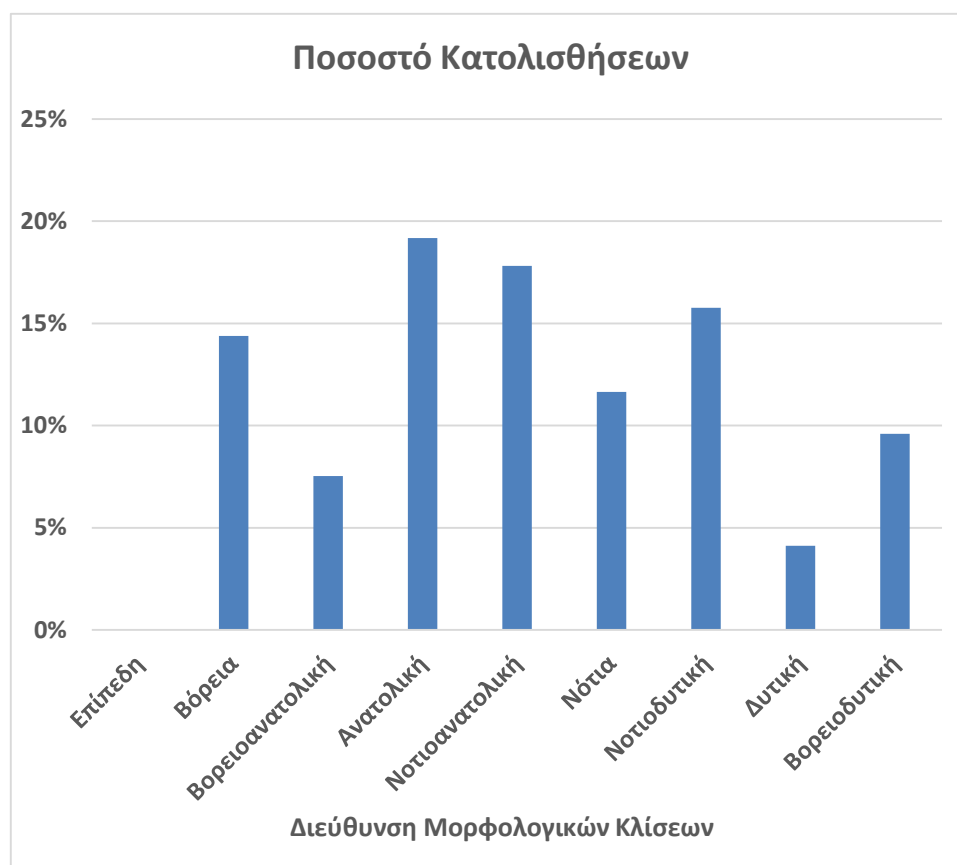
Σχήμα 31: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. μορφολογικών κλίσεων

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων εντοπίζεται στην τρίτη ενότητα, με κλίσεις  $16^{\circ}$ - $25^{\circ}$  (42.46 %), η οποία κατέχει τη δεύτερη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής έρευνας (34.43%, Σχήμα 19).

Παρατηρείται επίσης ότι στην κατηγορία με κλίσεις  $36^{\circ}$ - $45^{\circ}$ , δηλαδή με αρκετά απότομα πρανή, έχει καταγραφεί το 3.42% των κατολισθήσεων, ποσοστό ιδιαίτερα υψηλό για την έκταση που καταλαμβάνει η κατηγορία (1.03%, Σχήμα 19).

### 5.4.3 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Διεύθυνσης Μορφολογικών Κλίσεων, αναφορικά με τις εννέα (9) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.

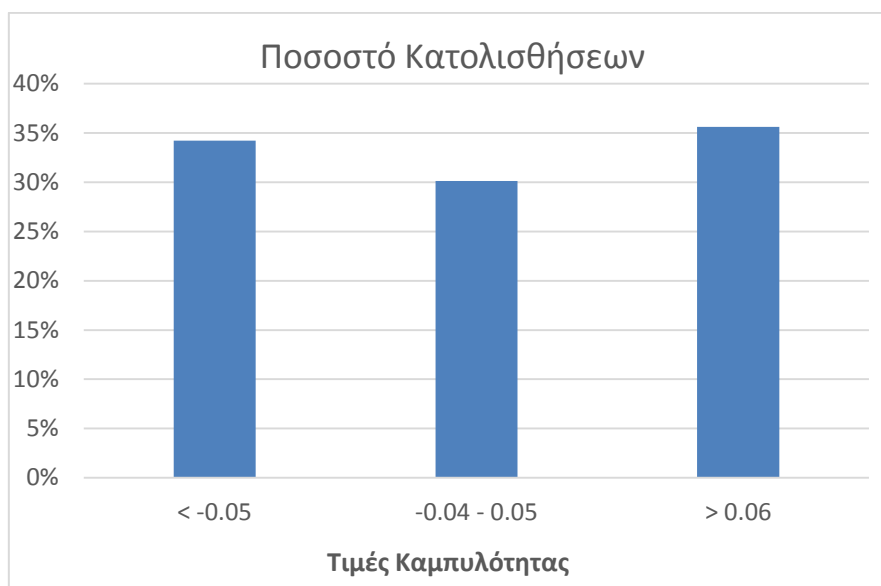


Σχήμα 32: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων εντοπίζεται σε περιοχές με Ανατολική διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων (19.18%), ενότητα η οποία κατέχει την τέταρτη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής έρευνας (Σχήμα 20). Αυτό αιτιολογείται από τις υψηλότερες τιμές υγρασίας και ύψους βροχής που χαρακτηρίζουν αυτές τις περιοχές. Ακολουθούν οι ενότητες με Νοτιοανατολική και Νοτιοδυτική διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων (17.81% και 15.75% αντίστοιχα), κάτι που αιτιολογείται από τις μεγάλες εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι συγκεκριμένες κλάσεις στην περιοχή έρευνας (15.70% και 14.35% αντίστοιχα, Σχήμα 20).

#### 5.4.4 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων

Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κατά τη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων, αναφορικά με τις τρεις (3) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.

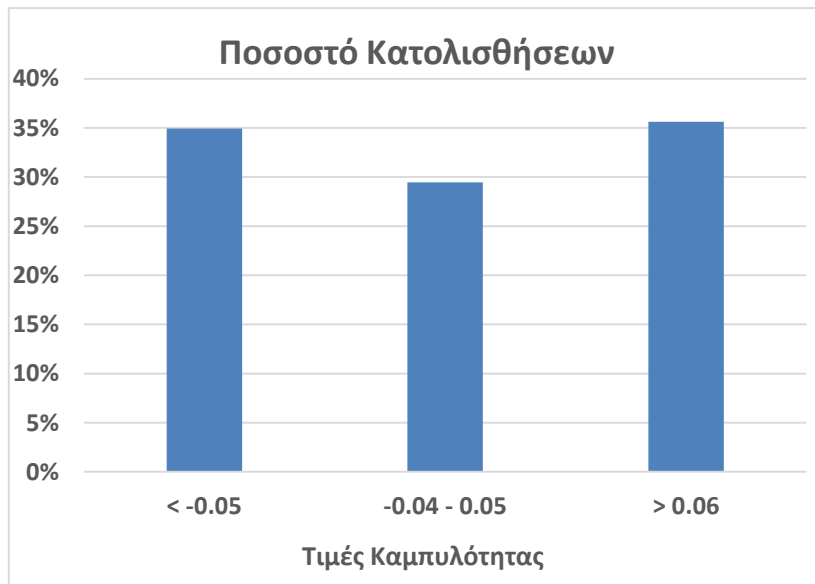


Σχήμα 33: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων

Παρατηρείται ότι τα ποσοστά των κατολισθήσεων των τριών κλάσεων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, ομοίως με τη σχετικά ισομερή κατανομή των εκτάσεων που φαίνεται στο Σχήμα 22. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό ανήκει στην κλάση με θετικές τιμές καμπυλότητας (35.62%). Ακολουθεί η κλάση με αρνητικές τιμές καμπυλότητας (34.25%) και το μικρότερο ποσοστό ανήκει στην κλάση που αφορά γραμμικές επιφάνειες πρανών (30.14%).

#### 5.4.5 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας κάθετα στη Διεύθυνση Μορφολογικών Κλίσεων, αναφορικά με τις τρεις (3) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.

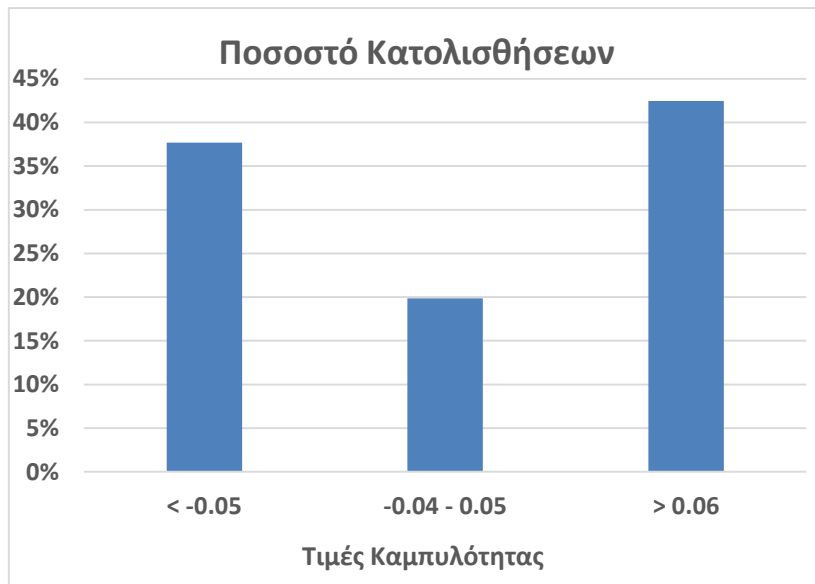


Σχήμα 34: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων

Παρατηρείται ότι, ομοίως με την προηγούμενη παράμετρο, τα ποσοστά των κατολισθήσεων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, ομοίως με την ισομερή κατανομή των εκτάσεων τους (Σχήμα 24), με το μεγαλύτερο να ανήκει στην κλάση με θετικές τιμές καμπυλότητας (35.62%).

#### 5.4.6 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας

Στο Σχήμα 36 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Καμπυλότητας, αναφορικά με τις τρεις (3) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.

