ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

« Εκτίμηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή του Ν. Ηρακλείου, Κρήτη, και χωροθέτηση ζωνών επιδεκτικότητας με την μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) »

ΑΔΑΜ ΣΟΦΙΑ 1114201600002
ΑΘΗΝΕΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ 1114201600003

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΝΟΜΙΚΟΥ
Αν. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Αθήνα

Μάιος, 2021

Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή του Ν. Ηρακλείου της νήσου Κρήτης μέσω γεωχωρικής ανάλυσης.

Το ενδιαφέρον για διερεύνηση πιθανών κατολισθητικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα έντονο, καθώς αυτός ο νομός γεωμορφολογικά συνίσταται από μέτριες έως υψηλές μορφολογικές κλίσεις και τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής δείχνουν να ευδοκιμούν κατολισθητικά φαινόμενα. Επίσης, είναι ο πιο πυκνοκατοικημένος νομός και η ασφαλή ανθρώπινη διαβίωση είναι πρωτίστως σημαντική, λαμβάνοντας προληπτικά μέτρα έγκαιρα για την αποφυγή υλικών ζημιών και ανθρώπινων απωλειών.

Αρχικά, συλλέχθηκαν δεδομένα κατολισθήσεων, που έχουν συμβεί στην περιοχή μελέτης, από αντίστοιχες γεωτεχνικές εκθέσεις με σκοπό να κατασκευαστεί μια γεωβάση με τα χωρικά και τα περιγραφικά στοιχεία των συγκεκριμένων κατολισθήσεων. Επίσης, στο στάδιο αυτό συγκεντρώθηκαν και τα απαραίτητα raster και vector δεδομένα για την γεωχωρική ανάλυση της περιοχής.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην Μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process – AHP), μια πολυκριτηριακή μέθοδος, με σκοπό την αναγνώριση των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε κατολισθητικά φαινόμενα σε περιβάλλον GIS. Σύμφωνα με αυτή την μεθοδολογία ορίστηκαν δέκα κρίσιμοι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων και στη συνέχεια ανάλογα με τον βαθμό επιρροής του κάθε παράγοντα στην περιοχή, κατασκευάζεται ο χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής μελέτης.

Κλείνοντας, ο τελικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την μελλοντική διερεύνηση τέτοιων φαινομένων και την προστασία της περιοχής. Επιπροσθέτως, η μέθοδος AHP χαρακτηρίζεται εύκολο εργαλείο, καθώς έχει την ευελιξία να παράγει ξανά τον τελικό χάρτη επιδεκτικότητας είτε αλλάζοντας έναν ή και περισσότερους παράγοντες, είτε αφαιρώντας κάποιον παράγοντα, είτε προσθέτοντας περισσότερους ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Λέξεις – κλειδιά: Ν. Ηρακλείου, AHP, GIS, πολυκριτηριακή ανάλυση, κατολισθήσεις, εκτίμηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Abstract

The purpose of this particular undergraduate thesis is the assessment of landslide risks in the Heraklion prefecture area of Crete island through geospatial analysis.

There's a particular interest for the investigation of possible landslide occurrences, as the geomorphology of the prefecture is defined by medium to very steep slopes and the technical-geological attributes of the area seem to favor the occurrence of landslides. Also, this specific prefecture is the most densely populated prefecture of the island , therefore it is essential that safe living conditions are assured by quickly taking measures to prevent the loss of human life and the structural damage of properties.

Firstly, historical data of landslide incidents within the study area were collected from related geotechnical reports for the development of a geodatabase which includes the spatial and descriptive information of the aforementioned landslides. Furthermore, in this stage of the process, the necessary raster and vector data for the geospatial analysis of the area were acquired.

The methodology that was used is based on the Analytical Hierarchy Process (AHP), which is a multi-criteria decision analysis method used for the identification of locations prone to landslide occurrences in a GIS environment. According to this methodology, ten (10) crucial factors causing landslides were defined, followed by the creation of a landslide risk assessment map of the study area, depending on the influence of each factor. Furthermore, AHP is a very handful and easy – to – use tool because the researcher is able to either remove, change the ranking of each factor, or add new factors, depending on the current conditions of the study area.

Keywords: Heraklion prefecture, AHP, GIS, multi-criteria decision analysis, landslides, risk assessment.

Ευχαριστίες

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μας εργασίας κα. Παρασκευή Νομικού, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια στον τομέα Γεωγραφίας & Κλιματολογίας του τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την στήριξή της και την βοήθειά της κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστούμε πολύ τον Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου κ. Παύλο Κρασάκη για την καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθειά του στην χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και σε όλα τα στάδια εξέλιξης της εργασίας, καθώς και την σημαντική συνεισφορά του ως προς την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Ευχαριστούμε τον κ. Νικολάου Νικόλαο Γεωλόγο και Διευθυντή του τομέα Γενικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, καθώς και την κα. Εξηνταρίδη Ανδριανή Γεωλόγο του ίδιου τομέα της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε) για την συγκέντρωση του βιβλιογραφικού υλικού και της βάσης δεδομένων των θέσεων των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων του Ν. Ηρακλείου.

Τέλος, ευχαριστούμε τις οικογένειές μας για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε όλους τους τομείς της ζωής μας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **1**

ABSTRACT **2**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ **3**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **5**

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ **7**

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ **9**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ **11**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{Ο} - ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ **13**

1.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ 13
1.2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ 14
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ 17
1.4 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ 20
1.4.1 Τις ερπυστικές κατολισθήσεις. *20*
1.4.2 Ταχείες κατολισθήσεις *21*
1.5 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ 24
1.6 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ .. 25
1.6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν μια κατολίσθηση *28*
1.6.2 Κατασκευή χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας *30*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο} - ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (Γ.Σ.Π.) **33**

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 33
2.2 ΕΙΔΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 36
2.3 ΕΙΔΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ 37
2.3.1 Διανυσματικό Μοντέλο (Vector) *37*
2.3.2 Εικονοκυτταρικό ή Ψηφιδωτο Μοντέλο (Raster) *38*
2.4 ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο} – Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ **40**

3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 40
3.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 43
3.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ 46
3.3.1 Η Ενότητα Κρήτης – Μάνης *47*
3.3.2 Η Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών *48*
3.3.3 Η Ενότητα Γαβρόβου – Τρίπολης *48*
3.3.4 Το κάλυμμα Πίνδου – Εθιάς *49*
3.3.5 Το τεκτονικό Mélange και τα ανώτερα καλύμματα *49*
3.3.6 Οι Νεογενείς σχηματισμοί *50*

3.3.7 Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί *51*
3.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ 52
3.5 ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ 58
3.6 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 61
3.7 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ 64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο} – ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 69

4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 69
4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 72
4.2.1 Επίπεδο Μορφολογικών κλίσεων (Slope) *72*
4.2.2 Επίπεδο Προσανατολισμού των πρανών (Aspect) *75*
4.2.3 Επίπεδο Μορφολογικής καμπυλότητας (Curvature) *78*
4.2.4 Επίπεδο ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών *81*
4.2.5 Επίπεδο απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο *84*
4.2.6 Επίπεδο χωρικής παρεμβολής βροχομετρικών δεδομένων *86*
4.2.7 Επίπεδο Χρήσεων Γης *90*
4.2.8 Επίπεδο απόστασης από το οδικό δίκτυο *93*
4.2.9 Επίπεδο απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία *95*
4.2.10 Επίπεδο πάχους του εδαφικού καλύμματος *98*
4.3 ΧΑΡΤΗΣ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ 102
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ (AHP) ΣΤΟΝ Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ 104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{Ο} – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 107

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ AHP ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ 108
5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 109
5.2.1 Αξιολόγηση των ζωνών υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας *109*
5.2.2 Αξιολόγηση ζωνών μέτριας επιδεκτικότητας *112*
5.2.3 Αξιολόγηση ζωνών χαμηλής και πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας *112*
5.2.4 Αξιολόγηση επιτυχίας του μοντέλου κατολισθητικής επιδεκτικότητας του Ν. Ηρακλείου *113*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^{Ο} – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 114

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 114
6.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ 115

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ 117

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Γεωγραφική απεικόνιση της κατανομής των φυσικών καταστροφών παγκοσμίως από τα δεδομένα του EM – DAT για το 2019 (https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf **)**.....14
Εικόνα 2: Διάγραμμα με τον συνολικό αριθμό πληττόμενων ανθρώπων (μπλε), των θανάτων (κόκκινο) και το ετήσιο οικονομικό αντίκτυπο, λόγω κατολισθήσεων παγκοσμίως στο χρονικό διάστημα 1940 – 2007 (EM – DAT, 2009)......16
Εικόνα 3: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Zaruba & Mencl (1976) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).....18
Εικόνα 4: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)**.**.....19
Εικόνα 5: Ταχείες κατολισθήσεις (Σταυροπούλου, 2009).....22
Εικόνα 6: Χαρακτηριστικές ενδείξεις ερπυστικών κινήσεων (Σταυροπούλου, 2009).....23
Εικόνα 7: Ανατροπή βράχων (Σταυροπούλου, 2009).....23
Εικόνα 8: Πλευρικές εξαπλώσεις (Σταυροπούλου, 2009).....23
Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση των κύριων χαρακτηριστικών ενός κατολισθητικού φαινομένου (Χλούπης, 2020).....25
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της φαινόμενης γωνίας τριβής φα , όπου H: η υψομετρική διαφορά από την μετακινούμενη μάζα, L: η απόσταση μετακίνησης και οι θέσεις 1 και 2: η αρχική και τελική θέση αντίστοιχα (Wang, et al., 2014).....27
Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής από αναλύσεις κατολισθητικού κινδύνου στο περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) (Fall, et al., 2006).....31
Εικόνα 12: Στοιχεία αξιολόγησης κινδύνου (Πηγή: https://www.humanrisks.com/blog/2019/11/14/what-to-include-in-a-risk-assessment)..32
Εικόνα 13: Τεχνικές συλλογής γεωγραφικών δεδομένων (Κάβουρας, 2015).....34
Εικόνα 14: Τα στάδια συλλογής γεωγραφικών δεδομένων (Κάβουρας, 2015).....35
Εικόνα 15: Συστατικά στοιχεία ενός ΣΓΠ (Κάβουρας, 2015)......36
Εικόνα 16: Απεικόνιση της νήσου Κρήτης και μικρότερων νησιών (Γάβδος, Χρυσή και Δία) με μορφή δορυφορικής εικόνας (Raster) από τους δορυφόρους Copernicus Sentinel 1.
(https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/Crete_Greece?fbclid=IwAR2_raKsxVSDkabeB7S5sbNju9xFtG48CsQReIr0QNFif6H2dBtvEFqOLFY **)**.....38
Εικόνα 17: Η θέση της Κρήτης στην Ελλάδα.....41
Εικόνα 18: Ο Νομός Ηρακλείου και οι δήμοι που τον απαρτίζουν.....42
Εικόνα 19: Γεωμορφολογικός χάρτης του Νομού Ηρακλείου.....45
Εικόνα 20: Απεικόνιση γεωλογικού χάρτη που δείχνει τις εμφανίσεις των γεωτεκτονικών ενοτήτων που δομούν το νησί της Κρήτης. (Papanikolaou & Vassilakis, 2010).....47
Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση της τεκτονικής τοποθέτησης των γεωτεκτονικών ενοτήτων που δομούν το νησί της Κρήτης. (Ροδιτάκη, 2011).....51
Εικόνα 22: Γεωτεκτονικός χάρτης του Ν. Ηρακλείου (προβολικό σύστημα: EGSA '87)......52
Εικόνα 23: Ρήγματα διεύθυνσης Α - Δ, Ν. Ηρακλείου. (Kokinou, et al., 2008).....54
Εικόνα 24: Ρήγματα διεύθυνσης Β – Ν, Ν. Ηρακλείου. (Kokinou, et al., 2008).....56

Εικόνα 25: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ - ΝΑ και ΝΔ - ΒΑ, Ν. Ηρακλείου. (Kokinou, et al., 2008) 57
Εικόνα 26: Χάρτης ζωνών σεισμικής επιδεκτικότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000). 58
Εικόνα 27: Σεισμοτεκτονικος χάρτης που απεικονίζει την σεισμικότητα της περιοχής μελέτης από το 1964 έως τον Μάρτιο του 2021. 60
Εικόνα 28: Απόσπασμα υδρογεωλογικού χάρτη της Κρήτης από το ΙΓΜΕ. 63
Εικόνα 29: Απόσπασμα από το υπόμνημα του υδρογεωλογικού χάρτη της Κρήτης από το ΙΓΜΕ. 64
Εικόνα 30: Διάγραμμα βροχοβαθμίδας από δεδομένα βροχόπτωσης του νομού Ηρακλείου στο διάστημα 1931 - 2020 της Γεωπύλης της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης. Σε υψόμετρο 0 m παρατηρείται περίπου ύψος βροχής 533,98 mm ετησίως, ενώ η βροχόπτωση αυξάνεται κατά 43,3 mm ανά 100 m. (https://www.apdkritis.gov.gr/el/dataset/ **;** https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/apps/webappviewer/index.html?id=62605a7792d340f4a91e61459b2856cf&fbclid=IwAR1OIwqYlrl_Y4GOLKTqoHkxoGaJndjpgX2Hv27jP7N7uph3DGwm0B_rVyI **;** https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/home/item.html?id=9efb0daa9d95436994fe2e36d0b032d9). 66
Εικόνα 31: Κλιματολογικός χάρτης της Ελλάδας. (https://www.ekalampaka.gr/article/i-ekthesi-toy-igme-gia-to-nero-toy-mayrelioy-symperasmata-kai-protaseis) 67
Εικόνα 32: Υπόμνημα του Κλιματολογικού χάρτη της Ελλάδας (Εικόνα 31). (https://www.ekalampaka.gr/article/i-ekthesi-toy-igme-gia-to-nero-toy-mayrelioy-symperasmata-kai-protaseis) 68
Εικόνα 33: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επικκινδυνότητας των μορφολογικών κλίσεων. 74
Εικόνα 34: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μορφολογικής κλίσης 74
Εικόνα 35: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας του προσανατολισμού των πρανών. 77
Εικόνα 36: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση προσανατολισμού πρανών 77
Εικόνα 37: Ιστόγραμμα διαχωρισμού κλάσεων για το επίπεδο μορφολογικής καμπυλότητας. Φαίνονται οι κλάσεις που ορίστηκαν. 79
Εικόνα 38: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της καμπυλότητας των πρανών. 80
Εικόνα 39: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μορφολογικής καμπυλότητας 81
Εικόνα 40: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας των ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών. 83
Εικόνα 41: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση ενοποιημένων λιθολογικών σχηματισμών 83
Εικόνα 42: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο. 85
Εικόνα 43: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο 86
Εικόνα 44: Στατιστικά στοιχεία του μέσου ετήσιου ύψους βροχής στο Ν. Ηρακλείου από το κατασκευασμένο αρχείο Point Shapefile των θέσεων μετεωρολογικών σταθμών στο σύστημα GIS 87

Εικόνα 45: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. 89
Εικόνα 46: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μέσης ετήσιας βροχόπτωσης 89
Εικόνα 47: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας των χρήσεων γης. 92
Εικόνα 48: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση χρήσεων γης. 92
Εικόνα 49: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το οδικό δίκτυο. 94
Εικόνα 50: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση εγγύτητας του οδικού δικτύου. 95
Εικόνα 51: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία. 97
Εικόνα 52: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση εγγύτητας των τεκτονικών στοιχείων. 97
Εικόνα 53: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας του πάχους του εδαφικού καλύμματος. 99
Εικόνα 54: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση πάχους του εδαφικού καλύμματος 100
Εικόνα 55: Βήματα κατασκευής των επιμέρους θεματικών χαρτών μέσω Model Builder. 101
Εικόνα 56: Χάρτης κατανομής κατολισθήσεων. 103
Εικόνα 57: Θεματικός χάρτης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας. 108
Εικόνα 58: Θεματικός χάρτης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας σε σύγκριση με τις θέσεις των κατολισθήσεων. 109

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης WP/WLI, 1995 (Σταυροπούλου, 2009) ...26
Πίνακας 2: Πιθανές βλάβες και επιπτώσεις σύμφωνα με την ταχύτητα μετακίνησης της ολισθαίνουσας μάζας (WP/WLI, 1995) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007) 26
Πίνακας 3: Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων σύμφωνα με την ταξινόμηση της ομάδας εργασίας της UNESCO (WP/WLI, 1994) (Σταυροπούλου, 2009) 29
Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές CI τυχαίων πινάκων AHP κατά Saaty 72
Πίνακας 5: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μορφολογικής κλίσης. 73
Πίνακας 6: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας του προσανατολισμού των πρανών. 76
Πίνακας 7: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μορφολογικής καμπυλότητας. 80
Πίνακας 8: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας των ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών. 82

Πίνακας 9: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο......85
Πίνακας 10: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. 88
Πίνακας 11: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας των χρήσεων γης. 91
Πίνακας 12: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το οδικό δίκτυο......94
Πίνακας 13: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία. 96
Πίνακας 14: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας του πάχους του εδαφικού καλύμματος......98
Πίνακας 15: Πίνακας των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάση της σειράς προτεραιότητας που ορίστηκε. Με κόκκινο χρωματίζεται ο σημαντικότερος παράγοντας και με πράσινο ο λιγότερο σημαντικός. 105
Πίνακας 16: Κλίμακα συγκρίσεων, Saaty (1986). (Ιωαννίδου, 2016).....106
Πίνακας 17: Πίνακας ζευγών συσχέτισης των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας και αντίστοιχης ιεράρχησης......106
Πίνακας 18: Υπόμνημα του πίνακα ζευγών συσχέτισης των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας και αντίστοιχης ιεράρχησης 107
Πίνακας 19: Πίνακας συχνότητας εμφάνισης κατολισθήσεων ανά ζώνη κατολισθητικής επιδεκτικότητας. 113

Εισαγωγή

Η περιοχή του Ν. Ηρακλείου παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ως προς την μελέτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας εξαιτίας πολλών παραγόντων. Η θέση αυτή επιλέχθηκε λόγω της εγγύτητας της στη ζώνη υποβύθισης της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική που την καθιστά περιοχή έντονης σεισμικότητας, το σχετικά έντονο λοφώδες - ορεινό ανάγλυφό της, την πυκνή τεκτονική δομή της, το μεγάλο ύψος ετήσιων βροχοπτώσεων και τη συχνότητα τους σε συνδυασμό με την ασβεστολιθική δομή των οροσειρών της περιοχής, καθώς και λόγω του πυκνού υδρογραφικού δικτύου με κλάδους χειμαρρώδους χαρακτήρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τον πυκνό αστικό ιστό και τον μεγάλο πληθυσμό του νομού θεωρήθηκε ότι καθιστούν την περιοχή αυτή μεγάλης σημαντικότητας για τη διεξαγωγή μίας έρευνας αυτού του είδους. Σημειώνεται ότι δεν βρέθηκαν αντίστοιχα βιβλιογραφικά δεδομένα κατολισθητικής επιδεκτικότητας στο Ν. Ηρακλείου και επομένως η παρούσα εργασία αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση για την εκτίμηση της συχνότητας εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στην συγκεκριμένη περιοχή που συμπληρώνει τη σχετική βιβλιογραφία.

Γενικά, τα σημαντικότερα αίτια εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στην συγκεκριμένη περιοχή αποτελούν η γεωλογική και τεκτονική δομή της περιοχής, οι μορφολογικές κλίσεις και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα όπως οι έντονες βροχοπτώσεις, γεγονός που φάνηκε από γεωτεχνικές εκθέσεις καταγεγραμμένων κατολισθήσεων στην περιοχή από το ΙΓΜΕ.

Για την διερεύνηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή του τελικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας ακολούθησαν οι παρακάτω ενέργειες:

- Συλλέχθηκαν τα απαραίτητα βιβλιογραφικά δεδομένα της περιοχής και οι προαναφερμένες γεωτεχνικές εκθέσεις για την κατασκευή γεωβάσης κατολισθήσεων.
- Πραγματοποιήθηκε γεωαναφορά και ψηφιοποίηση των πρωτογενών δεδομένων για ην κατασκευή ψηφιακών χαρτών της περιοχής βάσει του κάθε παράγοντα κατολισθητικής επιδεκτικότητας.
- Διαχωρισμός σε κλάσεις των δεδομένων του κάθε ψηφιακού χάρτη και βαθμονόμηση των κλάσεων βάσει του βαθμού επίδρασης τους στην επιδεκτικότητα της περιοχής.

- Κατασκευή θεματικών χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας των παραγόντων βάσει των διαχωρισμένων κλάσεων.
- Τοποθέτηση των παραγόντων σε σειρά σημαντικότητας και βαθμονόμηση του καθενός σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες βάσει της αρχής της Μεθόδου της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP).
- Κατασκευή τελικού θεματικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας του Ν Ηρακλείου χωρισμένο σε 5 κλάσεις βάσει της αναλυτικής ιεράρχησης των επιμέρους παραγόντων.
- Σύγκριση του τελικού χάρτη με τη γεωβάση καταγεγραμμένων κατολισθήσεων και αξιολόγηση του μοντέλου με σχετικό ποσοστό επιτυχίας 90,48%.

Η εκτίμηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας με την Μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα στην πρόληψη εκδήλωσης κατολισθήσεων και την αποφυγή ανθρώπινων, υλικών και οικονομικών απωλειών για μια ασφαλέστερη και ομαλότερη συμβίωση των ανθρώπων με το φυσικό περιβάλλον.

Κεφάλαιο 1ο - Κατολισθήσεις

1.1 Φυσικές καταστροφές

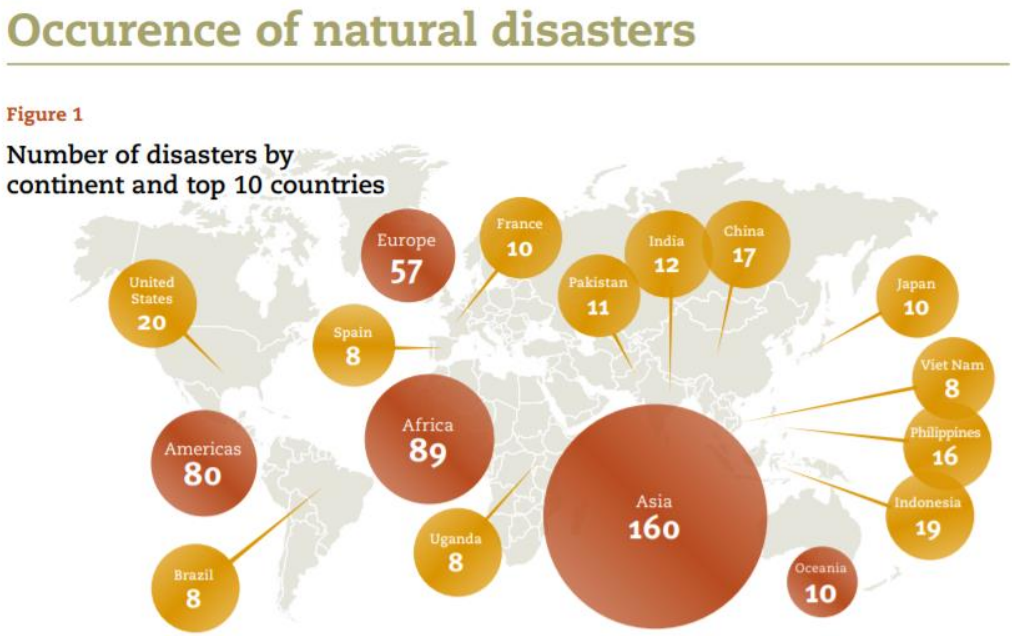
Η φυσική καταστροφή είναι ένα γεγονός που προκαλείται από φυσικό κίνδυνο. Όπως ορίζεται από την UNSDR, « Η φυσική καταστροφή είναι μια διαδικασία ή φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει απώλεια ζωής, τραυματισμούς ή άλλες επιπτώσεις στην υγεία, υλικές ζημιές, απώλεια ζώων και υπηρεσιών, κοινωνική και οικονομική αναστάτωση ή περιβαλλοντική ζημία ». Οι φυσικές καταστροφές χωρίζονται σε 5 κατηγορίες, όπως κατηγοριοποιούνται στη βάση δεδομένων EM – DAT του Κέντρου Έρευνας για την Επιδημιολογία των Καταστροφών (CRED) (Καρανασιοπούλου, 2010):

- ***Βιολογικές*** (πχ. Επιδημίες, πανικός ζώων, επιδρομές εντόμων)
- ***Γεωφυσικές:*** συμβάντα που σχετίζονται με τον φλοιό της Γης (πχ. Σεισμοί, ηφαίστεια, εδαφικές κινήσεις σε ξηρές συνθήκες)
- ***Υδρολογικές:*** συμβάντα που προκαλούνται από αποκλίσεις στον φυσιολογικό κύκλο του νερού και υπερχείλιση σωμάτων νερού με την επίδραση του ανέμου (πχ. Πλημμύρες, εδαφικές κινήσεις σε υγρές συνθήκες)
- ***Μετεωρολογικές:*** συμβάντα προκαλούμενα από μικρής διάρκειας και μικρής έως μέσης κλίμακας ατμοσφαιρικές διαδικασίες (διάρκεια λεπτών έως ημερών όπως οι καταιγίδες)
- ***Κλιματολογικές:*** συμβάντα που προκαλούνται από μακράς και μέσης έως μεγάλης κλίμακας διαδικασίες στο πλαίσιο των εποχιακών και πολύχρονων κλιματικών διακυμάνσεων (πχ. Ακραίες θερμοκρασίες, ξηρασία, πυρκαγιές).

Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα μπορεί να συμβαίνουν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό των παραπάνω.

Οι συχνότερες φυσικές καταστροφές που επηρεάζουν άμεσα το κοινωνικό σύνολο είναι οι κατολισθήσεις, οι πλημμύρες και οι πυρκαγιές. Οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν την

γένεση αυτών των φυσικών καταστροφών είναι η κλιματική αλλαγή και οι έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις στο περιβάλλον, όπως η εντατική αστικοποίηση. Όμως, για την κάθε αλλαγή που επιφέρει ο άνθρωπος στο περιβάλλον, υπάρχουν και επιπτώσεις (υλικές, περιβαλλοντικές, ανθρώπινες απώλειες). Σύμφωνα με τα δεδομένα του EM – DAT το 2019 καταγράφθηκαν 396 φυσικές καταστροφές με 11.755 επιβεβαιωμένους θανάτους, 94,9 εκατομμύρια πληττόμενους και οικονομική ζημία που ανέρχεται στα 103 δισεκατομμύρια δολάρια. Αντιθέτως, το διάστημα 2009 – 2018 έγιναν 343 φυσικές καταστροφές παγκοσμίως. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η εύρεση της ισορροπίας μεταξύ της συνύπαρξης του ανθρώπου με το περιβάλλον. Μια ιδανική ισορροπία είναι η πρόληψη και η κατασκευή μοντέλων επιδεκτικότητας των διαφόρων περιοχών σε αυτά φαινόμενα (CRED, 2020)



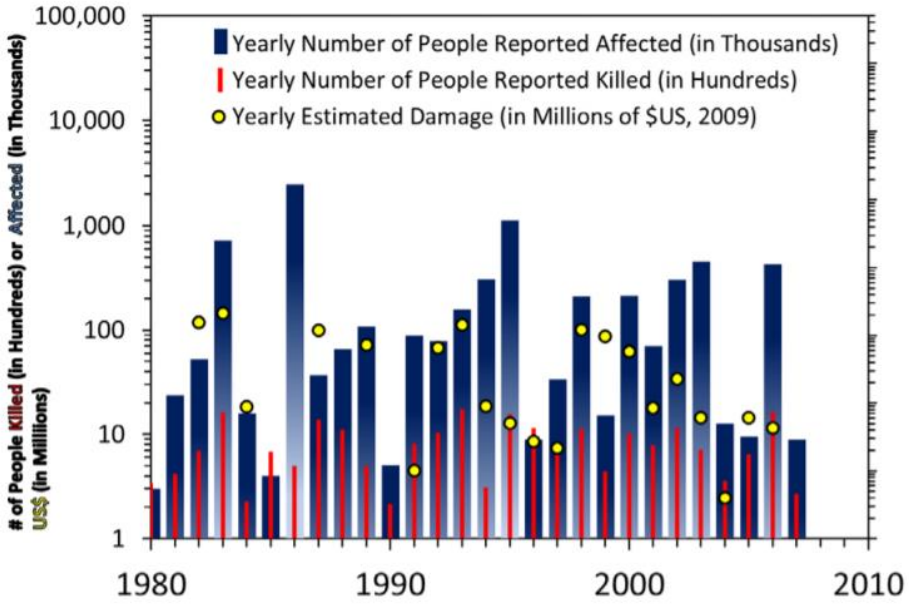
Εικόνα 1: Γεωγραφική απεικόνιση της κατανομής των φυσικών καταστροφών παγκοσμίως από τα δεδομένα του EM – DAT για το 2019 (*https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf*)

1.2 Κατολισθήσεις

Οι κατολισθήσεις, με την ευρύτερη έννοια της μετακίνησης που εκδηλώνεται σε φυσικά και τεχνητά πρανή, συνιστούν μαζί με τους σεισμούς, τις εκρήξεις των ηφαιστείων, τις ανεξέλεγκτες πυρκαγιές και τις πλημμύρες, τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές και αποτελούν την βασική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζωών καθώς και περιουσιών με σημαντικές

οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Κατά καιρούς έχουν προταθεί και άλλοι ορισμοί για τις κατολισθήσεις: Ο Terzaghi (1950) ορίζει την κατολίσθηση σαν « μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω». Οι Zaruba & Mencl (1969) ορίζουν την κατολίσθηση σαν « μια γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια». Ενώ, ο Cruden (1991) εισάγει έναν γενικότερο ορισμό για τις κατολισθήσεις. Συγκεκριμένα, ορίζει την κατολίσθηση σαν « την κίνηση μιας μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατάντη ενός πρανούς» (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Γενικά, οι κατολισθήσεις θεωρούνται φυσικά φαινόμενα όταν προκαλούνται από το δυναμικό καθεστώς της επιφάνειας της Γης (υδρόσφαιρα, λιθόσφαιρα, ατμόσφαιρα). Συνήθως, αποτελούν συνοδά φαινόμενα κυρίως μετά από σεισμούς, έντονα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και ηφαιστειακές εκρήξεις. Ωστόσο, οι κατολισθήσεις δεν θεωρούνται μόνο φυσικά φαινόμενα αλλά και ανθρωπογενή. Οι ανθρωπογενείς κατολισθήσεις συνδέονται με την επιρροή του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον (π.χ. κατασκευή τεχνητών επιφανειών, ανάπτυξη οδικού δικτύου) για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών (Qulin, et al., 2021). Όμως, τα ανθρωπογενή κατολισθητικά φαινόμενα που σημειώνονται κοντά σε αστικό ιστό επηρεάζουν άμεσα τις ζωές των ανθρώπων καθώς και τις περιουσίες αυτών. Ειδικότερα, στην ανατολική Ουγκάντα στην περιοχή Μπουντούντα εξαιτίας κατολισθητικών συμβάντων που έλαβαν χώρα το 2010 σκοτώθηκαν 388 άνθρωποι και ο αριθμός των πληττόμενων ανέρχεται στους 8.500 ανθρώπους. Αυτοί οι αριθμοί κατέταξαν αυτές τις εδαφικές υποχωρήσεις ως στις 10 μεγαλύτερες καταστροφές του κόσμου (Mungai, et al., 2017).



Εικόνα 2: Διάγραμμα με τον συνολικό αριθμό πληττόμενων ανθρώπων (μπλε), των θανάτων (κόκκινο) και το ετήσιο οικονομικό αντίκτυπο, λόγω κατολισθήσεων παγκοσμίως στο χρονικό διάστημα 1940 – 2007 (EM – DAT, 2009).

Η ανάγκη για την προστασία της ανθρώπινης ζωής, καθώς και για την μείωση της οικονομικής ζημίας και την προστασία των περιουσιών, παρότρυνε τους επιστήμονες να κατασκευάσουν μοντέλα επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες περιοχές. Σύμφωνα με τους (Nadim, et al., 2006) για την εγκυρότητα του προληπτικού μοντέλου επιδεκτικότητας είναι σημαντική η καταγραφή του εναυσματικού αιτίου της καταστροφής και όχι της κατηγορίας κινδύνου που την προκάλεσε. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μεγάλη καταστροφή που συνέβη στην περιοχή Μπουντούντα της Ουγκάντα οφείλεται κυρίως σε οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες, δηλαδή την αδυναμία της κυβέρνησης ή άλλων κρατικών φορέων να λάβει μέτρα προστασίας για τέτοιας μεγάλης έκτασης επικείμενων καταστροφών (Mungai, et al., 2017).

1.3 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις για τις κατολισθήσεις οι οποίες βασίζονται κυρίως σε παραμέτρους που έχουν σχέση με (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007):

1. Τον τύπο – είδος του υλικού κατολίσθησης
2. Την περιεχόμενη υγρασία του κατολισθαίνοντος υλικού
3. Τον τύπο της κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή)
4. Την ταχύτητα της κίνησης
5. Το αίτιο της κίνησης (σεισμός, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας)
6. Την σχέση της ολίσθησης και επιφάνειας ολίσθησης (επίπεδη, περιστροφική)
7. Την τοποθεσία όπου γίνεται το φαινόμενο (ξηρά, θάλασσα, λίμνη)
8. Τη γεωμετρία και μορφολογία του πρανούς
9. Το περιβαλλοντικό καθεστώς και τις κλιματικές συνθήκες
10. Τον μηχανισμό ολίσθησης

Τα πρώτα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων προτάθηκαν από τον Sharpe (1939) και Varnes (1958) και βασίζονταν σε τέσσερις παραμέτρους: (1) τον τύπο κίνησης, (2) την ταχύτητα, (3) τον τύπο του υλικού και (4) την περιεχόμενη υγρασία. Ωστόσο, αργότερα ο Erksine (1973) πρότεινε μια ταξινόμηση που λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές παραμέτρους καθώς και τις απαιτήσεις για τη χρήση γης. Ειδικότερα, ταξινόμησε τις κατολισθήσεις με βάση την ενεργότητά τους και τις επιπτώσεις που πιθανώς να έχουν στα διάφορα τεχνικά έργα, στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

1. Σταθεροποιημένες κατολισθήσεις (δεν έχουν ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης)
2. Πρόσφατα ενεργές κατολισθήσεις (εκδηλώνονται με πρόσφατες κινήσεις)
3. Κατολισθήσεις που έδρασαν πρόσφατα (μετά από μια περίοδο σταθεροποίησης, και
4. Ενεργές κατολισθήσεις (δείχνουν να μην έχουν σταθεροποιηθεί).

Οι Zaruba & Mencl (1969, 1976) βασίζουν την ταξινόμηση τους στην ιδιομορφία της γεωλογικής δομής, και επομένως διακρίνουν δύο μεγάλες κατηγορίες: (1) τις μετακινήσεις του τεταρτογενούς καλύμματος, οι οποίες είναι και οι πολυπληθέστερες, και (2) τις μετακινήσεις

του προτεταρτογενούς καλύμματος, οι οποίες υποδιαιρούνται ανάλογα με τον χαρακτήρα των πετρωμάτων και τον τύπο της μετακίνησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Κατηγορία	Είδος
Μετακινήσεις επιφανειακών αποθέσεων	Ερπυσμός κορημάτων και κάμψη της κεφαλής των στρωμάτων
	Ολισθήσεις κορημάτων και μανδύα αποσάθρωσης
	Ροές γαιών
Μετακινήσεις στα αργιλικά εδάφη και πετρώματα	Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης
	Ολισθήσεις κατά μήκος σύνθετων επιφανειών ολίσθησης
	Μετακίνηση πρανών από σύνθλιψη μαλακών πετρωμάτων
Μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων	Ολισθήσεις βράχων κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών
	Ολισθήσεις βαρύτητας (μακροχρόνιες παραμορφώσεις πρανών)
	Πτώσεις βράχων
Ειδικοί τύποι μετακίνησης	Εδαφική ροή λόγω παγετού
	Ολισθήσεις σε ευαίσθητες αργίλους
	Υποθαλάσσιες ολισθήσεις

Εικόνα 3: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Zaruba & Mencl (1976) *(Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)*

Ο Varnes (1978) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης όλων των μετακινήσεων που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή, εκτός των καθιζήσεων. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται σε δύο κύρια κριτήρια, τον τύπο μετακίνησης και το είδος του υλικού το οποίο μετακινείται. Ανάλογα με τον τύπο της μετακίνησης διακρίνονται: πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις, και ροές, ενώ μία επιπλέον ομάδα περιλαμβάνει τις σύνθετες μετακινήσεις που αποτελούν τον συνδυασμό περισσότερων τύπων μετακίνησης. Ανάλογα με το είδος του γεωλογικού υλικού που μετακινείται διακρίνονται κινήσεις που εκδηλώνονται (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007):

(α) στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock). Σαν βραχώδες υπόβαθρο ορίζεται η μάζα εκείνη η οποία πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης ήταν ένα σκληρό συνεκτικό πέτρωμα που βρισκόταν από γεωλογική άποψη στη φυσική του θέση.

(β) στους εδαφικούς σχηματισμούς (engineering soils) που διακρίνονται σε κορήματα (debris) και γαίες (earth). Αποτελούν χαλαρά ή ασθενώς συνδεδεμένα συσσωματώματα ορυκτών και

πετρωμάτων που μπορεί ναι είναι μεταφερμένα και να έχουν σχηματιστεί με τους μηχανισμούς της αποσάθρωσης και της διάβρωσης ή από την επί τόπου (in situ) αποσάθρωσή τους.

Τα κορήματα αποτελούν εδαφικά υλικά που περιέχουν ποσοστό 20 – 80% χονδρόκοκκων υλικών με μέγεθος > 2 mm (χαλίκια, κροκάλες, λατύπες, ογκόλιθοι), ενώ οι γαίες αποτελούν εδαφικά υλικά τα οποία με βάση τη μηχανική τους ταξινόμηση, ποσοστό >80% της μάζας τους έχει μέγεθος < 2 mm (κλάσμα άμμου, ιλύος και αργίλου).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος «κορήματα» αποδίδεται με την έννοια του αδρομερούς υλικού και όχι πάντα με την γεωλογική του σημασία. Η παραπάνω διάκριση αναφέρεται στα υλικά της μάζας της κατολίσθησης πριν εκδηλωθεί το φαινόμενο. Επομένως, λέγοντας κατάπτωση βράχου (rockfall), εννοείται ότι πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης, η μάζα ήταν βραχώδης η οποία μετά την κατολίσθηση πιθανά να μετατράπηκε σε κορήματα (θραύσματα πετρώματος).

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	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρική Εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
			(ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

Εικόνα 4: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978) *(Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)*.

Από όλες τις παραπάνω ταξινομήσεις, οι πλέον σημαντικές είναι των Zaruba – Mencl και κυρίως του Varnes, η οποία έχει γίνει πλέον διεθνώς αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή όλων των εδαφικών μετακινήσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταξινόμηση Zaruba – Mencl έχει περιορισμένη «ευρύτητα» στην εφαρμογή της, με έντονη θεώρηση του γεωλογικού παράγοντα, σε αντίθεση με του Varnes που είναι αρκετά «ευέλικτη», προσαρμόζεται εύκολα στις εκάστοτε συνθήκες και είναι πρακτικά εύκολα εφαρμόσιμη (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

1.4 Μορφές Κατολισθήσεων

Σύμφωνα με την επικρατέστερη ταξινόμηση κατολισθήσεων του Varnes (1978), διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες κατολισθήσεων (Σταυροπούλου, 2009):

1.4.1 Τις ερπυστικές κατολισθήσεις.

Αυτή η κατηγορία των κατολισθήσεων αφορά την μετακίνηση με αργό ρυθμό του επιφανειακού εδαφικού στρώματος της τάξης των μερικών εκατοστών ανά έτος. Σε αυτές εντάσσονται οι:

- Ανατροπές (topples): Η κίνηση στις ανατροπές είναι μια προς τα έξω περιστροφή της μάζας , γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από τη βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχη ή από την επίδραση του νερού που διαπερνά τις ασυνέχειες. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κυρίως σε βραχώδη πρανή (πτώση, ολίσθηση). Η ταχύτητα μετακίνησης στα αρχικά στάδια είναι ερπυστική, ενώ στα τελευταία στάδια είναι εξαιρετικά γρήγορη. Διακρίνονται σε: (α) ανατροπή βράχων, (β) ανατροπή κορημάτων, και (γ) ανατροπή γαιών. Η ανατροπή κορημάτων και γαιών συμβαίνουν σπάνια, ενώ οι τύποι αυτοί μετακίνησης οφείλονται σε υποσκαφή της βάσης του πρανούς λόγω φυσικών διεργασίων (πχ. διάβρωση) ή ανθρώπινων παρεμβάσεων (πχ. λατομεία).
- Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads): Η κίνηση που επικρατεί είναι η πλευρική διάσταση του υλικού. Οι πλευρικές εξαπλώσεις εμφανίζονται σε πρανή μικρής κλίσης. Στις ερπυστικές κατολισθήσεις ανήκουν οι εξαπλώσεις τεμαχών. Σε αυτή την κατηγορία οι βραχώδεις σχηματισμοί, που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχη. Το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα και τις περισσότερες φορές είναι εξαιρετικά αργή.
- Ροές (flows): Εκδηλώνονται συνήθως σε χαλαρά υλικά και η μετακινούμενη μάζα υφίστανται έντονες παραμορφώσεις. Συνήθως η κίνηση του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος δεν είναι άμεσα ορατή και επομένως, ταξινομούνται στον ερπυσμό

(creep). Διακρίνονται σε: (α) ροή βραχώδους υποβάθρου, (β) ροές κορημάτων: οι πιο βίαιες και συμβαίνουν χωρίς προειδοποίηση, και (γ) ροές γαιών.