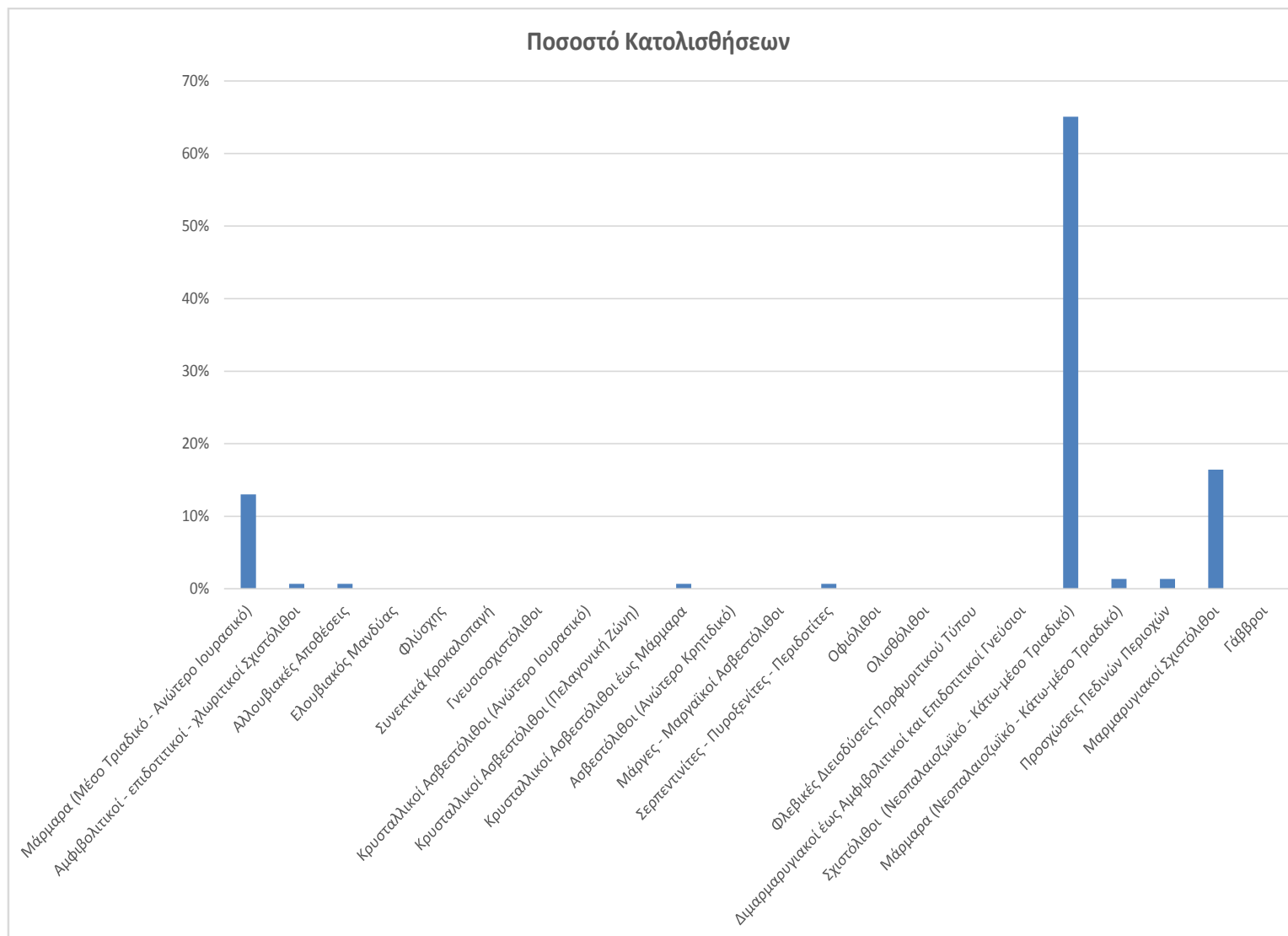


Σχήμα 35: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. καμπυλότητας

Παρατηρείται ότι η κατανομή των ποσοστών των κατολισθήσεων ακολουθεί την κατανομή των εκτάσεων (Σχήμα 27). Οι κλάσεις με αρνητικές και θετικές τιμές καμπυλότητας που κατέχουν παρόμοιες σε μέγεθος εκτάσεις (39.57% και 41.07% αντίστοιχα) δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στα ποσοστά των κατολισθήσεών τους (37.67% και 42.47% αντίστοιχα), ενώ η κλάση που αφορά γραμμικές επιφάνειες κατέχει μικρότερη έκταση (19.36%) και παρουσιάζει και αντίστοιχα μικρότερο ποσοστό (19.86%).

#### 5.4.7 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Γεωλογικών Ενοτήτων

Στο Σχήμα 37 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Γεωλογικών Ενοτήτων, αναφορικά με τις τριάντα πέντε (35) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.



Σχήμα 36: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. γεωλογικών ενοτήτων

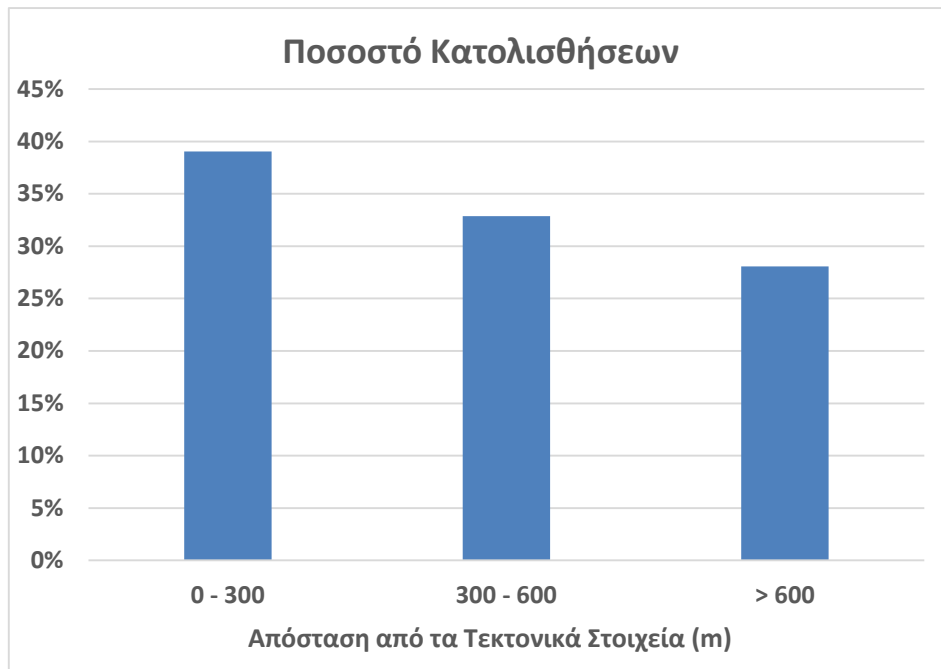


Παρατηρείται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των κατολισθήσεων έχει λάβει χώρα στην ενότητα των σχιστόλιθων του Νεοπαλαιοζωικού και Κάτω-μέσο Τριαδικού (65.1%). Αυτό αιτιολογείται από την πολύ μεγάλη έκταση που καταλαμβάνει ο συγκεκριμένος σχηματισμός στην περιοχή έρευνας (40.80%, Σχήμα 28) αλλά και από τα χαρακτηριστικά του. Ο ισχυρός κερματισμός, η έντονη τεκτονική καταπόνηση και η πλακώδης ανάπτυξή του σε συνδυασμό με το έντονο μορφολογικό ανάγλυφο έχουν ως αποτέλεσμα τη συχνή εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, συνήθως με τη μορφή μεταθετικών ολισθήσεων και καταπτώσεων.

Ακολουθούν οι ενότητες των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων (16.4%) και των μαρμάρων του Μέσο Τριαδικού και Ανώτερου Ιουρασικού (13.0%), και αυτές με σημαντική έκταση στην περιοχή έρευνας (25.73% και 10.79%, Σχήμα 28). Οι υπόλοιπες κατολισθήσεις κατανέμονται με πολύ μικρά ποσοστά στα Μάρμαρα του Νεοπαλαιοζωικού και Κάτω-μέσο Τριαδικού(1.4%), στις προσχώσεις πεδινών περιοχών (1.4%), στους αμφιβολιτικούς, επιδοτιτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους (0.7%), στις αλλουβιακές αποθέσεις (0.7%), στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους έως μάρμαρα (0.7%) και στους σερπεντινίτες, πυροξενίτες και περιδοτίτες (0.7%). Οι υπόλοιποι σχηματισμοί της περιοχής έρευνας δεν εμφανίζουν κατολισθητικά φαινόμενα.

#### 5.4.8 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία

Στο Σχήμα 38 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία, αναφορικά με τις τρεις (3) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.



Σχήμα 37: Ταξινόμηση των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. Απόστασης από τα Τεκτονικά Στοιχεία

Παρατηρείται ότι τα ποσοστά των κατολισθήσεων της κάθε κλάσης δεν παρουσιάζουν διαφορές αντίστοιχες με εκείνες ανάμεσα στις εκτάσεις των κλάσεων (Σχήμα 29). Συγκεκριμένα, η πρώτη κλάση (0 – 300m) με ποσοστό έκτασης 54.60% εμφανίζει το 39.04% των κατολισθήσεων, η δεύτερη κλάση (300 – 600m) με ποσοστό έκτασης 21.03% εμφανίζει το 21.03% και η τρίτη κλάση (> 600m) με ποσοστό έκτασης 24.36% εμφανίζει το 28.08% των κατολισθήσεων. Αυτό οφείλεται ενδεχομένως σε αδυναμία της μεθόδου, καθώς τα ρήγματα δε διαχωρίζονται σε ενεργά και ανενεργά κατά την αποτύπωσή τους.

#### 5.4.9 Ανάλυση του Θ.Ε.Π. Απόστασης από το Υδρογραφικό Δίκτυο

Στο Σχήμα 39 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων του Θ.Ε.Π. Απόστασης από το Υδρογραφικό Δίκτυο, αναφορικά με τις τέσσερις (4) κλάσεις στις οποίες χωρίστηκε.



Σχήμα 38: Κατανομή των κατολισθήσεων στις κλάσεις του Θ.Ε.Π. απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο

Παρατηρείται ότι η κατανομή των κατολισθήσεων ακολουθεί την κατανομή της έκτασης σε κάθε κλάση, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 30. Πιο αναλυτικά, η πρώτη κλάση (< 100m) με ποσοστό έκτασης 11.50% εμφανίζει το 11.64% των κατολισθήσεων, η δεύτερη κλάση (100 – 250m) με ποσοστό έκτασης 16.03% εμφανίζει το 16.44%, η τρίτη κλάση (250 – 400m) με ποσοστό έκτασης 14.55% εμφανίζει το 21.23% και η τέταρτη κλάση (> 400m) με ποσοστό έκτασης 57.93% εμφανίζει το 50.86% των κατολισθήσεων. Αυτό αιτιολογείται από την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής κυρίως υπό τη μορφή εποχικών χειμάρρων και ρεμάτων.

## 5.5 Διαμόρφωση των αρχείων εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης – Εφαρμογή

Στη συνέχεια, μέσω των στατιστικών στοιχείων που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, προσδιορίστηκε ο λόγος συχνότητας κάθε Θ.Ε.Π. και διαμορφώθηκε ο χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής με βάση τη μέθοδο Λόγου Συχνότητας. Έπειτα από τη ζωνοποίηση του χάρτη σε πέντε (5) κλάσεις (πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια, υψηλή και πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα) και το διαχωρισμό των δύο κλάσεων χαμηλότερης επιδεκτικότητας, επιλέχθηκαν οι 146 θέσεις ευστάθειας (ισάριθμες με τις 146 καταγεγραμμένες κατολισθήσεις), μέσω εργαλείου του ArcGIS. Έτσι, διαμορφώθηκαν το

αρχείο εκπαίδευσης 204 θέσεων (102 θέσεις αστοχίας και 102 θέσεις ευστάθειας) και το αρχείο ελέγχου 88 θέσεων (44 θέσεις αστοχίας και 44 θέσεις ευστάθειας).

## 5.6 Εκτίμηση της πολυσυγγραμμικότητας και αξιολόγηση των μεταβλητών ως προς την προγνωστική τους ικανότητα – Εφαρμογή

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση πολυσυγγραμμικότητας για την εκτίμηση ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών. Στον παρακάτω Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πολυσυγγραμμικότητας, μέσω του υπολογισμού των δεικτών VIF και TOL.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα ανάλυσης πολυσυγγραμμικότητας

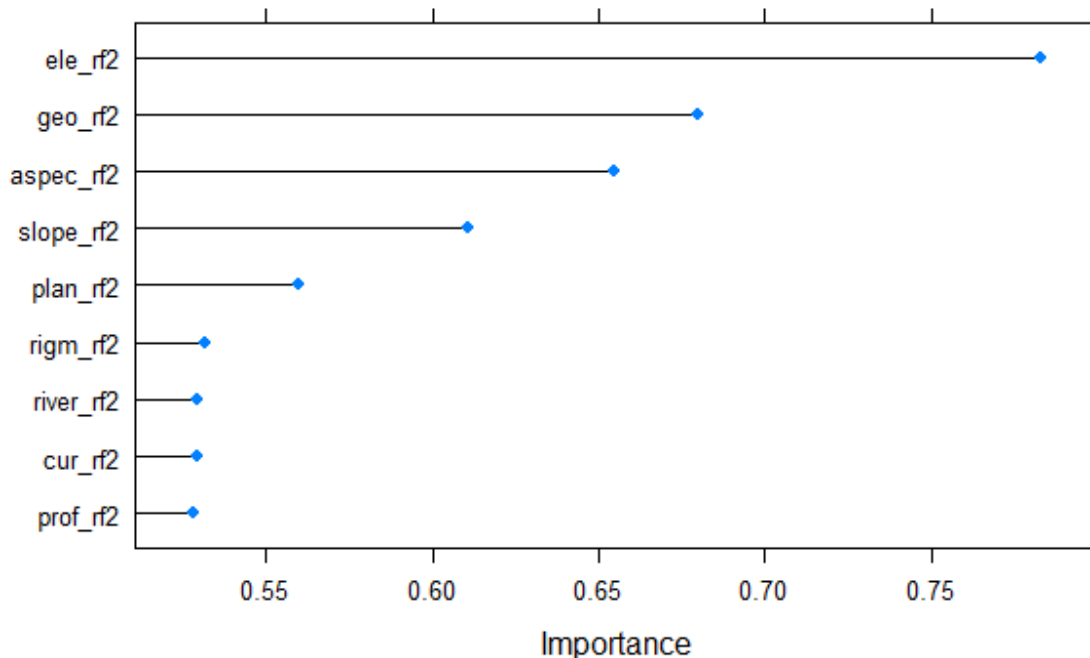
Μεταβλητές	Συντελεστής διόγκωσης (VIF)	Συντελεστής ανεκτικότητας (TOL)
Διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων	1.061544	0.9420242
Καμπυλότητα	1.350866	0.7402660
Υψόμετρο	1.182896	0.8453828
Γεωλογικές ενότητες	1.351022	0.7401804
Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων	1.293009	0.7733899
Καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων	1.303152	0.7673700
Απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία	1.164250	0.8589217
Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο	1.069088	0.9353764
Μορφολογικές κλίσεις	1.270072	0.7873568

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι όλες οι μεταβλητές ικανοποιούν τη συνθήκη της μη-πολυσυγγραμμικότητας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι τιμές του VIF είναι μικρότερες από τη θεωρητική τιμή πολυσυγγραμμικότητας που ισούται με 2 και,

αντίστοιχα, οι τιμές του TOL είναι μεγαλύτερες από τη θεωρητική τιμή που ισούται με 0.1, υποδηλώνοντας ότι υπάρχει αδύνατη συσχέτιση.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της προγνωστικής ικανότητας των μεταβλητών με τη βοήθεια του αλγορίθμου LVQ, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 39, όπου:

ele_rf2	υψόμετρο
geo_rf2	γεωλογικές ενότητες
aspec_rf2	διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων
slope_rf2	μορφολογικές κλίσεις
plan_rf2	καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων
rigm_rf2	απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία
river_rf2	απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο
cur_rf2	καμπυλότητα
prof_rf2	καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση μορφολογικών κλίσεων

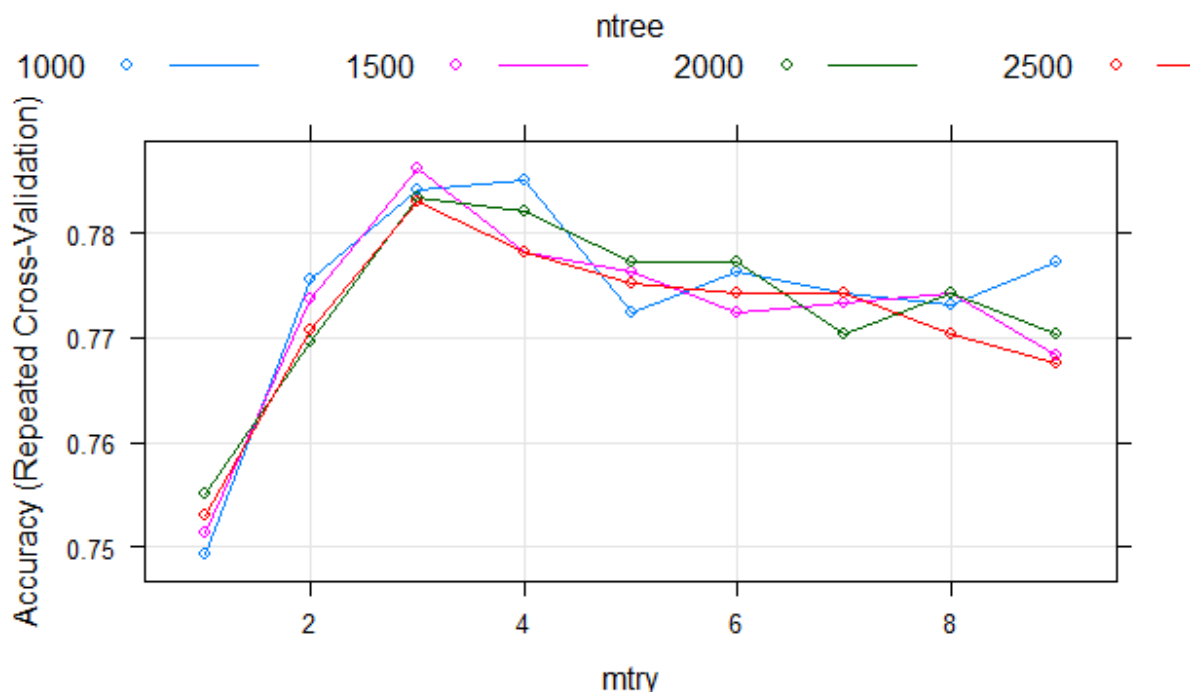


Σχήμα 39: Αποτελέσματα εκτίμησης της προγνωστικής ικανότητας των μεταβλητών μέσω του αλγορίθμου LVQ

Διαπιστώνεται ότι, όσον αφορά την προγνωστική ικανότητα, η μεταβλητή που αφορά το υψόμετρο είναι η πιο σημαντική. Ακολουθούν με σειρά οι μεταβλητές που αφορούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς, τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, τη μορφολογική κλίση, την καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, την απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, την απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, τη γενική καμπυλότητα και, τέλος, την καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, που είναι και η λιγότερο σημαντική.

### 5.7 Εκπαίδευση Μοντέλου – Εφαρμογή

Στη συνέχεια, και αφού διαμορφώθηκαν τα δυο υποσύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου, εφαρμόστηκε σχετικός αλγόριθμος για τον υπολογισμό των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το μοντέλο σε κάθε επίπεδο και του αριθμού των δένδρων που θα παραχθούν. Στο Σχήμα 40 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας, όπου διαπιστώνεται ότι η υψηλότερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών 3 μεταβλητών και παραγωγή 1500 δένδρων, όπου ntree είναι ο αριθμός των δέντρων που χρησιμοποιεί το μοντέλο και mtry είναι ο αριθμός των παραμέτρων που ελέγχονται.



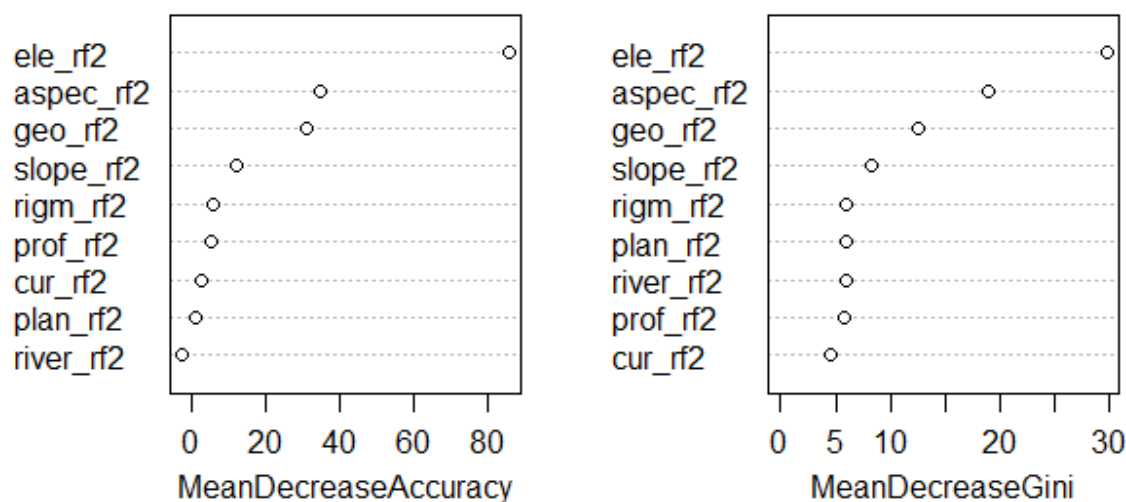
Σχήμα 40: Αποτελέσματα υπολογισμού των παραμέτρων ntree και mtry

## 5.8 Πρόγνωση – Εφαρμογή

Στο συγκεκριμένο βήμα, τα Θ.Ε.Π. μετατράπηκαν, μέσω του ArcGIS, σε μορφή ASCII, συνοδευόμενα με στοιχεία που αφορούν τον αριθμό των στηλών και γραμμών του διανυσματικού αρχείου, τις συντεταγμένες που προσδιορίζουν τη χωρική διασπορά του, το μέγεθος του φατνίου (cell size) και την τιμή που αντιστοιχεί σε φατνία χωρίς περιεχόμενο. Στη συνέχεια εκτελέστηκε σχετική ρουτίνα από το λογισμικό R Studio και για την εισαγωγή των δεδομένων εφαρμόστηκε εκ νέου το μοντέλο που διαμορφώθηκε κατά τη φάση της εκπαίδευσης για την εκτίμηση του βαθμού επιδεκτικότητας κάθε φατνίου.