1.4.2 Ταχείες κατολισθήσεις

Οι ταχείες κατολισθήσεις διακρίνονται στις:

- Καταπτώσεις (falls): Συνήθως βραχωδών τεμαχίων, όπου τεμάχια αποκολλώνται από επιφάνεια, στην οποία δεν παρατηρείται σημαντική κίνηση, από ένα πρανές σημαντικής κλίσης και η πτώση γίνεται ελεύθερα στον αέρα ή αναπήδηση. Διακρίνονται σε: (α) καταπτώσεις βράχων, (β) κορημάτων, και (γ) γαιών.

- Ολισθήσεις (slides), οι οποίες διακρίνονται σε:

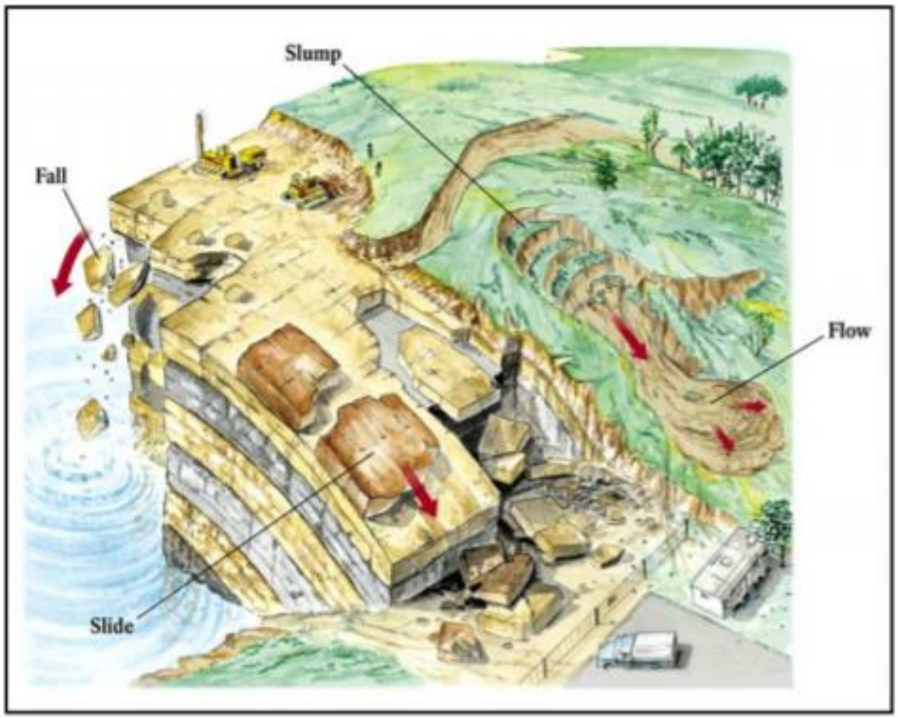
  I. *Μεταθετικές (translational):* Στις οποίες η ολίσθηση λαμβάνει χώρα κατά μήκος επίπεδης επιφάνειας (ή επιφανειών στην περίπτωση της σφηνοειδούς ολίσθησης). Η επιφάνειας της ολίσθησης ορίζεται από στρωματογραφικά (στρώση) ή τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα, διακλάσεις κλπ.). Ανάλογα με τον τύπο του μτακινούμενου υλικού διακρίνονται σε: (α) μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου, (β) μεταθετική ολίσθηση κορημάτων, και (γ) μεταθετική ολίσθηση γαιών.

  II. *Περιστροφικές (rotational):* Η ολίσθηση γίνεται σε κοίλη επιφάνεια με μικρή παραμόρφωση του υλικού που ολισθαίνει. Συνήθως η επιφάνεια ολίσθησης δεν είναι κυκλική αλλά ακολουθεί τον τρόπο ανάπτυξης των προϋπαρχόντων γεωλογικών σχηματισμών. Όπως και οι μεταθετικές έτσι και οι περιστροφικές διακρίνονται αντίστοιχα σε: (α) περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου, (β) περιστροφική ολίσθηση κορημάτων, και (γ) περιστροφική ολίσθηση γαιών.

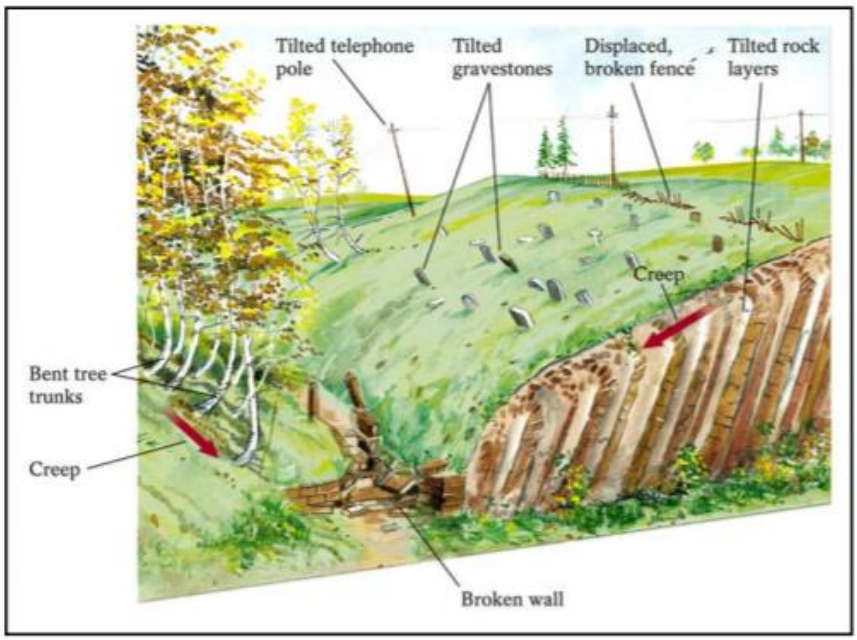
- Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads): Στις ταχείες κατολισθήσεις ανήκουν οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης. Δημιουργούνται κυρίως σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες , οι οποίες όταν διαταραχθούν, παρουσιάζουν απώλεια της αντοχής τους. Η

θραύση είναι βαθμιαία και συνήθως αρχίζει σαν εκτεταμένη καθίζηση με αντίστροφη προοδευτική επέκταση. Η κίνηση ξεκινάει χωρίς προειδοποίηση και η μετακίνηση τους χαρακτηρίζεται μεγάλης έως πολύ μεγάλης ταχύτητας.

- Ροές (flows): Το υλικό κινείται με την μορφή ενός ιξώδους ρευστού. Στην περίπτωση αυτή έχουμε συνεχή σχετική κίνηση των σωματιδίων της ολισθαίνουσας μάζας. Επίσης, τα υλικά της επιφάνειας παρασύρονται με την κινούμενη μάζα και δημιουργούν ένα μίγμα μετακινούμενων υλικών.

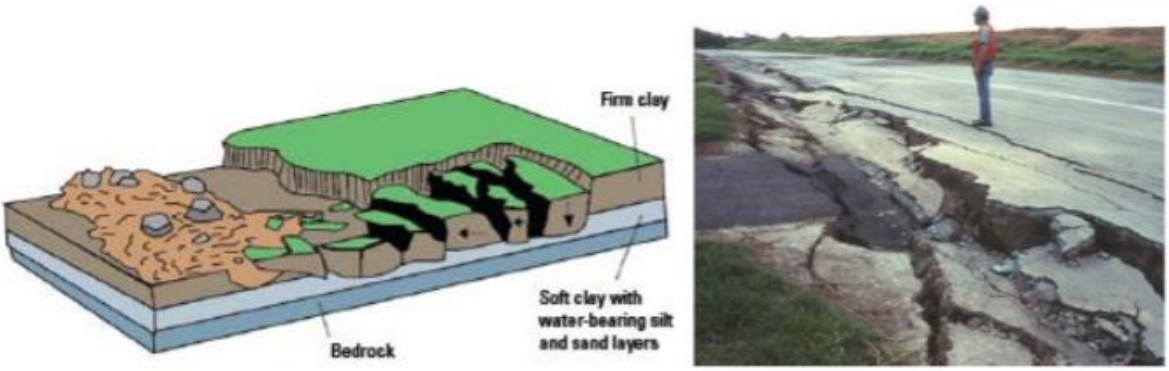


Εικόνα 5: Ταχείες κατολισθήσεις *(Σταυροπούλου, 2009)*



Εικόνα 6: Χαρακτηριστικές ενδείξεις ερπυστικών κινήσεων *(Σταυροπούλου, 2009)*

Εικόνα 7: Ανατροπή βράχων *(Σταυροπούλου, 2009)*



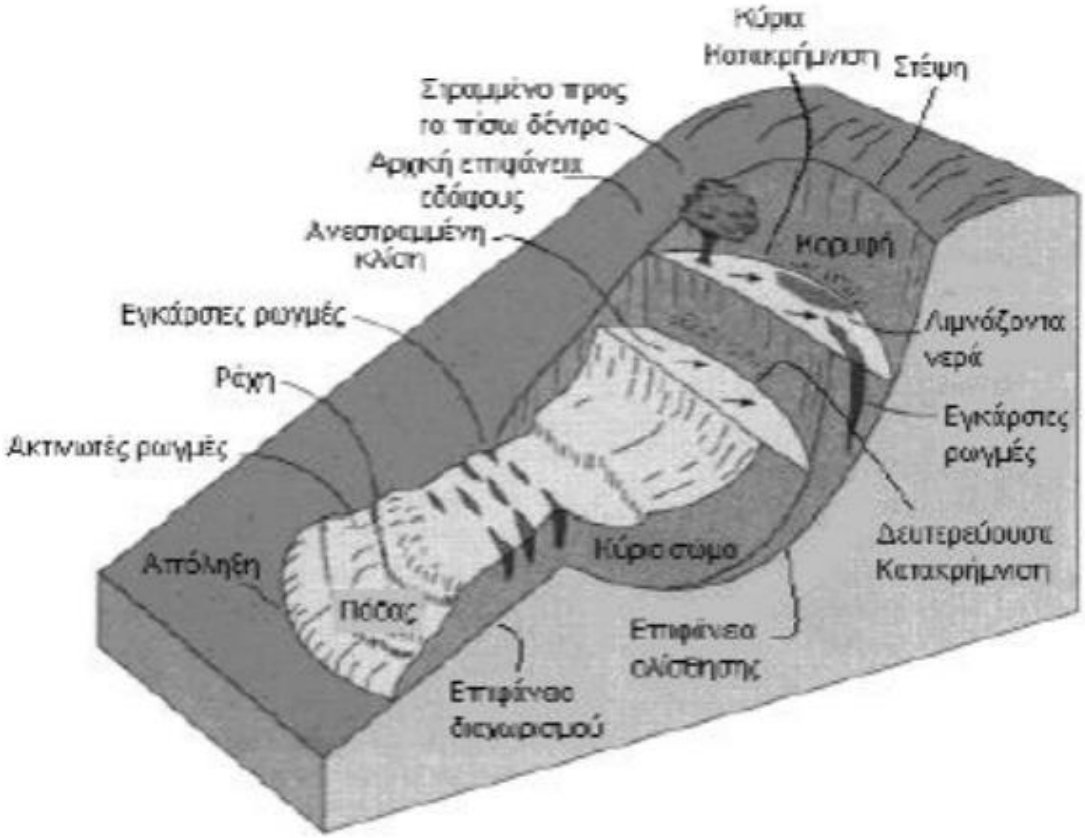
Εικόνα 8: Πλευρικές εξαπλώσεις *(Σταυροπούλου, 2009)*

1.5 Ονοματολογία

Ο Varnes μελέτησε αρκετά τα χαρακτηριστικά της περιστροφικής ολίσθησης και πρότεινε μια συγκεκριμένη ορολογία για την περιγραφή των επιμέρους χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης κατολισθητικής κίνησης. Το 1990 η Ειδική Επιτροπή για τις κατολισθήσεις που συστάθηκε από την Διεθνή Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG, Comission of Landslides), βασισμένη στην ονοματολογία που είχε προτείνει ο Varnes, όρισε μια αντίστοιχη συμπληρωματική ορολογία για τα χαρακτηριστικά του κατολισθητικού φαινομένου η οποία αφορά την περιγραφή των κατολισθήσεων γενικότερα και όχι μόνο των περιστροφικών ολισθήσεων. Αυτή η ονοματολογία χρησιμοποιείται πλέον σε διεθνές επίπεδο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης είναι τα εξής (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007; Krassakis & Loupasakis, 2018):

- *Στέψη (Crown):* Το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.
- *Κύρια κατακρήμνιση (Main scarp):* Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στη στέψη, που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- *Κορυφή (top):* Το υψηλότερο σημείο επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- *Κεφαλή (Head):* Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- *Δευτερεύουσα κατακρήμνιση (Minor scarp):* Δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της μετακινούμενης μάζας που έχει προέλθει από διαφορικές μετακινήσεις της μάζας.
- *Κύριο σώμα (Main body):* Το τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκεινται της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.
- *Πόδας (Foot):* Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και το οποίο υπέρκεινται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

- *Επιφάνεια ολίσθησης (Surface of rupture):* Η επιφάνεια πάνω στην οποία έγινε η κατολίσθηση.
- *Επιφάνεια διαχωρισμού:* Η επιφάνεια στην οποία διαχωρίζονται τα υλικά της κατολίσθησης από το σταθερό υπόβαθρο.
- *Απόληξη (Toe):* Το κατώτερο όριο της μετακινούμενης μάζας το οποίο βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από την στέψη.
- *Εγκάρσιες ρωγμές (Transverse ridges):* Ρωγμές παράλληλα στην κύρια διεύθυνση της ολίσθησης μεταξύ του κυρίου σώματος και του ποδός.



Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση των κύριων χαρακτηριστικών ενός κατολισθητικού φαινομένου *(Χλούπης, 2020)*

1.6 Κατάταξη με βάση την ταχύτητα μετακίνησης κατολισθητικών φαινομένων

Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολίσθησης αποτελεί σημαντική παράμετρος διότι σχετίζεται άμεσα με τις επιπτώσεις του φαινομένου όπως ανθρώπινες ζωές, βλάβες κτιρίων και έργων

υποδομής, υλικές απώλειες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ταχύτητα των μετακινήσεων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω της διαφορετικής ταχύτητας που αποκτούν τα επιμέρους τμήματα διαφόρων τύπων ολίσθησης στα διάφορα στάδια της εξέλιξής της. Ακόμα πιο δύσκολο είναι ο προσδιορισμός της ταχύτητας μετακίνησης του σύνθετου τύπου μετακίνησης. Τέλος, λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού της ταχύτητας προτάθηκε μια επιπλέον ταξινόμηση, που συνδυάζει τις άμεσες επιπτώσεις των κατολισθήσεων με την ταχύτητα, και διακρίνουμε 7 κατηγορίες (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	Όρια Ταχύτητας
7	Εξαιρετικά γρήγορη	------ 5 m/sec
6	Πολύ γρήγορη	------ 3 m/min
5	Γρήγορη	------ 1.8 m/hour
4	Μέτρια	------ 13 m/month
3	Αργή	------ 1.6 m/year
2	Πολύ Αργή	------ 16 mm/year
1	Εξαιρετικά Αργή	

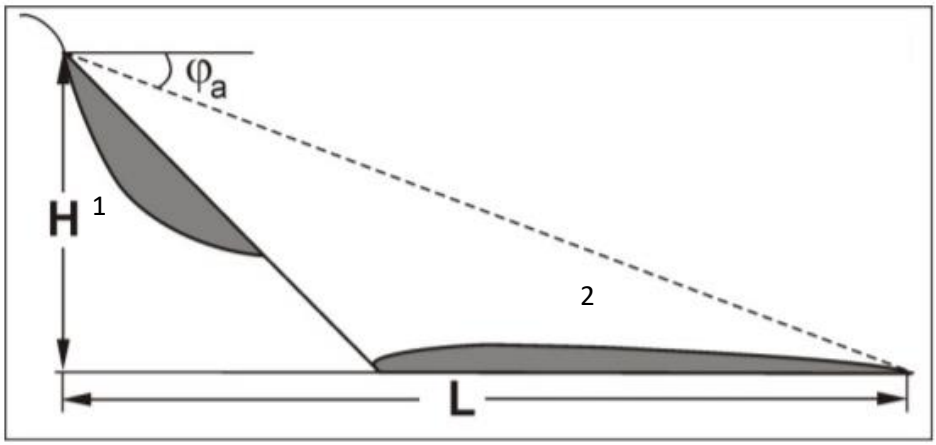
Πίνακας 1: Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης WP/WLI, 1995 *(Σταυροπούλου, 2009)*

Κατηγορία	Πιθανές βλάβες και επιπτώσεις
7	Ολική καταστροφή κτιρίων και πολλοί θάνατοι λόγω έντονων μετακινήσεων ή πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων. Μεγάλη καταστροφή κτιρίων και εγκαταστάσεων.
5	Πιθανή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα.
4	Κτίρια σε μικρή απόσταση από την κατολίσθηση είναι δυνατόν να διατηρηθούν, ενώ αυτά που βρίσκονταν πάνω στην κατολισθαίνουσα μάζα με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα .
3	Μερικές φορές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της κίνησης.
2	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες ή μπορούν να επισκευαστούν.
1	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με ενόργανες μετρήσεις λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

Πίνακας 2: Πιθανές βλάβες και επιπτώσεις σύμφωνα με την ταχύτητα μετακίνησης της ολισθαίνουσας μάζας (WP/WLI, 1995) *(Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)*

Παρατηρώντας τον πίνακα ταξινόμησης με τις πιθανές βλάβες, συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα μετακίνησης τόσο αυξάνονται και οι επιπτώσεις μιας κατολίσθησης. Συγκεκριμένα, η κατηγορία 7 πλησιάζει την ταχύτητα ενός δρομέα (~ 5 m/sec), και επομένως είναι σχεδόν ανέφικτη η διαφυγή των ανθρώπων αν η κατολίσθηση συμβεί ακαριαία. Επίσης, οι πολύ αργές μετακινήσεις (κατηγορίες 2 και 3) που αποτελούν σημαντικές ενδείξεις μελλοντικής κατολίσθησης συνήθως δεν γίνονται έγκαιρα αντιληπτές από τον άνθρωπο.

Μια αρκετά χρήσιμή ταξινόμηση προτάθηκε από τον Sassa το 2004, κατά την οποία οι κατολισθήσεις κατηγοριοποιούνται με βάση την ταχύτητα ολίσθησης και την απόσταση μετακίνησης των εδαφικών μαζών. Επομένως, έχουμε τις εξής κατηγορίες: (α) γρήγορες - μεγάλης απόστασης μετακίνησης, (β) γρήγορες - μικρής απόστασης μετακίνησης, (γ) αργές - μεγάλης απόστασης μετακίνησης, (δ) αργές - μικρής απόστασης μετακίνησης. Οι πιο επικίνδυνες κατηγορίες θεωρούνται οι κατολισθήσεις που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία και δημιουργούνται από έντονα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και σεισμούς. Η ταξινόμηση γίνεται με βάση τον υπολογισμό της φαινόμενης τριβής δηλαδή του λόγου H/L, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Γενικά, αν H/L < 0,5 τότε η κατολίσθηση ανήκει στην πρώτη κατηγορία (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της φαινόμενης γωνίας τριβής φα , όπου Η: η υψομετρική διαφορά από την μετακινούμενη μάζα, L: η απόσταση μετακίνησης και οι θέσεις 1 και 2: η αρχική και τελική θέση αντίστοιχα
(Wang, et al., 2014)

1.6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν μια κατολίσθηση

Ο μηχανισμός εκδήλωσης ενός κατολισθητικού φαινομένου (landslide process) είναι σύνθετος διότι εξαρτάται από μια αλληλουχία γεγονότων που με την σειρά τους εκδηλώνονται από την επίδραση διαφόρων αιτιών (landslide causes) με αποτέλεσμα να διαταραχθούν οι συνθήκες ισορροπίας και τελικά να έχουμε θραύση και μετακίνηση του πρανούς. Το 1994 η ομάδα εργασίας της UNESCO, βασισμένη στην άποψη ότι η εκδήλωση κατολισθήσεων είναι πολυπαραγοντική, πρότεινε μια γενικότερη ταξινόμηση των αιτιών της εκδήλωσης αυτών (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Σημαντικό ρόλο σε αυτή την ταξινόμηση παίζει η ευστάθεια του πρανούς, που ορίζεται με τον συντελεστή ασφαλείας F. Συγκεκριμένα, ως συντελεστή ασφαλείας ορίζεται ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας ολίσθησης ως προς την διατμητική τάση η οποία δρα στο τέμαχος (Σταυροπούλου, 2009):

$$F = \frac{\textit{Διατμητική αντοχή}}{\textit{Διατμητική τάση}} = \frac{\tau_{max}}{\tau}$$

Όπου η διατμητική αντοχή δίνεται από το κριτήριο Mohr – Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot tan\varphi$$

Όπου c η συνοχή, φ η γωνία τριβής και σ_n η ορθή τάση που δρα στο τέμαχος.

Γενικά,

όταν F > 1, τότε το πρανές είναι ευσταθές

όταν F ~ 1, τότε το πρανές θεωρείται οριακά ευσταθές, και

όταν F < 1, τότε το πρανές είναι ενεργά ευσταθές

Η ευστάθεια είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση των παραγόντων που προκαλούν τα κατολισθητικά φαινόμενα και για την ταξινόμηση των παραγόντων αυτών από την ομάδα της UNESCO σε δύο ομάδες, με βάση τα αποτελέσματα της επίδρασής τους. Η **πρώτη ομάδα** διαμορφώνεται ανάλογα με το αποτέλεσμα και το βαθμό της επίδρασης των παραγόντων και διακρίνεται σε: (α) προκαταρκτικούς παράγοντες (preparatory factors): παράγοντες οι οποίοι δεν σχετίζονται με την μετακίνηση αλλά με την προοδευτική αστάθεια του πρανούς που το κάνουν επιρρεπές σε ολίσθηση, και (β) παράγοντες εναύσματος μετακίνησης (triggering causal factors): παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στην έναρξη της μετακίνησης, όπου το πρανές

μετατρέπεται από οριακά ευσταθές σε ενεργά ασταθές. Η **δεύτερη ομάδα** διαμορφώνεται ανάλογα με την προέλευση των παραγόντων που αναφέρονται σε (Σταυροπούλου, 2009):

- Εδαφικές συνθήκες (χαρακτηριστικά του εδαφικών σχηματισμών ή βραχομάζας)
- Γεωμορφολογικές συνθήκες (γεωμετρία πρανούς, κλίση της επιφάνειας του εδάφους, προσανατολισμός του πρανούς κλπ.)
- Φυσικές διεργασίες (βροχοπτώσεις, σεισμοί, ηφαιστειακές εκρήξεις, κλπ.)
- Ανθρωπογενείς διεργασίες (κατασκευές τεχνικών έργων, εκσκαφές, κλπ.)

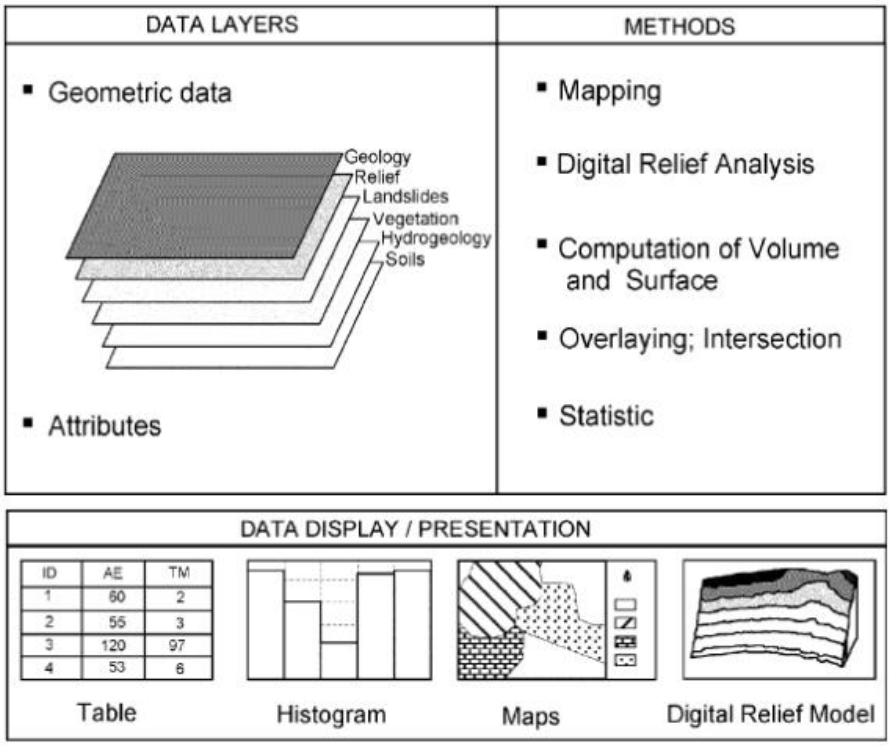
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ			**ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**
		1	Πλαστικό, χαμηλής αντοχής, υλικό
		2	Ευαίσθητο υλικό
		3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
		4	Αποσαθρωμένο υλικό
		5	Διατμημένο υλικό
		6	Ρωγματωμένο ή διακλασμένο υλικό
		7	Βραχόμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών *(στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)*
		8	Βραχόμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών *(ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)*
		9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
		10	Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία
	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΑΥΣΜΑΤΟΣ		**ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ**
		11	Τεκτονική ανύψωση
		12	Ανύψωση λόγω ηφαιστείων
		13	Επίδραση παγετώνων
		14	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς
		15	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς
		16	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα
		17	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς
		18	Εσωτερική διάβρωση
		19	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη 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 ηφαιστείων
		27	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
		28	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
		29	Αποσάθρωση λόγω παγετού
		30	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
			ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ
		31	Εκσκαφές στη βάση (πόδι) του πρανούς
		32	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανούς
		33	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
		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.)*

Πίνακας 3: Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων σύμφωνα με την ταξινόμηση της ομάδας εργασίας της UNESCO (WP/WLI, 1994) *(Σταυροπούλου, 2009)*

1.6.2 Κατασκευή χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Η χαρτογράφηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο, που βασίζεται στην αποτύπωση (υπό κατάλληλες χωρικές μονάδες) της χωρικής πιθανότητας εμφάνισης κατολισθητικών φαινομένων (Brabb, 1984). Ο σκοπός της συγκεκριμένης χαρτογράφησης είναι η αναγνώριση των περιοχών που είναι επιρρεπής σε μελλοντικές κατολισθήσεις και είναι βασισμένη σε: (α) παλαιότερες καταγραφές κατολισθήσεων της περιοχής, οι οποίες καταχωρούνται σε μια βάση δεδομένων (γεωβάση), (β) εδαφικές και γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, και (γ) ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον (Brenning, 2005). Στην κατασκευή τέτοιου είδους χαρτών υπεισέρχεται και ο όρος «ζωνοποίηση», κατά την οποία οριοθετείται ένα τμήμα της γήινης επιφάνειας και ταξινομείται με βάση τον βαθμό του υπαρκτού ή του δυνητικού κινδύνου από κατολισθητικά φαινόμενά (ή και γενικότερα από φυσικές καταστροφές), λαμβάνοντας υπόψιν και τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εδαφικές μετακινήσεις της περιοχής (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Τα σύγχρονα μοντέλα κατολισθητικής επιδεκτικότητας γίνονται ολοένα και πιο έγκυρα καθώς οι κατολισθήσεις καταγράφονται και επομένως, ο βαθμός ακρίβειας των μοντέλων αυτών αυξάνεται επειδή τα μοντέλα αυτά βασίζονται κυρίως σε συνθήκες που έχουν εκδηλωθεί προηγούμενες κατολισθήσεις (Fall, et al., 2006). Η εκτίμηση του βαθμού κινδύνου μιας κατολίσθησης εξαρτάται από το πλήθος των παραμέτρων που οδηγούν σε αστάθεια και τον τρόπο αλληλεπίδρασης και διαφοροποίησης τους. Η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) συμβάλλει καθοριστικά στην επεξεργασία των στοιχείων και την σχεδίαση χαρτών επιδεκτικότητας.



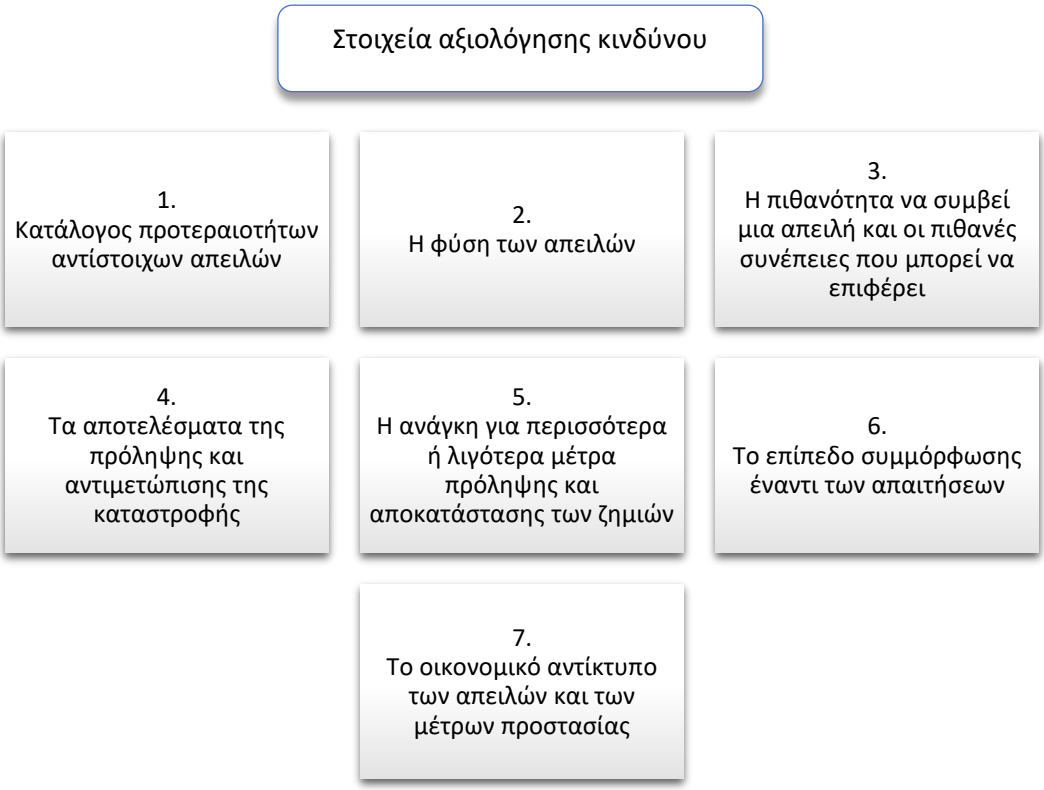
Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής από αναλύσεις κατολισθητικού κινδύνου στο περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) *(Fall, et al., 2006)*

Ωστόσο η κατασκευή ενός χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας δεν αποτελεί μόνο σύνθεση και σύγκριση διαφόρων παραγόντων ως προς τη χωρική κατανομή μιας περιοχής αλλά και ως προς τη χρονική. Επομένως, έχουμε ένα διμεταβλητό δυναμικό σύστημα χώρου – χρόνου. Από τα παραπάνω είναι κατανοητό ότι η χωροχρονική πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι μια περεταίρω δύσκολη διαδικασία, επειδή πρέπει να συνυπολογιστούν στατικοί και δυναμικοί παράγοντες που σχετίζονται με παραμέτρους όπως: (α) η διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, (β) η υδαταγωγιμότητα, (γ) η κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, (δ) η σεισμική δραστηριότητα κλπ. Όμως η έλλειψη επαρκών καταγραφών στις βάσεις δεδομένων καθώς και η απρόβλεπτη εξέλιξη μια κατολίσθησης (π.χ. διαφορετικός μηχανισμός εκδήλωσης κατά την επαναδραστηριοποίησή της) καθιστούν ακόμα πιο πολύπλοκη τη διαδικασία κατασκευής χαρτών επιδεκτικότητας (Krassakis & Loupasakis, 2018).

Για να διεξαχθεί μια έγκυρη έρευνα για την εξάπλωση και κατανομή των κατολισθήσεων πρέπει να ληφθούν υπόψιν, εκτός από τα παραπάνω που αναφέραμε, η τρωτότητα

(vulnerability), η διακινδύνευση (risk) και ο συνολικός κίνδυνος (total risk) που μπορεί να διατρέξει η περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007):

- Η *τρωτότητα (vulnerability)* είναι ο βαθμός που αντιπροσωπεύει το πόσο καταστροφικές ήταν οι επιπτώσεις της κατολίσθησης σε αυτή την περιοχή και εκφράζεται συγκριτικά με κλίμακα από 0 (καμία βλάβη) έως 1 (ολική βλάβη).
- Η *διακινδύνευση (risk)* είναι η πιθανότητα να εκδηλωθεί ένας κίνδυνος, όπως μια κατολίσθηση, ο οποίος θα έχει καταστροφικές συνέπειες.
- Ο συνολικός κίνδυνος (total risk) είναι ο αναμενόμενος αριθμός θυμάτων, τραυματισμών, υλικών βλαβών που οφείλεται σε ένα φυσικό φαινόμενο (π.χ. μια κατολίσθηση) και εκφράζεται με το σύνολο των γινομένων της τρωτότητας, της έκθεσης και του κινδύνου.



Εικόνα 12: Στοιχεία αξιολόγησης κινδύνου (Πηγή: https://www.humanrisks.com/blog/2019/11/14/what-to-include-in-a-risk-assessment)

Κεφάλαιο 2ο - Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.)

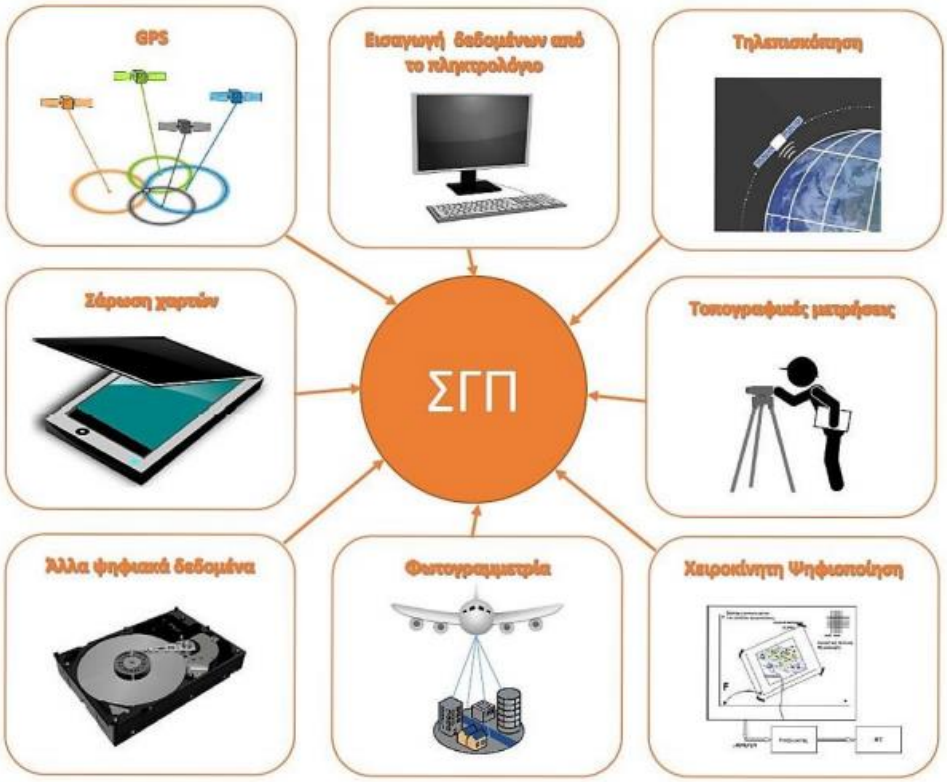
2.1 Εισαγωγή

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS) είναι σύγχρονα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χαρτών που αποσκοπούν στην μελέτη της γήινης επιφάνειας. Ειδικότερα, αποτελούν λογισμικά που αξιοποιούν τις δυνατότητες των υπολογιστών για αποθήκευση, επεξεργασία (ανάλυση και διαχείριση) και παρουσίαση αποτελεσμάτων που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την γεωγραφική κατανομή τους (Ευελπίδου, et al., 2008). Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας και των επιστημών η χρήση αυτών των λογισμικών δεν σταματά μόνο στην μελέτη της γήινης επιφάνειας. Πλέον με τα λογισμικά αυτά πραγματοποιούνται χαρτογραφήσεις και κατασκευάζονται χάρτες για την επιφάνεια και το ανάγλυφο άλλων πλανητών.

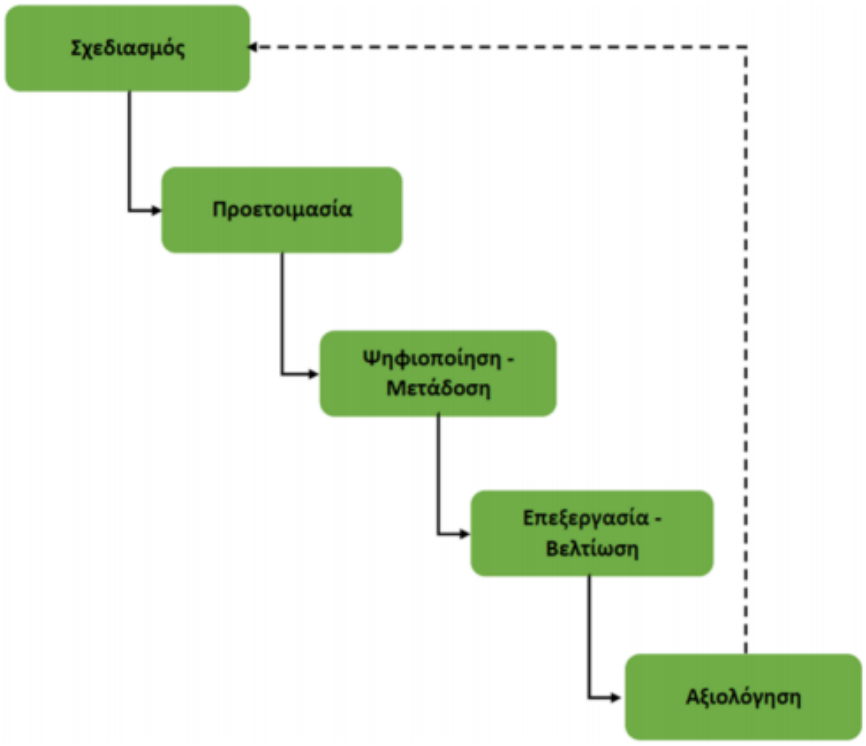
Πίσω από μια GIS εφαρμογή, η οποία πρέπει να καλύπτει συγκεκριμένες απαιτήσεις, έπεται μια σειρά ενεργειών, από την συλλογή δεδομένων έως και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας εφαρμογής GIS είναι τα εξής (Ευελπίδου, et al., 2008):

- *Συλλογή δεδομένων:* Το πρώτο και πολύ σημαντικό βήμα για την έναρξη μιας μελέτης με την χρήση των λογισμικών GIS, διότι τα πρωτογενή στοιχεία που θα εισαχθούν στην GIS εφαρμογή θα πρέπει είναι ακριβή για την εγκυρότητα της εκάστοτε μελέτης. Οι πηγές των πρωτογενών γεωγραφικών δεδομένων είναι: (α) αναλογικοί χάρτες, (β) δορυφορικές εικόνες, (γ) αεροφωτογραφίες, (δ) τοπογραφικές μετρήσεις, και (ε) άλλες πηγές γεωγραφικών δεδομένων (κρατικοί οργανισμοί, ιδιωτικοί φορείς, κλπ.) (Κάβουρας, et al., 2015).
- *Κωδικοποίηση και Εισαγωγή δεδομένων:* Αφού τα πρωτογενή στοιχεία πιστοποιηθούν ως προς την αξιοπιστία και την πληρότητά τους μέσω μεθόδων διόρθωσης και επεξεργασίας αυτών, τα στοιχεία αυτά κωδικοποιούνται στην εφαρμογή GIS με διάφορους μεθόδους, όπως η ψηφιοποίηση.

- *Αποθήκευση δεδομένων:* Είναι η πιο σημαντικότερη διαδικασία, κατά την οποία αποφεύγεται το λάθος της πολλαπλής καταγραφής.
- *Ανάκτηση και Διαχείριση δεδομένων:* Ο χρήστης μπορεί να ορίζει ποια πεδία από την βάση δεδομένων πρέπει να εμφανίζονται, όταν ζητούνται πληροφορίες για τα αντικείμενα ενός επιπέδου (layer). Επομένως, μέσω της βάσης δεδομένων ο χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται τα χαρακτηριστικά πεδία που διαθέτει το κάθε επίπεδο.
- *Επεξεργασία και Ανάλυση δεδομένων:* Σε αυτό το βήμα γίνονται οι επεξεργασίες και αναλύσεις των δεδομένων που χρειάζονται για το τελικό πόρισμα της μελέτης.
- *Απεικόνιση δεδομένων:* Το τελικό βήμα που αποσκοπεί είτε στην κατασκευή χαρτών, είτε στην απεικόνιση δεδομένων με άλλον τρόπο (εκτυπωτές, plotters).



Εικόνα 13: Τεχνικές συλλογής γεωγραφικών δεδομένων (Κάβουρας, 2015)



Εικόνα 14: Τα στάδια συλλογής γεωγραφικών δεδομένων (Κάβουρας, 2015)

Γενικά, τα συστήματα GIS αποτελούν μια άμεση λύση χωρικών και ποσοτικών προβλημάτων. Για παράδειγμα, η χωροθέτηση ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας και η βαθμονόμηση του κινδύνου εδαφικών υποχωρήσεων είναι πολύ σημαντική για την τοπική κοινωνία προκειμένου να αποφευχθούν ανθρώπινες και υλικές απώλειες – ζημιές. Επομένως, ένα λογισμικό GIS για να επιλύσει σωστά ποιοτικά και ποσοτικά ένα πρόβλημα ακολουθούνται τα εξής βήματα (Krassakis & Loupasakis, 2018):

1. Καθορισμός του προβλήματος με σαφήνεια.
2. Μετατροπή των πρωτογενών στοιχείων σε δεδομένα.
3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων & δημιουργία συμπερασμάτων.