## 5.9 Εκτίμηση της Σπουδαιότητας των Μεταβλητών – Εφαρμογή

Πριν τη φάση της πρόγνωσης, πραγματοποιείται εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών μέσω του υπολογισμού των δεικτών Mean Decrease Accuracy και Mean Decrease Gini. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 41.



Σχήμα 41: Ταξινόμηση μεταβλητών ως προς τη σπουδαιότητά τους σύμφωνα με τους δείκτες Mean Decrease Accuracy και Mean Decrease Gini

Παρατηρείται ότι για το μοντέλο Random Forest η παράμετρος με τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα είναι το υψόμετρο. Αυτό αιτιολογείται από τη διαφορά στην ανθρώπινη παρέμβαση που παρουσιάζουν οι κλάσεις του υψομέτρου, καθώς οι περισσότεροι οικισμοί, τεχνικά έργα και το μεγαλύτερο τμήμα του οδικού δικτύου αναπτύσσεται στα χαμηλά και μέτρια υψόμετρα. Έναν ακόμα βασικό λόγο της υψηλής σπουδαιότητας της παραμέτρου αυτής αποτελεί η μεγάλη δυσκολία προσβασιμότητας που χαρακτηρίζει τα μεγαλύτερα

υψόμετρα, κάτι που μειώνει την κατανομή των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων στις κλάσεις υψηλού υψομέτρου. Αυτή η διαφοροποίηση στην καταγραφή των κατολισθητικών φαινομένων μπορεί ενδεχομένως να αλλοιώσει το αποτέλεσμα του μοντέλου και παλαιότερες μελέτες στην περιοχή έρευνας (Χρυσάφη 2020, Φιλιππίδης 2015, Κιτσάκη – Μπαρμπαγιάννη 2014) την τοποθετούν χαμηλότερα σε σπουδαιότητα.

Δεύτερη σε σειρά σπουδαιότητας είναι η παράμετρος της διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων, και βασική αιτία για αυτό αποτελούν οι διαφορές μεταξύ των κλιματικών συνθηκών της περιοχής. Τα πρηνή με Βόρειες και Ανατολικές διευθύνσεις χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές υγρασίας και ύψους βροχής, παράγοντες τεράστιας σημασίας στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.

Αμέσως επόμενη παράμετρος σε σπουδαιότητα είναι οι γεωλογικές ενότητες της περιοχής. Οι διαφορές των μηχανικών χαρακτηριστικών των διάφορων σχηματισμών στην περιοχή έρευνας, καθώς και τα διαφορετικά επίπεδα αποσάθρωσής τους, επηρεάζουν σημαντικά την ευστάθεια των πρηνών στα οποία εμφανίζονται.

Η μορφολογική κλίση αποτελεί την τέταρτη πιο σημαντική παράμετρο σύμφωνα με το μοντέλο πρόγνωσης, κάτι που αιτιολογείται από τον κρίσιμο ρόλο που παίζει η κλίση στην ευστάθεια των πρηνών, σε συνδυασμό πάντα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που τα συνθέτουν.

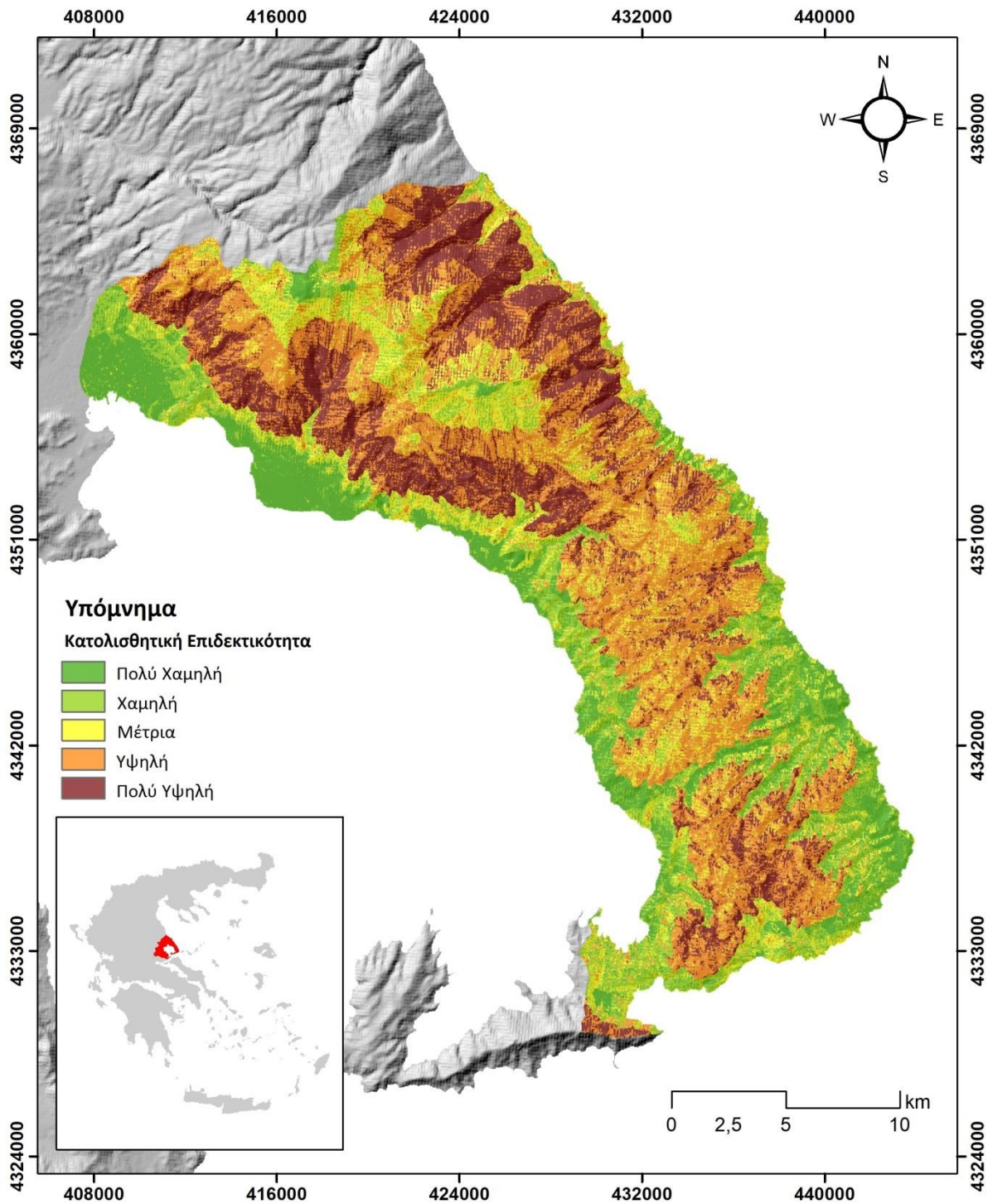
Σύμφωνα με το Σχήμα 41, οι αποστάσεις από τα τεκτονικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από μικρή σπουδαιότητα. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην πραγματοποιηθείσα αποτύπωση των ρηγμάτων κατά την ψηφιοποίηση του γεωλογικού χάρτη, η οποία υπολείπεται ακρίβειας, καθώς δεν έγινε διαχωρισμός μεταξύ ενεργών και ανενεργών ρηγμάτων. Από την άλλη, η σπουδαιότητα της παραμέτρου ενδεχομένως υποτιμάται, καθώς τα ρήγματα πολλές φορές αποτελούν παράγοντες διαμόρφωσης των μορφολογικών κλίσεων και, με αυτόν τον τρόπο, επηρεάζουν έμμεσα το μοντέλο.

Πολύ μικρή σπουδαιότητα έχουν οι παράμετροι της καμπυλότητας κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων και της καμπυλότητας. Βασικές αιτίες αποτελούν οι ισομερείς κατανομές των εκτάσεων αυτών των κλάσεων και των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων σε κάθε κλάση. Το ίδιο ισχύει και για την παράμετρο της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο, της οποίας η κατανομή των κατολισθήσεων στις διάφορες κλάσεις ακολουθεί την κατανομή των εκτάσεών τους.



### 5.10 Δημιουργία Χάρτη Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας – Εφαρμογή

Το αρχείο που δημιουργήθηκε μεταφέρεται στο ArcMap και, μέσω εργαλείου του λογισμικού, μετατράπηκε στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Χάρτης 14). Ο χάρτης αυτός κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε (5) κλάσεις μέσω της μεθόδου ταξινόμησης των φυσικών διαστημάτων – ορίων (natural breaks), έτσι ώστε να είναι διακριτή η διαβάθμιση της περιοχής ως προς τον δείκτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια, υψηλή και πολύ υψηλή επιδεκτικότητα.



Χάρτης 14: Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας

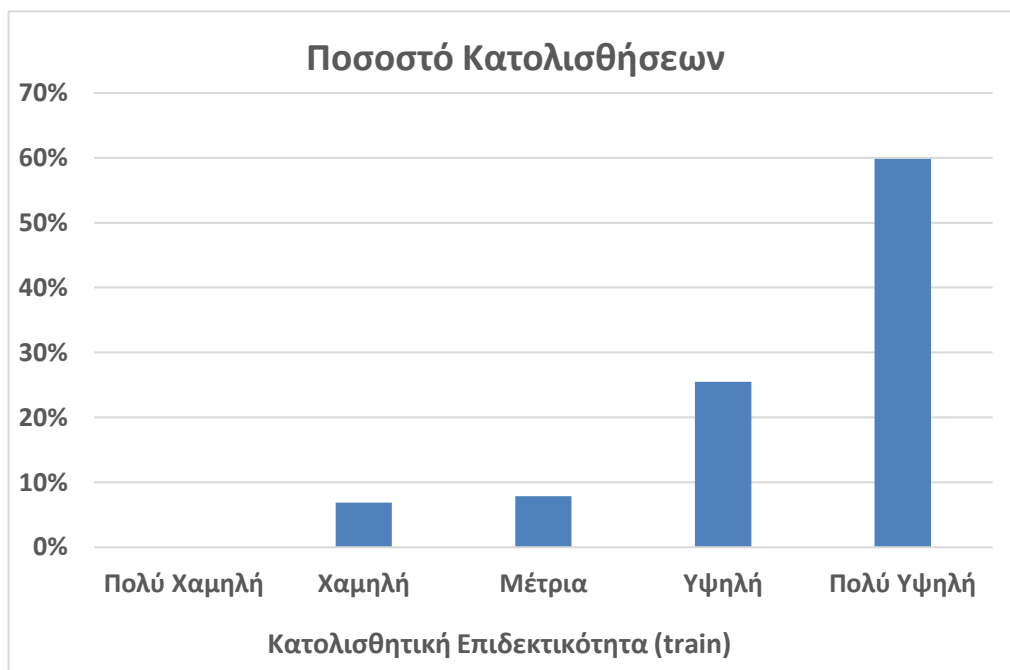
Η στατιστική κατανομή των ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 42.



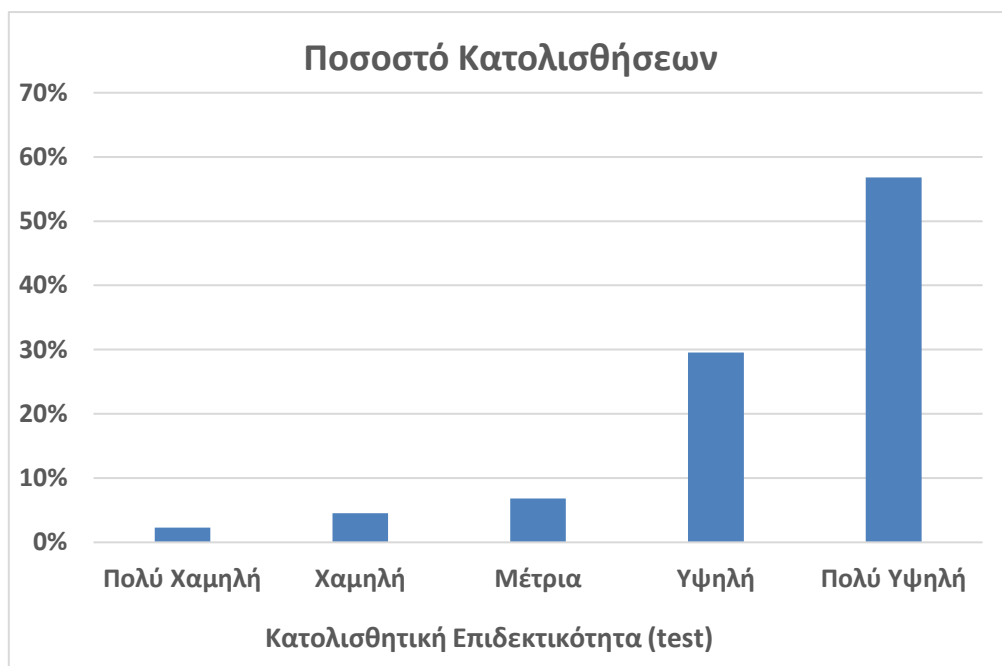
Σχήμα 42: Κατανομή έκτασης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Παρατηρείται ότι η ζώνη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με τη μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή έρευνας είναι η ζώνη υψηλής επιδεκτικότητας (32.28%). Ακολουθούν οι ζώνες πολύ υψηλής (20.65%), μέτριας (17.40%) και χαμηλής επιδεκτικότητας. Το μικρότερο ποσοστό έκτασης ανήκει στη ζώνη πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας (13.46%).

Η στατιστική κατανομή των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων παρουσιάζεται στα Σχήματα 43 (αρχείο εκπαίδευσης, train) και 44 (αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης, test).



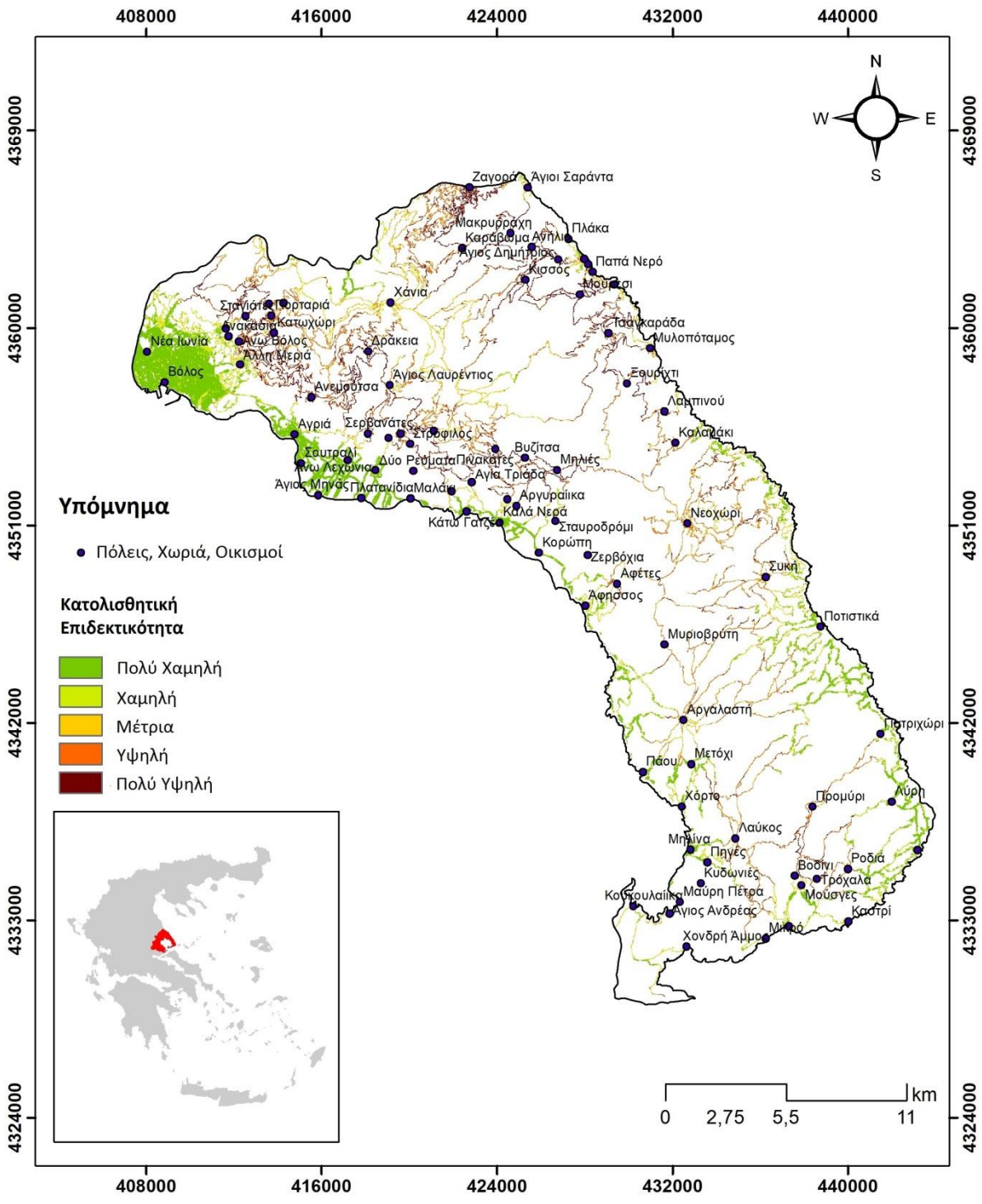
Σχήμα 43: Κατανομή κατολισθήσεων του αρχείου εκπαίδευσης στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας



Σχήμα 44: Κατανομή κατολισθήσεων του αρχείου ελέγχου – επαλήθευσης στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Παρατηρείται ότι και οι δύο κατανομές των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων ακολουθούν τη ζωνοποιημένη κατολισθητική επιδεκτικότητα της περιοχής σύμφωνα με το προγνωστικό μοντέλο, κάτι που υποδηλώνει την υψηλή απόδοση της προγνωστικής του ικανότητας. Τα υψηλότερα ποσοστά των δύο αρχείων (59.80% στο train και 56.82% στο test) εμφανίζονται στη ζώνη πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Ακολουθούν το 25.49% του train και το 29.55% του test στη ζώνη υψηλής επιδεκτικότητας, το 7.84% του train και το 6.82% του test στη ζώνη μέτριας επιδεκτικότητας και το 6.86% του train και το 4.55% του test στη ζώνη χαμηλής επιδεκτικότητας. Τα μικρότερα ποσοστά (59.80% στο train και 56.82% στο test) εμφανίζονται στη ζώνη πολύ χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Στο Χάρτη 15 απεικονίζεται το οδικό δίκτυο της περιοχής έρευνας διαβαθμισμένο χρωματικά ανάλογα με τις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας στις οποίες ανήκει. Η στατιστική κατανομή του οδικού δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 45. Οι κατανομές αυτές προέκυψαν από τη διαμόρφωση ζωνών επιρροής 50m εκατέρωθεν του οδικού δικτύου.



Χάρτης 15: Χωρική κατανομή του οδικού δικτύου στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας



*Σχήμα 45: Στατιστική κατανομή του οδικού δικτύου στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας*

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του οδικού δικτύου ανήκει στη ζώνη πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας, αποτέλεσμα που μπορεί να χαρακτηριστεί παραπλανητικό λόγω της μεγάλης πυκνότητας του οδικού δικτύου στην πόλη του Βόλου, η οποία αποτελεί περιοχή χαμηλού κινδύνου. Ακολουθούν τα τμήματα του οδικού δικτύου που ανήκουν στις ζώνες υψηλής και πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας, με σημαντικά ποσοστά (21.54% και 15.11% αντίστοιχα), τα οποία αιτιολογούν τη συχνότητα των προβλημάτων που προκαλούν τα κατολισθητικά φαινόμενα στους οδικούς άξονες της περιοχής. Τα μικρότερα ποσοστά ανήκουν στις ζώνες χαμηλής και μέτριας κατολισθητικής επιδεκτικότητας (12.02% και 10.95% αντίστοιχα).