Εικόνα 15: Συστατικά στοιχεία ενός ΣΓΠ (Κάβουρας, 2015).

2.2 Είδη Γεωγραφικών Δεδομένων

Στα λογισμικά GIS υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες δεδομένων: (α) *τα χωρικά δεδομένα* (π.χ. γεωγραφικές συντεταγμένες μιας θέσης), και (β) *τα ποιοτικά, θεματικά ή περιγραφικά δεδομένα* και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Ευελπίδου, et al., 2008):

- *Ονομαστική (nominal):* Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι ονομαστικές τιμές.
- Για παράδειγμα, η ιδιότητα «χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης» μπορεί να πάρει τις τιμές Ελλάδα, Ιταλία, Γαλλία κλπ.
- *Τακτική (ordinal):* Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ονομαστικές τιμές αλλά τα δεδομένα κατέχουν μια ταξική ιδιότητα. Για παράδειγμα, η ιδιότητα «πάχος του εδάφους» λαμβάνει τις τιμές πολύ ρηχό, ρηχό, παχύ, πολύ παχύ, κλπ.
- *Κατά διαστήματα (interval):* Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι αριθμοί που έχουν και την τακτική ιδιότητα όπως η έκταση της ακτογραμμής των χωρών της Ευρώπης, και επίσης οι τιμές των ακτογραμμών μετριούνται ως προς ένα μέγεθος αναφοράς (πχ. χιλιόμετρα, μέτρα, κλπ.) σύμφωνα με την τακτική σχέση που έχουν μεταξύ τους.

- *Αναλογική (ratio):* Σε αυτήν την κατηγορία ορίζεται ένα απόλυτο μηδενικό σημείο έναρξης στην καταχώρηση τιμών όπως στην ιδιότητα του υψομέτρου, όπου θεωρούμε σαν απόλυτο υψόμετρο 0 την μέση στάθμη της θάλασσας.

Περαιτέρω, τα δεδομένα ενός λογισμικού GIS, **ανάλογα με την φύση τους** διακρίνονται σε *διακριτά ή αριθμητικά* (όπως ο πληθυσμός) και *συνεχή ή αναλογικά* (όπως το υψόμετρο, κλπ.). Επίσης, **ανάλογα με τις διαστάσεις τους στον χώρο**, τα δεδομένα διακρίνονται σε *σημειακά* (υψομετρικά σημεία), *γραμμικά* (ρήγματα, οδικό δίκτυο, κλπ.), και *επιφανειακά* (γεωλογικοί σχηματισμοί, χρήσεις γης, κλπ.).

2.3 Είδη Απεικόνισης

Τα GIS βάσει του τρόπου επεξεργασίας και καταχώρισης των γεωγραφικών στοιχείων χωρίζονται σε *Raster* (εικονοκυτταρικά) και *Vector* (διανυσματικά). Αυτά τα δύο είδη απεικόνισης έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά στην αρχή λειτουργίας και στην επεξεργασία τους. Ωστόσο, υπάρχουν αλγόριθμοι μετατροπής από τον έναν τύπο στον άλλον μέσα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του GIS, αλλά και άλλα λογισμικά μετατροπής αυτών (Ευελπίδου, et al., 2008).

2.3.1 Διανυσματικό Μοντέλο (Vector)

Τα Vector δεδομένα αποτελούν τα γεωγραφικά δεδομένα που αντιπροσωπεύονται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες πάνω σε ένα ή περισσότερα επίπεδα πληροφορίας. Για να εισαχθεί ένα γεωγραφικό δεδομένο διανυσματικού τύπου θα πρέπει να καθοριστεί (Ευελπίδου, et al., 2008):

- Η φύση του (π.χ. γραμμή).
- Η θέση στο χώρο με γεωγραφικές συντεταγμένες αρχικού και τελικού σημείου [(x_1, y_1), (x_2, y_2)].
- Τα σημεία αλλαγής της διεύθυνσης της γραμμής (nodes), και
- Τα σημεία από τα οποία αποτελείται.

2.3.2 Εικονοκυτταρικό ή Ψηφιδωτο Μοντέλο (Raster)

Ένα Raster δεδομένο εκφράζεται με τη μορφή στοιχειωδών εικονοστοιχείων “Pixels”. Ένα παράδειγμα Raster δεδομένου είναι μια ψηφιακής μορφής αεροφωτογραφία. Το μοντέλο Raster μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση μιας συνεχούς μεταβλητής, όπως ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) (Ευελπίδου, et al., 2008).

Εικόνα 16: Απεικόνιση της νήσου Κρήτης και μικρότερων νησιών (Γάβδος, Χρυσή και Δία) με μορφή δορυφορικής εικόνας (Raster) από τους δορυφόρους Copernicus Sentinel 1.
(https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/Crete_Greece?fbclid=IwAR2_raKsxVSDkabeB7S5sbNju9xFtG48CsQReIr0QNFif6H2dBtvEFqOLFY **)**

2.4 Βάσεις δεδομένων

Στις μέρες μας, διάφοροι οργανισμοί καθώς κρατικοί και μη φορείς αποθηκεύουν τα πρωτογενή δεδομένα από GIS εφαρμογές σε ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων, ένα ειδικό λογισμικό που έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται την πρόσβαση πολλών χρηστών σε ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων (Longley, et al., 2010). Επομένως, είναι εύλογο να θεωρήσουμε ότι μια βάση δεδομένων είναι το πιο σημαντικό μέρος ενός συστήματος GIS, διότι αποτελεί την βασική πηγή πληροφοριών για την ανάλυση και την διαδικασία λήψης

αποφάσεων, και αφού αποτελεί την κύρια πηγή δεδομένων οφείλει να είναι και λειτουργική. Ειδικότερα μια βάση δεδομένων για να είναι λειτουργική πρέπει (Krassakis & Loupasakis, 2018): (α) τα δεδομένα να είναι σχετιζόμενα (με λογική συνοχή), (β) να κατασκευάζεται με συγκεκριμένο θεματικό περιεχόμενο, και (γ) να αποτελεί ένα σύνολο ενεργειών του πραγματικού κόσμου.

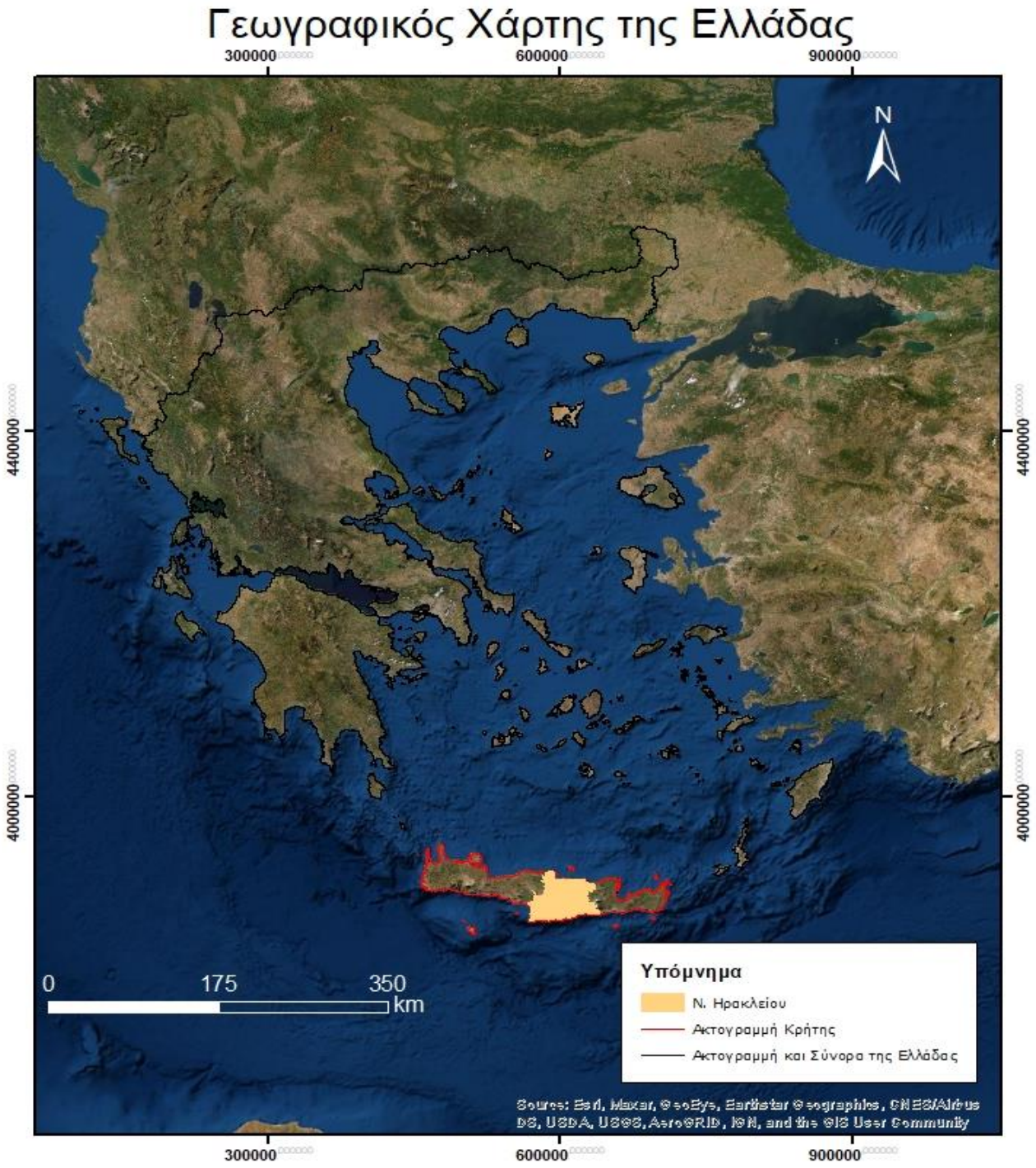
Στην περίπτωση που μια βάση δεδομένων συντελείται από περιγραφική και γεωγραφική πληροφορία, τότε ονομάζεται χωρική βάση δεδομένων (Krassakis & Loupasakis, 2018). Ανάλογα με την φύση της πληροφορίας που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε σε μια έρευνα με εφαρμογές GIS καθορίζονται και τα περιγραφικά χαρακτηριστικά μιας βάσης δεδομένων. Τις περισσότερες φορές τα περιγραφικά χαρακτηριστικά είναι πολυάριθμα και έτσι προτιμάται η κωδικοποίηση των περιγραφικών χαρακτηριστικών για λόγους κυρίως ευκολίας διαχείρισης αυτών των δεδομένων (Ευελπίδου, et al., 2008). Για παράδειγμα, μια χωρική βάση δεδομένων για τις χρήσεις γης της νήσου Κρήτης περιέχει περιγραφικά δεδομένα (π.χ. αεροδρόμιο, λιμάνι, κωνοφόρα δέντρα, κλπ.) και γεωγραφικά, δηλαδή την γεωγραφική εξάπλωση στον χώρο της κάθε χρήσης και για χάριν ευκολίας κωδικοποιούνται τα περιγραφικά χαρακτηριστικά κρατώντας την ιδιότητα «χρήσεις γης». Για παράδειγμα, ο κωδικός 312, στην βάση δεδομένων των χρήσεων γης Corine LC 2018, αντιστοιχεί στην εξάπλωση των κωνοφόρων δέντρων.

Κεφάλαιο 3ο – Η περιοχή μελέτης

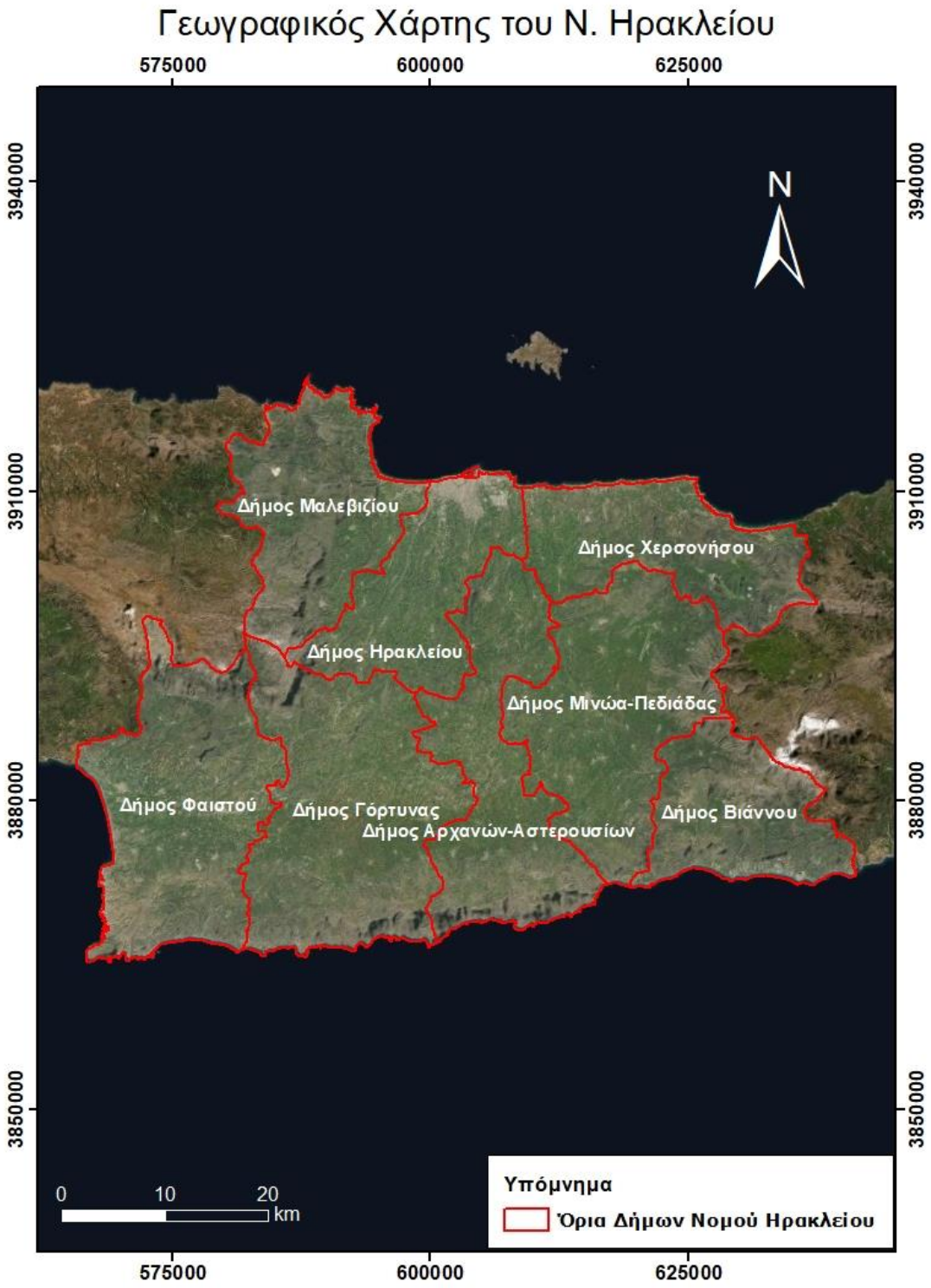
3.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νησί της Κρήτης, που αποτελεί το νοτιότερο νησί της Ελλάδας και βρίσκεται τοποθετημένη στα όρια του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου (προ-τόξο) στο νότιο Αιγαίο Πέλαγος όπου η Αφρικανική τεκτονική πλάκα υποβυθίζεται κάτω από την ανερχόμενη Ευρασιατική (πάνω στην οποία εμφανίζεται η Κρήτη). Η θέση αυτή χαρακτηρίζεται ως Ελληνική ζώνη υποβύθισης. (Sarris, et al., 2005; Ganas, 2017; Zygouri, et al., 2016). Η περιοχή βρίσκεται κλεισμένη μεταξύ τεσσάρων θαλασσών: το Κρητικό Πέλαγος στο Βορρά, το Λιβυκό Πέλαγος στο νότο, το Μυρτώο Πέλαγος στη Δύση και το Καρπάθιο Πέλαγος στην Ανατολή (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011), ενώ εμφανίζεται μεταξύ των ορίων των ηπείρων της Ευρώπης, της Αφρικής και της Ασίας (Sarris, et al., 2005).

Η Κρήτη χωρίζεται σε τέσσερις μεγάλους νομούς από δυτικά προς τα ανατολικά: Χανιών, Ρεθύμνου, Ηρακλείου και Λασιθίου, με την περιοχή του νομού Ηρακλείου που εξετάζεται να καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του νησιού. Αναλυτικότερα, ο νομός Ηρακλείου αποτελείται από 8 δήμους (Δήμος Μαλεβιζίου, Δήμος Ηρακλείου, Δήμος Χερσονήσου, Δήμος Φαιστού, Δήμος Γόρτυνας, Δήμος Αρχάνων – Αστερουσιών, Δήμος Μινώα – Πεδιάδας και Δήμος Βιάννου) και περιλαμβάνει αρκετές κατοικήσιμες περιοχές και οικισμούς όπως, ανεπτυγμένες πόλεις, με κυριότερη την πρωτεύουσα του νησιού, το Ηρακλείου και χωριά όπως η Αγία Βαρβάρα, οι Επάνω Αρχάνες, οι Μοίρες και τα Μάλια. Σε σχέση με τους υπόλοιπους νομούς, θεωρείται ο πιο πυκνοκατοικημένος με συνολικό μόνιμο πληθυσμό 305.490 κατοίκους, σύμφωνα με στατιστικά απογραφής της ΕΛΣΤΑΤ το 2011, και έχει έκταση 2.641 τετραγωνικά χιλιόμετρα. (Ροδιτάκη, 2011).



Εικόνα 17: Η θέση της Κρήτης στην Ελλάδα



Εικόνα 18: Ο Νομός Ηρακλείου και οι δήμοι που τον απαρτίζουν

3.2 Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

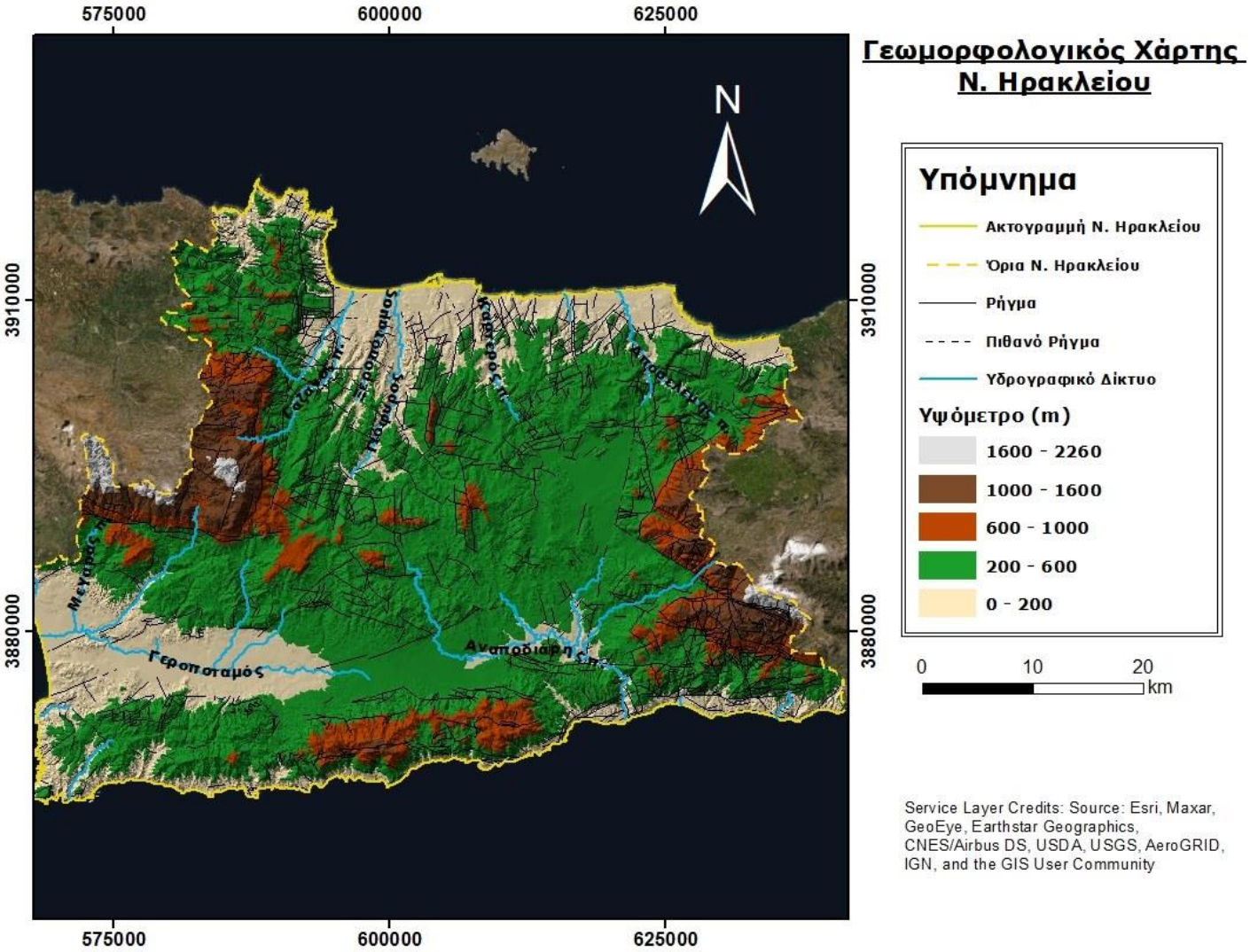
Γενικά, το μορφολογικό ανάγλυφο της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως ορεινό, καθώς απαρτίζεται από αρκετούς ορεινούς όγκους. Πιο συγκεκριμένα, το νησί συντελείται από μία οροσειρά η οποία έχει υποστεί τεκτονικό διαχωρισμό σε διαφορετικές οροσειρές με τη μορφή ραχών μεταξύ τον οποίων εντοπίζονται τεκτονικές κοιλάδες. Αυτές οι επιμέρους οροσειρές αποτελούν προς τα δυτικά τα Λευκά Όρη (2.454 μ.), προς το κεντρικό τμήμα του νομού την οροσειρά της Ίδης (2.456 μ.) ή αλλιώς Ψηλορείτης (Sarris, et al., 2005) και προς τα ανατολικά το όρος Δίκτη – Σέλενα (2.147 μ.), εκ των οποίων οι οροσειρές Ίδης και Δίκτης δομούν το νομό του Ηρακλείου που μελετάται. Επιπλέον, οι προαναφερθείσες οροσειρές χωρίζουν δύο μεγάλες πεδιάδες εντός της περιοχής μελέτης οι οποίες αποτελούν την λεκάνη του Ηρακλείου που εμφανίζεται στο βόρειο τμήμα του νομού οριοθετημένη από το όρος του Ψηλορείτη και της οροσειράς του Δίκτη και στην οποία φιλοξενείται η πόλη του Ηρακλείου και η πεδιάδα της Μεσαράς στο νότιο και δυτικό τμήμα του νομού (Ροδιτάκη, 2011; Fassoulas, 2001; Πολυχρονάκη, et al., 2009).

Στην μεγαλύτερη έκταση του νομού Ηρακλείου το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται ως λοφώδες κυρίως στο κεντρικό τμήμα, στα όρια του νομού δυτικά και ανατολικά χαρακτηρίζεται ως ορεινό, στα νότια ημιορεινό και στα βόρεια κυρίως στην πόλη του Ηρακλείου χαρακτηρίζεται ως πεδινό. Η περιοχή παρουσιάζει έντονη μεταβολή των μορφολογικών κλίσεων από τα περιθώρια προς το κέντρο και προς τις λεκάνες του Ηρακλείου και της Μεσαράς. Ειδικότερα, στις περιοχές των ορεινών όγκων Ίδη στα ΒΔ, Δίκτη στα ανατολικά και της οροσειράς των Αστερουσίων νότια παρατηρούνται μέτριες έως έντονες μορφολογικές κλίσεις της τάξης 15 – 45° (κατά θέσεις παρουσιάζονται και κλίσεις έως > 61°), στο κεντρικό τμήμα της περιοχής οι κλίσεις θεωρούνται μέτριες έως χαμηλές με τιμές από 6 - 30°, ενώ στις πεδιάδες του νομού που προαναφέρθηκαν επικρατούν ήπιες κλίσεις από 0 - 15°.

Το υδρογραφικό δίκτυο του νησιού θεωρείται πυκνό προς τα δυτικά και σταδιακά γίνεται πιο αραιό προς τα ανατολικά. Ειδικότερα, στην περιοχή μελέτης το υδρογραφικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα πλούσιο στην λεκάνη του Ηρακλείου λόγω των νεογενών αποθέσεων και το λοφώδες ανάγλυφο (Πολυχρονάκη Α., 2009). Στην γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής έχει συμβάλλει σημαντικά το υδρογραφικό δίκτυο ως εξωγενής παράγοντας, που παρόλο που είναι αρκετά πυκνό αποτελείται κυρίως από εποχικούς ποταμούς (χειμάρρους). Χαρακτηριστικό των ποταμών με χειμαρρώδη χαρακτήρα είναι η αποσάθρωση και η διάβρωση των ελεύθερων

εδαφικών υλικών από τις θέσεις απότομου αναγλύφου, όπως είναι οι ορεινοί όγκοι και κατά συνέπεια η μεταφορά τους μέσω της κοίτης του χειμάρρου προς τις θέσεις ήπιου αναγλύφου (λεκάνες Ηρακλείου και Μεσαράς), όπου και αποτίθενται (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Με αυτόν τον τρόπο στις ορεινές ζώνες απομένουν τα αρχαιότερα και πιο ανθεκτικά στην διάβρωση πετρώματα, όπου διατηρείται και η απότομη μορφολογία, ενώ τα μεταφερόμενα ιζήματα που μεταφέρονται στις κοιλάδες σχηματίζουν ομαλή μορφολογία.

Η επιφανειακή απορροή στις λεκάνες του νομού Ηρακλείου πραγματοποιείται με ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ποταμών μικρού μεγέθους με τους ποταμούς Γιόφυρο στη λεκάνη του Ηρακλείου και Γεροπόταμο στην πεδιάδα της Μεσαράς να αποτελούν τους σημαντικότερους από αυτούς (Ροδιτάκη, 2011). Κατά θέσεις κυρίως μέσα στην λεκάνη του Ηρακλείου το υδρογραφικό δίκτυο ακολουθεί την τεκτονική με τους μεγάλης τάξης κλάδους να είναι παράλληλοι στα ρήγματα με διευθύνσεις Β – Ν, ΒΒΑ – ΝΝΔ και ΒΒΔ – ΒΒΑ και οι μικρότερης τάξης κλάδοι ακολουθούν τα ρήγματα με διεύθυνση Α – Δ, ΒΑ – ΝΔ και ΒΔ – ΝΑ (Kokinou, et al., 2013).



Εικόνα 19: Γεωμορφολογικός χάρτης του Νομού Ηρακλείου

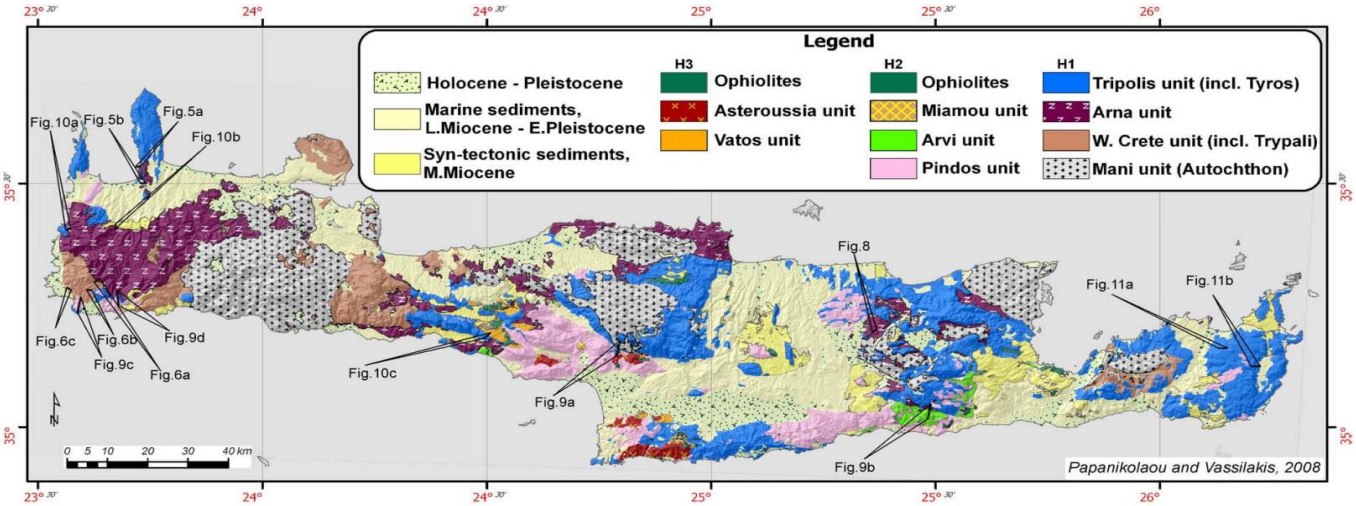
3.3 Στοιχεία γεωλογίας της Κρήτης και του νομού Ηρακλείου

Γενικά, η γεωλογία της Ελλάδας περιλαμβάνει σχηματισμούς που αποτέθηκαν/σχηματίστηκαν τόσο πριν, κατά τη διάρκεια όσο και μετά το πέρας της Αλπικής ορογένεσης, οι οποίοι χωρίζονται σε τεκτονικά μπλοκ/ενότητες με όμοια χαρακτηριστικά ανάλογα με τις λεκάνες ιζηματογένεσης στις οποίες σχηματίστηκαν. Η γενική εικόνα παρουσιάζει τις προαλπικές και αλπικές ενότητες/σχηματισμούς ως τις στρωματογραφικά κατώτατες και κατώτερες, αντίστοιχα, να υπόκεινται τεκτονικά των μεταλπικών ενοτήτων. Αυτό παρατηρείται και στο νησί της Κρήτης, που ανήκει στις εξωτερικές Ελληνίδες και στην εξωτερική τεκτονομεταμορφική ζώνη, όπου οι αλπικές και προαλπικές ενότητες διαφοροποιούνται σε τρείς σειρές τεκτονικών καλυμμάτων οι οποίες περιλαμβάνουν (van Hinsbergenn & Meulenkamp, 2006; Sarris, et al., 2005; Papanikolaou & Vassilakis, 2010):

- **Την κατώτερη σειρά**
  Η σειρά αυτή απαντάται ως το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της περιοχής και περιλαμβάνει την ενότητα Κρήτης - Μάνης (γνωστή και ως Plattenkalk, ενώ αντιστοιχεί σε μεταμορφωμένη εκδοχή της Ιόνιας ενότητας), την ενότητα Τρυπαλίου και την ενότητα Φυλλιτών-Χαλαζιτών (γνωστή και ως Άρνα, ενώ αποτελεί και την μεταμορφωμένη εκδοχή της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης).
- **Την ανώτερη σειρά**
  Οι γεωτεκτονικές ενότητες που ανήκουν στα ανώτερα στρώματα βρίσκονται επωθημένες πάνω στους σχηματισμούς της κατώτερης σειράς και περιλαμβάνει την ενότητα Γαβρόβου - Τρίπολης και την ενότητα Πίνδου – Εθιάς.
- **Τα ανώτερα καλύμματα Κρήτης**
  Το συγκρότημα αυτό αποτελεί μια σειρά καλυμμάτων/λεπιώσεων που βρίσκεται επωθημένη πάνω από την κατώτερη και την ανώτερη σειρά και περιλαμβάνει τις ενότητες της Άρβης, του Βάτου, του Μιαμού, του Πρέβελη, του Σπηλίου και των Αστερουσίων (Σκούρτσος & Σούκης, 2018).

Πάνω από τα αλπικά και τα προαλπικά καλύμματα έχει τοποθετηθεί οφιολιθικό κάλυμμα το οποίο με τη σειρά του υπόκειται μίας σειράς μεταλπικών και νεογενών καλυμμάτων/σχηματισμών. Τα τελευταία δομούν το εσωτερικό των ενδιάμεσων λεκανών του

νησιού και περιλαμβάνουν τον σχηματισμό της Πρίνας, τον σχηματισμό Τεφελίου, τον σχηματισμό Βρυσών, τον σχηματισμό Ελληνικού, τον σχηματισμό Φοινικιάς και τον σχηματισμό Αγίας Γαλήνης. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; van Hinsbergenn & Meulenkamp, 2006; Fassoulas, 2001; Papanikolaou & Vassilakis, 2010).



Εικόνα 20: Απεικόνιση γεωλογικού χάρτη που δείχνει τις εμφανίσεις των γεωτεκτονικών ενοτήτων που δομούν το νησί της Κρήτης. *(Papanikolaou & Vassilakis, 2010)*

Για το λόγο ότι την περιοχή μελέτης και ενδιαφέροντος αποτελεί ο νομός Ηρακλείου, ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση των γεωτεκτονικών ενοτήτων από τις οποίες απαρτίζεται η γεωλογική του δομή από τα κατώτερα στρώματα που αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής μέχρι τα ανώτερα καλύμματα και τα μεταλπικά.

3.3.1 Η Ενότητα Κρήτης – Μάνης

Το υπόβαθρο της περιοχής δομείται από την ενότητα Μάνης, η οποία είναι μια ελαφρώς μεταμορφωμένη ενότητα ανθρακικής και κλαστικής ιζηματογενέσης. Συγκεκριμένα, η ενότητα αυτή αποτελείται από φυλλίτες, σχιστόλιθους, χαλαζίτες και μετακλαστικά του Λιθανθρακοφόρου-Περμίου (στρώματα Γαληνού) που μεταβαίνουν σε νηριτικούς βιτουμενιούχους ασβεστόλιθους και δολομίτες του ανώτερου Περμίου (στρώματα Φόδελε). Πάνω από αυτά, στο Σκύθιο αποτίθενται τα στρώματα Σισσών με κλαστικούς δολομίτες/ασβεστόλιθους και σερικιτικά μάρμαρα και ακολουθεί ο στρωματολιθικός δολομίτης της επίκλυσης του Νορίου. Από πάνω εμφανίζονται στο Νόριο-Ραίτιο σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με δολομίτες και ανθρακικά πετρώματα (στρώματα Γκιγκίλου) που υπόκεινται

της μεσοιουρασικής σειράς πλακωδών ασβεστολίθων (μεταμόρφωση HP-LT - van Hinsbergenn & Meulenkamp, 2006), η οποία από κάτω προς τα πάνω χαρακτηρίζεται από τους φυλλίτες Καστανιάς, συμπαγή λευκά μάρμαρα, σχιστόλιθους με χαλαζίτες, χαρακτηριστικούς πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και κλαστικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους Σενώνιου, πολύχρωμα σιπολινομάρμαρα (Σκούρτσος & Σούκης, 2018). Ο στρωματογραφικά ανώτερος σχηματισμός της ενότητας είναι ελαφρά μεταμορφωμένος Ολιγοκαινικός φλύσχης Καλάβρου. Η ενότητα αυτή παρατηρείται κυρίως στην κεντρική Κρήτη να δομεί τις οροσειρές αυτής, κυρίως στους ορεινούς όγκους του Ψηλορείτη και των Αστερουσίων. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Σκούρτσος & Σούκης, 2018).

3.3.2 Η Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών

Η κατώτερη σειρά αλπικών-προαλπικών στην περιοχή μελέτης κλείνει με την τεκτονικά υψηλότερη ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών που επικάθεται πάνω στο μεταφλύσχη της Μάνης που δρουν ως βάση για την ενότητα της Άρνας. Η ενότητα αυτή έχει χωριστεί σε δύο μέρη, στο κατώτερο και το ανώτερο τμήμα, εκ των οποίων το κατώτερο τμήμα απαρτίζεται από γύψους, δολομίτες και χαλαζίτες του ανώτερου Λιθανθρακοφόρου – ανώτερου Τριαδικού-Λιάσιου, ενώ το ανώτερο τμήμα περιλαμβάνει μεταϊζηματογενή πετρώματα όπως σχιστόλιθους, φυλλίτες, χαλαζίτες, μετα-κροκαλοπαγή και μετα-ηφαιστειακά πετρώματα. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Σκούρτσος & Σούκης, 2018).

3.3.3 Η Ενότητα Γαβρόβου – Τρίπολης

Μέσω τεκτονικής αποκόλλησης παρατηρείται η ενότητα Γαβρόβου - Τρίπολης τοποθετημένη πάνω από την ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών της κατώτερης σειράς αλπικών-προαλπικών σχηματισμών. Η ενότητα αυτή αποτελεί την κατώτερη ενότητα της ανώτερης σειράς αλπικών-προαλπικών σχηματισμών (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Papanikolaou & Vassilakis, 2010; van Hinsbergenn & Meulenkamp, 2006). Η ενότητα Γαβρόβου - Τρίπολης αποτελεί μία νηριτική ανθρακική πλατφόρμα που περιλαμβάνει μια Τριαδική βάση μετα-ηφαιστειο-ιζηματογενών πετρωμάτων (Ραβδούχα στρώματα) που ακολουθείται από μία σειρά σκουρόχρωμων νηριτικών ασβεστόλιθων και δολομιτών ανώτερου Τριαδικού – Ηωκαίνου και κλείνει με ανω-Ηωκαινικό φλύσχη. Τα ανθρακικά αυτής της ενότητας παρουσιάζουν έντονη

τεκτονική παραμόρφωση και ρηγμάτωση καθώς και έντονη καρστικοποίηση στο κεντρικό τμήμα του νησιού. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Papanikolaou & Vassilakis, 2010; Σκούρτσος & Σούκης, 2018).

3.3.4 Το κάλυμμα Πίνδου – Εθιάς

Η ενότητα Τρίπολης ανώτερα ακολουθείται τεκτονικά από το κάλυμμα της Πίνδου-Εθιάς που αποτελεί μία μεγάλη πελαγική πλατφόρμα πυριτικής και ανθρακικής ιζηματογένεσης με κυριότερες εμφανίσεις στην κεντρική Κρήτη. Στη βάση της παρουσιάζει ένα σχηματισμό τύπου φλύσχη ηλικίας Τριαδικού που από το ανώτερο Τριαδικό μέχρι το μέσο Ιουρασικό (άνω Λιάσιο) ακολουθείται από μια σειρά πυριτιολίθων, κερατόλιθων, πηλιτών και ασβεστολίθων. Από το άνω Λιάσιο μέχρι και το κατώτερο-μέσο Κρητιδικό γίνεται απόθεση πηλιτών, ωολιθικών και λατυποπαγών ασβεστολίθων και ραδιολαριτών (χαρακτηριστικός σχηματισμός της ενότητας Πίνδου) που στο άνω Κρητιδικό καλύπτονται από τον πρώτο φλύσχη της Πίνδου. Τέλος, παρατηρούνται ανωκρητιδικοί-παλαιοκαινικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι που στο ανώτερο Παλαιόκαινο-Ηώκαινο μεταβαίνουν σε φλύσχη που κλείνει την ενότητα. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Σκούρτσος & Σούκης, 2018).

3.3.5 Το τεκτονικό Mélange και τα ανώτερα καλύμματα

Η ανώτερη σειρά αλπικών ενοτήτων καλύπτεται από το τεκτονικό mélange των ανωτέρων καλυμμάτων Κρήτης με τα κατώτερα καλύμματα που επικάθονται πάνω στην ενότητα Πίνδου-Εθιάς να είναι οι *ενότητες Άρβης*, *Βάτου* *και* *Μιαμού* που θεωρούνται ανάλογες μεταξύ τους. Αυτές οι ενότητες αποτελούνται από Τριαδικά ιζηματογενή χαμηλής μεταμόρφωσης (ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, αργίλους) που στο Κρητιδικό μεταβαίνουν σε μετα-ηφαιστειο-ιζηματογενή σχηματοσμό (τύπου άγριου φλύσχη) που κλείνει με φλύσχη. Βάσει των καθηγητών Σκούρτσου και Σούκη (2018) οι ενότητες του Βάτου και Μιαμού αποτελούνται από μεταμορφωμένες λάβες, βασάλτες και ασβεστόλιθους, όμοια με την παραπάνω περιγραφή που συνήθως αποδίδεται στην Άρβη.

Ανώτερα, εμφανίζεται το *κάλυμμα του Σπηλίου* που δομείται από κρυσταλλικούς οφιολιθικούς σερπεντινίτες και αμφιβολίτες και από πάνω ακολουθεί το *κάλυμμα του Πρέβελη* με μετακλαστικά όπως μεταμορφωμένα κροκαλοπαγή και σχιστόλιθους καθώς και μάρμαρα.

Το τελευταίο έχει υποστεί μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών στο Ιουρασικό.

Το τεκτονικό mélange κλείνει με την ανώτερη ανωκρητιδική *ενότητα Αστερουσίων* που φέρει πετρώματα μεταμόρφωσης υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλών πιέσεων όπως αμφιβολίτες, γνέυσιους, μάρμαρα, χαλαζίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους που καλύπτονται από *οφιολιθικό κάλυμμα*. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; Σκούρτσος & Σούκης, 2018; Papanikolaou & Vassilakis, 2010).

Το οφιολιθικό κάλυμμα περιλαμβάνει υπερβασικά και βασικά πετρώματα όπως σερπεντινίτες, περιδοτίτες, γάββρους και δολερίτες, τα οποία είναι έντονα τεκτονισμένα, και η πλήρης ανάπτυξη του εμφανίζεται μόνο στην περιοχή μελέτης με την μορφή απομονωμένων τεκτονικών ράκων ή επωθημένο πάνω στην ενότητα των Αστερουσίων ή πάνω από το τεκτονικό mélange. Η προέλευση και η γεωτεκτονική τοποθέτηση του καλύμματος παραμένει ασαφής και έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες από αρκετούς ερευνητές. Η επικρατέστερη άποψη είναι αυτή του Bonneau (1984) κατά την οποία το κάλυμμα αυτό των βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων επωθήθηκε πάνω στην ενότητα των Αστερουσίων μετά το Άνω Κρητιδικό κατά την κύρια ορογενετική φάση του Ανώτερου Ηωκαίνου - Ολιγοκαινού (Ροδιτάκη, 2011).