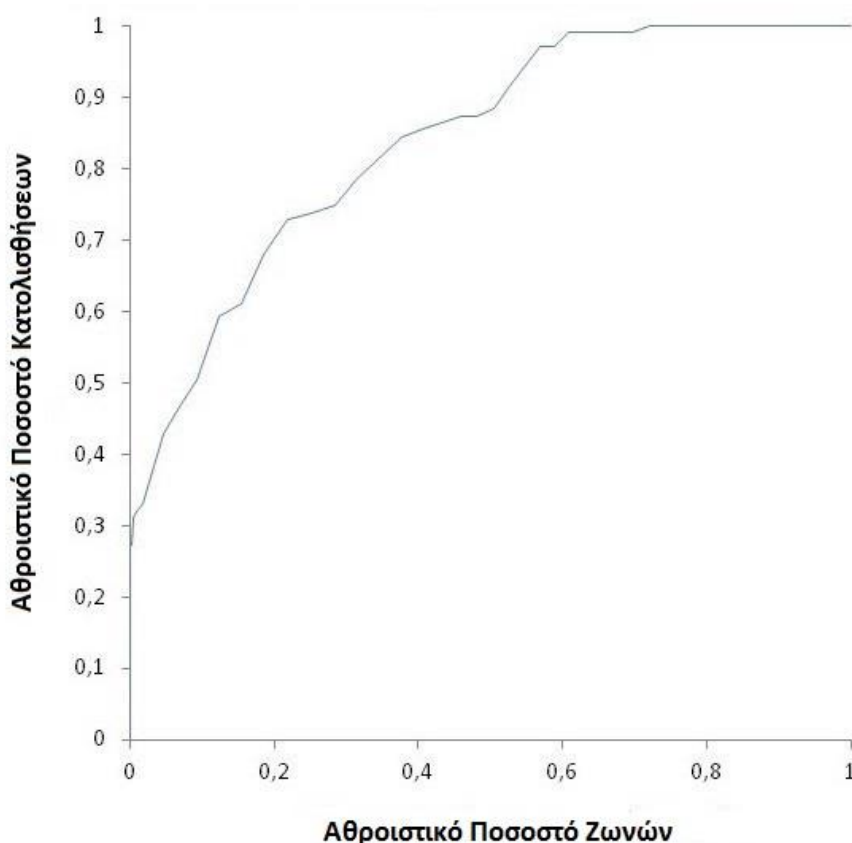
Η εν λόγω κατανομή αποτελεί μια εν δυνάμει σοβαρή απειλή για την τουριστική δραστηριότητα στην περιοχή, η οποία αντιπροσωπεύει βασικό μερίδιο της οικονομίας της. Για την προστασία των οδικών αξόνων από τα κατολισθητικά φαινόμενα και τη διαφύλαξη απρόσκοπτων συγκοινωνιών, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός και η εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης των κατολισθήσεων. Ορισμένα από αυτά τα μέτρα είναι η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης, φραχτών παγίδευσης και σκέπαστρων κατά μήκος του οδικού δικτύου. Παράλληλα, προτείνεται η κατασκευή έργων αποστράγγισης στα υπερκείμενα των οδικών αξόνων πρανή, η διαμόρφωσή τους σε αναβαθμούς και η χρήση τσιμεντενέσεων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα πιο απότομα και βραχώδη πρανή.

### 5.11 Επαλήθευση της Προγνωστικής Απόδοσης - Εφαρμογή

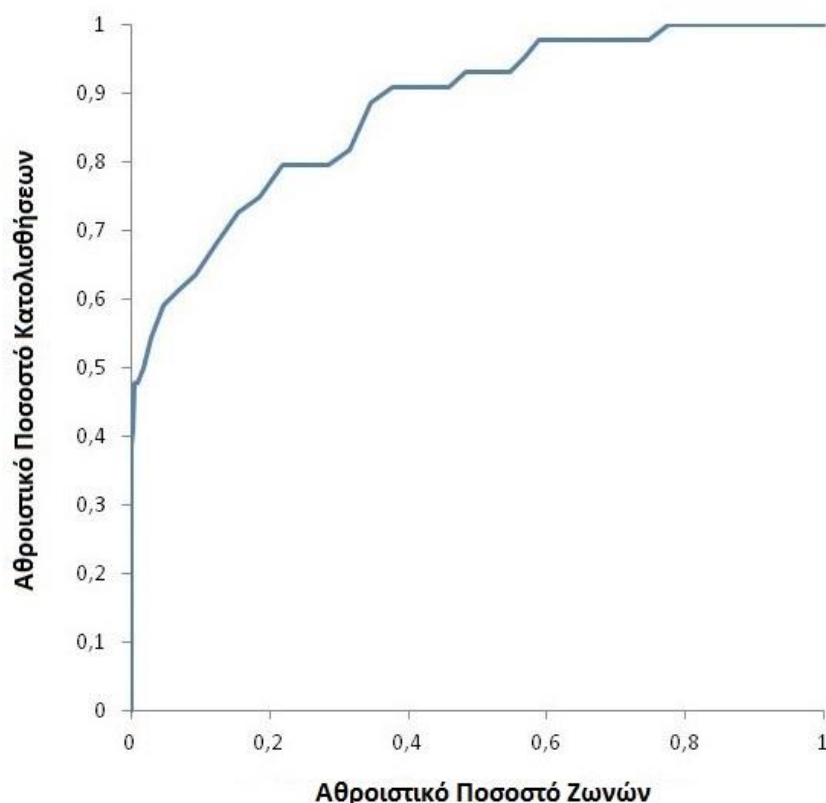
Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η επαλήθευση της χωρικής προγνωστικής απόδοσης του μοντέλου, υπολογίζοντας τον δείκτη Accuracy με βάση τον διαμορφωμένο Πίνακα Σύγκυσης και χρησιμοποιώντας τις Καμπύλες Λειτουργικού Χαρακτηριστικού Δείκτη (Receiver Operating Characteristic, ROC).

Αρχικά, για τον υπολογισμό του δείκτη Accuracy του αρχείου εκπαίδευσης, εφαρμόζεται η εξίσωση (2) για  $TP = 98$ ,  $TN = 97$ ,  $FP = 4$  και  $FN = 5$  με αποτέλεσμα  $Accuracy (train) = 0.9559$ . Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του δείκτη Accuracy του αρχείου ελέγχου – επαλήθευσης, η εξίσωση (2) για  $TP = 39$ ,  $TN = 35$ ,  $FP = 5$  και  $FN = 8$  παράγει αποτέλεσμα  $Accuracy (test) = 0.8506$ .

Τα αποτελέσματα των Καμπύλων ROC για τα αρχεία εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 46 και 47.



Σχήμα 46: Καμπύλη ROC του αρχείου εκπαίδευσης



Σχήμα 47: Καμπύλη ROC του αρχείου ελέγχου – επαλήθευσης

Για το αρχείο εκπαίδευσης, η τιμή AUC ισούται με 0.8763 ενώ για το αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης η τιμή AUC ισούται με 0.8361.

Από τις τιμές των δεικτών Accuracy και AUC προκύπτει ότι το μοντέλο χαρακτηρίζεται από υψηλή χωρική προγνωστική απόδοση, τόσο ως προς το αρχείο εκπαίδευσης, όσο και ως προς το αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές του δείκτη Accuracy είναι υψηλότερες των αντίστοιχων τιμών AUC, καθώς οι δεύτερες βασίζονται και σε δεδομένα της χωρικής κατανομής της πρόγνωσης του μοντέλου.

Πίνακας 6: Σύγκριση απόδοσης μοντέλων

	Παρόν μοντέλο	Χρυσάφη (2020)	Φιλιππίδης (2015)	Κιτσάκη – Μπαρμπαγιάννη (2014)
AUC	0.8763 (train)	0.7181 (train)	0.782	0.88
	0.8361 (test)	0.7118 (test)		



Συγκρινόμενη με αποτελέσματα παλαιότερων μελετών στην περιοχή έρευνας (Πίνακας 6), η απόδοση του μοντέλου της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται υψηλότερη αυτής του μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης της Χρυσάφη (2020) και του μοντέλου Λόγου Συχνοτήτων του Φιλιππίδη (2015) και εφάμιλλη του μοντέλου Σταθμισμένου Γραμμικού Συνδυασμού των Κιτσάκη – Μπαρμπαγιάννη (2014).

## 6 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η κατολισθητική επιδεκτικότητα στην περιοχή του Νοτιοανατολικού Πηλίου με την εφαρμογή της μεθόδου Random Forest. Η περιοχή έρευνας υπάγεται διοικητικά στην Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Εκτείνεται εντός των ορίων των Καλλικρατικών Δήμων Βόλου, Ζαγοράς – Μουρεσίου και Νοτίου Πηλίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό έκτασης της περιοχής καλύπτεται από δάση (41.4%) και το δεύτερο μεγαλύτερο αποτελεί καλλιέργειες (34.1%). Το κλίμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, με θερμό και ξηρό καλοκαίρι. Όσον αφορά τη γεωτεκτονική, η περιοχή μελέτης ανήκει στην Πελαγονική ζώνη, με τους επικρατέστερους σχηματισμούς να είναι τα μεταμορφωμένα πετρώματα (κυρίως σχιστόλιθοι), τα μάρμαρα και οι αλλουβιακές αποθέσεις. Η περιοχή έρευνας στο σύνολό της βρίσκεται σε ζώνη υψηλής σεισμικής δράσης και εμφανίζεται έντονα τεκτονισμένη, με πλούσια νεοτεκτονική δράση. Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής είναι πυκνό και χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη πολυάριθμων ρεμάτων δενδριτικής μορφής που εκβάλλουν στο Αιγαίο πέλαγος και στον Παγασητικό κόλπο.

Με βάση τα αποτελέσματα που παρήγαγε η εφαρμογή της μεθόδου Random Forest στην υπό έρευνα περιοχή, διαπιστώνονται τα εξής:

Από την γεωμορφολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται κυρίως ως λοφώδες και πεδινό, με τα υψόμετρα 0 – 600m να καταλαμβάνουν το 77.95% της έκτασης. Όσον αφορά τις μορφολογικές κλίσεις, στην περιοχή μελέτης κυρίαρχες είναι οι μέτριες προς ήπιες κλίσεις ( $0^{\circ}$  –  $25^{\circ}$ ), οι οποίες χαρακτηρίζουν το 89.68% της έκτασης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων με 146 θέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων, την οποία παρείχε το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε εννέα (9) μεταβλητές που σχετίζονται με την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων: το υψόμετρο, οι μορφολογικές κλίσεις του εδάφους, η διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση των μορφολογικών κλίσεων, η καμπυλότητα, η γεωλογία, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, για τις οποίες διαμορφώθηκαν και αναλύθηκαν τα Θ.Ε.Π.

Αρχικά, εφαρμόστηκε η μέθοδος Λόγου Συχνοτήτων, κατά την οποία υπολογίστηκαν οι τιμές του λόγου συχνοτήτων ανά κλάση για κάθε παράμετρο και διαμορφώθηκε ο χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μεθόδου. Αφού ο εν λόγω χάρτης διακρίθηκε σε πέντε (5) ζώνες επιδεκτικότητας (από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή), διαχωρίστηκαν οι δύο ζώνες χαμηλότερης επιδεκτικότητας, από τις οποίες προέκυψαν οι 146 θέσεις ευστάθειας. Αυτές οι θέσεις, σε συνδυασμό με τις θέσεις αστοχίας, αποτέλεσαν τα αρχεία εκπαίδευσης και ελέγχου – επαλήθευσης για το μοντέλο Random Forest.

Στο επόμενο βήμα, μέσω του αρχείου εκπαίδευσης, υπολογίστηκαν ο βέλτιστος αριθμός δέντρων (1500) και ο βέλτιστος αριθμός των παραμέτρων σε κάθε σημείο ελέγχου (3) για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του μοντέλου, το οποίο στη συνέχεια εφαρμόστηκε στην περιοχή έρευνας, με δεδομένα εισόδου τα αρχεία των Θ.Ε.Π.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της σπουδαιότητας των μεταβλητών, σύμφωνα με την οποία σπουδαιότερη μεταβλητή είναι αυτή του υψομέτρου. Ακολουθούν με σειρά οι μεταβλητές της διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων, της γεωλογίας, των μορφολογικών κλίσεων, ενώ πολύ μικρή σπουδαιότητα έχουν οι παράμετροι της καμπυλότητας, και οι αποστάσεις από τα τεκτονικά στοιχεία και το υδρογραφικό δίκτυο.

Η υψηλή σπουδαιότητα της παραμέτρου του υψομέτρου οφείλεται κυρίως στην προσβασιμότητα που χαρακτηρίζει τα χαμηλότερα υψόμετρα, η οποία επηρεάζει τον αριθμό των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων, αλλά και στην εκτεταμένη ανθρώπινη παρέμβαση στα υψόμετρα αυτά. Αυτό επιφέρει ως ένα βαθμό αλλοίωση του αποτελέσματος, καθώς άλλες μελέτες στην περιοχή (Χρυσάφη, Φιλιππίδης, Κιτσάκη – Μπαρμπαγιάννη) την τοποθετούν χαμηλότερα σε σπουδαιότητα.

Η σπουδαιότητα της παραμέτρου της διεύθυνσης μορφολογικών κλίσεων οφείλεται στις διαφορές των κλιματικών συνθηκών στην περιοχή έρευνας. Οι βόρειες και ανατολικές περιοχές, στις οποίες επικρατούν κυρίως βόρειες, βορειοανατολικές και ανατολικές διευθύνσεις μορφολογικών κλίσεων λόγω της μορφολογίας του ορεινού όγκου του Πηλίου, χαρακτηρίζονται από υψηλότερους δείκτες υγρασίας και ύψους βροχής, παράγοντες μεγάλης σημασίας για την ευστάθεια των πρανών.

Η σπουδαιότητα της γεωλογίας στο προγνωστικό μοντέλο οφείλεται εν μέρει στην κατανομή των εκτάσεων στις κλάσεις (το 65.1% των κατολισθήσεων εμφανίζεται στους σχιστόλιθους οι οποίοι καταλαμβάνουν το 40.8% της συνολικής έκτασης), αλλά κυρίως στα χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Ο παχύς μανδύας αποσάθρωσης του σχιστόλιθου σε

συνδυασμό με την πλακώδη ανάπτυξή του και το έντονο μορφολογικό ανάγλυφο συμβάλλουν στην αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης κατολίσθησης.

Οι μορφολογικές κλίσεις των πρανών χαρακτηρίζονται από υψηλή σπουδαιότητα, καθώς αποτελούν κρίσιμο παράγοντα της σταθερότητάς τους σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών. Χαρακτηριστικό αποτέλεσμα αυτού είναι το υψηλό ποσοστό των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων σε περιοχές με κλίσεις  $36^{\circ}$ - $45^{\circ}$  (3.42%) σε σχέση με το πολύ μικρό ποσοστό έκτασής τους (1.03%). Γι αυτό το λόγο και άλλες έρευνες τοποθετούν την παράμετρο ψηλά στη σειρά σπουδαιότητας.

Στο επόμενο βήμα, διαμορφώθηκε ο τελικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας, με πηγή το αρχείο που δημιουργήθηκε από το μοντέλο πρόβλεψης. Ο χάρτης διακρίθηκε σε πέντε (5) ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας, με τη ζώνη υψηλής επιδεκτικότητας να καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής έρευνας (32.28%). Ακολουθούν οι ζώνες πολύ υψηλής (20.65%), μέτριας (17.40%) και χαμηλής επιδεκτικότητας. Το μικρότερο ποσοστό έκτασης ανήκει στη ζώνη πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας (13.46%).

Επιπλέον, δημιουργήθηκε αντιστοίχιση του οδικού δικτύου της περιοχής έρευνας στις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας, με το 36.65% του δικτύου να ανήκει στις ζώνες υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας. Ως αποτέλεσμα αυτής της αντιστοίχισης και του εντοπισμού των τμημάτων του οδικού δικτύου που ανήκουν στις ζώνες αυτές, καθίσταται πλέον ευκολότερη η πρόταση υλοποίησης συγκεκριμένων μέτρων αντιμετώπισης, όπως η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης, φραχτών παγίδευσης, σκέπαστρων κατά μήκος του οδικού δικτύου, έργων αποστράγγισης στα υπερκείμενα των οδικών αξόνων πρανή, η διαμόρφωσή τους σε αναβαθμούς και η χρήση τσιμεντενέσεων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα πιο απότομα και βραχώδη πρανή.

Τέλος, επαληθεύτηκε η προγνωστική απόδοση του μοντέλου μέσω του υπολογισμού του δείκτη Accuracy, με αποτελέσματα 0.9559 για το αρχείο εκπαίδευσης και 0.8506 για το αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης, και μέσω των καμπύλων ROC, με αποτελέσματα 0.8736 για το αρχείο εκπαίδευσης και 0.8361 για το αρχείο ελέγχου – επαλήθευσης. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την υψηλή απόδοση του μοντέλου συγκριτικά με μοντέλα παλαιότερων μελετών στην περιοχή έρευνας.

Μία αδυναμία της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκύπτει από τη διαμόρφωση των κλάσεων των Θ.Ε.Π. των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι κλάσεις διακρίθηκαν με βάση δεδομένα παλαιότερων μελετών και εργασιών με θέμα τη διερεύνηση της

κατολισθητικής επιδεκτικότητας και ήταν στη διακριτική ευχέρεια του ερευνητή. Η ανάπτυξη του μοντέλου με αυτόν τον τρόπο και όχι με τη χρήση στατιστικών μεθόδων κατανομής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διακριτικής ικανότητας του μοντέλου.

Μία ακόμα αδυναμία πηγάζει από τις παραμέτρους της γεωλογίας και της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία και, πιο συγκεκριμένα, τη μειωμένη ακρίβεια αποτύπωσής τους. Η ψηφιοποίηση των γεωλογικών ενοτήτων και το παραγόμενο Θ.Ε.Π. προέκυψαν από φύλλα του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:50000. Η αποτύπωση σε τέτοια κλίμακα υπολείπεται ακρίβειας σε σχέση με μια έρευνα πεδίου και την ακριβή καταγραφή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής, ειδικά στις θέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων. Παράλληλα, κατά την ψηφιοποίηση των τεκτονικών στοιχείων, τα ρήγματα δεν διακρίθηκαν σε ενεργά και ανενεργά, κάτι που ενδεχομένως μείωσε τη βαρύτητα της παραμέτρου και τη διακριτική ικανότητα του μοντέλου.

Όσον αφορά τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα, υπάρχει η δυνατότητα ένταξης επιπλέον παραμέτρων στο προγνωστικό μοντέλο, όπως ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index) και οι χρήσεις γης, για τον εμπλουτισμό των δεδομένων εισόδου. Επιπλέον, είναι δυνατή η εκτέλεση έρευνας πεδίου στις θέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους. Τέλος, η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων για την καταλληλότερη διαμόρφωση των κλάσεων των παραμέτρων ενδεχομένως θα βελτίωνε την προγνωστική απόδοση του μοντέλου.

Η εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής αποτελεί πρώτο και βασικό βήμα στην αντιμετώπιση του κινδύνου των κατολισθητικών φαινομένων και στη διαχείριση των επιπτώσεών τους. Επομένως, ο χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι ένα εν δυνάμει κρίσιμο και αναγκαίο εργαλείο προς αξιοποίηση από τους αρμόδιους φορείς, τόσο για την καλύτερη αντιμετώπιση των υπάρχοντων προβλημάτων, όσο και για το βέλτιστο σχεδιασμό μελλοντικών αναπτυξιακών έργων.

## 7 Βιβλιογραφία

### Διεθνής Βιβλιογραφία

Bolstad, P. (2005). GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems, Eider Press, Third Edition, pp.620.

Brabb, E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. Proceedings 4th ISL, 307-324, Toronto.

Burrough, P. & McDonell, A.R., (1998). Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press.

Choi J., Oh H.J., Lee H.J., Lee C. & Lee S. (2012). Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology*, 124 (1):12-23.

Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*.

Djalante, R. (2012). Adaptive governance and resilience: the role of multi-stakeholder platforms in disaster risk reduction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2923–2942.

EM-DAT, (2016): The OFDA/CRED International Disaster Database. Université Catholique de Louvain. Brussels, Belgium. Retrieved from: <http://www.cred.be/emdat>.

Erskine, C. F. (1973). Landslides in the Vicinity of the Fort Randall Reservoir, South Dakota.

Ewers C., Dematheis, F., Singamaneni, H., Nandanwar, N., Fruth, A., Diehl, I., ... Wieler, L. (2014). Correlation between the genomic o454-nlpD region polymorphisms, virulence gene equipment and phylogenetic group of extraintestinal *Escherichia coli* (ExPEC) enables pathotyping irrespective of host, disease and source of isolation. *Gut Pathogens*, 6, 37. Retrieved from: <http://www.gutpathogens.com/content/6/1/37>.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. & Savage, W.Z. (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology* 102, 85-98.