3.3.6 Οι Νεογενείς σχηματισμοί

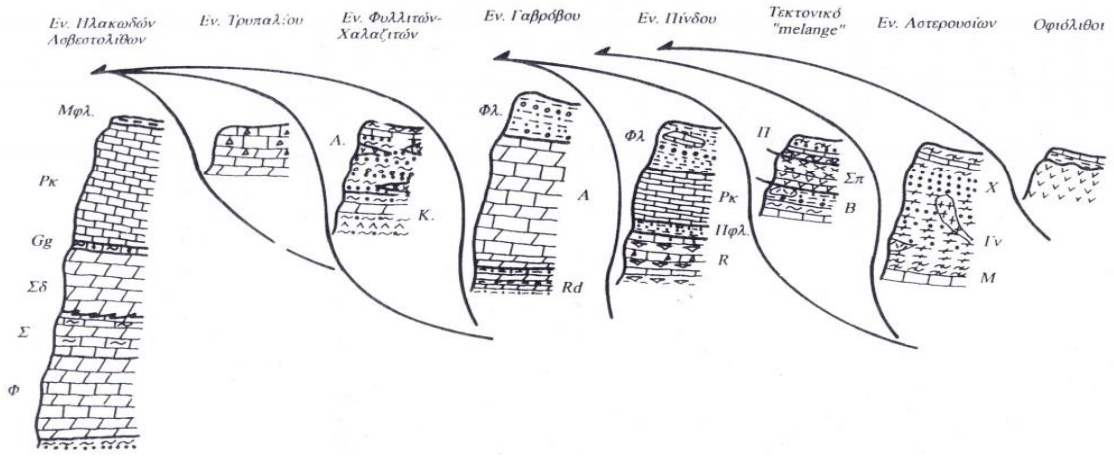
Η γεωλογία της Κρήτης κλείνει με την τοποθέτηση των ανώτερων μεταλπικών-νεογενών σχηματισμών πάνω στους κατώτερους προαναφερμένους σχηματισμούς όπου στη βάση εμφανίζεται ο αρχαιότερος *σχηματισμός της Πρίνας* που περιλαμβάνει κροκαλοπαγή και σκοτεινόχρωμα ασβεστολιθικά λατυποπαγή ρηχού περιβάλλοντος και μεσο-ανω-μειοκαινικής ηλικίας. Στη συνέχεια, παρατηρείται ο *σχηματισμός Τεφελίου* πάνω στην Πρίνα με κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άργιλοι) λιμνοθαλάσσιου-ρηχού θαλάσσιου περιβάλλοντος του Τορτόνιου που ακολουθείται από τους βιοκλαστικούς-υφαλογενείς *σχηματισμούς Βρυσών* όπως ασβεστόλιθους με μαργαϊκές εναλλαγές και εβαπορίτες (Τορτόνιο - Μεσσήνιο). Σε ασυμφωνία πάνω από αυτά τοποθετούνται τα λιμναία-λιμνοθαλάσσια ιζήματα της *ομάδας του Ελληνικού* (όπως κροκαλοπαγή και λεπτοκοκκώδη κλαστικά ιζήματα με γύψους) και στη συνέχεια Πλειοκαινικά μαργαϊκά λατυποπαγή και μάργες με λεπτόκοκκα κλαστικά περιβάλλοντος ανοιχτής θάλασσας του *σχηματισμού των Φοινικιών*. Τέλος, στην "κορυφή" εμφανίζεται ο ανώτερος σχηματισμός της Κρήτης, ο

σχηματισμός της Αγίας Γαλήνης, με ανωπλειοκαινικά - πλειστοκαινικά κλαστικά ιζήματα, ως αποτέλεσμα της διάβρωσης του σχηματισμού του Ελληνικού. (Sarris, et al., 2005; Ροδιτάκη, 2011; van Hinsbergenn & Meulenkamp, 2006; Fassoulas, 2001).

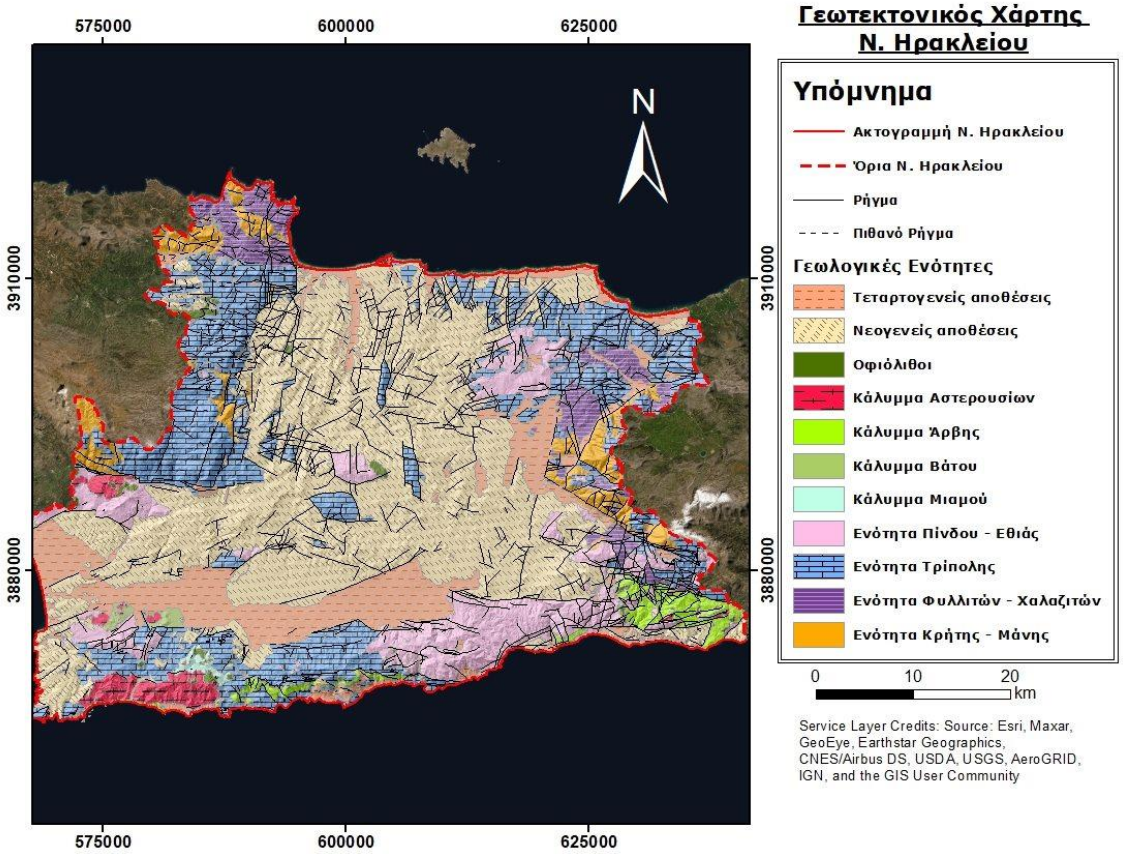
3.3.7 Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί

Τα τεταρτογενή μεταλπικά ιζήματα χωρίζονται σε χερσαία και θαλάσσια. Τα χερσαία αποτελούνται κυρίως από ασύνδετα, χονδροκλαστικά υλικά με την μορφή ποταμοχειμμάριων αποθέσεων, κώνων κορημάτων ή αναβαθμίδων και παρατηρούνται σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην πεδιάδα της Μεσαράς, ενώ τα θαλάσσια αποτελούνται κυρίως από θαλάσσιες αναβαθμίδες και άμμοι Τυρρήνιας ηλικίας και καλύπτουν κυρίως της ακτές της περιοχής μελέτης (Ροδιτάκη, 2011).

Στην **Εικόνα 21** διακρίνεται σχηματική αναπαράσταση της σχετικής τοποθέτησης των ενοτήτων μεταξύ τους.



Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση της τεκτονικής τοποθέτησης των γεωτεκτονικών ενοτήτων που δομούν το νησί της Κρήτης. *(Ροδιτάκη, 2011)*



Εικόνα 22: Γεωτεκτονικός χάρτης του Ν. Ηρακλείου (προβολικό σύστημα: EGSA '87).

3.4 Τεκτονική δομή του Νομού Ηρακλείου

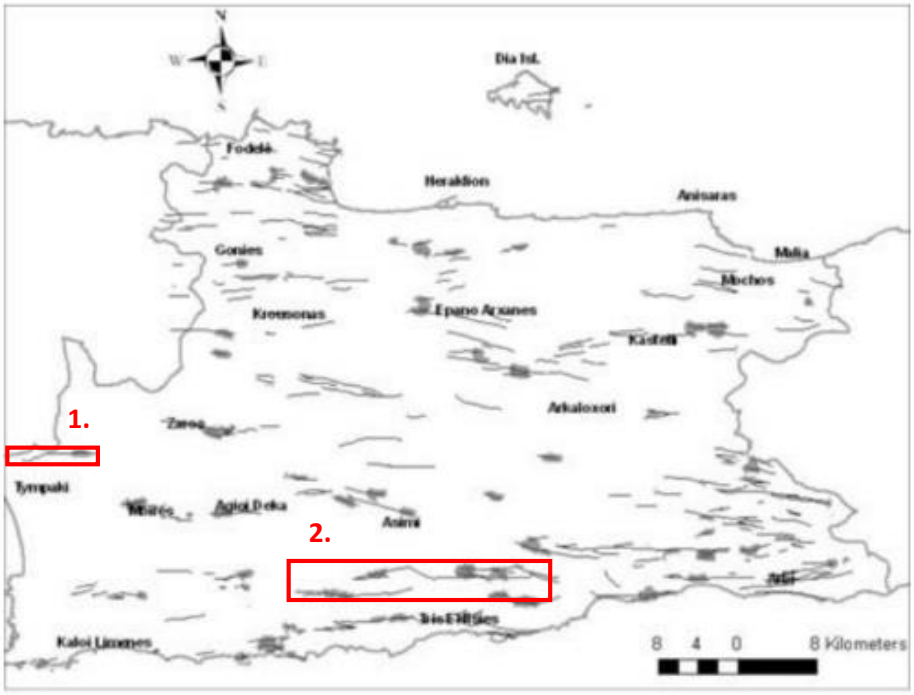
Το νησί της Κρήτης εντοπίζεται στο όριο της ζώνης σύγκλισης τεκτονικών πλακών, όπου η αφρικάνική πλάκα συγκρούεται και υποβυθίζεται κάτω από την ευρασιατική (πάνω στην οποία βρίσκεται η Κρήτη), με αποτέλεσμα να έχει υποστεί σημαντική τεκτονική παραμόρφωση και να αποτελεί μία αρκετά σεισμογενή περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, ολόκληρη η περιοχή ανυψώθηκε τεκτονικά στη διάρκεια του Τεταρτογενούς εξαιτίας της μανδυακής σφήνας που σχηματίστηκε από την υποβύθιση της αφρικανικής πλάκας. Κατά το ανώτερο Τεταρτογενές λαμβάνει χώρα ευστατικό φαινόμενο (που μαρτυράται από τις θαλάσσιες αναβαθμίδες των νότιων ακτών), ενώ τέμνεται από πολλαπλά κανονικά ρήγματα που φέρνουν σε επαφή τα ανθρακικά πετρώματα και τα μεταμορφωμένα του Μεσοζωικού (αλπικοί σχηματισμοί) των ορεινών όγκων με τα νεογενή και τεταρτογενή αλλουβιακά υλικά των κοιλάδων και λεκανών.

(Caputo, et al., 2010).

Ο νομός του Ηρακλείου αποτελεί μια περιοχή με πολύ πυκνή κάλυψη από κανονικά ρήγματα μήκους αρκετών χιλιομέτρων (10-20km), με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από απότομα πρανή στις ορεινές ζώνες και ήπιο ανάγλυφο στις κοιλάδες του Ηρακλείου και της Μεσαράς (Zygouri, et al., 2016). Αναλυτικότερα, τα ρήγματα της περιοχής χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες:

- **Η 1η κατηγορία**

  Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα ρήγματα διεύθυνσης Ανατολής – Δύσης (Α-Δ) (Fassoulas, 2001; Kokinou, et al., 2008) που χαρακτηρίζονται με γωνία κλίσης 80°-110° και άλμα μεγαλύτερο από 200m (Fassoulas, 2001). Τα ρήγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν τα αρχαιότερα ρήγματα της περιοχής και παρατηρούνται να εμποδίζουν/κόβουν ρήγματα διεύθυνσης Βορρά – Νότου (Β-Ν), ενώ οι επιφάνειες τους έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση με αποτέλεσμα να είναι δύσκολα διακριτές (Fassoulas, 2001). Σημαντικά ρήγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν τα ρήγματα Αγίας Γαλήνης (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, **1.**) καθρέφτης ύψους 100m, περιλαμβάνει το σχηματισμό αγίας Γαλήνης στο υποκείμενο τέμαχος και τεταρτογενή αλλούβια στο υπερκείμενο) στην οροσειρά Ίδης και των Αστερουσίων (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, **2.**) που ντιστοιχούν στα βόρεια και νότια όρια της πεδιάδας της Μεσαράς αντίστοιχα (Caputo, et al., 2010; Delibasis, et al., 1999). Σημειώνεται ότι τα κανονικά ρήγματα αυτής της κατηγορίας ευθύνονται για καθεστώς εφελκυσμού κατά τη διεύθυνση Β-Ν (Caputo, et al., 2010).



Εικόνα 23: Ρήγματα διεύθυνσης Α - Δ, Ν. Ηρακλείου. *(Kokinou, et al., 2008)*

- **Η 2η κατηγορία**

  Νεότερης ηλικίας κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Β-Ν ταξινομούνται στη ***2η κατηγορία*** (Fassoulas, 2001; Kokinou, et al., 2008). Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να ταξινομηθούν επίσης ρήγματα με διευθύνσεις ΒΒΑ-ΝΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ που έχουν καταγραφεί (Kokinou, et al., 2013) και παρατηρούνται στο γεωτεκτονικό χάρτη (εικόνα). Η περιοχή μελέτης κόβεται από πολλά ρήγματα αυτής της κατηγορίας που παρουσιάζουν ολίσθηση βύθισης και διάτμηση με τα περισσότερα από αυτά να εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα του νομού, δηλαδή στη λεκάνη του Ηρακλείου. Καταγράφονται τουλάχιστον τρείς πολύ σημαντικές ρηξιγενείς ζώνες με ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν και ΒΒΑ-ΝΝΔ και οι οποίες οριοθετούν τη λεκάνη (Fassoulas, 2001):

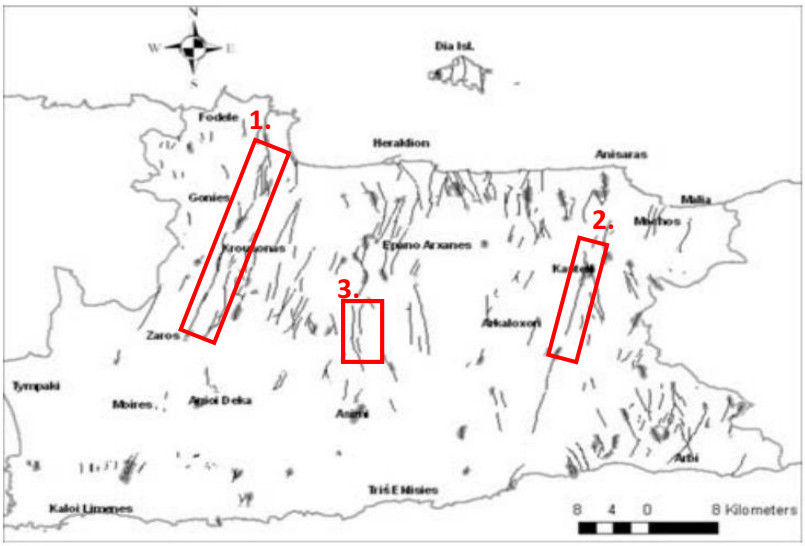
1. **Ρηξιγενής ζώνη Κρουσσώνα-Τιλισσού (Εικόνα *24*, 1.)** (Fassoulas, 2001): Γνωστή και ως ρηξιγενής ζώνη ανατολικού Ψηλορείτη (Caputo, et al., 2010) ή Μαλεβιζίου (Delibasis, et al., 1999) και τοποθετείται στη βάση του όρους Ίδης με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ μήκους 22km και κατακόρυφη μετατόπιση (άλμα ρήγματος) πάνω από 400m. Αποτελεί το δυτικό περιθώριο του τεκτονικού βυθίσματος της λεκάνης του Ηρακλείου

και περιλαμβάνει τα ρήγματα του Κρουσσώνα, της Αγίας Βαρβάρας και του Τιλισσού, με κλίση 65°-70° προς τα ανατολικά, που χωρίζουν τα νεογενή – τεταρτογενή πετρώματα της λεκάνης (υπερκείμενο τέμαχος) από τα αλπικά πετρώματα που δομούν το όρος Ίδη – Ψηλορείτη. (Fassoulas, 2001; Caputo, et al., 2010).

2. **Ρηξιγενής ζώνη Καστελίου (Εικόνα *24*, 2.):** Τοποθετείται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου και παρουσιάζει μέση διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ. Σε αντίθεση με την προηγούμενη ρηξιγενή ζώνη, η ζώνη Καστελίου παρουσιάζει πιο άθικτες επιφάνειες ρήγματος σε σχέση με τη ζώνη Κρουσσώνα-Τιλισσού, με ύψη έως και 4m. Επιπλέον, στη ζώνη αυτή περιλαμβάνονται 2-3 ρήγματα που φέρουν σχετικά μικρή μετατόπιση. (Fassoulas, 2001).

3. **Ρηξιγενής ζώνη Γιούχτα (Εικόνα *24*, 3.):** Εμφανίζεται στη βάση της οροσειρά του Γιούχτα που αποτελεί το Νότιο όριο της λεκάνης του Ηρακλείου (Zygouri, et al., 2016; Fassoulas, 2001). Αποτελείται από κύρια δύο ρήγματα, το ένα αντίθετο του άλλου με διεύθυνση Β-Ν και φορά βύθισης προς τα δυτικά και ανατολικά αντίστοιχα με αρκετά άθικτες επιφάνειες ρήγματος που μαρτυρούν μετατόπιση των γύρω σχηματισμών κατά περίπου 400m. Μεταξύ των ρηγμάτων αυτών περικλείονται οι ασβεστόλιθοι του υποβάθρου. Παρατηρούνται, επιπλέον, μικρότερα ρήγματα που φέρουν σε επαφή το υπόβαθρο με τα νέο-τεταρτογενή ιζήματα της λεκάνης. (Fassoulas, 2001).

Σημειώνεται ότι τα ρήγματα της δεύτερης κατηγορίας ευθύνονται για το καθεστώς συμπίεσης που υπερισχύει κατά τη διεύθυνση Α-Δ στο νησί της Κρήτης και επομένως του Νομού Ηρακλείου (Caputo, et al., 2010).

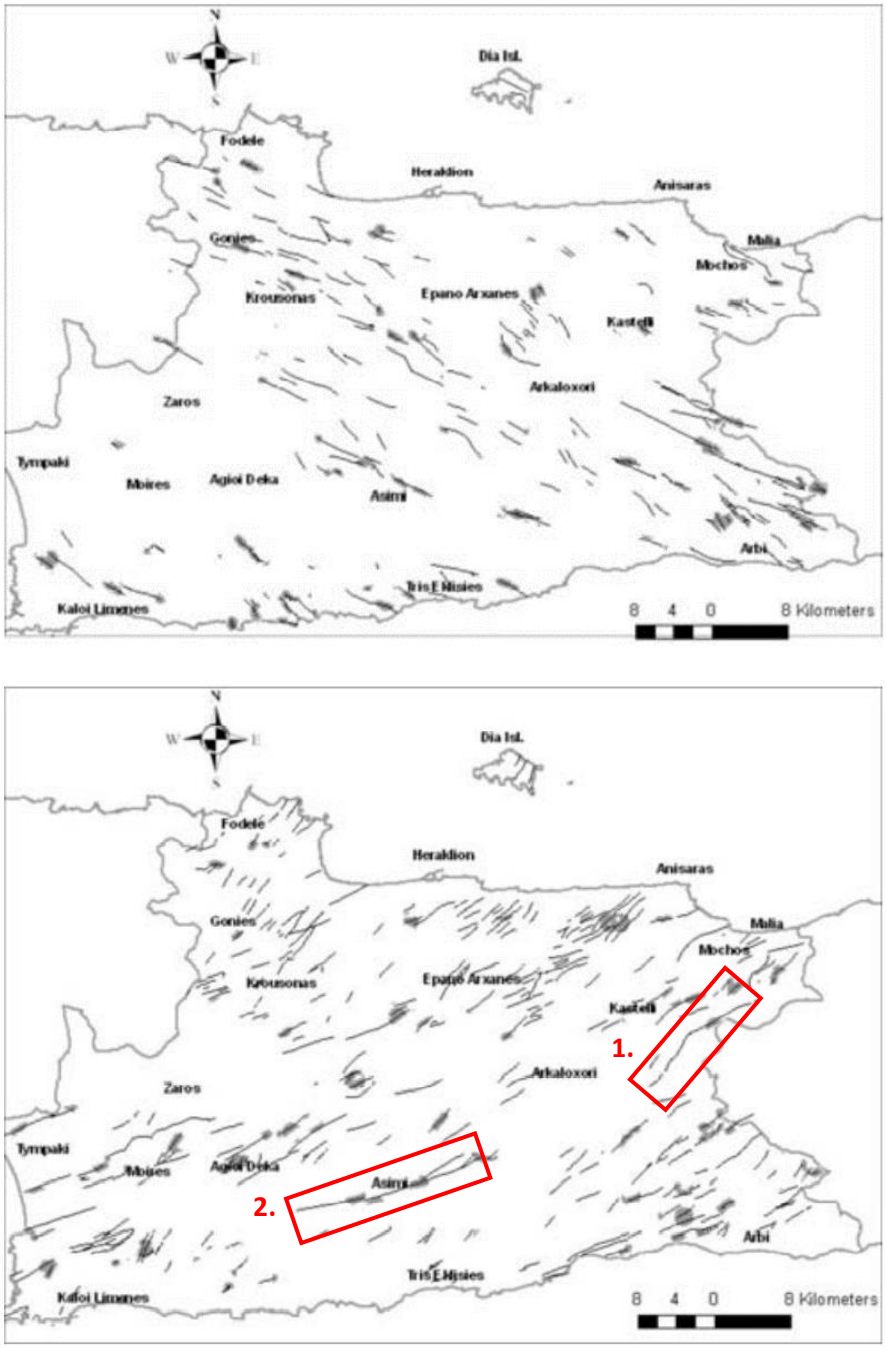


Εικόνα 24: Ρήγματα διεύθυνσης Β – Ν, Ν. Ηρακλείου. *(Kokinou, et al., 2008)*

Η 3η κατηγορία

Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία ρηγμάτων που δομούν την περιοχή μελέτης ταξινομούνται τα κανονικά ρήγματα με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ (αν και τα σημαντικότερα είναι διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ), τα οποία αποτελούν τα νεότερα ρήγματα του Νομού Ηρακλείου και τέμνουν τα νεογενή ιζήματα της περιοχής ενώ διαπερνούν και τα ρήγματα των προηγούμενων ομάδων. Ένα σημαντικό ρήγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το ρήγμα Καστελίου (**Εικόνα *25*, 1.**) (Fassoulas, 2001), το οποίο εμφανίζεται στη βάση του όρους Δίκτη και αποτελεί το ανατολικό περιθώριο της λεκάνης του Ηρακλείου. και γωνία βύθισης περίπου 70°-75° (Caputo, et al., 2010). Όμοια με τις ρηξιγενείς ζώνες της δεύτερης κατηγορίας, το ρήγμα Καστελίου φέρνει σε επαφή τους αλπικούς σχηματισμούς του όρους Δίκτη με τα νεογενή-τεταρτογενή της κοιλάδας του Ηρακλείου (Caputo, et al., 2010). Άλλο ένα σημαντικό ρήγμα που έχει καταγραφεί και ανήκει στην παρούσα κατηγορία είναι το κανονικό ρήγμα του Ασημίου - Πλακιώτισσας (**Εικόνα *25*, 2.**) περίπου στο κέντρο του νότιου τμήματος του νομού, το οποίο αποτελεί το βόρειο όριο της κοιλάδας της Μεσαράς σε αυτή τη θέση. Η διεύθυνση του ρήγματος είναι ΒΑ-ΝΔ ενώ η επιφάνεια του ρήγματος βυθίζεται με φορά προς το νότο (75°-80°). Βόρεια του ρήγματος εμφανίζονται τα νεογενή ιζήματα του υποκείμενου τεμάχους και νότια του ρήγματος φαίνονται της τεταρτογενή ιζήματα

του υπερκείμενου τεμάχους που αντιστοιχεί στο εσωτερικό της κοιλάδας. (Ganas, 2017).



Εικόνα 25: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ - ΝΑ και ΝΔ - ΒΑ, Ν. Ηρακλείου. *(Kokinou, et al., 2008)*

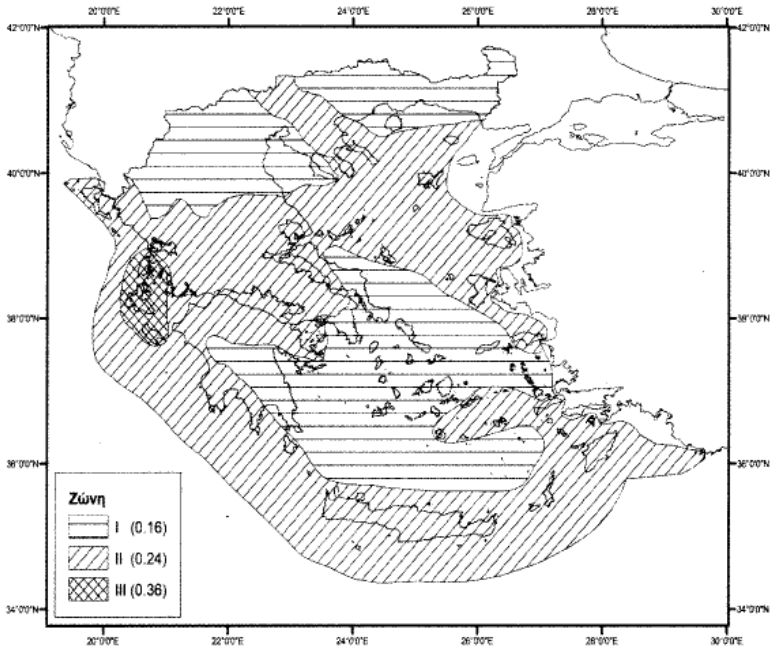
3.5 Σεισμολογικές συνθήκες του Νομού Ηρακλείου

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ) η Ελλάδα χωρίζεται σε 3 ζώνες σεισμικής επιδεκτικότητας ανάλογα με την τιμή της μέγιστης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης Α, η οποία ισούται με:

$A = \alpha \cdot g$ (cm/sec^2),

όπου α: η επιτάχυνση σχεδιασμού και g: η επιτάχυνση της βαρύτητας = 981 (cm/sec^2).

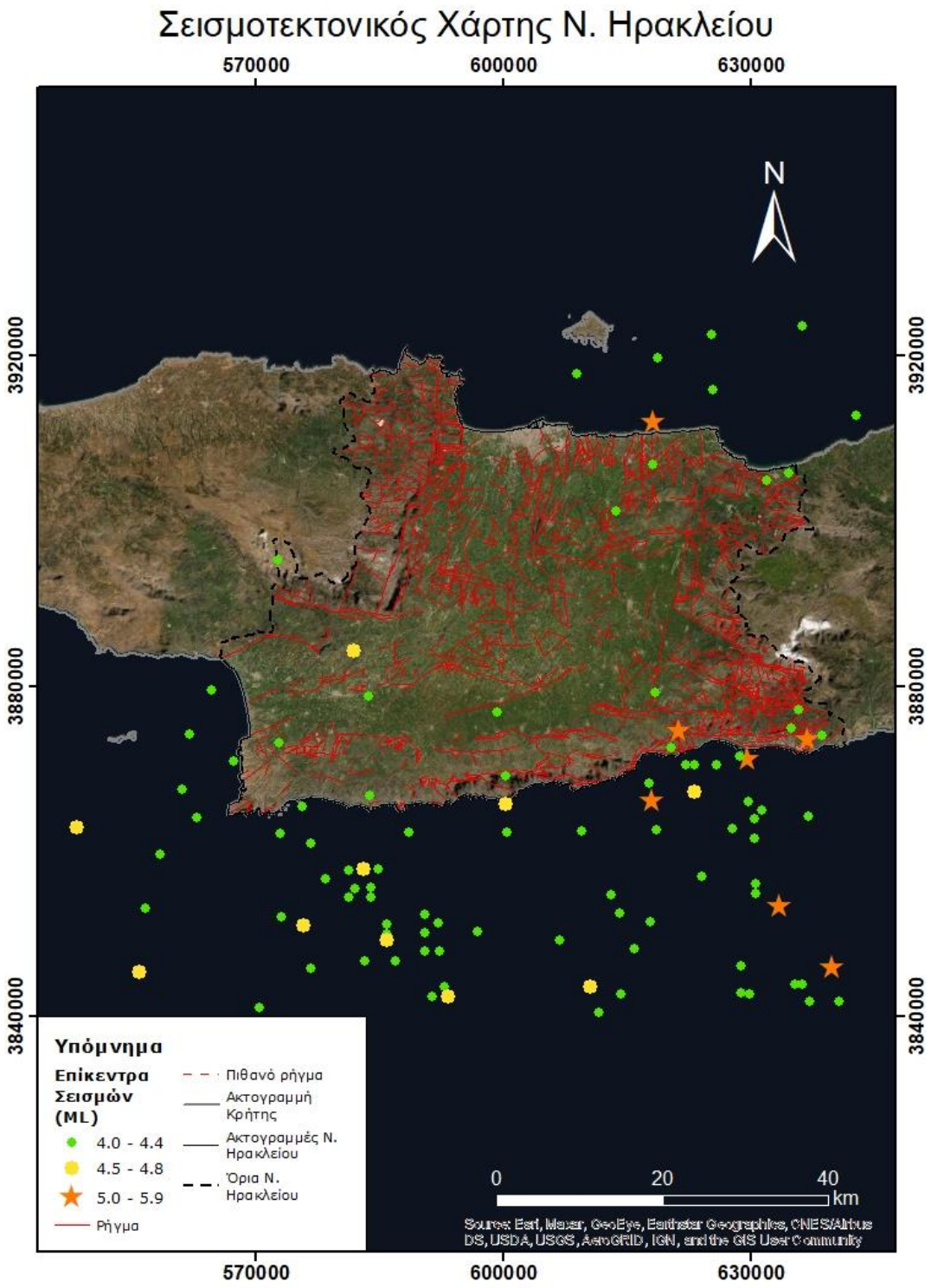
Με βάση αυτόν τον διαχωρισμό η ζώνη I αντιστοιχεί σε α = 0,16, η ζώνη II αντιστοιχεί σε α = 0,24 και η ζώνη III αντιστοιχεί σε α = 0,36. Παρατηρώντας τον χάρτη ζωνών σεισμικής επιδεκτικότητας η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας κατατάσσεται στην ζώνη ΙΙ.



Εικόνα 26: Χάρτης ζωνών σεισμικής επιδεκτικότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000).

Ο νομός Ηρακλείου αποτελεί μία αρκετά σεισμογενή περιοχή και αυτό οφείλεται τόσο στη γεωγραφική του θέση (κοντά σε ζώνη σύγκλισης πλακών), όσο και στα ρήγματα που τέμνουν ολόκληρη την έκταση του και τα οποία περιεγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα (Kokinou, et al., 2008). Σύμφωνα με παρατηρήσεις ερευνητών (Delibasis, et al., 1999), βόρεια του νομού

προς το Κρητικό πέλαγος σημειώνεται μία ελάττωση στη συχνότητα και πυκνότητα των σεισμικών επικέντρων σε σχέση με το σεισμολογικό καθεστώς νότια, προς το Λιβυκό Πέλαγος, όπου ο αριθμός των σεισμών μακριά από την ακτογραμμή παρουσιάζει μεγάλη αύξηση. Αυτή η περίσσεια σεισμικών φαινομένων, μπορεί να αποδοθεί στη διαδικασία υποβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική προς τον κατώτερο μανδύα (Kokinou, et al., 2008; Delibasis, et al., 1999). Ακόμα, η σεισμική κατανομή επί του νομού Ηρακλείου δείχνει μία διαφορετική τεκτονική εικόνα. Ειδικότερα, διακρίνεται μία σημαντική αύξηση των σεισμικών διαρρήξεων καθώς κινούμαστε από το δυτικό τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου προς το ανατολικό, γεγονός που σχετίζεται με τη μεγάλη συγκέντρωση ρηγμάτων δεύτερης κατηγορίας στα ανατολικά (Delibasis, et al., 1999; Kokinou, et al., 2008). Όμοια αύξηση σεισμικών επικεντρικών συσσωρεύσεων μπορεί να παρατηρηθεί στο νότιο τμήμα της περιοχής, και συγκεκριμένα προς την κοιλάδα της Μεσαράς, πιθανώς για τους ίδιους λόγους που παρατηρείται αυξητική τάση στο Λιβυκό Πέλαγος (Delibasis, et al., 1999).



Εικόνα 27: Σεισμοτεκτονικος χάρτης που απεικονίζει την σεισμικότητα της περιοχής μελέτης από το 1964 έως τον Μάρτιο του 2021.

3.6 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα Κρήτης (13) και συγκεκριμένα σε έξι υδροφόρα συστήματα (Πολυχρονάκη, et al., 2009):

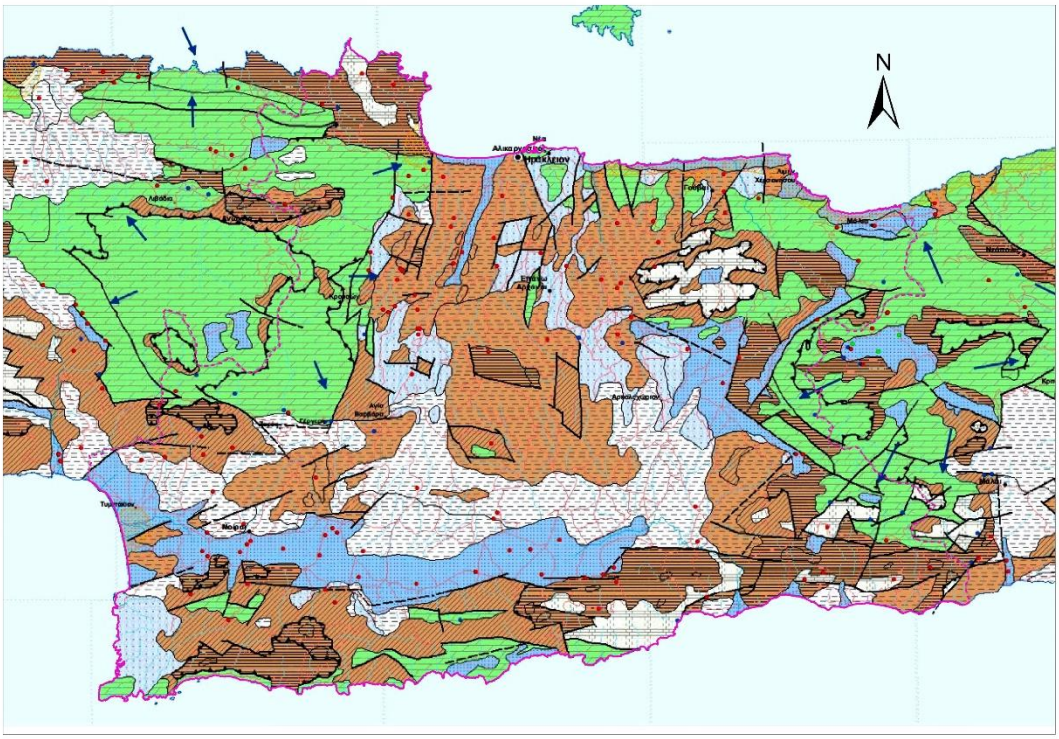
1. **GR 1306 Καρστικό υδροφόρο σύστημα Ψηλορείτη – Ταλαίων.** Το υδροφόρο αυτό σύστημα έχει έκταση 1033 km^2 και αποτελείται από τους ορεινούς όγκους του Ψηλορείτη και των Ταλαίων. Γεωλογικά η περιοχή δομείται κυρίως από τα ανθρακικά της ενότητας Κρήτης – Μάνης, τα επωθημένα καλύμματα των Φυλλιτών – Χαλαζιτών, της Τρίπολης και στο ΒΔ τμήμα καλύπτεται από νεογενείς και πλειστοκαινικές αποθέσεις. Σημαντικές υδροφορίες λόγω των μακροπερατών ιδιοτήτων τους αναπτύσσονται στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Μάνης (πλακώδεις ασβεστόλιθοι) και της Τρίπολης. Ανάμεσα σε αυτούς τους δύο σχηματισμούς παρεμβάλλεται η ενότητα των Φυλλιτών – Χαλαζιτών που αποτελείται από στεγανά πετρώματα με αποτέλεσμα οι υδροφορείς αυτοί να διαχωρίζονται και να ενώνονται όπου απουσιάζει η παρεμβολή αυτών. Δεδομένου του υψομέτρου της περιοχής (έως και 2.456 μ.) του υδροσυστήματος ετησίως δέχεται αρκετά κυβικά νερού από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (~ 1,1 δις κυβικά νερό), ενώ σημαντικό ποσοστό κατεισδύεται που ανέρχεται στα 450.000.000 m^3 εμπλουτίζοντας αρκετές υπόγειες υδροφορίες και πηγές. Η σημαντικότερη πηγή βρίσκεται στην περιοχή του Αλμυρού του Ηρακλειού με παροχή που κυμαίνεται από 3,5 – 19,4 m^3/sec.
2. **GR 1307 Υδροφόρο σύστημα λεκάνης Ηρακλείου.** Το υδροσύστημα αυτό καλύπτεται κυρίως από νεογενείς αποθεσείς, έχει έκταση 924 km^2 και αποτελεί γειτονικό υδροφόρο σύστημα Ψηλορείτη – Ταλαίων, που αυτό υποδεικνύει και την πλευρική τροφοδοσία των υπόγειων αναπτυγμένων υδροφορέων του συστήματος. Γενικά, το σύστημα αυτό έχει αναπτυγμένους κυρίως υπόγειους υδροφορείς που αναπτύσσονται σε μαργαϊκούς ασβεστολίθους και γύψους, αλλά και σε προνεογενείς ανθρακικούς σχηματισμούς, οι οποίοι λόγω αναθόλωσης εντοπίζονται στην επιφάνεια, στο κέντρο της λεκάνης, ή εντοπίστηκαν σε βάθος. Η επιφανειακή απορροή είναι αρκετά μεγάλη δεδομένου ότι το σύστημα στην μεγαλύτερή του έκταση καλύπτεται από αδιαπέρατους σχηματισμούς μάργας και αργίλων και του πυκνού υδρογραφικού δικτύου, γεγονός που οφείλεται στον υψηλό συντελεστή της επιφανειακής απορροής.

3. **GR 1308 Υδροφόρο σύστημα λεκάνης Μεσαράς.** Το υδροσύστημα οριοθετείται από την λεκάνη της Μεσαράς, έχει έκταση 241 km^2 και καλύπτεται αποκλειστικά από τεταρτογενείς σχηματισμούς. Το σύστημα γεωμορφολογικά χαρακτηρίζεται πεδινό και διαρρέεται από τον Αναποδιάρη ποταμό και από τον Γεροποταμό. Η τροφοδοσία των ποταμών είναι αποκλειστικά μετεωρική και τροφοδοτούνται αρκετοί χείμαρροι στις ενστρώσεις κροκαλοπαγών κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Δεδομένα γεωτρήσεων δείχνουν ότι το υδάτινο ισοζύγιο είναι ελλειμματικό και η στάθμη των υδροφορέων παρουσιάζει πτωτική τάση.
4. **GR 1309 Καρστικό υδροφόρο σύστημα Αστερουσίων.** Το καρστικό αυτό υδροσύστημα αποτελεί το νοτιότερο υδροσύστημα και οριοθετείται από την οροσειρά των Αστερουσίων. Συγκεκριμένα, έχει έκταση 433 km^2 και γεωλογικά συντελείται από τα ανώτερα καλύμματα της Κρήτης και τους οφιολίθους, ερυθρούς μαργαϊκούς ασβεστολίθους, φλύσχη και τα ανθρακικά των ζωνών Τρίπολης και Πίνδου. Οι υδροφορείς αναπτύσσονται μόνο στα αναθρακικά πετρώματα και είναι τοπικοί.
5. **GR 1310 Υδροφόρο σύστημα λεκάνης Καστελίου.** Το υδροσύστημα λεκάνης Καστελίου αποτελεί το μικρότερο σε έκταση υδροσύστημα με έκταση 76 km^2 και καλύπτεται μόνο από τεταρτογενείς αποθέσεις εντός των οποίων αναπτύσσονται αρκετοί υδροφοροί. Λόγω της υπεράντλησης των υδροφόρων για γεωργικές δραστηριότητες δεν αναμένονται αποθέματα.
6. **GR 1311 Καρστικό υδροφόρο σύστημα Δίκτη – Σέλενας.** Το υδροφόρο σύστημα Δίκτη – Σέλενα θεωρείται από τα μεγλαύτερα υδροσυστήματα του νησιού και έχει έκταση 1027 km^2 από τα οποία τα 704 km^2 είναι υδροπερατοί σχηματισμοί και τα υπόλοιπα αδιαπέρατοι. Υδροπερατούς σχηματισμούς αποτελούν τα ανθρακικά της Μάνης, της Τρίπολης και της Πίνδου. Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί θεωρούνται η ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών που παρεμβάλλεται ανάμεσα στις ενότητες της Μάνης και της Τρίπολης και οι τοπικοί μεταλπικοί σχηματισμοί.