- Guzzetti, F., Carrarra, A., Cardinali, M., & Reichenbach P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multiscale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181–216.
- Kuhn S., Egert, B., Neumann, S., & Steinbeck, C. (2008). Building blocks for automated elucidation of metabolites: Machine learning methods for NMR prediction. *BMC Bioinformatics*, 9, 400, doi: 10.1186/1471-2105-9-400.
- Ladas I., Fountoylis I., Mariolakos I., 2007. Using GIS & Multicriteria Decision analysis in landslide susceptibility mapping - a case study in Messinia prefecture area (SW Peloponnesus, Greece)
- Li, L., Lan, H., Guo, C., Zhang, Y., Li, Q. & Wu, Y. (2017). A Modified Frequency Ratio Method for Landslide Susceptibility Assessment. *Landslides* 14, 727-741.
- Marble D. F., Calkins H. W., Peuquet D. J. (1984). *Basic Readings in Geographic Information Systems*, Spad Systems Ltd.
- Popescu M. E. (2002). Landslide causal factors and landslide remedial options, Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Landslides, slope stability and safety of Infrastructures, Singapore, pp. 61-81
- Radbruch D. H. (1970). Map of relative amounts of landslides in California. US Geological Survey Open-File Report 70-1485, 36 p, map scale 1:500,000. US Geological Survey Open-File Report 85–585
- Rozos D., Bathrellos G.D., Skillodimou H.D. (2011). Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: A case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 63 (1):49-63. DOI: 10.1007/s12665-010-0687-z
- Sharpe C. (1938). Landslides and related phenomena: A study of mass-movements of soil and rock. *The Geographical Journal*, 92, 276.
- Skempton A.W. & Hutchinson, J.N. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. Proc., 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the Art Vol., , pp. 291-340.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. S. Paige (Ed.), *Geology to Engineering Practice*. New York: Geological Society of America.

United State Geological Survey (USGS), (2004). *Landslide Types and Processes*, Fact Sheet 2004-3072, Version 1.0, pp. 1-4

Varnes, D. (1958). *Landslide Types and Processes*. *Highway Research Board Special Report*, 29.

Varnes, D. (1978). Slope movements types and processes. *Landslides: Analysis and Control*. Washington, National Academy of Sciences.

Wei, C., Xiaoshen, X., Jiale, W., Biswajeet, P., Haoyuan, H., Dieu, T.B., Zhao, D. & Jianquan, M. (2017). A Comparative Study of Logistic Model Tree, Random Forest, and Classification and Regression Tree Models for Spatial Prediction of Landslide Susceptibility. *Catena* 151, 147-160.

van Westen, C.J. Introduction to landslides Part 4: Use of GIS for Landslide Mapping. University Notes, University of Twente, Faculty Geo-Information Science and Earth Observation, Twente, Netherlands.

van Westen, C.J., Castellanos, E. & Kuriakose, S.L. (2008). Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability Assessment: An Overview. *Engineering Geology* 102, 112-131.

WP/WLI. (1994). A Suggested Method for a Landslide Summary, *Bull. of the Int. Assos., Engineering Geology*.

Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T., 2011. A GIS- based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3):274-287, DOI: 10.1016/j.catena.2011.01.014

Zaruba, Q., & Mencl, V. (1969). *Landslides and their control*. Amsterdam, Elsevier.

Zaruba Q., & Mencl, V. (1976). *Engineering Geology*, Amsterdam, 504.



## Ελληνική Βιβλιογραφία

Αναπτυξιακή Εταιρεία Μαγνησίας (ANEM), (2012): Μελέτη Επισήμανσης Τοπικών Προϊόντων Ποιότητας, Φορέας ανάθεσης: Αναπτυξιακή Εταιρεία Πηλίου, Πρόγραμμα Leader+, Βόλος.

Βαβίζος, Γ., Ζαννάκη Κ., Ζαφειρόπουλος, Δ. (1996): Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη της Χερσονήσου της Μαγνησίας, Φορέας Ανάθεσης: Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Ανάδοχος: Γραφείο Μελετών Eco consultants, Αθήνα.

Βασιλειάδης, Ε.Α. (2010). Ζωνοποίηση της Επικινδυνότητας των Κατολισθητικών Φαινομένων στον Ελληνικό Χώρο. Δημιουργία και Εφαρμογή Μοντέλων με Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.

Βολιώτη, Κ.Γ. (2009). Ζωνοποίηση της Επικινδυνότητας λόγω Κατολισθήσεων στο Χώρο της Ηπειρωτικής Ελλάδας με Χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Απεικόνιση σε Χάρτη Μικρής Κλίμακας. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Βουμβουλάκης, Ε. (2010). Συμβολή μεθόδων μηχανικής μάθησης στην εκτίμηση και τον έλεγχο δυναμικής ασφάλειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα.

Γαλανάκης, Δ. (1997). Νεοτεκτονική δομή και στρωματογραφία των νεογενών-τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης Αλμυρού-Παγασητικού, Πηλίου, διαύλου Ωρέων-Τρικεριού και Μαλιακού. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας.

Γκαρέλη, Ι.Ο. (2018). Εκτίμηση της Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας και των Επιπτώσεων που έχουν τα Κατολισθητικά Φαινόμενα στη Λειτουργία του Οδικού Δικτύου στην Ορεινή Περιοχή του Δήμου Πατρέων. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Πάτρα.

Ε.Α.Γ.Μ.Ε., 2019. Τεχνικογεωλογική έρευνα οριοθέτησης πληγείσων περιοχών του Δήμου Ζαγοράς-Μουρεσίου από τις κατολισθήσεις του 2018.

Ηλία, Ι.Κ. (2013). Τεχνικογεωλογικά Χαρακτηριστικά των Μαργών στην Ευρεία Περιοχή Κύμης και η Επίδρασή τους στις Κατασκευές Τεχνικών Έργων - Προβλήματα και Αντιμετώπιση τους. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Κάβουρα, Α.Π. (2013). Κατολισθήσεις στο νομό Αχαΐας: Ανάπτυξη Μοντέλου Επικινδυνότητας. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, ΠΜΣ Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον, Πάτρα.

Κάβουρα, Α.Π. (2017). Ανάπτυξη Μοντέλου Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων σε Περιοχή της Δυτικής Ελλάδας. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.

Καρακουλάκης Σ., Παπαδόπουλος Ν., (2012). Το φαινόμενο της κατολίσθησης στον Ελληνικό χώρο. Διπλωματική Εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκη, Τμήμα Έργων Υποδομής, Θεσσαλονίκη.

Κατσαούνης, Χ. (2010). Προσδιορισμός της Κατολισθητικής Επικινδυνότητας για τον Νομό Χανίων με την Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά.

Κατσικάς Χ., (2012). Κατολίσθηση Μαλακάσας – Συμπεριφορά και θεώρηση των μέτρων αντιμετώπισης 15 χρόνια μετά την αστοχία. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Κιτσάκη, Μ., Μπαρμπαγιάννη, Δ. (2014). Ζωνοποίηση της Κατολισθητικής Επικινδυνότητας στο Όρος Πήλιο με τη Συμβολή Δεδομένων Συμβολομετρίας Μόνιμων Σκεδαστών, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Κολοκοτρώνης, Β. (2019). Διερεύνηση Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας και Επικινδυνότητας σε Περιοχές της Βορειοδυτικής Πελοποννήσου. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Κούκης, Γ., & Σαμπατακάκης, Ν. (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Κουμαντάκης, Ι. (1985). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας. Σημειώσεις για τους φοιτητές της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Κουτσόπουλος, Κ. (2002), Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου, Δίσιγμα.

Κουτσόπουλος, Κ. (2005). Ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση της ανάπτυξης. Η περίπτωση των Γ.Σ.Π. Περιβάλλον και Ανάπτυξη. Διαλεκτικές σχέσεις και διεπιστημονικές προσεγγίσεις. Αθήνα: Εναλλακτικές Εκδόσεις.

Κωτσιαντής, Σ., (2005). Ομάδες ταξινομητών για την αύξηση της ακρίβειας των μεθόδων μηχανικής μάθησης και εξόρυξης γνώσης. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα.

Λέκκας, Ε. (2000). Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές. Β' Έκδοση, Access Pre-Press, Αθήνα.

Λουπασάκης, Κ., (2015). Τεχνική Γεωλογία Ι. Διδακτικές σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Λυμπέρη, Σ. (2017). Κατασκευή Χάρτη Επικινδυνότητας για Κατολισθητικά Φαινόμενα στη Νήσο Λευκάδα. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Αθήνα.

Μουτσοκάπας, Π., Παπαθεοδώρου, Κ., Μάργαρης, Β.Ν., Κλήμης, Ν.Σ. (2010). Μέθοδοι προεκτίμησης κατολισθητικού κινδύνου μέσω Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών: αξιολόγηση και εφαρμογή στο Νομό Μαγνησίας. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.

Μπαλαμπάνης, Α., (2020). Μοντελοποίηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών χωρικής ανάλυσης. Η περίπτωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αράχθου. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Μαγνησίας (NAM) (2005). Στρατηγικό σχέδιο ανάπτυξης Μαγνησίας, Φορέας εκπόνησης: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Βόλος.

Παϊδούση, Ε. (2016). Δέντρα Αποφάσεων. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής. ΔΠΜΣ Μαθηματικά των Υπολογιστών και των Αποφάσεων, Πάτρα.

Πιτιλάκης, Δ., Ραπτάκης, Γ., Μάκρα, Α., Βελδεμίρη, Φ., Αναστασιάδης, Α., Χατζηνικολάου, Π. (2010). Γεωτεχνικός Χάρτης και Μικροζωνική Μελέτη Πολεοδομικού

Συγκροτήματος Βόλου-Ν.Ιωνίας, Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος.

Πολυκρέτης, Χ. (2013). Ανάπτυξη Μοντέλων Εκτίμησης της Επιδεκτικότητας για Εκδήλωση Κατολίσθησης με τη Χρήση μεθόδων Γεωπληροφορικής και Τεχνητής Νοημοσύνης. Διπλωματική Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, ΠΜΣ Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου, Αθήνα.

Ρίσβα Ι.Γ. (2012). Κατολισθητικές κινήσεις στην περιοχή Προυσού, Ευρυτανίας. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.

Τσαγγαράτος, Π.Π. (2012). Διερεύνηση της Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς των Γεωλογικών Σχηματισμών με τη Χρήση Πληροφοριακών Συστημάτων. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα.

Τσάγκας, Δ. (2011). Γεωμορφολογικές Παρατηρήσεις και Κινήσεις Βαρύτητας στη Βόρεια Πελοπόννησο: Περιοχή Ξυλόκαστρο - Διακοφτό. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα.

Τσαμπά, Α. (2018). Εφαρμογή Προγνωστικών Χωρικών Μοντέλων για την Εκτίμηση της Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας και η Χρήση τους ως Εργαλείου Διαχείρισης Κινδύνων. Η Περίπτωση της Λεκάνης Απορροής του Κρικελιώτη Ποταμού του Νομού Ευρυτανίας. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πάτρα.

Φιλιππίδης, Α. (2015). Εκτίμηση Κατολισθητικής Επικινδυνότητας στην Περιοχή του Πηλίου, Ν. Μαγνησίας. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΠΜΣ Γεωγραφία και Περιβάλλον, Αθήνα.

Χαλκιάς, Χ. (2011). Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.

Χατζηπέτρος Α., (2006). Γεωλογία της Ελλάδος.

## **Ιστοσελίδες Διαδικτύου**

<https://www.aljazeera.com>

<https://www.bbc.com>

<https://www.emdat.be/>

<https://www.esri.com/en-us/home>

<https://www.usgs.gov/>

<https://www.geofabrik.de/>