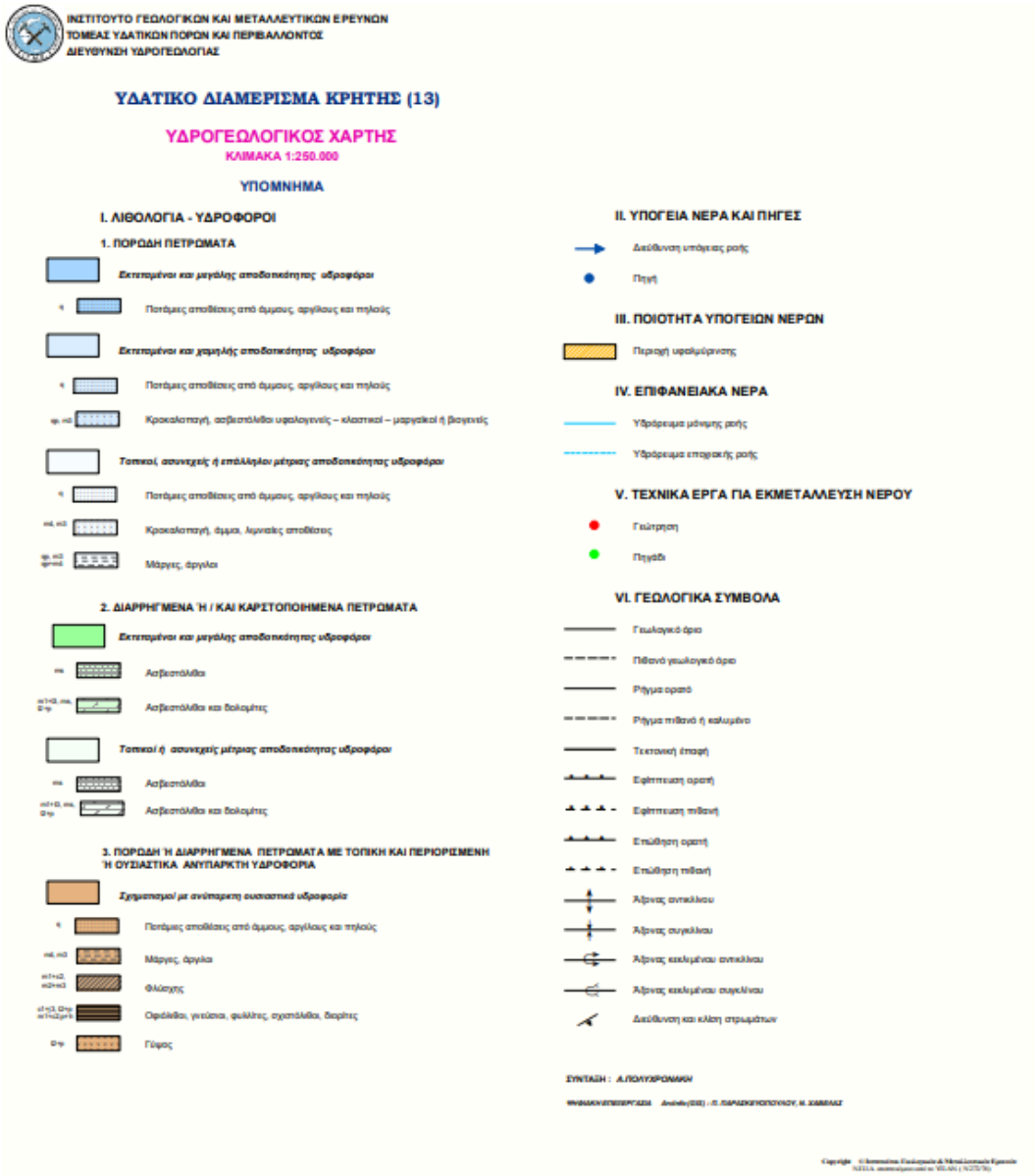
Γενικά, τα ανθρακικά πετρώματα αποτελούν τους μεγαλύτερους υδροφορείς και κατά συνέπεια υδροπερατούς σχηματισμούς της περιοχής, με τους σημαντικότερους να σχηματίζονται στους ασβεστόλιθους της ενότητας Τρίπολης (Sarris, et al., 2005), που εκφορτίζονται με τη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού πηγών (συνολικά 47 πηγές καταγράφονται με τις περισσότερες να είναι καρστικού τύπου) (Malagò, et al., 2016). Η καρστικοποιημένη

φύση των ανθρακικών πετρωμάτων της περιοχής επιτρέπει την κατείσδυση του επιφανειακού νερού (νερό υδρογραφικών δικτύων και βροχοπτώσεων/κατακρημνίσεων) σε αυτά ορίζοντας τα ως καρστικούς υπόγειους υδροφορείς (Malagò, et al., 2016).

Όσον αφορά τους υπόλοιπους γεωλογικούς σχηματισμούς χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι ή ημιπερατοί ανάλογα με τον συντελεστή περατότητας. Τους αδιαπέρατους σχηματισμούς απαρτίζουν οι μάργες και οι άργιλοι του νεογενούς, οι σχιστόλιθοι, ο φλύσχης και οι οφιόλιθοι με συντελεστή περατότητας 5 – 15 % του ετήσιου ύψους βροχής, ενώ στους ημιπερατούς σχηματισμούς κατατάσσονται οι σχηματισμοί του νεογενούς – κροκαλοπαγή – ψαμμίτες – μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, καθώς και οι τεταρτογενείς αποθέσεις που αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή με συντελεστή περατότητας το 15 – 25 % (Πολυχρονάκη, et al., 2009).



Εικόνα 28: Απόσπασμα υδρογεωλογικού χάρτη της Κρήτης από το ΙΓΜΕ.



Εικόνα 29: Απόσπασμα από το υπόμνημα του υδρογεωλογικού χάρτη της Κρήτης από το ΙΓΜΕ.

3.7 Στοιχεία Κλιματολογίας της Κρήτης

Γενικά η Κρήτη βρίσκεται στο όριο μεταξύ της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής ηπείρου και της Αφρικανικής ηπείρου, με αποτέλεσμα το *κλίμα της περιοχής* να αποτελεί ένα ενδιάμεσο στάδιο όπου παρατηρείται μεταβολή από το κλίμα που επικρατεί στο Αιγαίο πέλαγος βόρεια (Μεσογειακό κλίμα) προς το κλίμα που επικρατεί στην Αφρική και το Λιβυκό πέλαγος νότια (ερημικό Μεσογειακό κλίμα). (Ζαμπετάκης, 2009).

Το νησί αποτελεί μία έντονα ηλιόλουστη περιοχή με την *διάρκεια ηλιοφάνειας* να

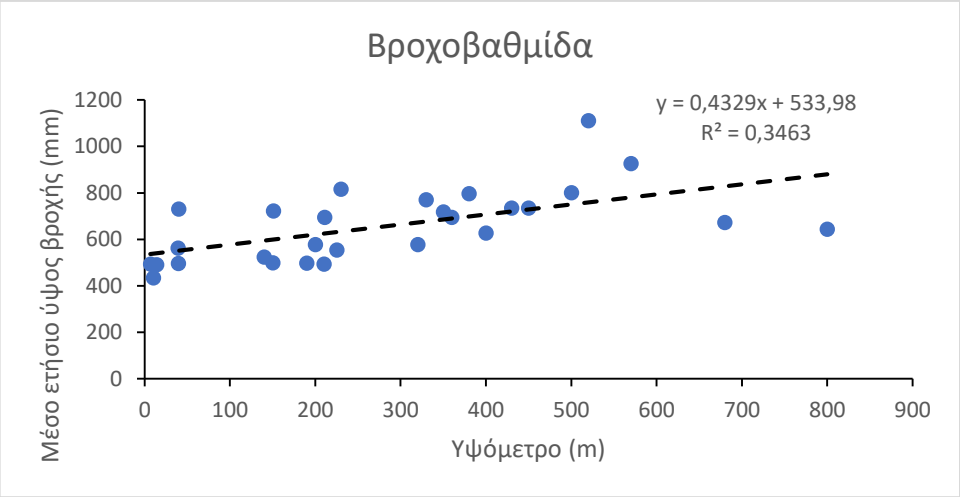
ελαττώνεται από το νότιο τμήμα του (μέση διάρκεια ηλιοφάνειας ανέρχεται έως και 3000 ώρες) προς το βόρειο (μέση διάρκεια ηλιοφάνειας ανέρχεται έως και 2700 ώρες). Αντίστοιχα έχουν καταγραφεί άνεμοι μέσης ετήσιας διάρκειας 60-80 ημερών (αριθμός ημερών που χαρακτηρίζονται από ανέμους ανά έτος) η οποία φαίνεται ελαττώνεται από τις ορεινές ζώνες προς τις παραλιακές ζώνες. Επιπλέον, οι *άνεμοι* της Κρήτης παρουσιάζουν ένταση μεγαλύτερη των 6Β με κύριες διευθύνσεις πνοής προς νότο και νοτιοανατολικά. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν αρκετά το θερμοκρασιακό καθεστώς της περιοχής. (Ζαμπετάκης, 2009).

Στην Κρήτη παρατηρούνται έντονες *θερμοκρασίες* της τάξης των 25°C μέση ετήσια θερμοκρασία το καλοκαίρι (Ιούλιο – Αύγουστο) και ιδιαίτερα στο Νότιο και Ανατολικό τμήμα του νησιού, οι οποίες παρουσιάζουν ελάττωση καθώς μεταβαίνουμε προς το Βόρειο και Δυτικό τμήμα. Αντίστοιχα οι θερμοκρασίες ελαττώνονται σημαντικά το χειμώνα (Ιανουάριο – Φεβρουάριο) που αποτελεί την ψυχρότερη περίοδο με μέση μηνιαία θερμοκρασία 7,3°C στο κεντρικό τμήμα του νησιού (περιοχή Ανώγεια). Η θερμοκρασία παρουσιάζει μέσο ετήσιο εύρος μεταξύ 17-20°C με τη λεκάνη του Ηρακλείου να παρουσιάζει μέση ετήσια θερμοκρασία 18,55°C που αυξάνεται νότια προς τη Μεσαρά. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία στις ακτές παρουσιάζεται σχεδόν σταθερή και σχετικά ήπια λόγω της θαλάσσιας αύρας με μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις να παρατηρούνται στις ορεινές ζώνες. (Ζαμπετάκης, 2009).

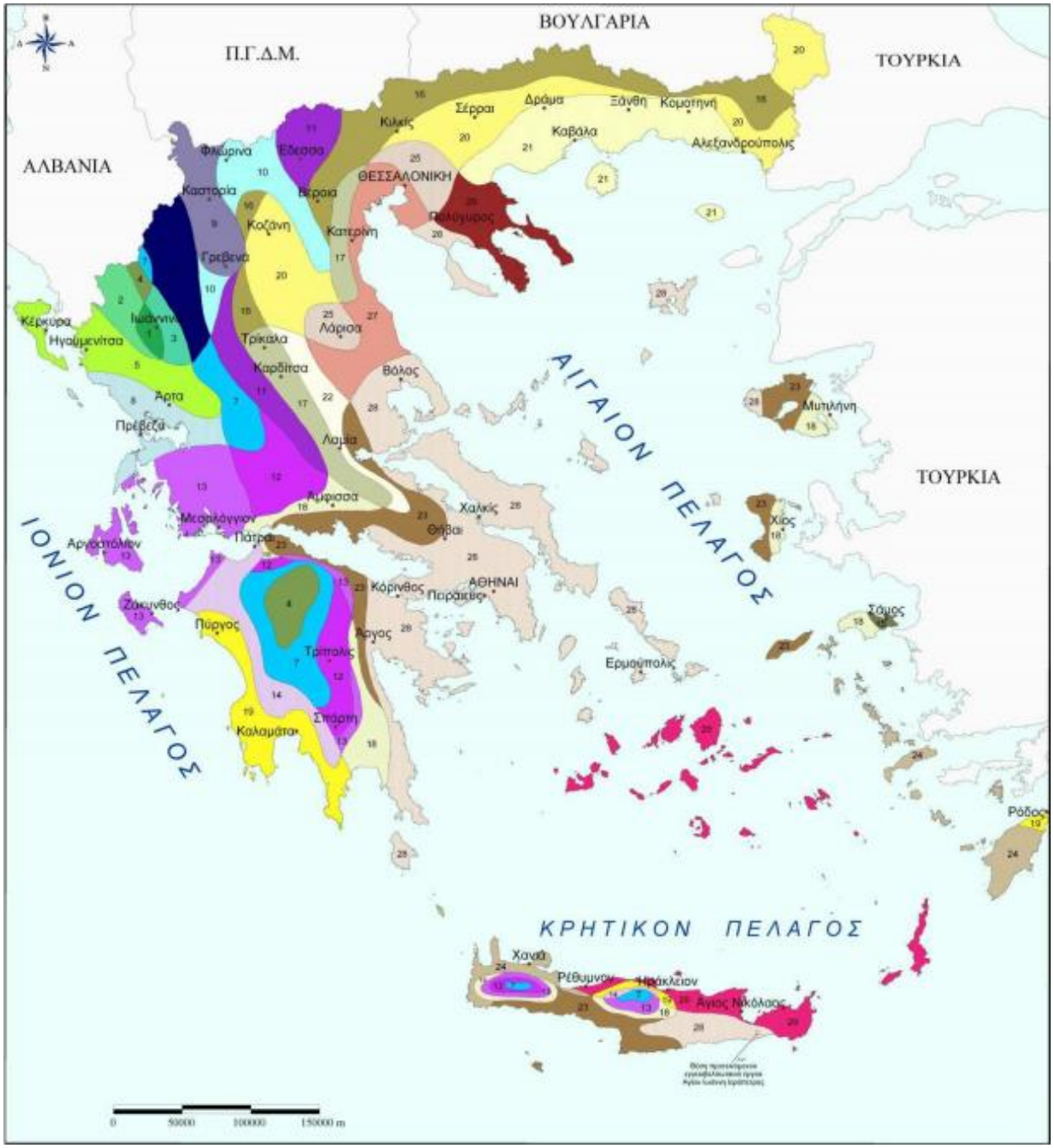
Το *καθεστώς των βροχοπτώσεων* του νησιού παρουσιάζει έντονες βροχοπτώσεις τη χειμερινή περίοδο με ποσοστά ετήσιας βροχόπτωσης να φτάνουν το 25% μέσης ετήσιας διάρκειας (αριθμός ημερών) 15 ημερών στο διάστημα του Δεκεμβρίου και του Ιανουαρίου αντίστοιχα. Μεταβαίνοντας προς του καλοκαιρινούς μήνες του Ιουλίου και Αυγούστου καταγράφεται αύξηση της θερμοκρασίας και ελάττωση των βροχοπτώσεων οι οποίες παρατηρούνται σε μέσο μηνιαίο αριθμό ημερών 0,3 ημερών. Το ποσοστό του μέσου ετήσιου αριθμού ημερών βροχής γενικά φτάνει περίπου το 24,7% του έτους και το ύψος της βροχής παρουσιάζει μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη θερμοκρασία σε γεωγραφικό επίπεδο. Η σχέση αυτή αντικατοπτρίζει μία αυξητική τάση του μέσου ετήσιου ύψους βροχής στα Δυτικά και τα Βόρεια του νησιού και μία μειωτική τάση στα Ανατολικά και Νότια τμήματα αυτού. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω η ατμοσφαιρική υγρασία του νησιού παρουσιάζεται εντονότερη τους χειμερινούς μήνες και πιο ήπια στους καλοκαιρινούς με όμοια αύξηση στο Βορρά (η τιμή ατμοσφαιρικής υγρασίας του σταθμού Ηρακλείου φτάνει το 55,4%). (Ζαμπετάκης, 2009).

Οι προαναφερμένες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της ετήσιας βροχόπτωσης από τα

Βόρεια στα Νότια είναι αποτέλεσμα της μετάβασης από το εύκρατο κλίμα του αιγαίου στο θερμό και ξηρό κλίμα του Λιβυκού πελάγους κοντά στην Αφρική.



Εικόνα 30: Διάγραμμα βροχοβαθμίδας από δεδομένα βροχόπτωσης του νομού Ηρακλείου στο διάστημα 1931 - 2020 της Γεωπύλης της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης. Σε υψόμετρο 0 m παρατηρείται περίπου ύψος βροχής 533,98 mm ετησίως, ενώ η βροχόπτωση αυξάνεται κατά 43,3 mm ανά 100 m. (https://www.apdkritis.gov.gr/el/dataset/ **;** https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/apps/webappviewer/index.html?id=62605a7792d340f4a91e61459b2856cf&fbclid=IwAR1OIwqYlrl_Y4GOLKTqoHkxoGaJndjpgX2Hv27jP7N7uph3DGwm0B_rVyI **;** https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/home/item.html?id=9efb0daa9d95436994fe2e36d0b032d9).



Εικόνα 31: Κλιματολογικός χάρτης της Ελλάδας. (https://www.ekalampaka.gr/article/i-ekthesi-toy-igme-gia-to-nero-toy-mayrelioy-symperasmata-kai-protaseis)

Εικόνα 32: Υπόμνημα του Κλιματολογικού χάρτη της Ελλάδας (*Εικόνα 31*). (https://www.ekalampaka.gr/article/i-ekthesi-toy-igme-gia-to-nero-toy-mayrelioy-symperasmata-kai-protaseis)

Κεφάλαιο 4ο – Δεδομένα & Μεθοδολογία

4.1 Μεθοδολογία

Στη συγκεκριμένη εργασία η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, ορίστηκαν 10 παράγοντες για την διερεύνηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής του Ν. Ηρακλείου βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων από αντίστοιχες εργασίες (Fall, et al., 2006; Antoniou, et al., 2017; Krassakis & Loupasakis, 2018; Kouli, et al., 2010; Psomiadis, et al., 2020; Kouli, et al., 2013), καθώς και άλλων αντίστοιχων διεθνών βιβλιογραφιών. Αφού συλλέχθηκαν όλα τα απαραίτητα πρωτογενή στοιχεία raster και vector, εισήχθησαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον ArcGIS – ArcMap 10.6 και στη συνέχεια έγινε περαιτέρω επεξεργασία αυτών για την κατασκευή των επιμέρους χαρτών για τον κάθε παράγοντα. Οι 10 παράγοντες ορίστηκαν από την μορφολογία, τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά, το γεωτεκτονικό καθεστώς, τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον και τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Επομένως, οι παράγοντες ορίζονται ως εξής:

1. Γεωλογία - Λιθολογία
2. Μέσος όρος ετήσιων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων
3. Χρήσεις γης
4. Απόσταση από το οδικό δίκτυο
5. Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο
6. Απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία
7. Πάχος του εδαφικού καλύμματος
8. Μορφολογικές κλίσεις
9. Προσανατολισμός πρανών
10. Μορφολογική καμπυλότητα

Στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ανάλυση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας σύμφωνα με τους παράγοντες που αναφέρθηκαν χαρακτηρίζεται ως πολυπαραγοντική, χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process – AHP). Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο προκείμενου

να επιτευχθεί η επίλυση ενός προβλήματος (στην συγκεκριμένη περίπτωση – η κατανομή της κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή μελέτης), πραγματοποιείται σύγκριση πολλαπλών παραγόντων μεταξύ τους και της αντίστοιχης ιεράρχησής τους (Achu, et al., 2020).

Πιο συγκεκριμένα, βάσει της μεθόδου, οι παράγοντες χωρίζονται σε ανάλογες υποκατηγορίες που συγκρίνονται ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο επηρεάζουν το προς ανάλυση πρόβλημα και τους δίνεται ο κατάλληλος βαθμός σημαντικότητας (Rank) (π.χ. στον παράγοντα λιθολογία γίνεται ταξινόμηση και βαθμονόμηση των διαφόρων λιθολογιών που δομούν την περιοχή). Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση ανά ζεύγη των ξεχωριστών παραγόντων ανάλογα με το πόσο σημαντικότερη είναι η συνεισφορά του στο τελικό αποτέλεσμα βάσει της φύσης του προβλήματος σε σχέση με έναν σταθερό παράγοντα ή επίπεδο πληροφορίας κάθε φορά (π.χ. πόσο σημαντικός είναι ο τεκτονισμός ή η μέση ετήσια βροχόπτωση σε σχέση με το επίπεδο της λιθολογίας ως προς την αύξηση της επιδεκτικότητας σε κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή;) (Achu, et al., 2020; Paraskevopoulos, n.d.; Sener, et al., 2010; Vargas, 1990). Σύμφωνα με αυτή τη σύγκριση δημιουργείται μία αριθμητική κλίμακα ιεράρχησης για το κάθε συγκρινόμενο ζεύγος των οποίων η σχετική σημαντικότητα ποσοτικοποιείται με έναν αριθμό από το 1 έως το 9 (π.χ. ο παράγοντας Α είναι 4 φορές πιο σημαντικός από τον παράγοντα Β, ενώ αντίστοιχα ο παράγοντας Β είναι ¼ φορές σημαντικότερος από τον Α) (Achu, et al., 2020; Paraskevopoulos, n.d.; Sener, et al., 2010; Vargas, 1990).

Οι παραπάνω κλίμακες ιεράρχησης/προτίμησης μπορούν να προστεθούν σε μορφή μαθηματικού πίνακα που αντιστοιχεί στο πλέγμα όλων των διαφορετικών συγκρίσεων. Στον πίνακα αυτό κατατάσσονται τόσο οριζόντια, όσο και κάθετα όλοι οι παράγοντες, ενώ οι τιμές που τον απαρτίζουν αντιστοιχούν στις αναλογίες της σύγκρισης του κάθε ζεύγους παραγόντων στις κατάλληλες θέσεις (Achu, et al., 2020; Paraskevopoulos, n.d.; Sener, et al., 2010; Vargas, 1990). Ο πίνακας (ή πλέγμα) έχει την παρακάτω μορφή:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου κάθε τιμή α αντιστοιχεί σε έναν λόγο σύγκρισης:

$$a = \frac{\text{βαθμός σημαντικότητας/βάρος παράγοντα κάθετης διάταξης}}{\text{βαθμός σημαντικότητας/βάρος παράγοντα οριζόντιας διάταξης}}$$

(Achu, et al., 2020). Η διαγώνιος του πίνακα λαμβάνει την τιμή 1 εφόσον αντιστοιχεί στις συγκρίσεις του κάθε παράγοντα με τον εαυτό του, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις περιλαμβάνουν τις κατάλληλες τιμές του α (Sener, et al., 2010).

Ακολούθως, πρέπει να γίνει έλεγχος της συνοχής της ιεράρχησης που έγινε. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας τον δείκτη συνοχής (Consistency Index – CI) που ισούται με:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

όπου λmax = η μέγιστη ισοτιμή του ισοδιανύσματος ω του πίνακα Α και n = ο αριθμός των παραγόντων που δομούν τον πίνακα (Achu, et al., 2020; Paraskevopoulos, n.d.).

Η τιμή λmax υπολογίζεται βρίσκοντας αρχικά το σύνολο των n-ωστών ριζών τον τιμών της κάθε σειράς του πίνακα και το ισοδιάνυσμα ω της κάθε σειράς που προκύπτει από την διαίρεση του κάθε συνόλου n-ωστών ριζών με τον άθροισμα όλων των συνόλων. Συνεχίζοντας, υπολογίζεται ο όρος $A \cdot \omega$ της κάθε σειράς ως $A_1 \cdot \omega = 1 \cdot \omega_1 + \alpha_{12} \cdot \omega_2 + \cdots + \alpha_{1n} \cdot \omega_n$ και ούτω καθεξής για τις υπόλοιπες σειρές. Έτσι, βάσει της σχέσης $A \cdot \omega = \lambda_{max} \cdot \omega$ υπολογίζονται τόσες τιμές του λmax όσοι παράγοντες λαμβάνουν μέρος στην ιεράρχηση (n τιμές λmax) και υπολογίζεται η μέση τιμή τους που θεωρείται ότι αντιστοιχεί στην τιμή του λmax που ζητείται. Έπειτα, υπολογίζεται ο CI με τον τύπο που προαναφέρθηκε. (Paraskevopoulos, n.d.). Αναφέρεται ότι όσο πιο κοντά στο n είναι η τιμή του λmax, τόσο πιο κοντά στο μηδέν (0) θα είναι η τιμή του CI και επομένως τόσο καλύτερη θα είναι η συνοχή της ανάλυσης των παραγόντων (Paraskevopoulos, n.d.; Achu, et al., 2020).

Επόμενο βήμα της μεθόδου για τον έλεγχο της εγκυρότητας της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός του ποσοστού συνοχής (Consistency Ratio - CR) που ορίζεται ως CI/RI όπου RI είναι ο δείκτης συνοχής ενός ενδεικτικού πίνακα ίσου αριθμού παραγόντων με το προς επίλυση πρόβλημα που ορίζει ο Saaty (Paraskevopoulos, n.d.; Sener, et al., 2010; Achu, et al., 2020). Ο πίνακας τυχαίων τιμών του RI του Saaty φαίνεται παρακάτω (Paraskevopoulos, n.d.).

Αριθμός παραγόντων	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CI (RI)	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές CI τυχαίων πινάκων AHP κατά Saaty.

Τελικά, βάσει κατάλληλου λογισμικού μπορεί να γίνει συσχέτιση των χαρτών των διαφορετικών παραγόντων σε σύστημα ArcGIS – ArcMap 10.6 λαμβάνοντας υπόψιν τον πίνακα ιεράρχησης για την κατασκευή ενός τελικού χάρτη κατανομής ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Κατά συνέπεια, η κατασκευή των επιμέρους χαρτών με σωστά κριτήρια είναι πολύ σημαντική για την παραγωγή του τελικού χάρτη επιδεκτικότητας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου έπεται η λεπτομερής περιγραφή για την κατασκευή των χαρτών των επιμέρους παραγόντων καταλήγοντας στον τελικό χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με την Μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης.

4.2 Κατασκευή θεματικών χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας

4.2.1 Επίπεδο Μορφολογικών κλίσεων (Slope)

Ένας παράγοντας που έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την σταθερότητα των εδαφικών σχηματισμών και ευθύνεται για την εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί η μορφολογική κλίση των πρανών (Kouli, et al., 2010; Psomiadis, et al., 2020). Γενικά, όσο πιο απότομο είναι ένα πρανές με παρουσία σχετικά ασταθούς υλικού (πχ. ασύνδετο εδαφικό υλικό, κατακερματισμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί), τόσο πιο επιρρεπές είναι σε κατολισθήσεις (Antoniou, et al., 2017).

Για την κατασκευή του θεματικού χάρτη των μορφολογικών κλίσεων εισήχθησαν σε περιβάλλον ArcGIS 10.6 οι ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής μελέτης από την Γ.Υ.Σ. (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) και δημιουργήθηκε το αρχείο TIN μέσω του εργαλείου Create TIN. Ακολούθως, δημιουργήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM, Cell Size = 30m) με την βοήθεια του εργαλείου TIN to Raster, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των θεματικών χαρτών μορφολογικών κλίσεων (Slope), προσανατολισμού των πρανών (Aspect) και μορφολογικής καμπυλότητας (Curvature). Ο μορφολογικός χάρτης κλίσεων (Slope) κατασκευάστηκε με το εργαλείο Slope που βρίσκεται στο Raster surface με εισαγωγή του DEM.

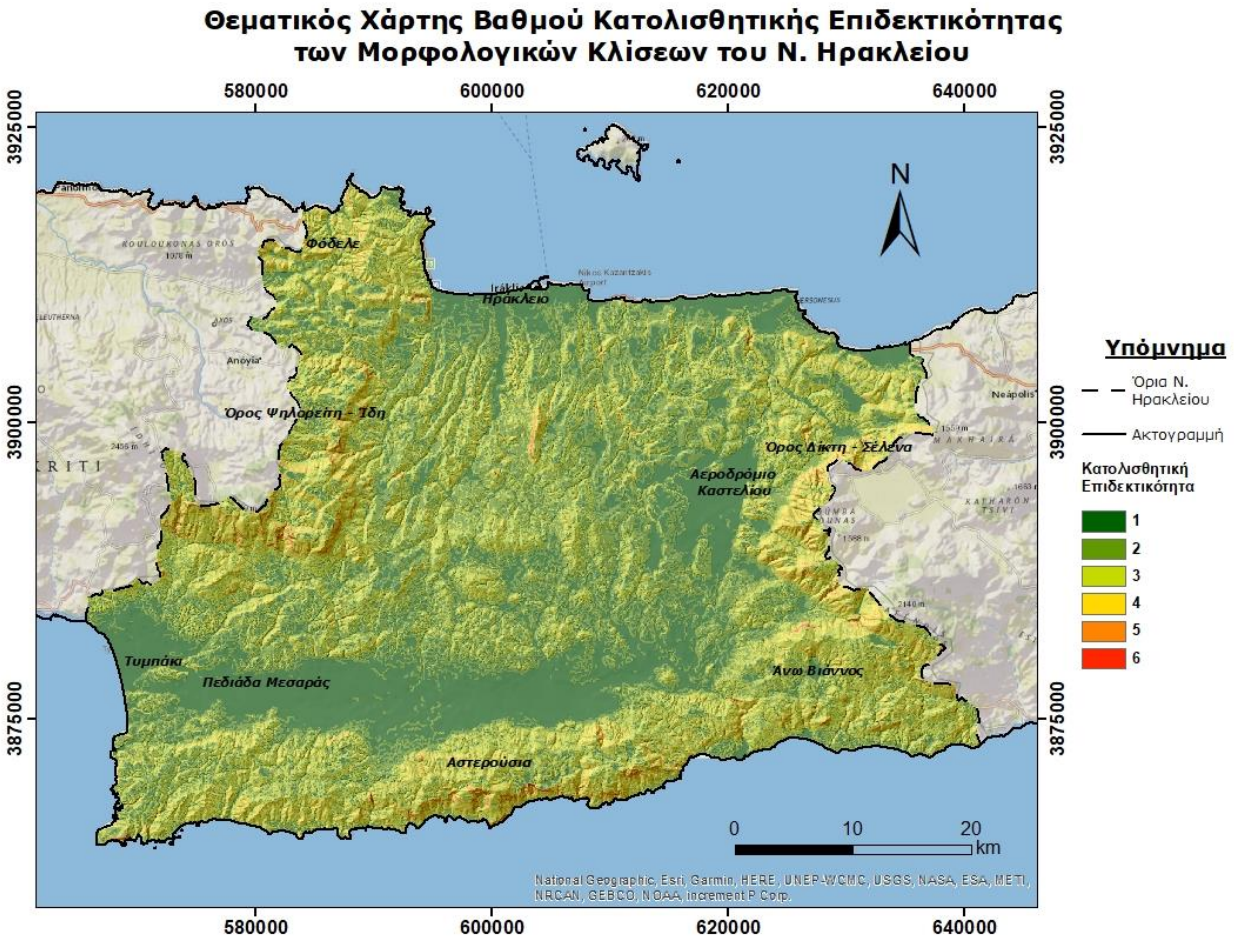
Προκειμένου να εκτιμηθεί η κατολισθητική επιδεκτικότητα της περιοχής βάσει των μορφολογικών κλίσεων ήταν απαραίτητη η επαναταξινόμηση των κλίσεων της περιοχής σε κλάσεις διαφορετικού βαθμού επιδεκτικότητας. Αυτό επιτεύχθηκε με το εργαλείο Reclassify (3D Analyst). Ο διαχωρισμός και η βαθμονόμηση των κλάσεων έγινε βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων (Rozos, et al., 2008; Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007; Krassakis & Loupasakis, 2018). Με αυτόν τον τρόπο ορίστηκαν οι εξής κλάσεις: 1) 0 – 5 °, 2) 6 – 15°, 3) 16 – 30°, 4) 31 – 45°, 5) 46 – 60°, 6) > 61°. Στις συγκεκριμένες κλάσεις δόθηκαν βαθμοί επιδεκτικότητας που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *5***).

Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση των μορφολογικών κλίσεων της περιοχής μελέτης		
Κλάση μορφολογικών κλίσεων	**Βαθμός Επιδεκτικότητας**	**Κανονικοποιημένος βαθμός επιδεκτικότητας (%)**
0 - 5°	1	17
6 - 15°	2	33
16 - 30°	3	50
31 - 45°	4	67
46 - 60°	5	83
> 61°	6	100

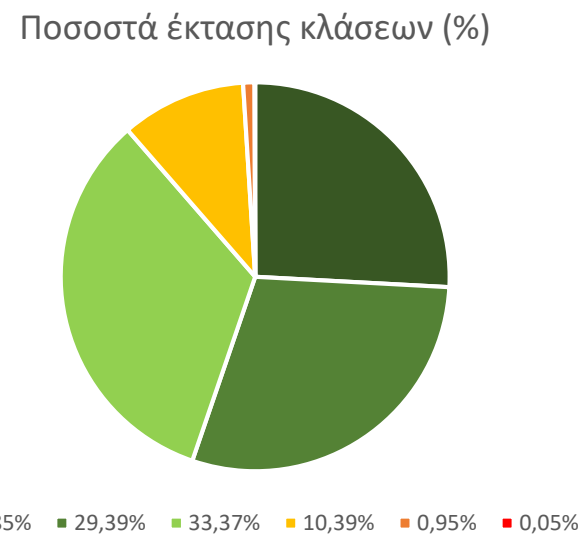
Πίνακας 5: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μορφολογικής κλίσης.

Για την καλύτερη σύγκριση των θεματικών χαρτών με την μέθοδο AHP έγινε κανονικοποίηση των τιμών του βαθμού επιδεκτικότητας των κλάσεων σε επί τοις 100 ποσοστά, το οποίο φαίνεται στην 3^{η} στήλη του πίνακα.

Το αποτέλεσμα της επεπαναταξινόμησης φαίνεται στον παρακάτω θεματικό χάρτη με προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87).



Εικόνα 33: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επικκινδυνότητας των μορφολογικών κλίσεων.



Εικόνα 34: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μορφολογικής κλίσης

4.2.2 Επίπεδο Προσανατολισμού των πρανών (Aspect)

Ο προσανατολισμός των πρανών της περιοχής μελέτης αποτελεί έναν απαραίτητο παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μία έρευνα κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Αν και δεν επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα των γεωλογικών σχηματισμών ενός πρανούς, ο προσανατολισμός του είναι υπεύθυνος για την έκθεση των σχηματισμών σε κλιματικές συνθήκες όπως η ηλιοφάνεια, οι βροχοπτώσεις και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Rozos, et al., 2008; Antoniou, et al., 2017; Krassakis & Loupasakis, 2018; Kouli, et al., 2010). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή στον κορεσμό των πρανών σε νερό (μεγάλη έκθεση στον ήλιο προκαλεί ξήρανση του πρανούς και μεγάλη σταθερότητα, μεγάλη έκθεση σε βροχοπτώσεις προκαλεί κορεσμό του πρανούς και μείωση στη μηχανική αντοχή των σχηματισμών του πρανούς) (Kouli, et al., 2010; Antoniou, et al., 2017) καθώς και την μεταβολή της σταθερότητας εξαιτίας της ψύξης τους σε περιόδους έντονης χιονόπτωσης και της τήξης σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας (Rozos, et al., 2008; Krassakis & Loupasakis, 2018). Επιπλέον, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους τα πρανή γίνονται πολύ ή λιγότερο επιρρεπή στις διεργασίας αποσάθρωσης και διάβρωση εξαιτίας των ατμοσφαιρικών φαινομένων (Rozos, et al., 2008; Kouli, et al., 2010; Antoniou, et al., 2017; Krassakis & Loupasakis, 2018).

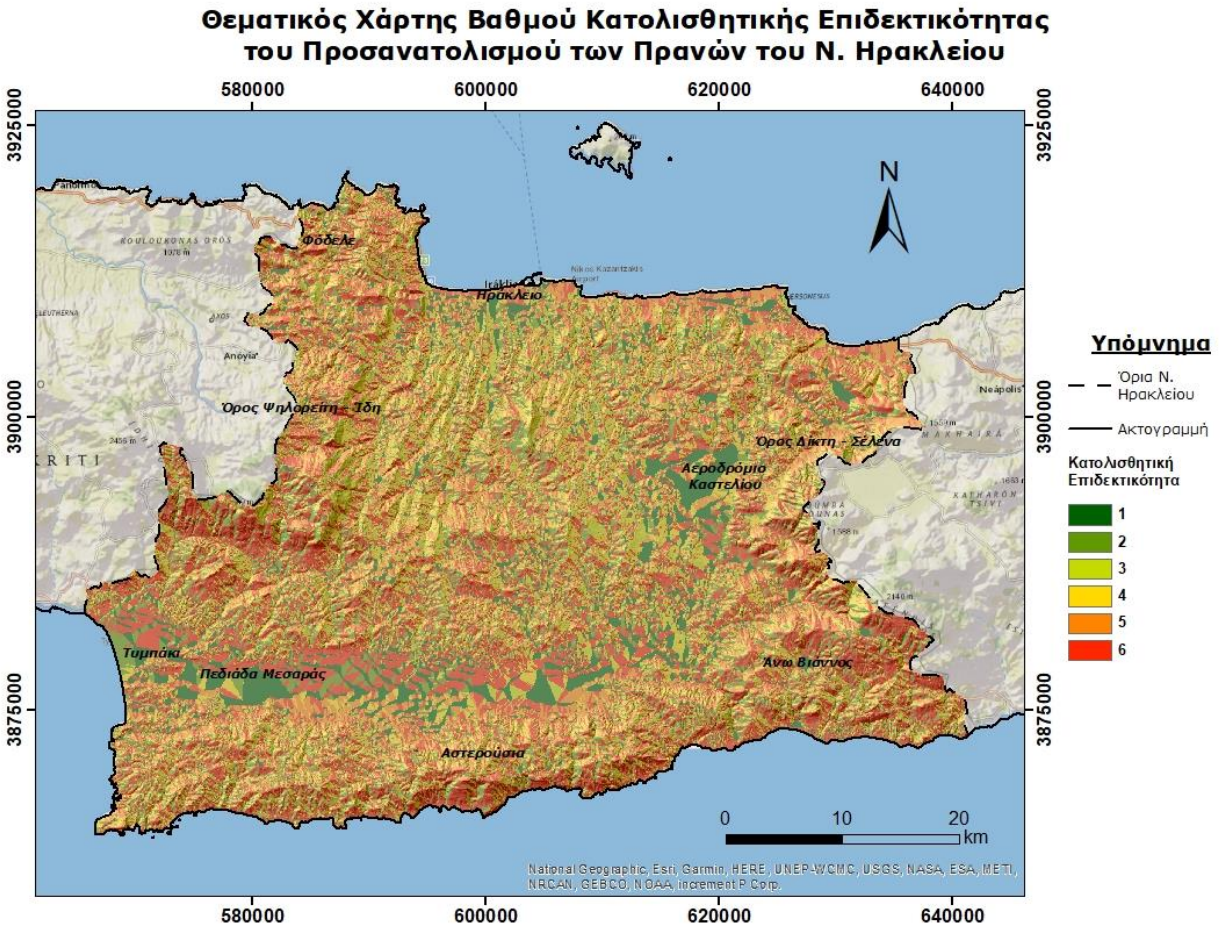
Ο θεματικός χάρτης του προσανατολισμού των πρανών κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του 30m-DEM που προαναφέρθηκε χρησιμοποιώντας το εργαλείο Aspect του Raster surface.

Για την ταξινόμηση της επιδεκτικότητας που αντιστοιχεί στους διαφορετικούς προσανατολισμούς των πρανών του Ν. Ηρακλείου έγινε διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση μέσω του εργαλείου Reclassify (3D Analyst) εισάγοντας το αρχικό αρχείο του Aspect. Η επαναταξινόμηση του προσανατολισμού πρανών ακολούθησε τη σχετική βιβλιογραφία (Rozos, et al., 2008; Krassakis & Loupasakis, 2018). Όπου αναφέρεται ότι οι προσανατολισμοί που ευδοκιμούν τα κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο είναι NNE - SSW και NE-SW. Με βάση αυτά χωρίστηκαν οι εξής κλάσεις προσανατολισμού πρανούς: **1)** -1°, **2)** 225° - 275°, **3)** 45° - 90°, **4)** 90° - 135° & 275° - 315°, **5)** 315° - 0°, **6)** 0° - 45° & 135° - 225°. Οι κλάσεις και οι βαθμοί επιδεκτικότητας που τους αποδόθηκαν βάση της βιβλιογραφίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *6***).

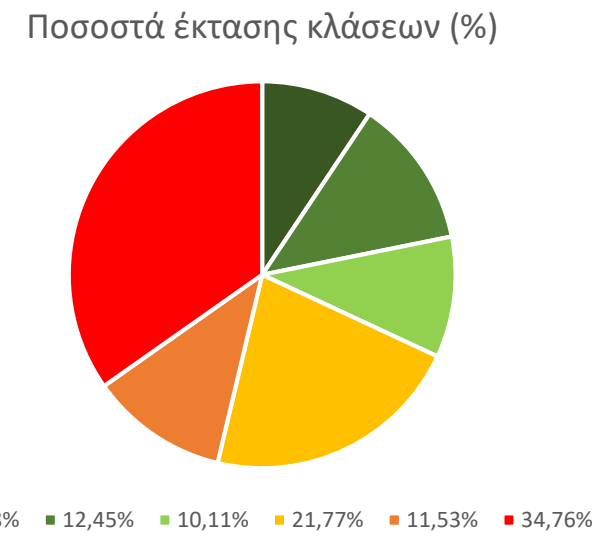
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση των προσανατολισμών των πρανών της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις προσανατολισμού πρανών	**Βαθμός Επιδεκτικότητας**	**Κανονικοποιημένος βαθμός επιδεκτικότητας (%)**
-1°	1	17
225° - 275°	2	33
45° - 90°	3	50
90° - 135° & 275° - 315°	4	67
315° - 0°	5	83
0° - 45° & 135° - 225°	6	100

Πίνακας 6: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας του προσανατολισμού των πρανών.

Αφότου έγινε η ταξινόμηση των κλάσεων κατασκευάστηκε ο τελικός θεματικός χάρτης προσανατολισμού πρανών με προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87) που παρουσιάζεται ακολούθως.



Εικόνα 35: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας του προσανατολισμού των πρανών.



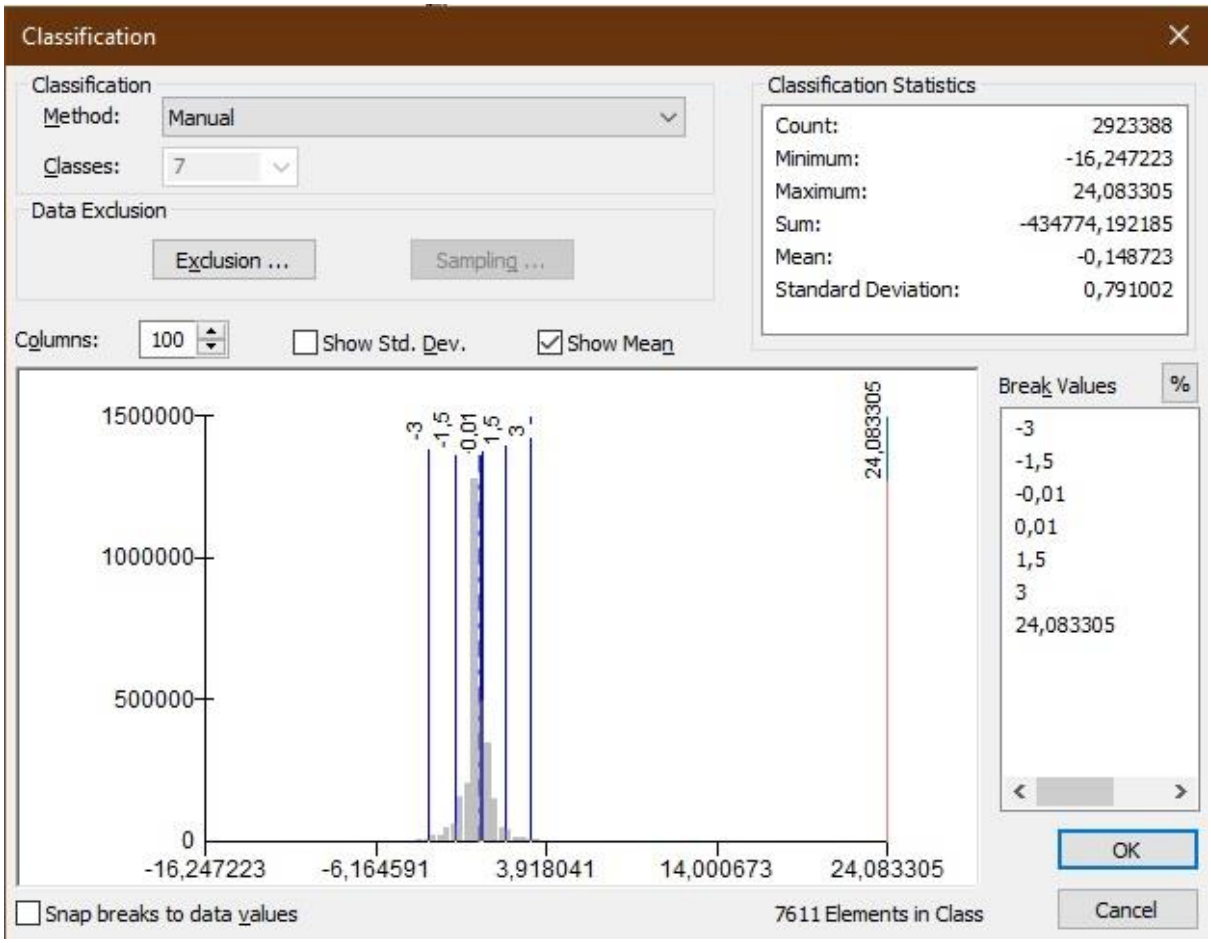
Εικόνα 36: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση προσανατολισμού πρανών

4.2.3 Επίπεδο Μορφολογικής καμπυλότητας (Curvature)

Η μορφολογική καμπυλότητα της περιοχής μελέτης αποτελεί σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, εφόσον επιδρά στις υδρολογικές ιδιότητες των πρανών, οι οποίες, με τη σειρά τους, επηρεάζουν την αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών στις αστοχίες. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι πρανή με κοίλο σχήμα παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση και συγκράτηση νερού, με αποτέλεσμα να γίνεται κορεσμός των σχηματισμών σε νερό και να αυξάνεται η πιθανότητα κατολίσθησης σε σχέση με τα κυρτά πρανή (Ladas, et al., 2007; Antoniou, et al., 2017).

Ο θεματικός χάρτης μορφολογικής καμπυλότητας κατασκευάστηκε εισάγοντας το αρχείο 30m-DEM στο εργαλείο Curvature του Raster surface.

Στη συνέχεια, έγινε διαχωρισμός της καμπυλότητας σε κλάσεις και βαθμονόμηση αυτών χρησιμοποιώντας το εργαλείο Reclassify (3D Analyst), όπου εισάχθηκε ο αρχικός χάρτης Curvature. Γενικά, η καμπυλότητα των πρανών της περιοχής χαρακτηρίζεται από αριθμούς αρνητικούς έως θετικούς. Οι αρνητικές τιμές καμπυλότητας αντιστοιχούν σε κοίλες επιφάνειες πρανούς ενώ οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν κυρτές επιφάνειες, με την τιμή μηδέν να συμβολίζει επίπεδες επιφάνειες. Στον Ν. Ηρακλείου παρατηρούνται τιμές καμπυλότητας από -16,25 έως 24,08 με την τιμή 0 να αντιστοιχεί τοπικά κυρίως στην πεδιάδα της Μεσαράς, στη λεκάνη του Ηρακλείου και στη πεδιάδα του δήμου Μινώα – Πεδιάδας. Η επαναταξινόμηση των κλάσεων έγινε αρχικά με τη μέθοδο Natural Breaks (Jenks) και στη συνέχεια έγινε περεταίρω διόρθωση για την ανάδειξη των επίπεδων περιοχών (***Εικόνα 37***). Αυτό επιτεύχθηκε φτιάχνοντας μία μέση κλάση με τις τιμές -0,01 – 0,01 που προσδιορίζει κυρίως τις προαναφερμένες πεδιάδες ενώ στις υπόλοιπες κλάσεις χρησιμοποιήθηκε σταθερή διαφορά 1,5 και -1,5 για την καλύτερη ανάδειξη των ορεινών περιοχών. Έτσι ορίστηκαν οι κλάσεις 0.01 – 1,5, 1.5 – 3 και -3 – -1,5, -1,5 – -0,01, καθώς και οι κλάσεις >3 και < -3 για τις σημαντικά κυρτές και σημαντικά κοίλες περιοχές αντίστοιχα. Αυτή η επαναταξινόμηση και οι βαθμοί επιδεκτικότητας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (***Πίνακας 7)***.

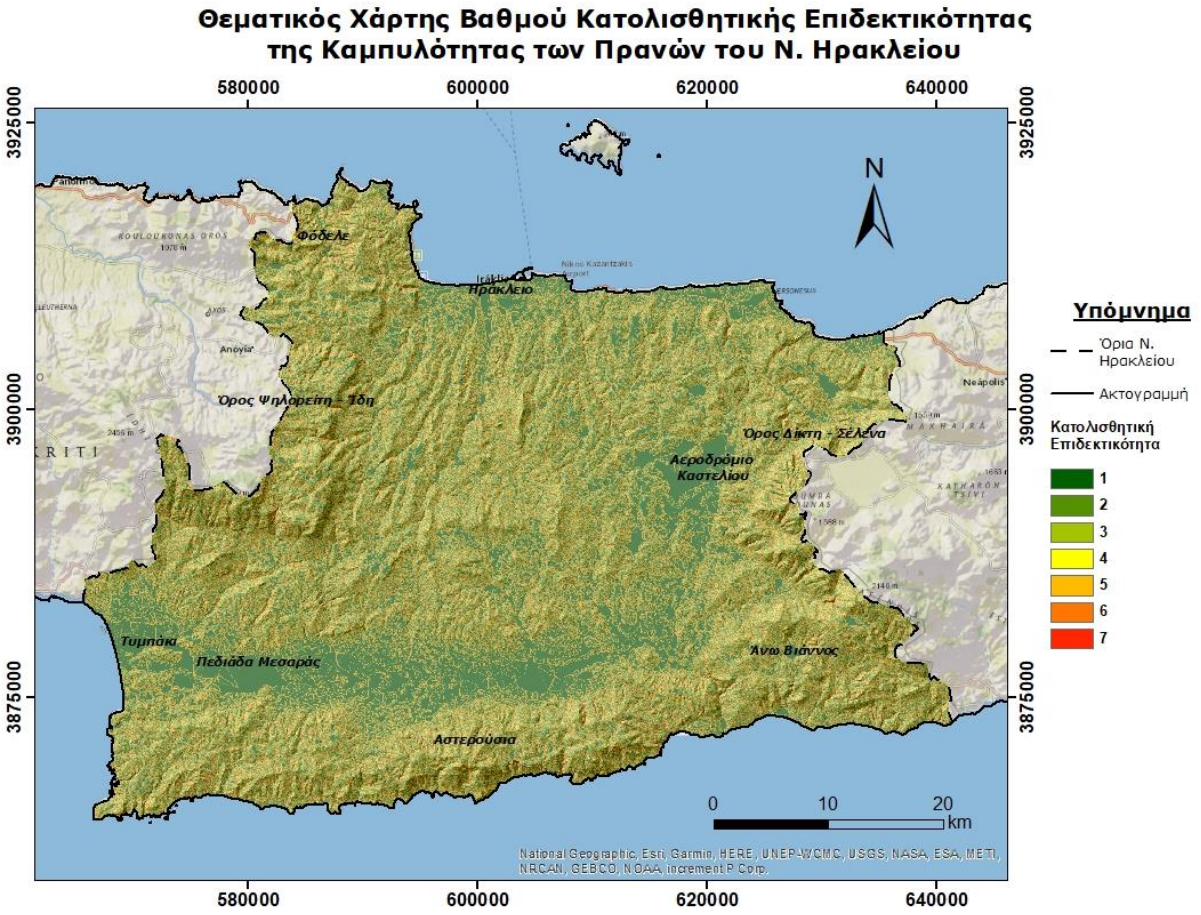


Εικόνα 37: Ιστόγραμμα διαχωρισμού κλάσεων για το επίπεδο μορφολογικής καμπυλότητας. Φαίνονται οι κλάσεις που ορίστηκαν.

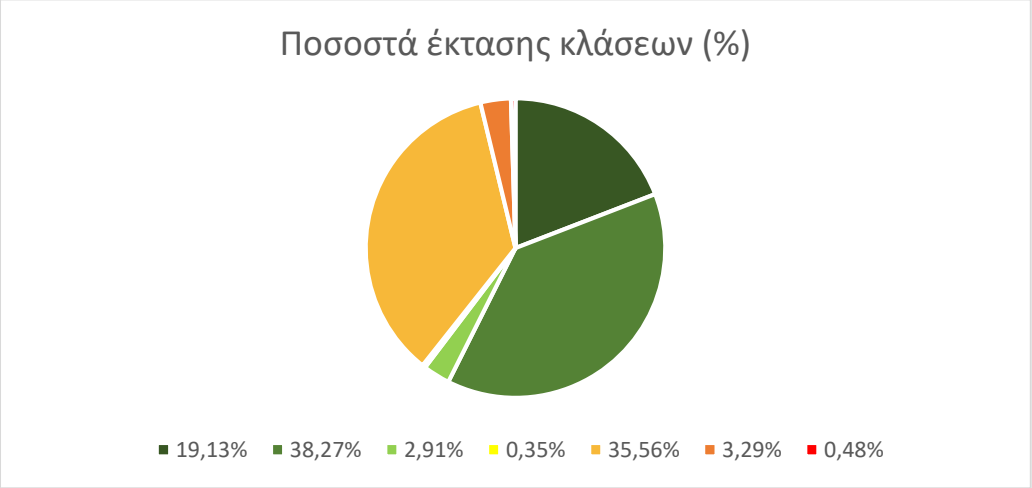
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση της μορφολογικής καμπυλότητας της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις μορφολογικής καμπυλότητας	**Βαθμός Επιδεκτικότητας**	**Κανονικοποιημένος βαθμός επιδεκτικότητας (%)**
-0.01 - 0.01	1	14
0.01 - 1.5	2	29
1.5 - 3	3	43
> 3	4	57
-1.5 - -0.01	5	71
-3 - -1.5	6	86
< -3	7	100

Πίνακας 7: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μορφολογικής καμπυλότητας.

Ο θεματικός χάρτης της μορφολογικής καμπυλότητας που προέκυψε από τον διαχωρισμό των κλάσεων με προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87) φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 38: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της καμπυλότητας των πρανών.



Εικόνα 39: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μορφολογικής καμπυλότητας

4.2.4 Επίπεδο ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών

Η γεωλογική δομή μίας περιοχής επηρεάζει άμεσα την συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων και αποτελεί τον βασικότερο και πιο κρίσιμο παράγοντα κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Κάθε γεωλογικός σχηματισμός έχει ένα σύνολο χαρακτηριστικών μηχανικών και υδρογεωλογικών ιδιοτήτων που τον καθιστούν λιγότερο ή περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα σε σχέση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς.

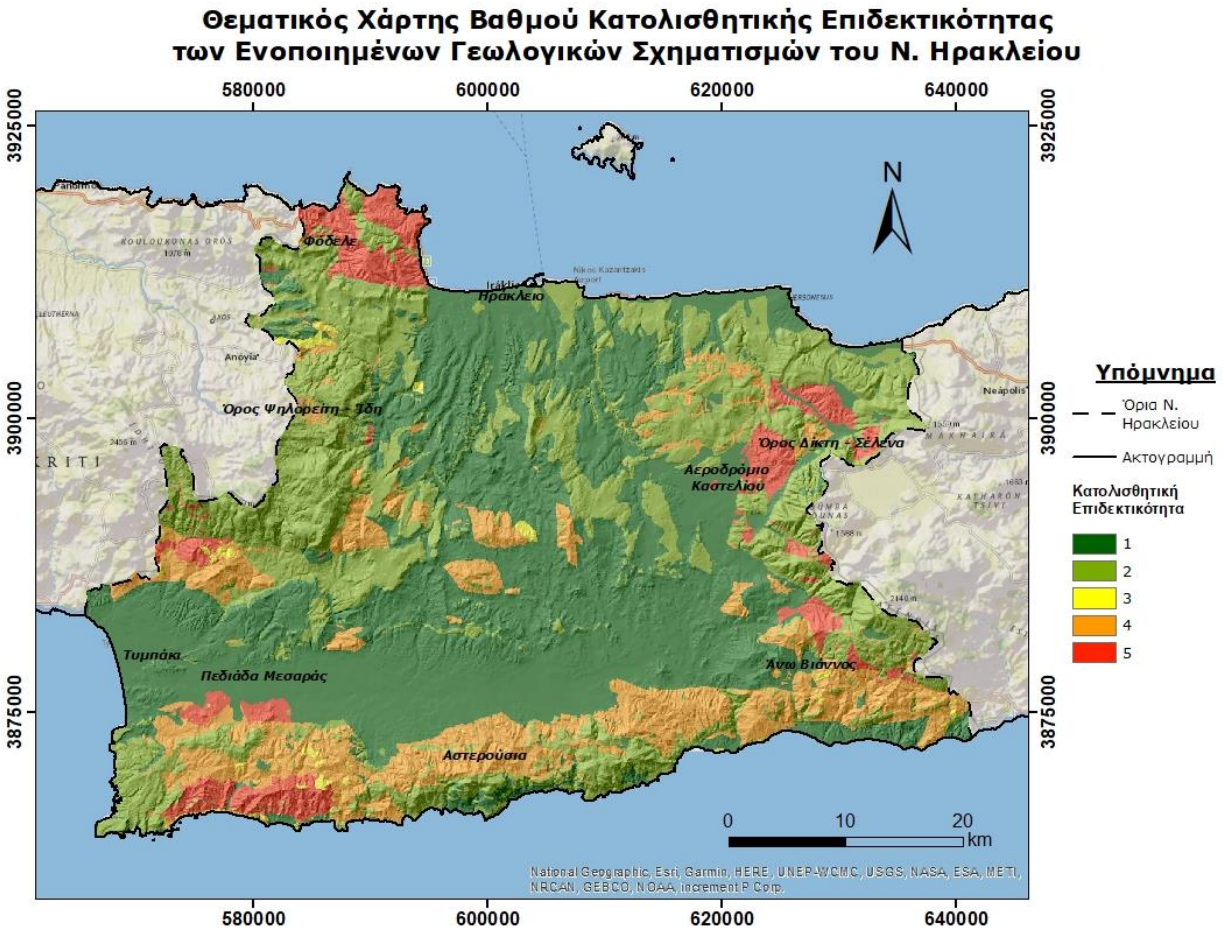
Για την κατασκευή του επιπέδου ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών χρησιμοποιήθηκαν 8 φύλλα χαρτών του Ε.Α.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50.000 (Φύλλο Μέλαμπες, Φύλλο Αχεντρίας, Φύλλο Αντισκάριον, Φύλλο Ηράκλειον, Φύλλο Μόχος, Φύλλο Τυμπάκιον, Φύλλο Επάνω Αρχάναι, Φύλλο Άνω Βιάννος) και ένα φύλλο χάρτη του Ν. Κατσιαβριά, κλίμακας 1:50.000 (Φύλλο Ανώγεια). Τα φύλλα αυτά γεωαναφέρθηκαν σε περιβάλλον ArcMap 10.6 σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ‘87) με βάση το shapefile της ακτογραμμής της Ελλάδας που λήφθηκε από το Γ.Υ.Σ. . Ακολούθως, έγινε ψηφιοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών και η απλοποίησή τους με βάση τα λιθολογικά τους χαρακτηριστικά εντός των ορίων του Ν. Ηρακλείου που λήφθηκε από την ιστοσελίδα της ΕΛΣΤΑΤ. Το shapefile των λιθολογικών σχηματισμών μετατράπηκε σε αρχείο Raster με Cell Size 30 x 30m βάσει της απλοποιημένης λιθολογίας με τη χρήση του εργαλείου Polygon to Raster. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το εργαλείο Reclassify (3D Analyst) έγινε επαναταξινόμηση των

γεωλογικών σχηματισμών με βάση τον βαθμό επιδεκτικότητας τους, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *8***).

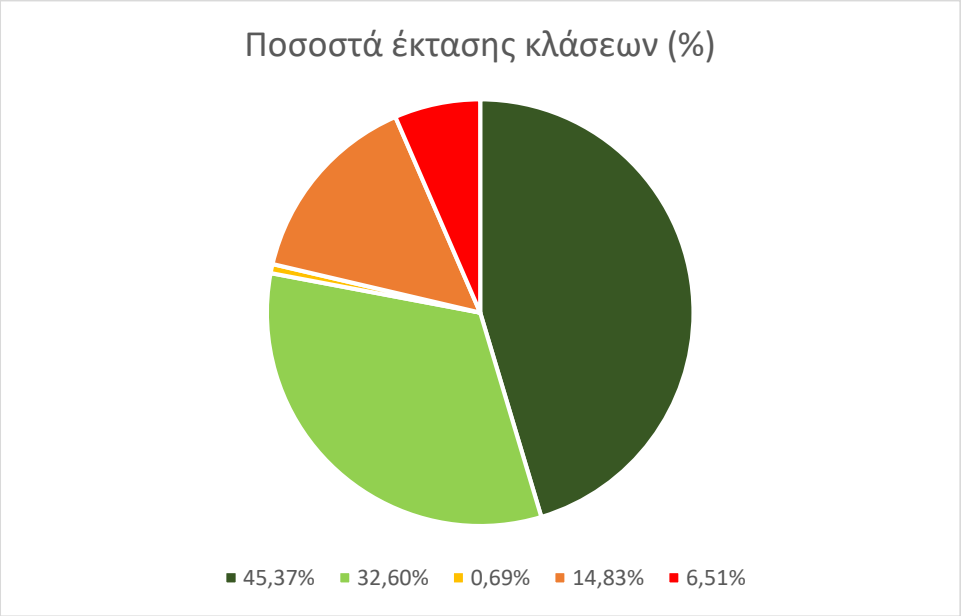
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση των ενοποποιημένων γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις Λιθολογίας	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
Θαλάσσιες & παράκτιες αποθέσεις/Κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι - ιλύς, μάργες & κροκαλοπαγή/Χαλαρά ιζήματα	1	20
Ασβεστόλιθοι, δολομίτες & μάρμαρα/Γύψοι	2	40
Οφιόλιθοι/Μαγματικά πετρώματα μέσα σε ιζήματα	3	60
Γρανιτικές διεισδύσεις/Φλύσχης	4	80
Σχιστόλιθοι, φυλλίτες, χαλαζίτες & γνεύσιοι	5	100

Πίνακας 8: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας των ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών.

Ο τελικός θεματικός χάρτης σεισμικής επιδεκτικότητας των ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών του Ν. Ηρακλείου βάσει της παραπάνω βαθμονόμησης φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 40: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας των ενοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών.



Εικόνα 41: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση ενοποιημένων λιθολογικών σχηματισμών

4.2.5 Επίπεδο απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο μίας περιοχής χαρακτηρίζεται από έντονη εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων, πράγμα που το καθιστά παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε έρευνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη ροή του, το νερό του δικτύου προκαλεί έντονη διάβρωση των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών τους οποίους διαπερνά προκαλώντας εδαφικές υποχωρήσεις σε κοντινή εμβέλεια γύρω από τη ροή του ποταμού (Antoniou, et al., 2017; Krassakis & Loupasakis, 2018; Ladas, et al., 2007; Kouli, et al., 2010). Επιπλέον τα ποτάμια προκαλούν τον κορεσμό των πρανών σε νερό, πράγμα που συνεπάγεται την ελάττωση της σταθερότητάς τους (Ladas, et al., 2007). Η περιοχή μελέτης όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο αποτελείται από πυκνό υδρογραφικό δίκτυο που συνίσταται κυρίως από ποταμούς χειμαρρώδους τύπου, που λόγω της μεγάλης μεταφορικής τους ικανότητας διαβρώνουν τα ανώτερα εδαφικά υλικά του πρανούς και τα αποθέτουν σε λεκάνες απορροής όπως η λεκάνη του Ηρακλείου και η κοιλάδα της Μεσαράς.

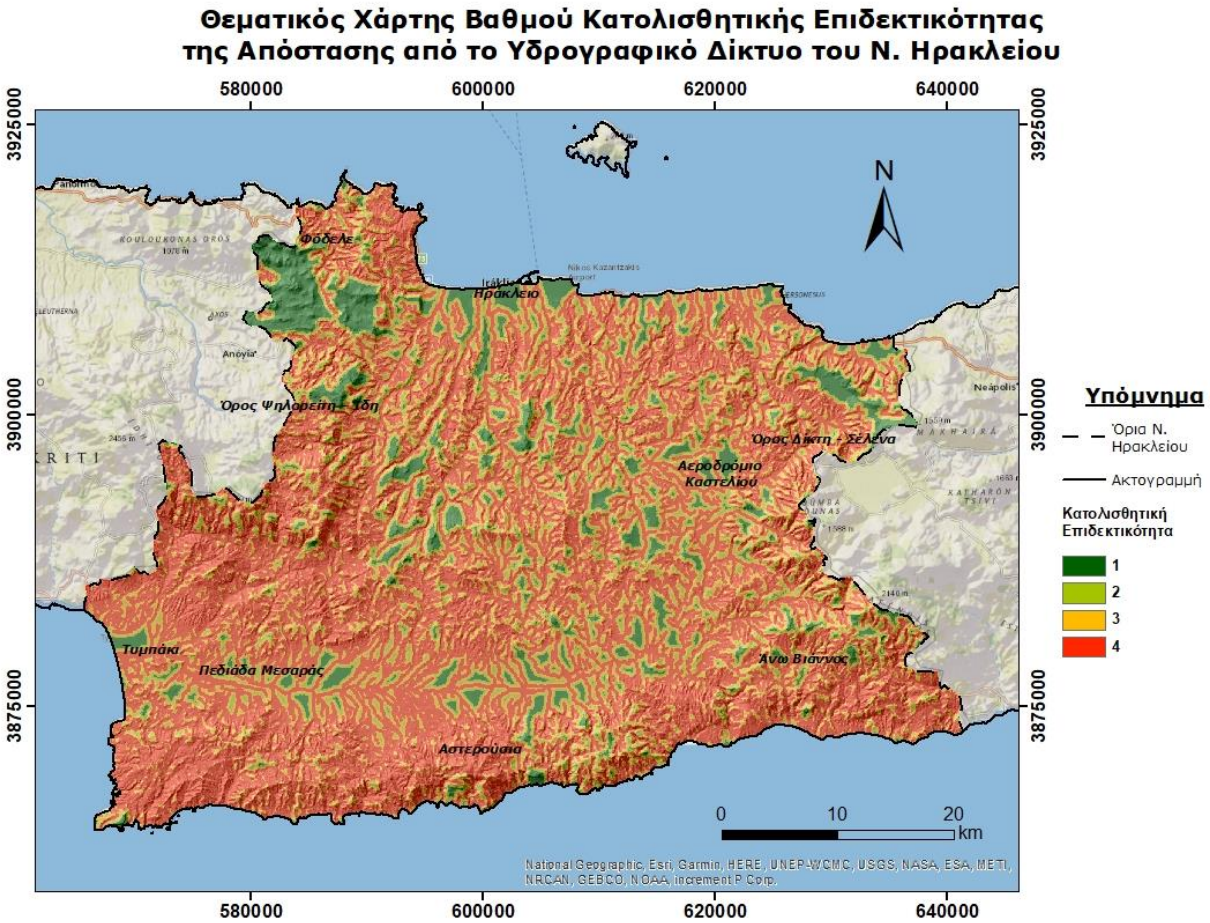
Για την κατασκευή του θεματικού χάρτη για την απόσταση από τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου του Ν. Ηρακλείου χρησιμοποιήθηκε αρχείο shapefile με το υδρογραφικό δίκτυο που λήφθηκε από την ιστοσελίδα της Γ.Υ.Σ. . Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Buffer στο αρχείο του δικτύου ώστε να οριστούν οι εξής ζώνες απόστασης: 1) < 150m, 2) 150 – 300m, 3) 300 – 450m, ακολουθώντας σχετική βιβλιογραφία (Krassakis & Loupasakis, 2018). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο union εισάγοντας το αρχείο buffer και το Polygon Shapefile της περιοχής του Ν. Ηρακλείου από την ΕΛΣΤΑΤ ώστε να οριστούν και οι αποστάσεις > 450m. Ακολούθως, έγινε χρήση του εργαλείου clip για την αφαίρεση των τμημάτων των ζωνών που επεκτείνονταν εκτός της περιοχής μελέτης.

Για την αναγνώριση της επιδεκτικότητας στην περιοχή βάσει της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο ορίστηκε βαθμός επιδεκτικότητας στην κάθε μία από τις κλάσεις/ζώνες που προαναφέρθηκαν, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *9***).

Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο	Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων	Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)
> 450m	1	25
300 - 450m	2	50
150 - 300m	3	75
< 150m	4	100

Πίνακας 9: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

Η τελική εικόνα του χάρτη απόστασης από τα ποτάμια που παράχθηκε σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87) φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 42: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

Εικόνα 43: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο

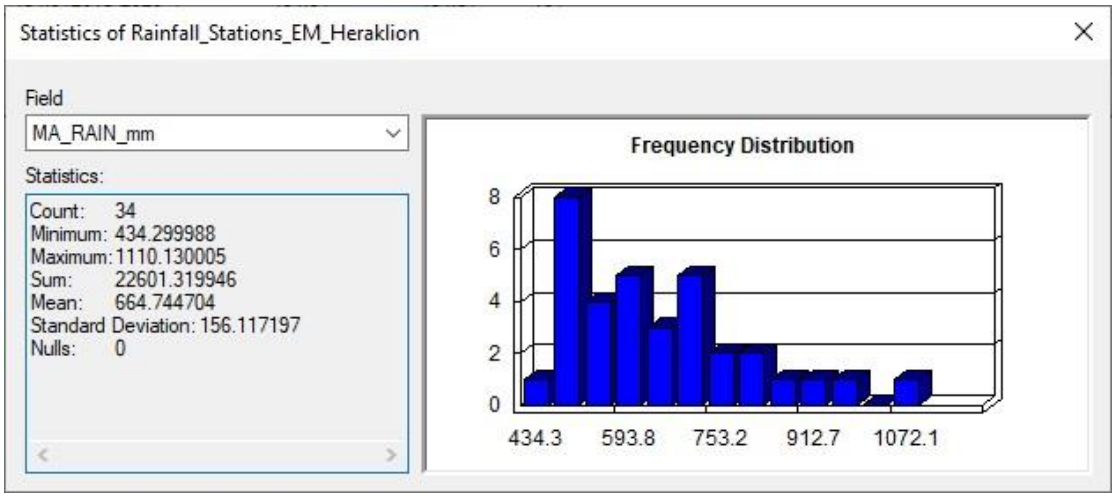
4.2.6 Επίπεδο χωρικής παρεμβολής βροχομετρικών δεδομένων

Στις έρευνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη αποτελούν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και κυρίως οι βροχοπτώσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης ετησίως. Η μέση ετήσια βροχόπτωση μίας περιοχής παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην ελάττωση της σταθερότητας των γεωλογικών σχηματισμών που τη δομούν, οδηγώντας στην αστοχία τους. Πιο συγκεκριμένα, η διείσδυση του μετεωρικού νερού στις ασυνέχειες και στους πόρους του πετρώματος προκαλούν κορεσμό του πετρώματος και διεύρυνση των ασυνεχειών και, κατά συνέπεια, χάνεται η σταθερότητα του και δημιουργούνται κατολισθήσεις (Antoniou, et al., 2017). Επιπλέον, η αύξηση του νερού του πορώδους συνεπάγεται διόγκωση ορισμένων σχηματισμών ρευστοποίηση τους, όπως συμβαίνει στα αργιλικά εδάφη, πράγμα που αποτελεί συχνό αίτιο κατολίσθησης.

Για την κατασκευή του θεματικού χάρτη του επιπέδου χωρικής παρεμβολή βροχομετρικών δεδομένων συλλέχθηκαν μηνιαία βροχομετρικά δεδομένα 34 μετεωρολογικών σταθμών στα χρονικά διαστήματα έτους 1931 – 2006 και έτους 2009 – 2020 από την ιστοσελίδα της

Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης (https://www.apdkritis.gov.gr/el/dataset/) και της Γεωπύλης της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης (https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/apps/webappviewer/index.html?id=62605a7792d340f4a91e61459b2856cf&fbclid=IwAR1OIwqYlrl_Y4GOLKTqoHkxoGaJndjpgX2Hv27jP7N7uph3DGwm0B_rVyI και https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/home/item.html?id=9efb0daa9d95436994fe2e36d0b032d9).

Για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ύψους βροχής των σταθμών αυτών έγινε άθροιση των μηνιαίων υψών βροχής του κάθε έτους και στη συνέχεια βρέθηκε ο μέσος όρος αυτών (μέσο ετήσιο ύψος βροχής) για το καθένα από τα δύο χρονικά διαστήματα που προαναφέρθηκαν. Στους σταθμούς που βρέθηκαν δεδομένα και για τα δύο χρονικά διαστήματα υπολογίστηκε ο μέσος όρος του μέσου ετήσιου ύψους βροχής των δύο διαστημάτων, ο οποίος έγινε αποδεκτός ως το πραγματικό μέσο ετήσιο ύψος. Βάσει των παραπάνω δεδομένων βρέθηκε ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής του Ν. Ηρακλείου στο διάστημα 1931 – 2020 είναι περίπου 665mm (**Εικόνα *44***).



Εικόνα 44: Στατιστικά στοιχεία του μέσου ετήσιου ύψους βροχής στο Ν. Ηρακλείου από το κατασκευασμένο αρχείο Point Shapefile των θέσεων μετεωρολογικών σταθμών στο σύστημα GIS

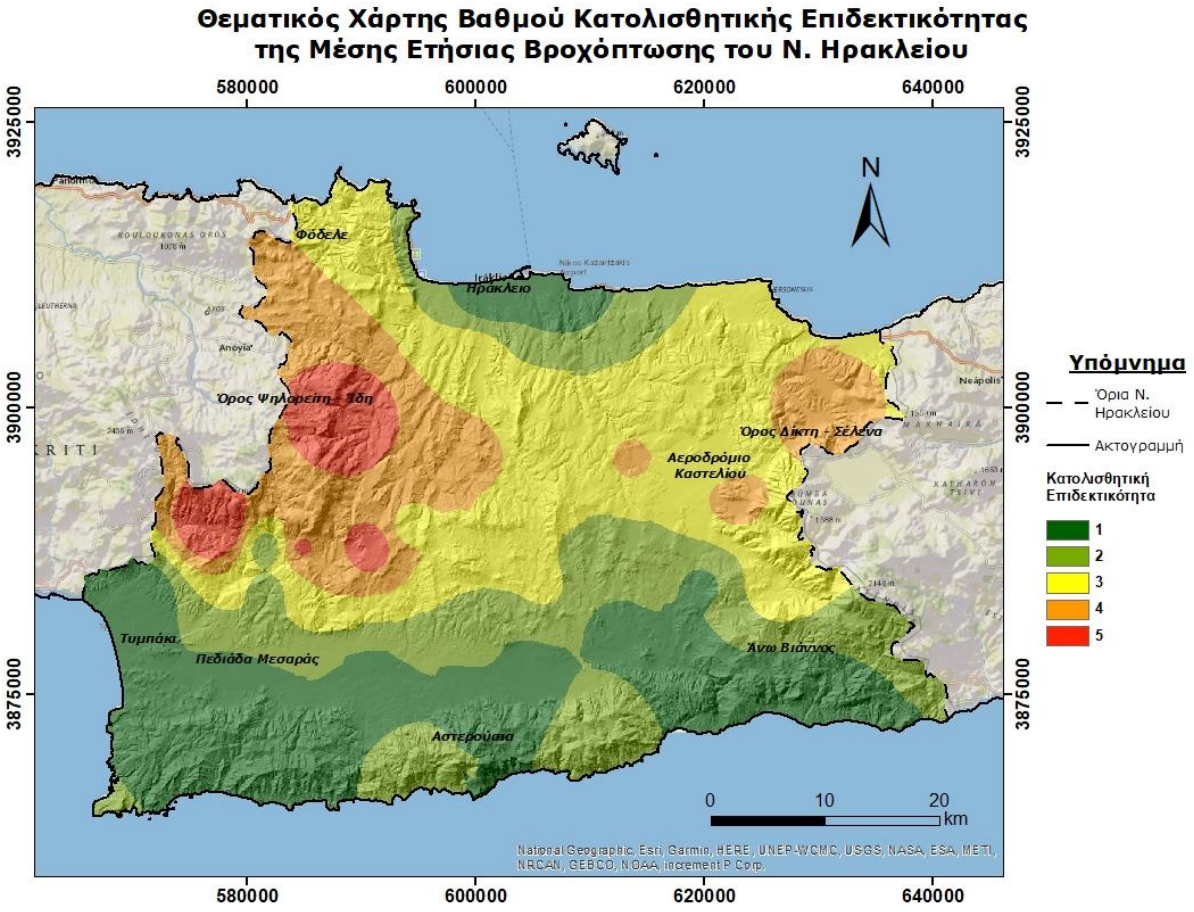
Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.6 όπου ψηφιοποιήθηκαν τα σημεία των θέσεων των σταθμών σε Shapefile όπου αντιστοιχήθηκαν τα μέσα ετήσια ύψη βροχής, καθώς και το υψόμετρο του κάθε σταθμού. Στη συνέχεια, έγινε χωρική παρεμβολή των δεδομένων (Interpolation) με τη χρήση του εργαλείου IDW (Spatial

Analyst) που θεωρείται η καλύτερη μέθοδος χωρικής παρεμβολής για δεδομένα μεγάλης διασποράς (Ευελπίδου, et al., 2008; Krassakis & Loupasakis, 2018). Ακολούθως, το κατασκευασμένο αρχείο Raster (Cell Size = 30 x 30m) αναλύθηκε σε κλάσεις κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάσει του ύψους βροχής με τη χρήση του εργαλείου Reclassify (3D Analyst) και της τεχνικής Natural Breaks. Έτσι, ορίστηκαν οι κλάσεις: 1) < 595mm, 2) 596 - 675mm, 3) 676 - 756mm, 4) 757 - 854mm και 5) > 855mm, στις οποίες δόθηκαν βαθμοί επιδεκτικότητας θεωρώντας ότι ο κίνδυνος κατολισθητικών φαινομένων αυξάνεται με το ύψος βροχής (**Πίνακας *10***).

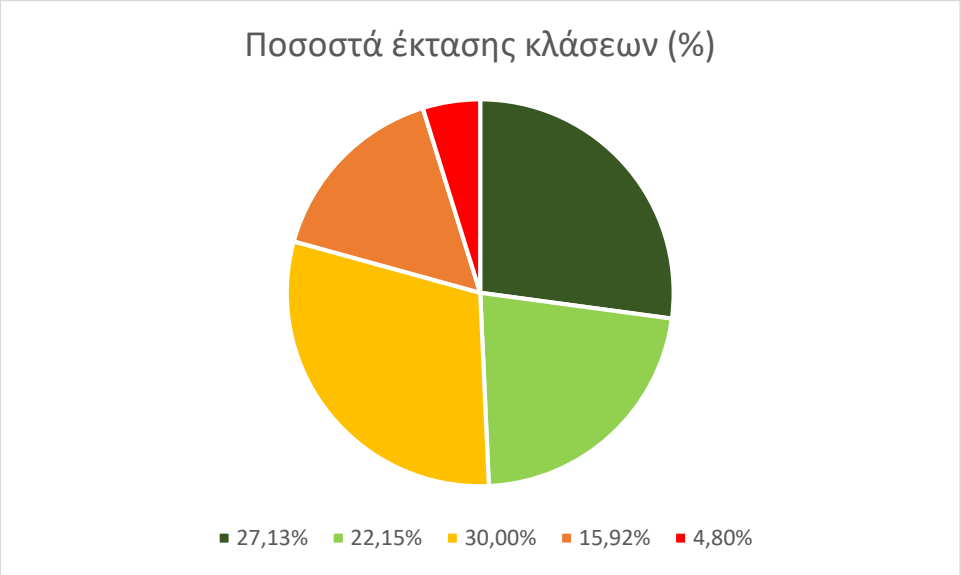
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (mm)	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
< 595mm	1	20
596 - 675mm	2	40
676 - 756mm	3	60
757 - 854mm	4	80
> 855mm	5	100

Πίνακας 10: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.

Η παραπάνω διαδικασία οδήγησε στην κατασκευή του παρακάτω θεματικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάσει του μέσου ετήσιου ύψους βροχής για τον Ν. Ηρακλείου σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ‘87).



Εικόνα 45: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.



Εικόνα 46: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση μέσης ετήσιας βροχόπτωσης

4.2.7 Επίπεδο Χρήσεων Γης

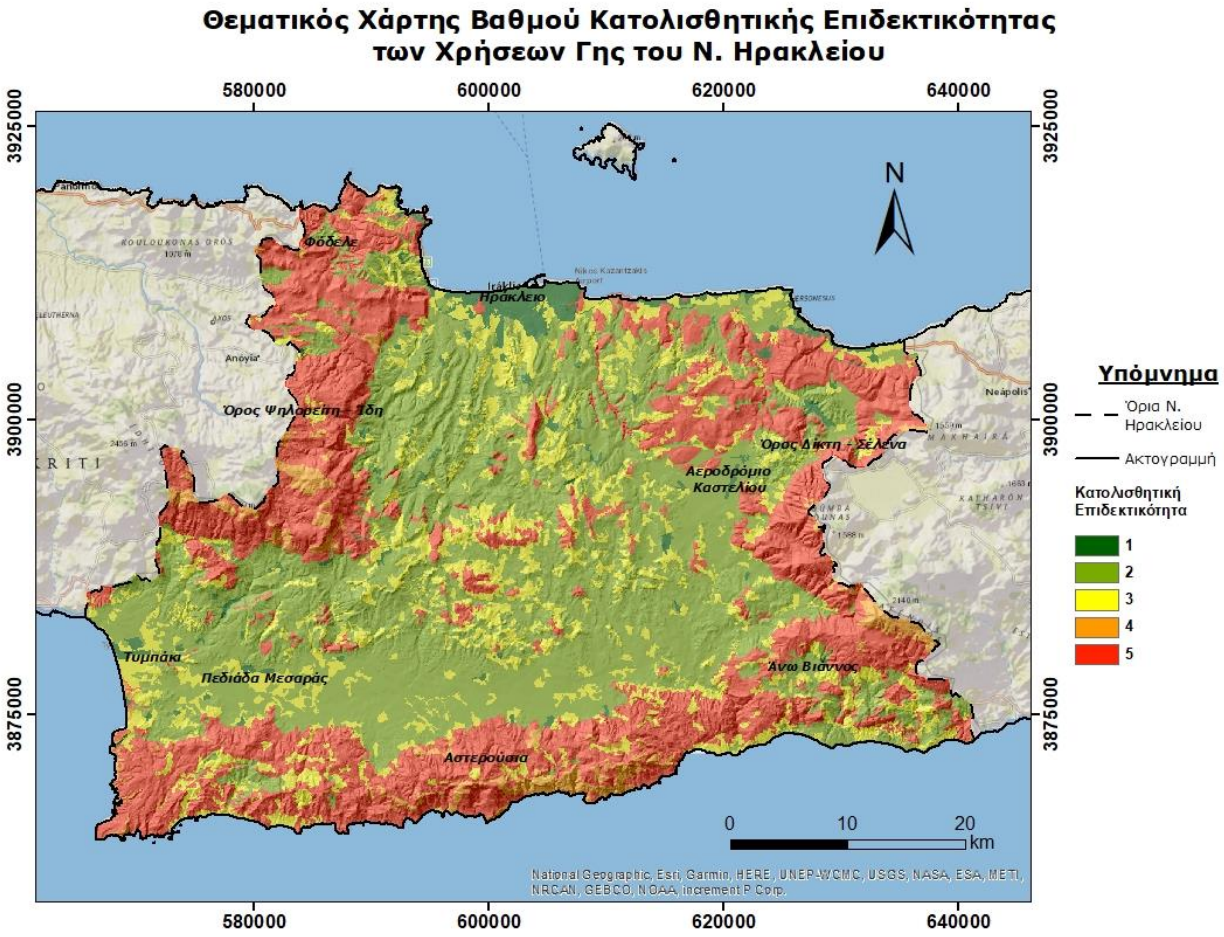
Οι χρήσεις γης αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την δραστηριοποίηση των κατολισθήσεων, διότι τα τεχνικά έργα όπως σήραγγες και ορύγματα, καθώς άλλες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως θέσεις εξορύξεων συμβάλλουν στην αστοχία των πετρωμάτων. Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν κυρίως καλλιεργήσιμες περιοχές με αμπελώνες και ελιές, που λόγω της θέσης τους (κυρίως σε περιοχές ήπιου αναγλύφου) θεωρήθηκε ότι δεν κινδυνεύουν από κατολισθήσεις.

Τα απαραίτητα δεδομένα για την κατασκευή του θεματικού χάρτη του επιπέδου χρήσεων γης προήλθαν από το ευρωπαϊκό πρότυπο Corine του έτους 2018 (https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018). Τα δεδομένα αυτά προβλήθηκαν σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA 87) μέσω του εργαλείου Project Raster του ArcMap 10.6 και κόπηκαν στην περιοχή του νομού με τη βοήθεια του εργαλείου Clip βάσει του πολυγώνου του Ν. Ηρακλείου. Ακολούθως έγινε μία απλοποίηση των κατηγοριών χρήσης γης βάσει των κωδικών του CORINE ώστε να σχηματιστούν οι εξής κατηγορίες: αστικός ιστός, τεχνητές περιοχές, περιοχές που σχετίζονται με νερό, περιοχές με φυτείες, αρδευόμενα εδάφη, μη-αρδευόμενα εδάφη, βοσκοτόπια, καλλιεργήσιμες περιοχές, άγονες ή με αραιά βλάστηση περιοχές, φυτοκαλυμμένες περιοχές και δάση και περιοχές τεχνικών έργων ή εξορύξεων. Στη συνέχεια, με το εργαλείο Reclassify (3D Analyst) ορίστηκε βαθμός επιδεκτικότητας για τις παραπάνω κατηγορίες (**Πίνακας *11***) βάσει βιβλιογραφίας (Kouli, et al., 2010).

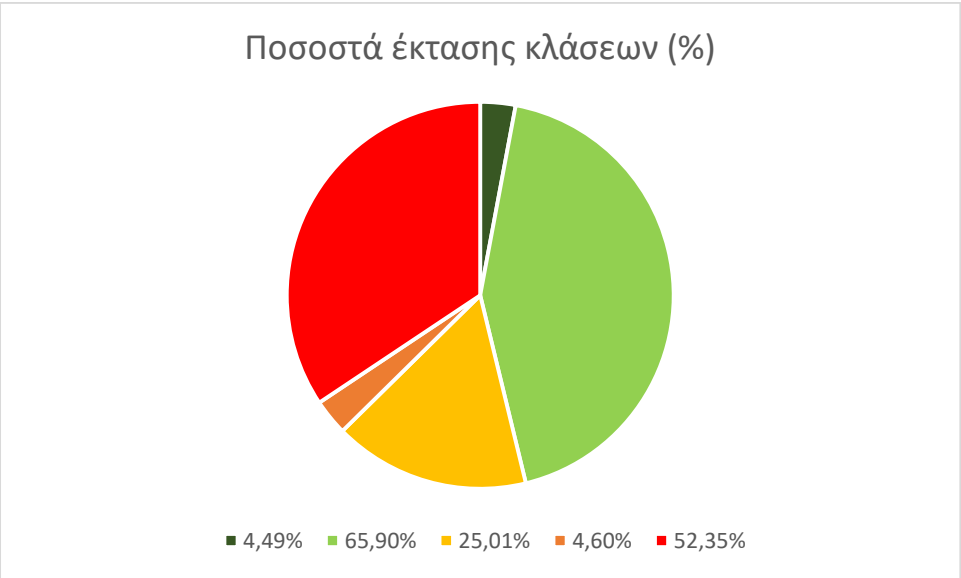
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις χρήσεων γης	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
Αστικός ιστός/Τεχνητές περιοχές/Περιοχές που σχετίζονται με νερό	1	20
Αρδευόμενα εδάφη/Περιοχές με φυτείες	2	40
Μη-αρδευόμενα εδάφη/Βοσκοτόπια/Καλλιεργήσιμες περιοχές	3	60
Άγονες ή με αραιά βλάστηση περιοχές	4	80
Περιοχές τεχνικών έργων ή εξορύξεων/Φυτοκαλυμμένες περιοχές και δάση	5	100

Πίνακας 11: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας των χρήσεων γης.

Από αυτή την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ο παρακάτω θεματικός χάρτης του επιπέδου των χρήσεων γης σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ‘87).



Εικόνα 47: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας των χρήσεων γης.



Εικόνα 48: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση χρήσεων γης.

4.2.8 Επίπεδο απόστασης από το οδικό δίκτυο

Η κατασκευή του θεματικού επιπέδου απόστασης από το οδικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι το οδικό δίκτυο αποτελεί ανθρώπινη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον που σαφέστατα μπορεί να οδηγήσει ένα πρανές σε αστοχία. Για παράδειγμα, η υποσκαφή ενός πρανούς για την κατασκευή οδικού δικτύου αλλάζει την ευστάθειά του λόγω αύξησης των διατμητικών τάσεων και το καθιστά επιρρεπή σε αστοχία (Antoniou, et al., 2017).

Για την κατασκευή του συγκεκριμένου θεματικού επιπέδου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα οδικού δικτύου της περιοχής από Open Street Map (OSM). Στην συνέχεια, αφαιρέθηκαν τα στοιχεία που θεωρήθηκαν μη απαραίτητα για την διερεύνηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, όπως οδοί πυκνού αστικού ιστού και δρόμοι που βρίσκονται σε πεδιάδες και δεν δέχθηκαν ανθρωπογενή παρέμβαση για την δημιουργία τους. Τα κύρια στοιχεία του συγκεκριμένου θεματικού επιπέδου αποτελούν το οδικό δίκτυο κατασκευασμένο με υποσκαφή πρανών, δρόμοι ταχείας κυκλοφορίας και αυτοκινητόδρομοι. Επίσης, η επιλογή των κομματιών του οδικού δικτύου για την έρευνα έγινε και με βάση τις γεωμορφολογικές συνθήκες από τις οποίες περιβάλλεται το συγκεκριμένο κομμάτι του οδικού δικτύου.

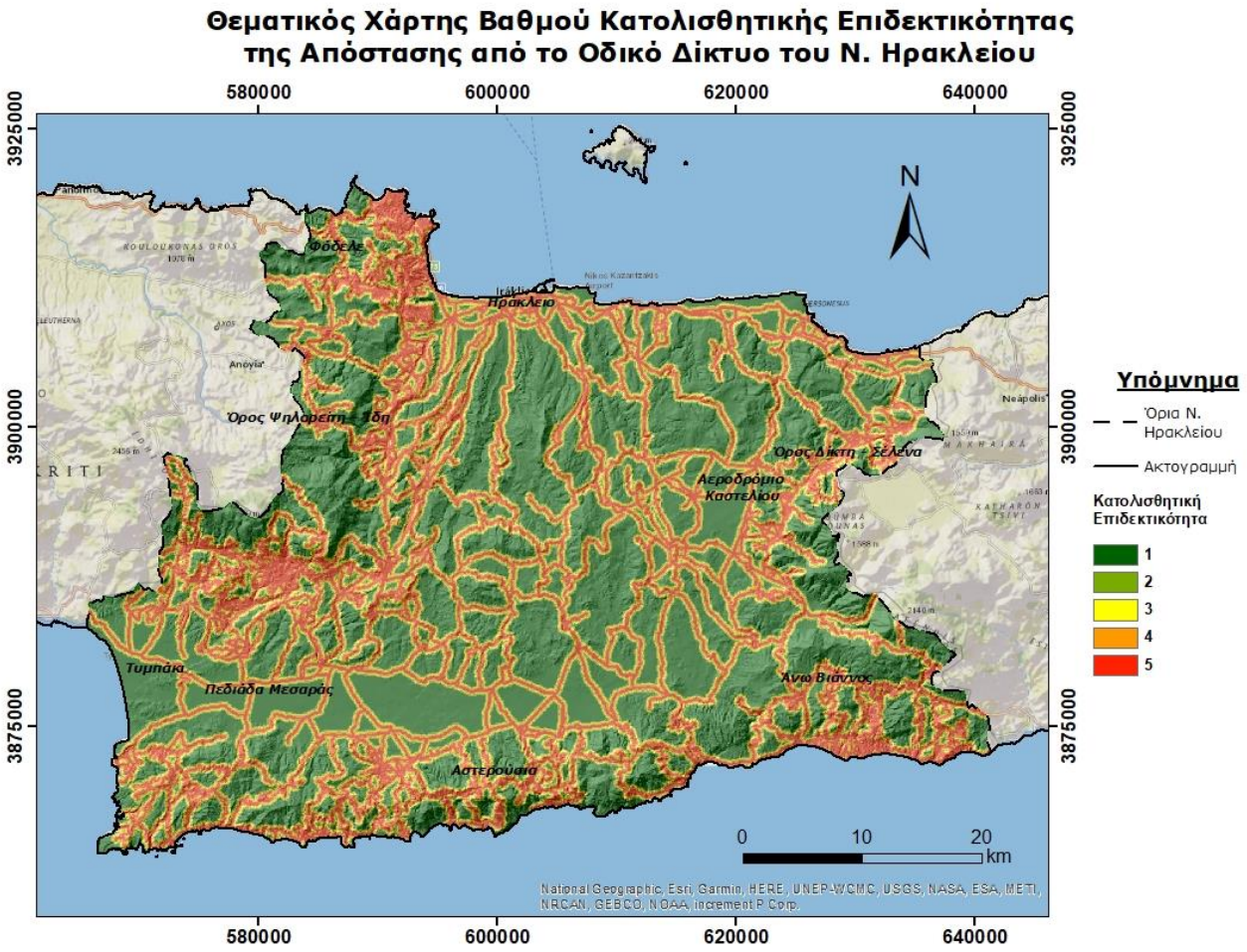
Αφού έγινε η σύνταξη του επιπέδου σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Buffer στο αρχείο του δικτύου ώστε να οριστούν ζώνες απόστασης: 1) < 100m, 2) 101 – 200m, 3) 201 – 300m, 4) 301 – 400m, και 5) > 400m ακολουθώντας σχετική βιβλιογραφία (Krassakis & Loupasakis, 2018). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο union εισάγοντας το αρχείο buffer και το Polygon Shapefile της περιοχής του Ν. Ηρακλείου από την ΕΛΣΤΑΤ ώστε να οριστούν και οι αποστάσεις > 400m. Ακολούθως, έγινε χρήση του εργαλείου clip για την αφαίρεση των τμημάτων των ζωνών που επεκτείνονταν εκτός της περιοχής μελέτης. Το τελικό αρχείο raster κατασκευάστηκε σε ανάλυση κανάβου cell size = 30 x 30m.

Για την αναγνώριση της επιδεκτικότητας στην περιοχή βάσει της απόστασης από το οδικό δίκτυο ορίστηκε βαθμός επιδεκτικότητας στην κάθε μία από τις κλάσεις/ζώνες που προαναφέρθηκαν, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *12***).

Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση της απόσταση από το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις απόστασης από το οδικό δίκτυο	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
0 - 100m	5	100
101 - 200m	4	80
201 - 300m	3	60
301 - 400m	2	40
> 400m	1	20

Πίνακας 12: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το οδικό δίκτυο.

Τελικά, κατασκευάστηκε ο βαθμονομημένος χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάσει της εγγύτητας προς το οδικό δίκτυο σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87), όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 49: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από το οδικό δίκτυο.

Εικόνα 50: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση εγγύτητας του οδικού δικτύου.

4.2.9 Επίπεδο απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας κατολίσθησης είναι ο τεκτονισμός, διότι δημιουργεί απότομους κρημνούς, διακλάσεις και διατμητικές ζώνες σε αποσαθρωμένα και κατακερματισμένα πετρώματα, οδηγώντας σε πιθανή εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων (Antoniou, et al., 2017; Ladas, et al., 2007).

Για την κατασκευή του συγκεκριμένου θεματικού επιπέδου ψηφιοποιήθηκαν τα τεκτονικά στοιχεία της περιοχής σύμφωνα με τα γεωαναφερμένα φύλλα του ΙΓΜΕ που προαναφέρθηκαν (σελ. ***81***, παράγραφος ***4.2.4***).

Αφού έγινε η σύνταξη του επιπέδου, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Buffer στο αρχείο του δικτύου ώστε να οριστούν ζώνες απόστασης: 1) > 500m, 2) 250 – 500m, 3) < 250m, ακολουθώντας σχετική βιβλιογραφία (Krassakis & Loupasakis, 2018). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο union εισάγοντας το αρχείο buffer και το Polygon Shapefile της περιοχής του Ν. Ηρακλείου από την ΕΛΣΤΑΤ ώστε να οριστούν και οι αποστάσεις > 500m. Ακολούθως, έγινε χρήση του εργαλείου clip για την αφαίρεση των τμημάτων των ζωνών που επεκτείνονταν εκτός της περιοχής μελέτης. Το τελικό αρχείο raster κατασκευάστηκε σε ανάλυση κανάβου cell size = 30 x 30m.

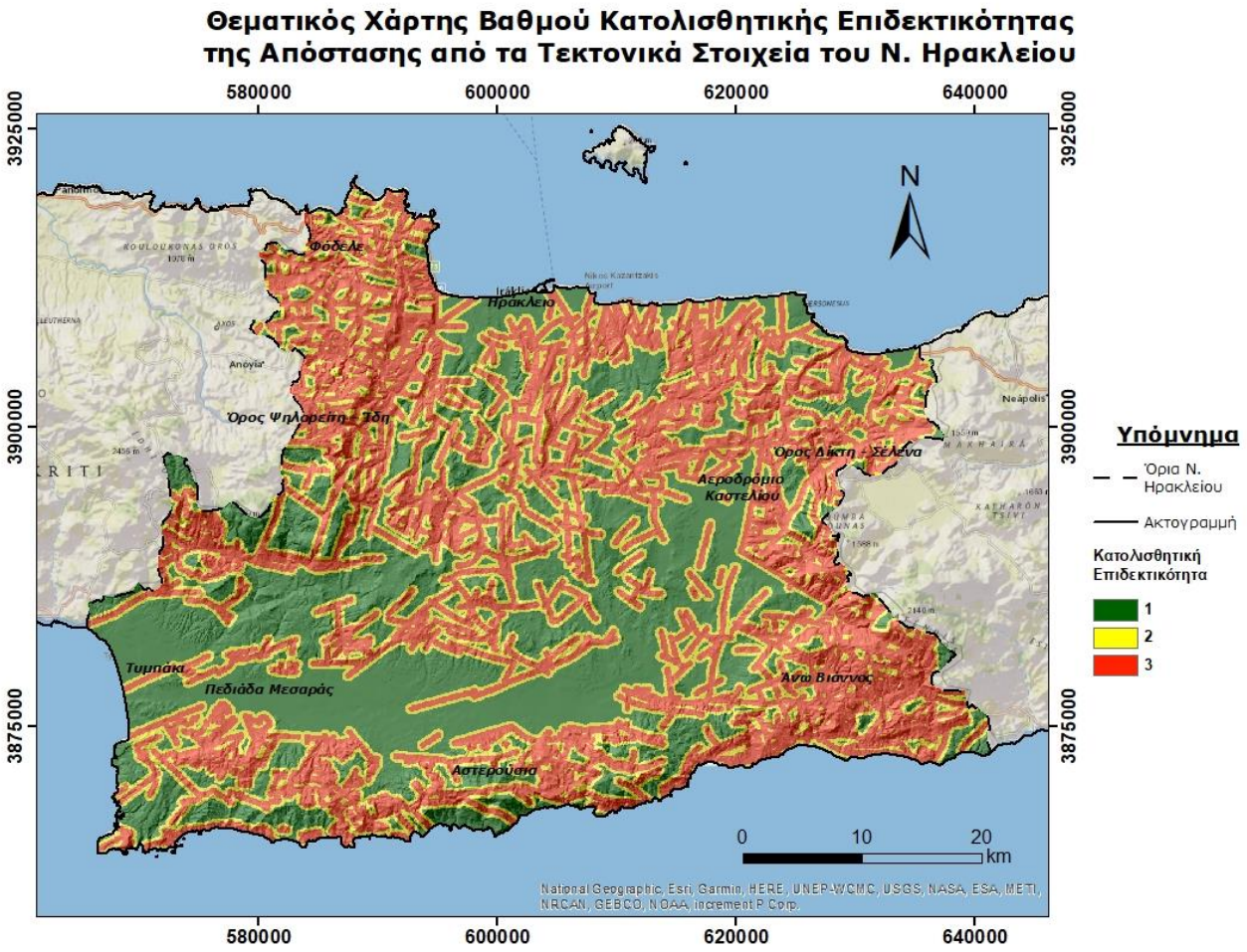
Για την αναγνώριση της επιδεκτικότητας στην περιοχή βάσει της απόστασης από τα

τεκτονικά στοιχεία ορίστηκε βαθμός επιδεκτικότητας στην κάθε μία από τις κλάσεις/ζώνες που προαναφέρθηκαν, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας *13***).

Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
> 500m	1	33
250 - 500m	2	67
< 250m	3	100

Πίνακας 13: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία.

Τελικά, κατασκευάστηκε ο βαθμονομημένος χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάσει της εγγύτητας των τεκτονικών στοιχείων σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87), όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 51: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία.

Εικόνα 52: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση εγγύτητας των τεκτονικών στοιχείων.

4.2.10 Επίπεδο πάχους του εδαφικού καλύμματος

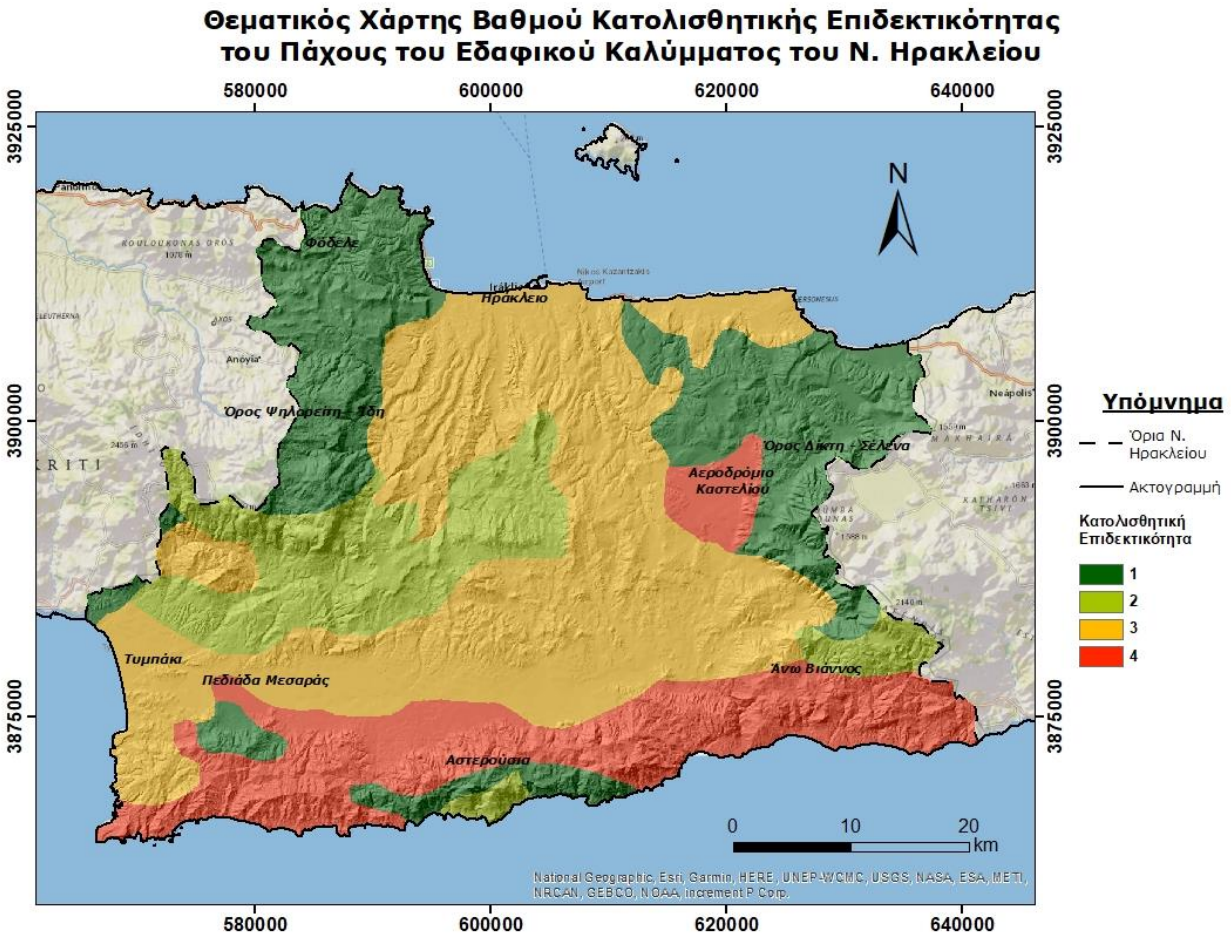
Το πάχος των εδαφικών σχηματισμών μίας περιοχής επηρεάζει τόσο την πιθανότητα κατολισθητικών γεγονότων, όσο και τις επιπτώσεις που προκαλούνται από την εδαφική υποχώρηση. Πιο συγκεκριμένα, εδάφη με μεγάλο πάχος χαλαρού υλικού έχουν αυξημένη πιθανότητα να υποχωρήσουν ενώ η μεγάλη ποσότητα εδαφικού υλικού που θα κινηθεί θα προκαλέσει σημαντικές ζημιές και πιθανώς ανθρώπινες απώλειες.

Ο θεματικός χάρτης του επιπέδου πάχους του εδαφικού καλύμματος έχει προέλθει από τον χάρτη εδαφικής κατάταξης της Ελλάδας, κλίμακα 1:500.000 (Yassoglou, 2004). Αρχικά, έγινε γεωαναφορά του χάρτη σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA 87) και ψηφιοποίηση των τύπων εδάφους της περιοχής μελέτης σε αρχείο τύπου Polygon Shapefile. Συνεχίζοντας, έγινε μετατροπή του αρχείου από Shapefile σε Raster και συσχέτιση του χάρτη που προέκυψε με χάρτη βάθους του εδάφους από βιβλιογραφικά δεδομένα (Καραμεσούτη, 2011). Βάσει της παραπάνω συσχέτισης ορίστηκαν, με τη βοήθεια του εργαλείου Reclassify (3D Analyst), οι εξής κλάσεις: 1) Πολύ ρηχά (< 15cm), 2) Ρηχά (15 – 30cm), 3) Μετρίως Βαθιά (30 – 75cm) και 4) Βαθιά (> 75cm), των οποίων η βαθμονόμηση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 14.

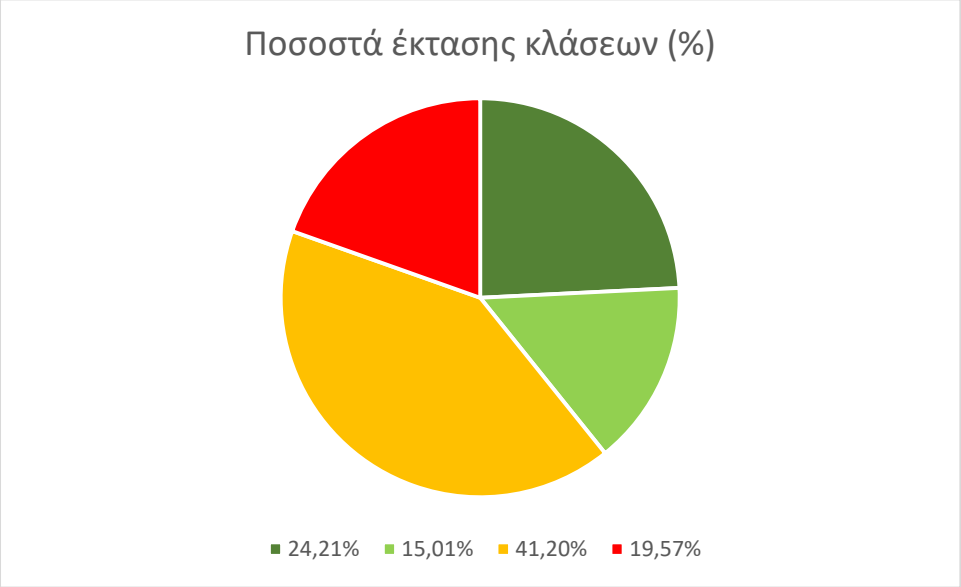
Διαχωρισμός κλάσεων και βαθμονόμηση του πάχους του εδαφικού καλύμματος της περιοχής μελέτης		
Κλάσεις πάχους του εδαφικού καλύμματος	**Βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων**	**Κανονικοποιημένοι βαθμοί επιδεκτικότητας κλάσεων (%)**
Πολύ ρηχά (< 15cm)	1	25
Ρηχά (15 – 30cm)	2	50
Μετρίως Βαθιά (30 – 75cm)	3	75
Βαθιά (> 75cm)	4	100

Πίνακας 14: Πίνακας κλάσεων κατολισθητικής επιδεκτικότητας του πάχους του εδαφικού καλύμματος.

Τελικά, κατασκευάστηκε ο βαθμονομημένος χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάσει του πάχους του εδαφικού καλύμματος, όπως φαίνεται παρακάτω.

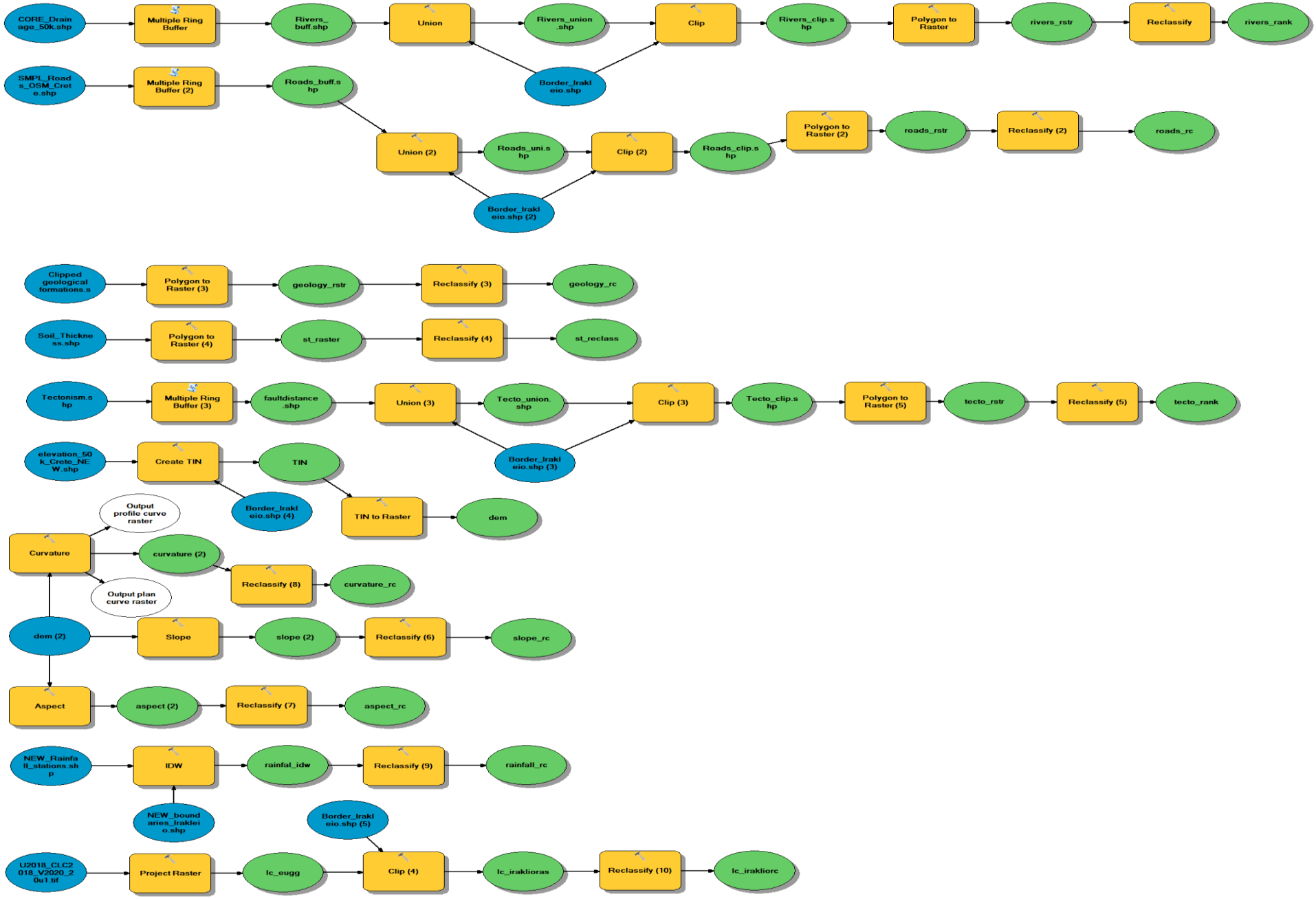


Εικόνα 53: Θεματικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας του πάχους του εδαφικού καλύμματος.



Εικόνα 54: Διάγραμμα πίτας του ποσοστού της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης που καλύπτει η κάθε κλάση πάχους του εδαφικού καλύμματος

Παρακάτω απεικονίζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολούθησαν για την κατασκευή των επιμέρους θεματικών επιπέδων και θεματικών χαρτών για την γεωχωρική ανάλυση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής μελέτης. Η απεικόνιση των βημάτων έγινε με την βοήθεια του Model Builder σε περιβάλλον ArcMap 10.6 .



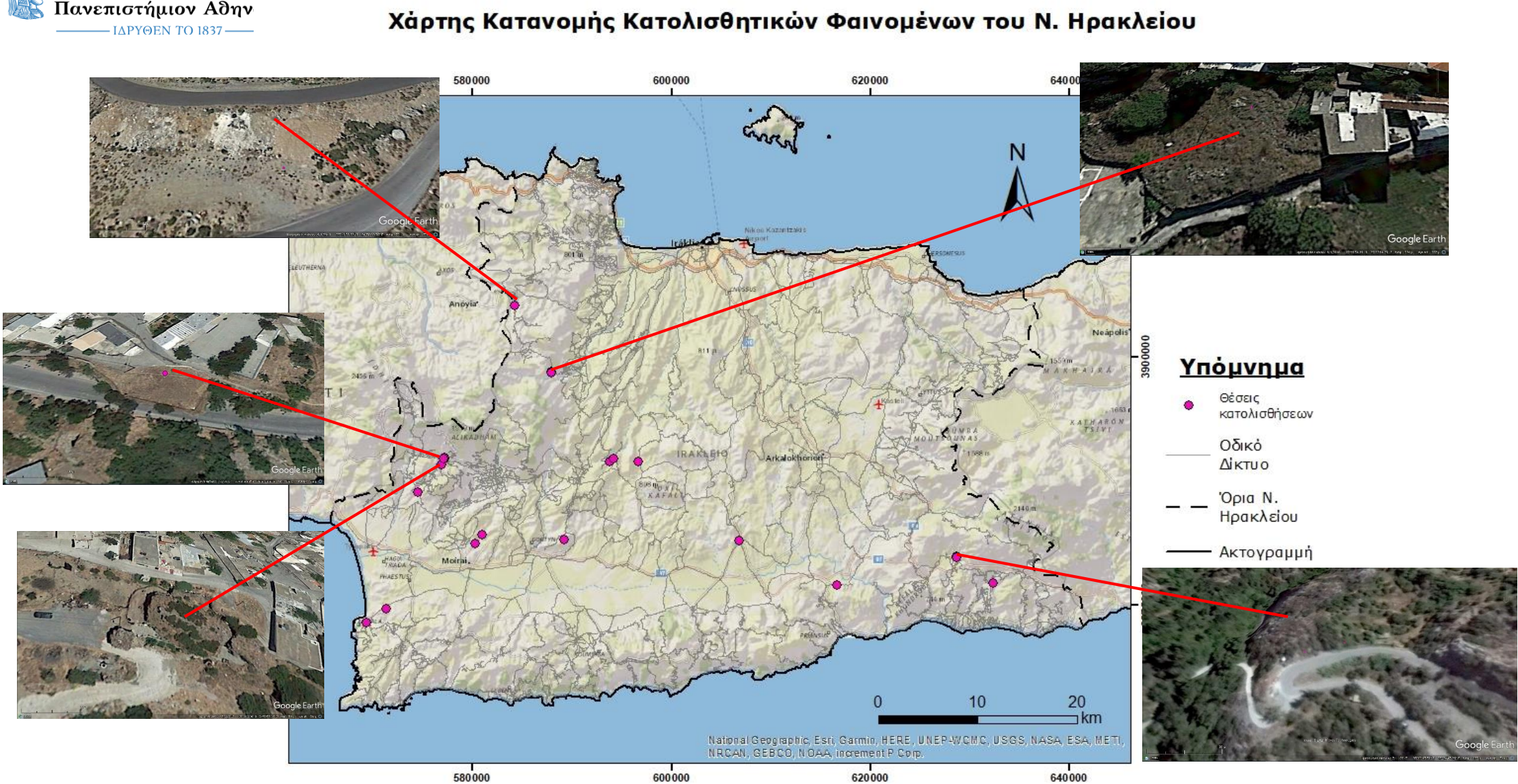
Εικόνα 55: Βήματα κατασκευής των επιμέρους θεματικών χαρτών μέσω Model Builder.

4.3 Χάρτης απογραφής κατολισθητικών φαινομένων

Για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής θεωρείται απαραίτητη η συλλογή δεδομένων από προϋπάρχοντα κατολισθητικά φαινόμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων του κατασκευασμένου μοντέλου.

Στην συγκεκριμένη εργασία συλλέχθηκαν δεδομένα από βιβλιογραφικές πηγές (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007), καθώς και καταγεγραμμένες κατολισθήσεις από το ΙΓΜΕ και τις αντίστοιχες τεχνικές εκθέσεις (Ελευθερίου & Ρόζου, 1978; Ρόζος, 1981; Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988; Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019; Ελευθερίου, 1970; Ζουρμπάκης, et al., 2020).

Οι θέσεις των κατολισθητικών φαινομένων που συλλέχθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη που κατασκευάστηκε σε περιβάλλον ArcMap 10.6 σε προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87).



Εικόνα 56: Χάρτης κατανομής κατολισθήσεων.

4.4 Εφαρμογή της Μεθόδου της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) στον Ν. Ηρακλείου

Πριν την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου οι παράγοντες τοποθετήθηκαν σε σειρά προτεραιότητας ως προς την επιρροή τους στην ευαισθησία της περιοχής σε κατολισθητικά φαινόμενα. Η σειρά αυτή ορίστηκε βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων (Kouli, et al., 2010; Ladas, et al., 2007; Antoniou, et al., 2017; Kouli, et al., 2013; Krassakis & Loupasakis, 2018; Rozos, et al., 2008), γεωτεχνικών εκθέσεων του ΙΓΜΕ (Ρόζος, 1981; Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019; Ζουρμπάκης, et al., 2020; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978; Ελευθερίου, 1970; Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978) και των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη οι θέσεις των κατολισθήσεων σε σχέση με τις κλάσεις επιδεκτικότητας του κάθε παράγοντα.

Ως προς την σειρά προτεραιότητας ο παράγοντας που θεωρήθηκε ότι έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην ευαισθησία της περιοχής μελέτης σε κατολισθητικά φαινόμενα είναι η *λιθολογική δομή* της. Η επιλογή αυτή έγινε αφού ο κίνδυνος κατάρρευσης ενός πρανούς εξαρτάται κυρίως από τις μηχανικές ιδιότητες του γεωλογικού σχηματισμού από τον οποίο αποτελείται. Αυτή η τοποθέτηση επιβεβαιώνεται και από βιβλιογραφικά δεδομένα (Ladas, et al., 2007; Rozos, et al., 2008; Kouli, et al., 2010; Kouli, et al., 2013; Antoniou, et al., 2017; Krassakis & Loupasakis, 2018).

Ο αμέσως σημαντικότερος παράγοντας κατολίσθησης θεωρήθηκε η *μορφολογική κλίση* του Ν. Ηρακλείου αφού οι περισσότερες κατολισθήσεις (συχνότητα: 61,4%) γίνονται γενικά σε περιοχές με σημαντική κλίση πρανούς (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Γενικά, η επιλογή αυτή έγινε και με επαλήθευση από ανάλογη βιβλιογραφία (Ladas, et al., 2007; Kouli, et al., 2010; Antoniou, et al., 2017).

Για το λόγο ότι η περιοχή είναι αρκετά σεισμογενής υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ενεργοποίησης των κανονικών ρηγμάτων της πυκνής τεκτονικής δομής του Νομού, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την συχνότητα κατολισθήσεων. Ως εκ τούτου η *απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία* αποτελεί τον επόμενο παράγοντα στην σειρά προτίμησης.

Ο τέταρτος παράγοντας αποτελεί τη *μέση ετήσια βροχόπτωση* αφού σε περιόδους έντονης

βροχής έχουν καταγραφεί αρκετές από τις κατολισθήσεις που συλλέχθηκαν (Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978; Ρόζος, 1981; Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019).

Η *απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο* ορίστηκε ως ο πέμπτος παράγοντας στη σειρά προτεραιότητας παρόμοιας σημαντικότητας με τη βροχόπτωση βάσει βιβλιογραφικής συσχέτισης (Kouli, et al., 2010).

Η *απόσταση από το οδικό* και *οι χρήσεις γης* ορίστηκαν ως ο έκτος και ο έβδομος παράγοντας, αντίστοιχα, με σχεδόν όμοια σημαντικότητα για τον λόγο ότι αυτοί οι δύο παράγοντες σχετίζονται με την ανθρώπινη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον.

Ο προσανατολισμός των πρανών και η *μορφολογική καμπυλότητα* αποτελούν τον όγδοο και ένατο παράγοντα, αντίστοιχα. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι εξίσου σημασίας καθώς συνδέονται με εξωγενείς παράγοντες και εξαρτώνται από το ανάγλυφο της περιοχής.

Τέλος, ως δέκατος παράγοντας ορίστηκε το *πάχος του εδαφικού καλύμματος*. Ο συγκεκριμένος παράγοντας θεωρήθηκε ο λιγότερο σημαντικός από τους υπόλοιπους διότι η περιοχή μελέτης δεν θεωρείται αρκετά ορεινή (Kouhartsiouk & Perdikou, 2020).

Παράγοντες Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας	Σειρά Προτεραιότητας
Λιθολογία	1
Μορφολογικές Κλίσεις (°)	2
Απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία (m)	3
Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	4
Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο (m)	5
Απόσταση από το οδικό δίκτυο (m)	6
Χρήσεις γης	7
Προσανατολισμός πρανών (°)	8
Μορφολογική καμπυλότητα	9
Πάχος του εδαφικού καλύμματος (cm)	10

Πίνακας 15: Πίνακας των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας βάση της σειράς προτεραιότητας που ορίστηκε. Με κόκκινο χρωματίζεται ο σημαντικότερος παράγοντας και με πράσινο ο λιγότερο σημαντικός.

Η βαθμονόμηση των παραγόντων έγινε με βάση τα κριτήρια βαθμολογίας που όρισε ο Saaty (1986).

Τιμή	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σπουδαιότητα	Και οι δύο παράγοντες συμβάλλουν εξίσου στον στόχο ή το κριτήριο.
3	Μικρή σπουδαιότητα ενός σε σχέση με άλλον	Η πείρα και η κρίση ευνοούν ελαφρώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
5	Βασική ή μεγάλη σπουδαιότητα	Η πείρα και η κρίση ευνοούν σαφώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
7	Πολύ ισχυρή ή αποδεδειγμένη σπουδαιότητα	Ένας παράγοντας ευνοείται ιδιαίτερα σε σχέση με έναν άλλον. Η κυριαρχία του αποδεικνύεται στην πράξη.
9	Απόλυτη σπουδαιότητα σε σχέση με άλλον	Τα στοιχεία που ευνοούν έναν παράγοντα είναι αδιαμφισβήτητα.
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές	Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβιβασμός.
0	Καμία σχέση	Ο παράγοντας δεν συμβάλλει στον στόχο.

Πίνακας 16: Κλίμακα συγκρίσεων, Saaty (1986). *(Ιωαννίδου, 2016)*

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν προηγουμένως παρουσιάζεται παρακάτω ο πίνακας που κατασκευάστηκε με την μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης, καθώς και τα βάρη σημαντικότητας του κάθε παράγοντα. Αναφέρεται ότι για την τελική ιεράρχηση έγιναν πέντε (5) προσομοιώσεις εκ των οποίων επιλέχθηκε αυτή με τον καλύτερο λόγο συνοχής (CR = 0.073) που φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας ζευγών συσχέτισης των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας και αντίστοιχης ιεράρχησης

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Βάρη (%)
A	***1***	2	2	3	4	4	6	7	7	9	23,738
B	1/2	***1***	2	3	5	6	7	7	8	9	22,908
C	1/2	1/2	***1***	4	4	5	6	7	7	8	19,213
D	1/3	1/3	1/4	***1***	2	3	5	6	6	7	10,842
E	1/4	1/5	1/4	1/2	***1***	2	4	5	5	6	7,771
F	1/4	1/6	1/5	1/3	1/2	***1***	3	5	5	6	6,217
G	1/6	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	***1***	2	3	5	3,443
H	1/7	1/7	1/7	1/6	1/5	1/5	1/2	***1***	2	4	2,516
I	1/7	1/8	1/7	1/6	1/5	1/5	1/3	1/2	***1***	3	2,007
J	1/9	1/9	1/8	1/7	1/6	1/6	1/5	1/4	1/3	***1***	1,346
										CR	***0,073***

Πίνακας 17: Πίνακας ζευγών συσχέτισης των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας και αντίστοιχης ιεράρχησης.

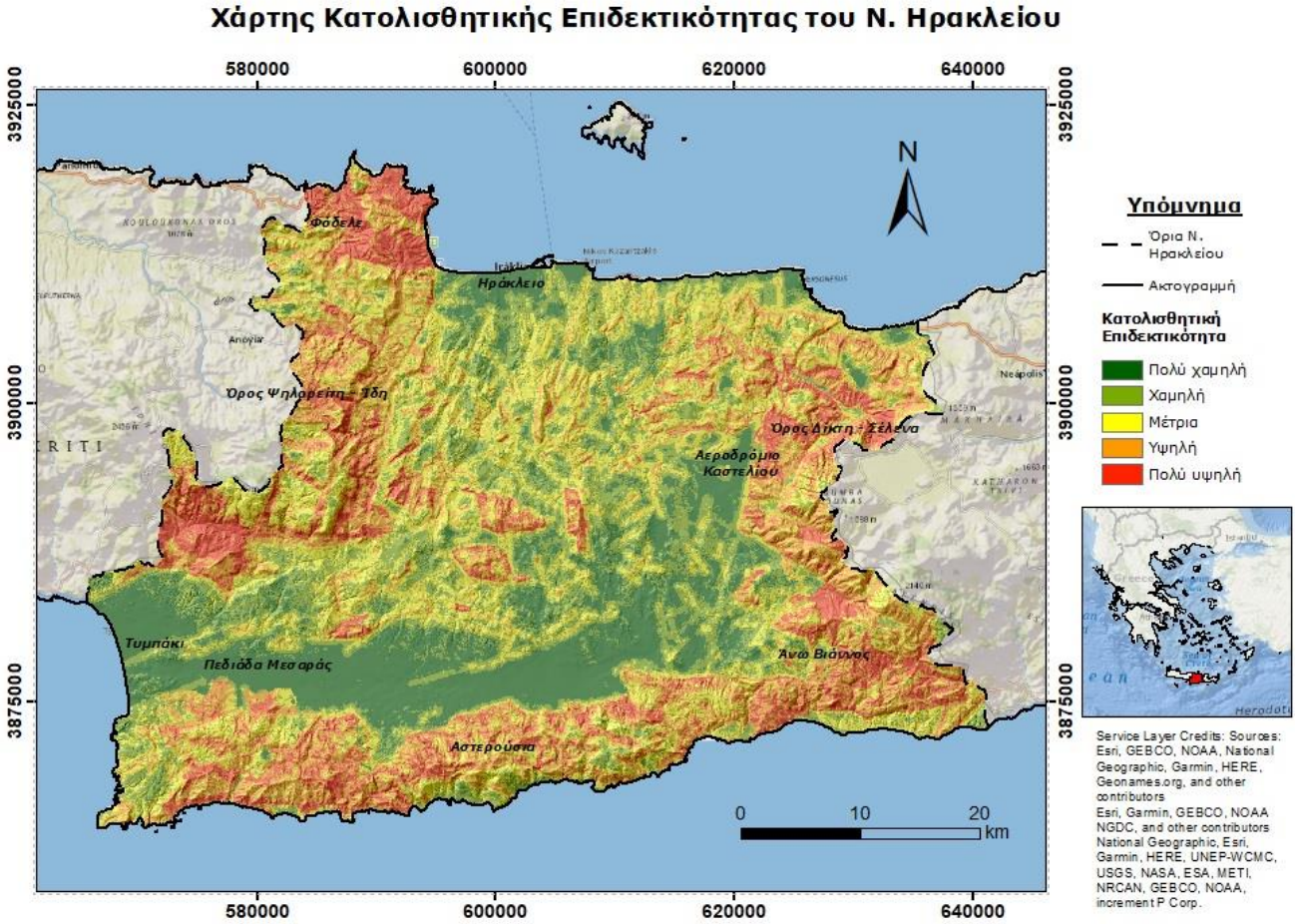
Υπόμνημα	
Λιθολογία	A
Μορφολογικές Κλίσεις (°)	B
Απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία (m)	C
Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	D
Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο (m)	E
Απόσταση από το οδικό δίκτυο (m)	F
Χρήσεις γης	G
Προσανατολισμός πρανών (°)	H
Μορφολογική καμπυλότητα	I
Πάχος του εδαφικού καλύμματος (cm)	J

Πίνακας 18: Υπόμνημα του πίνακα ζευγών συσχέτισης των παραγόντων κατολισθητικής επιδεκτικότητας και αντίστοιχης ιεράρχησης

Κεφάλαιο 5ο – Αποτελέσματα & Αξιολόγηση

5.1 Αποτελέσματα μεθόδου AHP για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας του Ν. Ηρακλείου

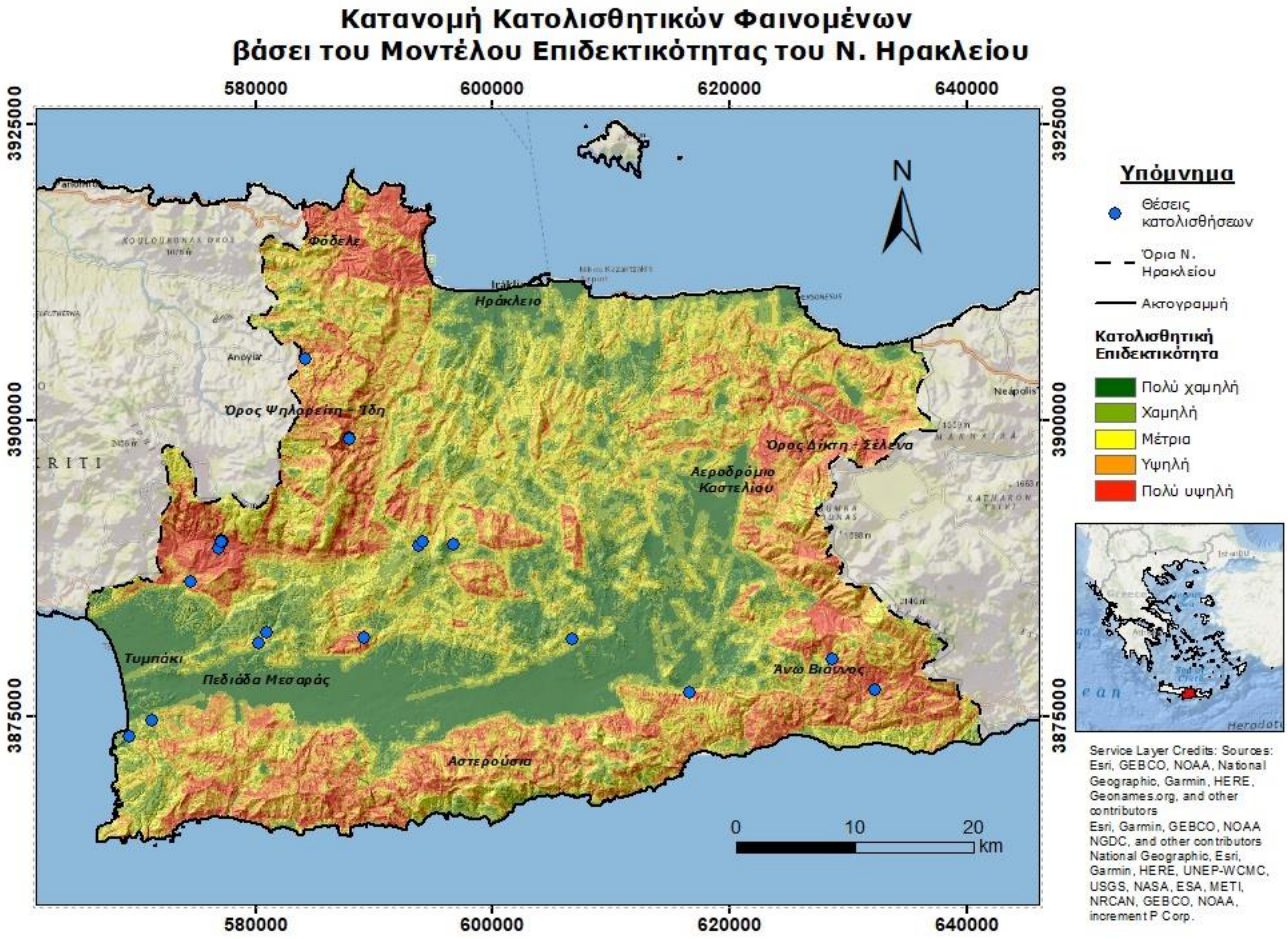
Μετά το πέρας της μεθοδολογίας που αναλύθηκε προηγουμένως κατασκευάστηκε ο τελικός χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας με τη χρήση του εργαλείου extAhp20 - Analytic Hierarchy Process for ArcGIS (https://www.arcgis.com/home/item.html?id=bb3521d775c94b28b69a10cd184b7c1f) σε περιβάλλον ArcMap 10.6 με προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87) και ανάλυση Cell Size = 30 x 30m. Η επιδεκτικότητα της περιοχής σε κατολισθητικά φαινόμενα χωρίστηκε σε 5 κλάσεις με τη μέθοδο Natural Breaks (Jenks) ως εξής: *κατολισθητική επιδεκτικότητα*: **1)** *Πολύ χαμηλή*, **2)** *Χαμηλή*, **3)** *Μέτρια*, **4)** *Υψηλή* και **5)** *Πολύ υψηλή* (**Εικόνα** *57*).



Εικόνα 57: Θεματικός χάρτης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

5.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ακρίβεια του κατασκευασμένου μοντέλου είναι απαραίτητη η συσχέτιση των ζωνών επιδεκτικότητας που ορίζονται στον παραπάνω χάρτη με τις θέσεις των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων του νομού. Αυτή η σύγκριση φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 58: Θεματικός χάρτης ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας σε σύγκριση με τις θέσεις των κατολισθήσεων.

5.2.1 Αξιολόγηση των ζωνών υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας

Βάσει του παραπάνω χάρτη φαίνεται ότι οι περισσότερες θέσεις όπου έχουν καταγραφεί κατολισθήσεις ανήκουν στις ζώνες Πολύ υψηλής έως Υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας με μερικές να εντοπίζονται σε περιοχές Μέτριας κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι κατολισθήσεις που έχουν συμβεί φαίνεται να

κατανέμονται στου ορεινούς όγκους του Ίδη – Ψηλορείτη, των Αστερουσίων και του Δίκτη, καθώς και στα όρια της κοιλάδας της Μεσαράς. Οι περιοχές αυτές (Πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα) χαρακτηρίζονται από έντονες μορφολογικές κλίσεις (**Εικόνα *33***), μεγάλα ύψη ετήσιας βροχόπτωσης (**Εικόνα *45***) και σημαντική τεκτονική καταπόνηση (**Εικόνα *51***), παράγοντες οι οποίοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την κατολισθητική επιδεκτικότητα. Μελετώντας τις γεωτεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ παρατηρήθηκε ότι οι περισσότερες κατολισθήσεις που καταγράφθηκαν ήταν το αποτέλεσμα έντονων βροχοπτώσεων (Ρόζος, 1981; Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978; Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019) και συνέβησαν σε θέσεις με σχετικά απότομες κλίσεις (Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978; Ρόζος, 1981; Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988), γεγονός που δικαιολογεί την παραπάνω εικόνα.

Επιπλέον, οι ζώνες μέγιστης κατολισθητικής επιδεκτικότητας (κόκκινες και πορτοκαλί ζώνες) δομούνται από φλύσχη, σχιστόλιθους και ασβεστόλιθους, λιθολογίες όπου συχνά εκδηλώνονται κατολισθήσεις (**Εικόνα *40***). Συγκεκριμένα, βάσει των τεχνικών εκθέσεων του ΙΓΜΕ πολλές από τις καταγεγραμμένες κατολισθήσεις λαμβάνουν χώρα σε θέσεις με φλυσχικό - φλυσχοειδές υπόβαθρο (Ρόζος, 1981; Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978) και σχηματισμούς φυλλιτών – υπερβασικών (Ρόζος, 1981), καθώς και με ασβεστόλιθους (Νικολάου & Γεωργοπούλου, 1988; Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ζουρμπάκης & Κοϊνάκης, 2019). Παρότι οι ασβεστόλιθοι ταξινομήθηκαν με σχετικά χαμηλό βαθμό κατολισθητικής επιδεκτικότητας, η έντονη τεκτονική και η μεγάλη ποσότητα βροχής συνεισφέρουν στην σημαντική καρστικοποίηση των ανθρακικών πετρωμάτων προκαλώντας τις κατολισθήσεις που συνέβησαν, καθιστώντας έτσι τις περιοχές αυτές πολύ επικίνδυνες.

Οι κόκκινες-πορτοκαλί περιοχές χαρακτηρίζονται από πυκνό υδρογραφικό (**Εικόνα *42***) και οδικό δίκτυο (**Εικόνα *49***) γεγονός που επιβαρύνει την ευστάθεια των πρανών της περιοχής τόσο λόγω της καρστικοποίησης και διάβρωσης που προκαλούν τα ποτάμια και οι χείμαρροι όσο και λόγω της ελάττωσης της μηχανικής αντοχής των σχηματισμών από τα έργα διάνοιξης των δρόμων. Η μεγάλη πυκνότητα των δικτύων έχει σαν αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών να βρίσκεται κοντά στις ασταθείς και επικίνδυνες ζώνες, κάτι που επαληθεύεται από το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθήσεις που έχουν καταγραφεί έγιναν κοντά σε δρόμους και κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.

Συγκρίνοντας τις θέσεις των κατολισθήσεων εντός των ζωνών μέγιστης κατολισθητικής επιδεκτικότητας (**Εικόνα *58***) με τις χρήσεις γης (**Εικόνα *47***) παρατηρείται ότι τα κατολισθητικά φαινόμενα συμβαίνουν κοντά σε ορεινές δασικές περιοχές και σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και φυτείες. Αντιθέτως, θέσεις ανθρωπογενούς επιρροής που θεωρούνται πολύ επικίνδυνες, όπως ορυχεία και χώροι τεχνικών εργασιών, δεν παρουσιάζουν εκδηλώσεις κατολισθήσεων βάσει του παρόντος δείγματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι θέσεις ανθρωπογενών εργασιών εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές ήπιας μορφολογίας, ενώ οι θέσεις καλλιεργειών και φυτειών που εκδηλώνονται οι κατολισθήσεις, αν και χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας από μόνες τους, αποτελούν ζώνες μεγάλης επιδεκτικότητας λόγω του λοφώδους αναγλύφου και της εγγύτητας τους σε ορεινούς όγκους (**Εικόνα *33***). Αναλυτικότερα, έχει διατυπωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων στον ελλαδικό χώρο (59%) συμβαίνουν σε λοφώδες έως ημιορεινό υψόμετρο και συγκεκριμένα σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και φυτοκαλυμμένες περιοχές (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Επιπλέον, όπως αναμένεται, δεν έχουν συλλεχθεί καταγεγραμμένες κατολισθήσεις μέσα σε τεχνητές περιοχές όπως σε αστικό ιστό, λιμάνια και αεροδρόμια λόγω της θέσης τους (περιοχές πολύ ομαλού αναγλύφου), αν και ορισμένες κατολισθήσεις συμβαίνουν στα όρια τέτοιων περιοχών όπου φαίνεται σχετικά λοφώδες ανάγλυφο (6-30°) (**Εικόνα *33***).

Αξιολογώντας το τελικό αποτέλεσμα βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μορφολογίας, όπως ο προσανατολισμός και η καμπυλότητα των πρανών σε σχέση με το δείγμα κατολισθήσεων που συλλέχθηκε φαίνεται ότι οι περιοχές μέγιστης επιδεκτικότητας χαρακτηρίζονται από προσανατολισμούς Β/ΒΑ, Α/ΝΔ και Δ/Β που αποτελούν μέτριας έως πολύ υψηλής επιδεκτικότητας (**Εικόνα *35***). Αντίστοιχα το μεγαλύτερο μέρος αυτών των περιοχών παρουσιάζει μεγάλες εναλλαγές μεταξύ σχετικά κοίλης και σχετικά κυρτής μορφολογίας με μέτρια έως χαμηλή επιδεκτικότητα (**Εικόνα *38***). Αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν σχετικά έμμεσα την σταθερότητα των πρανών, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (4.2.2, 4.2.3) και θεωρούνται χαμηλής σημαντικότητας ως προς την συνολική επιδεκτικότητα της περιοχής αφού εξαρτώνται περισσότερο από τους υπόλοιπους παράγοντες.

Αντιστοιχίζοντας τις ζώνες κατολισθητικής επιδεκτικότητας που προέκυψαν με το χάρτη του πάχους του εδαφικού καλύμματος (**Εικόνα *53***) που κατασκευάστηκε προηγουμένως φαίνεται ότι οι κύριες ζώνες Πολύ υψηλής έως Υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας του όρους Ψηλορείτη – Ίδη και του όρους Δίκτη – Σέλενα αποτελούνται από πολύ ρηχά και ρηχά εδάφη σχετικά χαμηλής επιδεκτικότητας, ενώ η αντίστοιχη ζώνη Πολύ υψηλής – Υψηλής

κατολισθητικής επιδεκτικότητας των Αστερουσίων αποτελείται από βαθιά εδάφη, υψηλής επιδεκτικότητας. Αυτή η εικόνα οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης παρουσιάζει στη μεγαλύτερή της έκταση μικρό πάχος εδαφικού υλικού και γι' αυτόν τον λόγο δεν θεωρήθηκε σημαντικός παράγοντας εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Αυτό φαίνεται περισσότερο και από τις κατολισθήσεις που συλλέχθηκαν, οι οποίες βάσει των γεωτεχνικών εκθέσεων του ΙΓΜΕ οφείλονται κυρίως σε παράγοντες όπως: η λιθολογία, η μορφολογική κλίση, η τεκτονική, η βροχόπτωση και το υδρογραφικό δίκτυο.

5.2.2 Αξιολόγηση ζωνών μέτριας επιδεκτικότητας

Όσον αφορά τις ζώνες Μέτριας κατολισθητικής επιδεκτικότητας (κίτρινο), αποτελούν περιοχές με σχετικά πιο ομαλό ανάγλυφο (**Εικόνα *33***), μέτρια έως χαμηλά ύψη ετήσιας βροχόπτωσης (**Εικόνα *45***) και πιο αραιό οδικό δίκτυο (**Εικόνα *49***), αλλά χαρακτηρίζονται από σχετικά πυκνό υδρογραφικό δίκτυο (**Εικόνα *42***) και τεκτονικά στοιχεία (**Εικόνα *51***). Επιπλέον, οι περιοχές αυτές δομούνται κυρίως από νεογενή πετρώματα όπως μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή που γενικά αποτελούν σχηματισμούς Χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας (**Εικόνα *40***). Παρόλα αυτά οι μάργες και οι άργιλοι χάνουν εύκολα την σταθερότητά τους από την κατείσδυση του νερού της βροχής (διόγκωση αργίλων και ρευστοποίηση μαργών) ενώ τα κροκαλοπαγή διαβρώνονται από τους ορμητικούς χειμάρρους τους υδρογραφικού δικτύου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν αυτές τις περιοχές σχετικά μέτριας κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Αυτό γίνεται φανερό από τον σχετικά μικρότερο αριθμό καταγεγραμμένων κατολισθήσεων του παρόντος δείγματος που εμφανίζονται σε αυτές τις ζώνες και οι οποίες συνέβησαν κυρίως σε κροκάλες, μάργες και αργίλους λόγω της δράσης της βροχής και της διάβρωσής τους (Ελευθερίου & Μουγιάρης, 1978; Ελευθερίου & Ρόζου, 1978).

5.2.3 Αξιολόγηση ζωνών χαμηλής και πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας

Οι θέσεις Χαμηλής και Πολύ χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας (πράσινο και λαχανί) αντιπροσωπεύουν σχεδόν επίπεδες περιοχές όπως την κοιλάδα της Μεσαράς, τη λεκάνη του Ηρακλείου και την πεδιάδα του δήμου Μινώα-Πεδιάδας. Αυτές οι περιοχές λόγω των σχηματισμών χαμηλής επιδεκτικότητας (**Εικόνα *40***), του πολύ ήπιου αναγλύφου τους

(μορφολογική κλίση 0 - 15°, **Εικόνα *33***) και του μέσου έως χαμηλού ύψους ετήσιας βροχόπτωσης (**Εικόνα *45***) αποτελούν τις πιο ασφαλείς θέσεις του Ν. Ηρακλείου, παρά το πυκνό υδρογραφικό δίκτυο τους (**Εικόνα *42***) και την τεκτονική τους δομή (**Εικόνα *51***). Η εικόνα αυτή συμβαδίζει με το γεγονός ότι έχουν καταγραφεί πολύ λίγες κατολισθήσεις στις περιοχές αυτές σύμφωνα με το δείγμα που συλλέχθηκε.

5.2.4 Αξιολόγηση επιτυχίας του μοντέλου κατολισθητικής επιδεκτικότητας του Ν. Ηρακλείου

Προκειμένου να οριστεί η επιτυχία του μοντέλου έγινε αρχικά αντιστοίχιση του αριθμού των κατολισθήσεων του δείγματος που εμφανίζονται σε κάθε ζώνη επιδεκτικότητας. Σύμφωνα με αυτό υπολογίστηκε το ποσοστό συχνότητας εμφάνισης κατολισθήσεων στην κάθε ζώνη βάσει του δείγματος που συλλέχθηκε, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας συχνότητας εμφάνισης κατολισθήσεων ανά ζώνη κατολισθητικής επιδεκτικότητας		
Βαθμός ζώνης κατολισθητικής επιδεκτικότητας	**Αριθμός κατολισθήσεων**	**Συχνότητα κατολισθήσεων (%)**
Πολύ χαμηλός	0	0,00
Χαμηλός	2	9,52
Μέτριος	7	33,33
Υψηλός	3	14,29
Πολύ υψηλός	9	42,86
Σύνολο	**21**	**100,00**

Πίνακας 19: Πίνακας συχνότητας εμφάνισης κατολισθήσεων ανά ζώνη κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Θεωρήθηκε ότι το ποσοστό επιτυχίας του μοντέλου εξαρτάται από την συχνότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων στις ζώνες Μετρίας, Υψηλής και Πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Βάσει αυτής της αρχής υπολογίστηκε ότι το ποσοστό επιτυχίας του μοντέλου αντιστοιχεί στο 90,48 %.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια αυτών των αποτελεσμάτων είναι σχετική, καθώς ο αριθμός των κατολισθήσεων που συλλέχθηκαν σε σχέση με την έκταση της περιοχής μελέτης είναι πολύ μικρός. Επομένως, το τελικό αποτέλεσμα δεν αντιστοιχεί σε εντελώς πραγματική εικόνα και προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου θα πρέπει να

συλλεχθεί μεγαλύτερο δείγμα κατολισθήσεων και να πραγματοποιηθεί εκ νέου αξιολόγηση της κατολισθητικής επικινδύνοτητας της περιοχής.

Κεφάλαιο 6ο – Συμπεράσματα & Προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η επιδεκτικότητα της περιοχής του Ν. Ηρακλείου ως προς την πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων σύμφωνα με την Μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process – AHP). Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcMap 10.6 για την γεωχωρική ανάλυση των παραγόντων που επιδρούν στην κατολισθητική επιδεκτικότητα της περιοχής μελέτης και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση ζευγών παραγόντων μεταξύ τους (pairwise comparison) για την πολυκρητιριακή ανάλυση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Για την κατασκευή του τελικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο extAhp20 - Analytic Hierarchy Process for ArcGIS όπου έγινε συνυπολογισμός των ζωνών επιδεκτικότητας του νομού Ηρακλείου βάσει των συγκρίσεων των ζευγών παραγόντων και της τελικής ιεράρχησης όλων των παραγόντων βάσει της σημαντικότητάς ως προς το προς-επίλυση πρόβλημα και τελικά πραγματοποιήθηκε προβολή του βαθμού επιδεκτικότητας που εκτιμήθηκε σε κάναβο ανάλυσης Cell Size = 30 x 30m και με προβολικό σύστημα Greek Grid (EGSA ’87).

Γενικά, λόγω των τεχνικών εκθέσεων του ΙΓΜΕ και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής προέκυψε ότι οι παράγοντες που τείνουν να προκαλούν περισσότερες κατολισθήσεις στον Ν. Ηρακλείου είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή, οι μορφολογικές κλίσεις, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, οι βροχοπτώσεις καθώς και το οδικό και υδρογραφικό δίκτυο. Βάσει σύγκρισης του χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με το δείγμα κατολισθήσεων που συλλέχθηκε είναι φανερό ότι η περιοχή μελέτης παρουσιάζει μεγαλύτερη κατολισθητική επιδεκτικότητα στις θέσεις με ορεινό και λοφώδες ανάγλυφο όπως η οροσειρά Ψηλορείτη – Ίδη στα δυτικά, η οροσειρά των Αστρουσιών στα νότια και η οροσειρά Δίκτη – Σέλενα στα ανατολικά. Αντίθετα, περιοχές

ομαλού αναγλύφου όπως η κοιλάδα της Μεσαράς, η λεκάνη του Ηρακλείου και η πεδιάδα του δήμου Μινώα – Πεδιάδας παρουσιάζουν χαμηλή επιδεκτικότητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι κατολισθήσεις συμβαίνουν συνήθως σε περιοχές που δομούνται από φλύσχη και φλυσχοειδείς σχηματισμούς, μάργες, αργίλους, σχίστες – φυλλίτες και ανθρακικά πετρώματα όπου πλήττονται από πολλές βροχοπτώσεις που προκαλούν καρστικοποίηση των ανθρακικών και διάλυση των συγκολλητικών υλικών των πετρωμάτων. Ακόμα, κατολισθήσεις τείνουν να προκαλούνται σε θέσεις με έντονη τεκτονική καταπόνηση που υποβαθμίζει τη μηχανική αντοχή των διαφόρων σχηματισμών και καθιστά τα ανθρακικά πετρώματα πιο ευδιάλυτα από το κατεισδυούμενο νερό, καθώς και σε θέσεις που τέμνονται από κλάδους υδρογραφικού δικτύου με ροή ποταμοχειμάρριου χαρακτήρα που προκαλεί σημαντική διάβρωση της λιθολογίας. Τέτοιες θέσεις κατολισθητικών συμβάντων παρουσιάζονται συχνά στα όρια αστικού δικτύου και οικισμών και συγκεκριμένα κοντά σε δρόμους του κύριου οδικού δικτύου. Αυτά τα χαρακτηριστικά βρέθηκε ότι συμπίπτουν με τις περιοχές έντονου ορεινού – λοφώδους αναγλύφου που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε προβολή των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων που συλλέχθηκαν πάνω στον τελικό χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής μελέτης προκειμένου να γίνει σύγκριση των πραγματικών δεδομένων με το κατασκευασμένο μοντέλο. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής ήταν ότι η ζώνη Πολύ χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζει συχνότητα κατολισθητικών φαινομένων 0% και η ζώνη Χαμηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας έχει συχνότητα 9,52%. Επιπροσθέτως, η ζώνη Μέτριας επιδεκτικότητας εμφανίζει κατολισθήσεις με συχνότητα που ανέρχεται στο 33,33%. Ακόμα, η ζώνη Υψηλής επιδεκτικότητας αντιπροσωπεύει κατολισθητική συχνότητα 14,29%, μικρότερη της ζώνης μέτριας επιδεκτικότητας λόγω της μικρής έκτασης της. Τέλος, Η ζώνη Πολύ υψηλής επιδεκτικότητας χαρακτηρίζεται από συχνότητα κατολισθήσεων της τάξης του 42,86%.

6.2 Προοπτικές της μεθόδου

Η εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή του Ν. Ηρακλείου με την μέθοδο AHP αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Επιπροσθέτως, η μέθοδος AHP χαρακτηρίζεται εύκολο εργαλείο, καθώς έχει την

ευελιξία να παράγει ξανά τον τελικό χάρτη επιδεκτικότητας είτε αλλάζοντας έναν ή και περισσότερους παράγοντες, είτε αφαιρώντας κάποιον παράγοντα, είτε προσθέτοντας περισσότερους ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης. Γενικά, συνίσταται να χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων φυσικών καταστροφών όπως η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Ωστόσο, για την διεξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων χρειάζεται να οριστούν σωστά οι παράγοντες που θα μελετηθούν και η σωστή βαθμολόγηση της σύγκρισης των ζευγών – παραγόντων για την επίλυση ενός προβλήματος. Επιπλέον, μετά το πέρας της διαδικασίας είναι πάντα απαραίτητη η σύγκριση και συσχέτιση του μοντέλου με τον κατάλληλο αριθμό πραγματικών δεδομένων προκειμένου να οριστεί η εγκυρότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ότι συχνά σε περιοχές πιο περιορισμένης έκτασης μπορεί να γίνει έρευνα κατολισθητικής επιδεκτικότητας με μεγαλύτερη ακρίβεια, ιδιαίτερα εφόσον μπορεί να γίνει καλύτερος και πιο λεπτομερής διαχωρισμός των παραγόντων σε κλάσεις.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την χρήση δεδομένων συμβολομετρίας για την βελτιστοποίηση της μεθόδου, ώστε να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός λόγος CR και να γίνει η καλύτερη δυνατή προσέγγιση της πραγματικής κατολισθητικής επιδεκτικότητας σε μία περιοχή όπως ο Ν. Ηρακλείου. Επιπροσθέτως, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος RES για την κατασκευή όμοιου μοντέλου κατολισθητικής επιδεκτικότητας που κατόπιν σύγκρισης με το μοντέλο της μεθόδου AHP μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της έρευνας. Σε περεταίρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Landslide Hazard Index – LHI) βάσει των βαρών σημαντικότητας των παραγόντων που ορίστηκαν για τη μέθοδο AHP και του ποσοστού των διαχωρισμένων κλάσεων του κάθε παράγοντα και στη συνέχεια με στατιστικές μεθόδους να οριστεί ένας καινούργιος χάρτης ζωνών επιδεκτικότητας με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέλος, η μελλοντική κατασκευή μοντέλων κατολισθητικής επιδεκτικότητας με τις παραπάνω μεθόδους θα συνεισφέρει στην πρόληψη καταστροφικών συνεπειών και στην προστασία της περιοχής από ανθρώπινες και υλικές απώλειες.

Βιβλιογραφία και Σχετικές Πηγές

1. Achu, A. L., Thomas, J. & Reghunath, R., 2020. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundwater for Sustainable Development,* Volume 10, pp. 1-11.
2. Antoniou, V., Lappas, S., Leoussis, C. & Nomikou, P., 2017. Landslide Risk Assessement of the Santorini Volcanic Group. *GISTAM - 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, pp. 131 - 141.
3. Brabb, E., 1984. *Innovative approaches for Landslide Hazard Evaluation.* Toronto, IV International Symposium on Landslides, pp. 307 - 323.
4. Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7 November, Issue 5, pp. 853 - 862.
5. Caputo, R. et al., 2010. Active faulting on the island of Crete (Greece). *Geophysical Journal International,* Volume 183, p. 111–126.
6. CRED, 2020. Natural disasters 2019: Now is the time to not give up.
7. Delibasis, N. et al., 1999. Microseismic activity and seismotectonics of Heraklion Area (central Crete Island, Greece). *Tectonophysics,* Volume 308, p. 237–248.
8. Fall, M., Azzam, R. & Noubactep, C., 2006. A multi - method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Engineering Geology*, Volume 82, pp. 241 - 263.
9. Fassoulas, C., 2001. The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active European margin: the Heraklion basin, Crete, Greece. *Journal of GEODYNAMICS,* April, Volume 31, pp. 49-70.
10. Ganas, F. M. B. P. T. &. V., 2017. Geological and seismological evidence for NW-SE crustal extension at the southern margin of Heraklion basin, Crete.. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Volume 51, pp. 52-75.
11. Kokinou, E. et al., 2008. A seismotectonic study for the Heraklion basin in Crete (Southern Hellenic Arc, Greece). *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOLOGY,* 2(1), pp. 9-16.
12. Kokinou, E., Skilodimou, H. & Bathrellos, G., 2013. Morphotectonic analysis of Heraklion Basin (Crete, Greece).. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, September, 47(1), pp. 285-294.
13. Kouhartsiouk, D. & Perdikou, S., 2020. The application of DInSAR and Bayesian statistics for the assessment of landslide susceptibility. *Natural Hazards*, February, 2(105), pp. 1-29.
14. Kouli, M. et al., 2013. Landslide susceptibility mapping in Crete island. *NHESSD - Natural Hazards and Earth Systems Sciences Discussions*, 29 January , Issue 1, pp. 73 - 109.

15. Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P. & Vallianatos, F., 2010. Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Nat hazards*, Issue 52, pp. 599 - 621.

16. Krassakis, P., Ioannidou, A., Tsagaratos, P. & Loupasakis, C., 2020. *LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING OF THE AITOLOAKARNANIA AND EVRYTANIA REGIONALUNITS, WESTERN GREECE, UPDATED WITH THE EXTENSIVE CATASTROPHIC OF WINTER 2015..* Patra, Greece, Proc. of 1st International conference on Environmental Design, Laboratory of Technology and Policy of Energy and Environment (LATPEE), Hellenic Open University, pp. 431-434.

17. Krassakis, P. & Loupasakis, C., 2018. *Assessment of landslide susceptibility using geospatial analysis and interferometry data, in the mountainous municipalities of Nafpaktia and Karpenisi..* s.l., Proc. of 1st conference of the Remote Sensing and Space Applications Committee of the Geological Society of Greece., pp. 43-44.

18. Ladas, I., Fountoulis, I. & Mariolakos, I., 2007. USING GIS & MULTICRITERIA DECISION ANALYSIS IN LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING - A CASE STUDY IN MESSINIA PREFECTURE AREA (SW PELOPONNESUS, GREECE). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, May, Volume XXXX, pp. 1973-1985.

19. Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D. & Rhind, D., 2010. *Συστήματα και Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).* Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

20. Malagò, A. et al., 2016. Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete. *Journal of Hydrology,* Volume 540, p. 64–81.

21. Mungai, D., Masaba, S., Isabirye, M. & Nsubuga, H., 2017. Implementation of landslide disaster risk reduction policy in Uganda. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Issue 24, pp. 326 - 331.

22. Nadim, F. et al., 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Journal of the International Consortium on Landslides*, Issue 3, pp. 159 - 173.

23. Papanikolaou, D. & Vassilakis, E., 2010. Thrust faults and extensional detachment faults in Cretan tectono-stratigraphy: Implications for Middle Miocene extension. *Tectonophysics,* Volume 488, p. 233–247.

24. Paraskevopoulos, K., n.d. *The Analytic Hierarchy Process (AHP) - Lesson 1,* s.l.: s.n.

25. Psomiadis, E. et al., 2020. Landslide Mapping and Susceptibility Assessment Using Geospatial Analysis and Earth Observation Data. *Land*, Issue 9,13, pp. 2 -26 .

26. Qulin, T. et al., 2021. Geological hazard risk assessment of line landslide based on remotely sensed data and GIS. *Measurement*, Issue 169.

27. Rozos, D., Tsangaratos, P. & Skias, E., 2008. An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County. *Landslides*, Volume 5, pp. 261 - 270 .

28. Sarris, A., Karakoudis, S., Bidaki, X. & Soupios, P., 2005. Study of the Morphological Attributes of Crete through the Use of Remote Sensing Techniques. *IASME Transactions,* 6(2), p. 1043–1051.

29. Sener, S., Sener, E., Nas, B. & Karagüzel, R., 2010. Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beysehir catchment area (Konya, Turkey). *Waste Management,* Volume 30, pp. 2039-2040.

30. van Hinsbergenn, D. J. J. & Meulenkamp, J. E., 2006. Neogene supradetachment basin development on Crete (Greece) during exhumation of the South Aegean core complex. *Basin Research,* Volume 18, p. 103–124.

31. Vargas, G. L., 1990. An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications. *European Journal of Operational Research,* Volume 48, pp. 2-8.

32. Wang, G., Zhang, D., Furuya, G. & Yang, J., 2014. Pore - pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: A case study. *Engineering Geology*, Issue 174, pp. 36 - 45.

33. Yassoglou, N., 2004. *Soil Association Map of Greece.* s.l.:s.n.

34. Zygouri, V., Koukouvelas, I. & Ganas, A., 2016. Palaeoseismological Analysis of the East Giouchtas Fault, Heraklion Basin, Crete (Prelimenary Results). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, May, Volume 50, pp. 563-571.

35. Ελευθερίου, Α., 1970. *Έκθεσις επί των Σεισμών του Ηρακλείου της 22ης Φεβρουαρίου 1970,* Αθήναι: s.n.

36. Ελευθερίου, Α. & Μουγιάρης, Ν., 1978. *Έκθεση στη Γεωτεχνική Έρευνα των Κατολισθήσεων σε Οικισμούς του Ν. Ηρακλείου,* Αθήναι: s.n.

37. Ελευθερίου, Α. & Ρόζου, Δ., 1978. *Γεωτεχνική Έρευνα των Κατολισθητικών Φαινομένων της Κοινότητας Μαγαρικαρίου του Ν. Ηρακλείου,* Αθήναι: s.n.

38. Ευελπίδου, Ν., Βασιλόπουλος, Α. & Βαϊόπουλος, Δ., 2008. *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών: Από την θεωρία στην πράξη.* Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

39. Ζαμπετάκης, Γ., 2009. *GR 1306: Καρστικό υδροσύστημα Ψηλορείτη - Ταλαίων / Υδατικό διαμέρισμα Κρήτης (13),* Ρέθυμνο: s.n.

40. Ζουρμπάκης, Ε., Αθανασούλη, Ε. & Μηχαλάκης, Ι., 2020. *Έκθεση Αυτοψίας: Τεχνικογεωλογική Εξέταση Κατολισθητικών Φαινομένων στο Δήμο Φαιστού, Π. Ε. Ηρακλείου,* Ρέθυμνο: s.n.

41. Ζουρμπάκης, Ε. & Κοϊνάκης, Ι., 2019. *Έκθεση Τεχνικογεωλογικής Αναγνώρισης Θέσεων Επισφαλών Βραχωδών Όγκων σε Περιοχές του Δήμου Γορτίνας, Π. Ε. Ηρακλείου,* Ρέθυμνο: s.n.

42. Ι.Γ.Μ.Ε., 1972. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Αντισκάριον, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

43. Ι.Γ.Μ.Ε., 1974. *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας: Φύλλο Αχεντρίας, κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

44. Ι.Γ.Μ.Ε., 1974. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Μέλαμπες, κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

45. Ι.Γ.Μ.Ε., 1984. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Τυμπάκιον, Κλιμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

46. Ι.Γ.Μ.Ε., 1989. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Μόχος, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

47. Ι.Γ.Μ.Ε., 1994. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Επάνω Αχαρναί, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

48. Ι.Γ.Μ.Ε., 1996. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Ηράκλειον, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

49. Ι.Γ.Μ.Ε., 2002. *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος: Φύλλο Άνω Βιάννος, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

50. Ιωαννίδου, Ά., 2016. *Κατολισθητικά φαινόμενα στους Ν. Αιτωλ/νίας και Ευρυτανίας. Διερεύνηση των γενεσιουργών αιτίων και σύνθεση χαρτών επιδεκτικότητας.,* Αθήνα: s.n.

51. Κάβουρας, Μ., Δάρρα, Α., Κονταξάκη, Σ. & Τομαή, Ε., 2015. *Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας: Αρχές και Τεχνολογίες.* Ζωγράφου(Αττική): Ελληνικα Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα.

52. Καραμεσούτη, Μ. Ι., 2011. *Ορισμός Περιβαλλοντικά Ευαίσθητων Περιοχών της Ελλάδος στην Ερημοποίηση,* Αθήνα: s.n.

53. Καρανασιοπούλου, Ε., 2010. *Φυσικές Καταστροφές: Η διεθνής και η ελληνική εμπειρία,* Θεσσαλονίκη: s.n.

54. Κατσιαβρίας, Ν. & Παπαζέτη, Ε., 2008. *Γεωλογικός Χάρτης Ανωγείων Κρήτης Ελλάδος, Κλίμακα 1:50.000.* s.l.:s.n.

55. Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2007. *Γεωλογία Τεχνικών Έργων.* Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

56. Νικολάου, Ν. & Γεωργοπούλου, Π., 1988. *Έκθεση Γεωτεχνικής Εξέτασης στην Περιοχή Καταπτώσεων Βράχων στην Κοινότητα Αγίου Θωμά, Νομού Ηρακλείου,* Αθήνα: s.n.

57. Πολυχρονάκη Α., 2009. *Υδροσύστημα Λεκάνης του Ηρακλείου: Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης (13),* Ρέθυμνο: s.n.

58. Πολυχρονάκη, Α. και συν., 2009. *Υδρογεωλογική Μελέτη: Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης (13),* Ρέθυμνο: s.n.

59. Ροδιτάκη, Α., 2011. *Τοπογραφία και Γεωμορφολογία της λεκάνης του Ηρακλείου,* Χανιά: s.n.

60. Ρόζος, Δ., 1981. *Γεωτεχνική Έρευνα των Καταπτώσεων Βραχοδών Μαζών στην Κοινότητα Βοριζίων του Ν. Ηρακλείου,* Αθήναι: s.n.

61. Σκούρτσος, Ε. & Σούκης, Κ., 2018. *Γεωλογία Ελλάδος-Περιγραφή Τεκτονικών Ενοτήτων: Ενότητα Πίνδου - Ενότητα Παρνασσού - Μεταβατικές Ενότητες,* s.l.: s.n.

62. Σκούρτσος, Ε. & Σούκης, Κ., 2018. *Περιγραφή Τεκτονικών Ενοτήτων: Ιόνια Ενότητα – Ενότητα Κρήτης-Μάνης (Plattenkalk) – Ενότητα Γαβρόβου-Τρίπολης,* Αθήνα: s.n.

63. Σκούρτσος, Ε. & Σούκης, Κ., 2018. *Περιγραφή Τεκτονικών Ενοτήτων: Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας – Βοιωτίας, Ενότητες Άρβης – Βάτου– Μιαμού & Αστερουσιών, Ενότητα Υποπελαγονικής,* Αθήνα: s.n.

64. Σταυροπούλου, Μ., 2009. *Κατολισθήσεις,* Αθήνα: s.n.

65. Χλούπης, Γ., 2020. *Κατολισθήσεις και Ηφαιστειακές εκρήξεις,* s.l.: s.n.