

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών & Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση & Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Εντοπισμός περιοχών με μεγάλη επικινδυνότητα
κατολισθήσεων / λασπορροών από δορυφορικά δεδομένα
και ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους
στο νομό Αχαΐας**

Κωνσταντίνος Αθ. Κωνσταντόπουλος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Γεώργιος Χαρ. Μηλιαρέσης**

Ιούνιος 2018

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών & Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση & Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Εντοπισμός περιοχών με μεγάλη επικινδυνότητα
κατολισθήσεων / λασπορροών από δορυφορικά δεδομένα
και ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους
στο νομό Αχαΐας**

Κωνσταντίνος Αθ. Κωνσταντόπουλος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Γεώργιος Χαρ. Μηλιαρέσης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στις 14 Ιουνίου 2018 από τη Σχολή Θετικών & Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Ιούνιος 2018

Περίληψη

Ο χωρικός σχεδιασμός μεταξύ των βασικών του στόχων έχει ως σκοπό την ενίσχυση της αειφόρου και ισόρροπης κοινωνικό-οικονομικής ανάπτυξης, όπως επίσης την αύξηση της παραγωγικής διαδικασίας και την επίτευξη της κοινωνικής συνοχής.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η χωροθέτηση ζωνών με μεγάλη επικινδυνότητα κατολισθήσεων / λασπορροών στο νομό Αχαΐας, μια περιοχή με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως:

- (i) Γεωλογία (μεγάλη επιφανειακή εξάπλωση φλύσχη / αλλουβιακών αποθέσεων),
- (ii) Τεκτονική δραστηριότητα (εκτεταμένα συστήματα ρηγμάτων που συντάσσονται με το υδρογραφικό δίκτυο και την έντονη σεισμικότητα),
- (iii) Ακραία καιρικά φαινόμενα (βροχοπτώσεις) που επιδεινώνονται με τη συνεπαγόμενη κλιματική αλλαγή, και
- (iv) Εξαιρετικά έντονο ανάγλυφο με μεγάλες κλίσεις και εκτεταμένη κατά βάθος διάβρωση.

Βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών, το αντικείμενο μελέτης της διατριβής διαρθρώνεται σύμφωνα με τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα, όπως:

- (i) Ποια η διαθεσιμότητα των ελεύθερων γεωγραφικών δεδομένων με συγκεκριμένους περιορισμούς ως προς την γεωγραφική διακριτική ικανότητα και την ακρίβεια, αλλά και ποιο θεματικό πληροφοριακό περιεχόμενο μας επιτρέπει να χωροθετήσουμε ζώνες και να τις αξιολογήσουμε ως προς την επικινδυνότητα κατολισθήσεων / λασπορροών,
- (ii) Ποια η νοηματική διατύπωση του προβλήματος: «εντοπισμός ζωνών με μεγάλη επικινδυνότητα κατολισθήσεων / λασπορροών» στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης,
- (iii) Ποια επίπεδα πληροφορίας (με βάση τεχνικές ανάλυσης πεδίου) που θα δημιουργηθούν από τα διαθέσιμα ελεύθερα γεωγραφικά δεδομένα, θα συμμετάσχουν στη σύνθεση του χωρικού ερωτήματος,
- (iv) Πως θα υλοποιηθεί (formalization) το ερώτημα (ii) σε γεωγραφικό πληροφοριακό σύστημα ανοικτού κώδικα, και
- (v) Ποια η αξιολόγηση των δυνατικών αποτελεσμάτων και ο έλεγχος, του κατά πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή να υποβοηθήσουν τη λήψη αποφάσεων.

Η μεθοδολογική προσέγγιση της διατριβής δομήθηκε με βάση τα χωρικά ερωτήματα και τα γεωγραφικά δεδομένα, σύμφωνα με την ακόλουθη ερευνητική αλληλουχία, όπως:

- (i) Τη νοηματική πρόσληψη του προβλήματος και των αλληλο-συσχετιζόμενων

γεωγραφικών παραμέτρων του,

- (ii) Τον εντοπισμό κατάλληλων γεωγραφικών δεδομένων (με συγκεκριμένες προδιαγραφές ακρίβειας και χωρικής διακριτικής ικανότητας),
- (iii) Τη σύνθεση των επιπέδων πληροφορίας και των παράγωγων τους στο περιβάλλον λογισμικού ανοικτού κώδικα,
- (iv) Την τυποποίηση του προβλήματος (formalization) στο περιβάλλον του λογισμικού ανοικτού κώδικα (QGIS, SAGA GIS) και υλοποίησης των χωρικών ερωτημάτων, καθώς
- (v) Τον έλεγχο και την αξιολόγηση.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της διατριβής για την περιοχή μελέτης μπορούν να αναπτυχθούν σε τέσσερις βασικούς άξονες και να αναλυθούν κατ' επέκταση σε επιμέρους τομείς, όπως:

- (i) Η χρήση των ελεύθερων πρόσβασης δεδομένων και ειδικότερα:
 - (a) Του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους SRTM,
 - (b) Των Δορυφορικών Φωτογραφιών Landsat 7
 - (c) Των Θεματικών Χαρτών καλύψεων γης CORINE, και
 - (d) Τα Ανοιχτά (Διανυσματικά) Δεδομένα,

αποδείχθηκε ότι είναι αξιόπιστες πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χωρική μοντελοποίηση καθώς και σε μέτριας διακριτικής ανάλυσης μελέτες, όπως οι δυνητικά περιβαλλοντικές μελέτες προέγκρισης χωροθέτησης και οι ρυθμιστικές χωροταξικές μελέτες.

- (ii) Τα υψομετρικά δεδομένα SRTM επέτρεψαν τον προσδιορισμό επιπέδων πληροφορίας που αναπαριστούν τις γεωμορφολογικές, υδρολογικές, γεωμορφομετρικές και υδρομηχανικές πληροφορίες στην περιοχή μελέτης.
- (iii) Τα επίπεδα πληροφορίας χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς για να προσδιορισθεί η φυσική υπογραφή (εντοπιότητα) της περιοχής στην οποία λαμβάνουν χώρα κατολισθήσεις και λασπορρόες στην περιοχή μελέτης.
- (iv) Η «εντοπιότητα» χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό ζωνών με αντίστοιχα χαρακτηριστικά στην περιοχή μελέτης, επιτρέποντας τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών, που θα συμβάλλουν καθοριστικά στη δυνατότητα λήψης αποφάσεων σε τοπικό, περιφερειακό και κρατικό επίπεδο.

Λέξεις Κλειδιά: «Κατολισθήσεις / Λασπορρόες, ΓΣΠ, Χωρική Ανάλυση, Ανοιχτά Δεδομένα».

Summary

The spatial planning among its main objectives is to strengthen sustainable and balanced socio-economic development as well as to increase the production process and achieve social cohesion.

The purpose of this Master Thesis is the location of zones with high risk of landslides in the prefecture of Achaia, an area with particular characteristics such as:

- (i)** Geology (large surface spread of flysch / alluvial deposits),
- (ii)** The tectonic activity (extensive fracture systems compiled with the hydrographic network and large seismicity),
- (iii)** The severe and extreme weather phenomena (rainfall) that are worsening with the resulting climate change, and
- (iv)** Extremely intense relief with large inclines and extensive deep erosion.

Based on the above characteristics, the subject of the dissertation is structured according to the following research questions, such as:

- (i)** What is the availability of free geographic data with specific constraints on geographic distinctiveness and accuracy and what thematic information content allows us to spatialise zones and evaluate them with regard to the risk of landslides,
- (ii)** What is the meaning of the problem of: «*localization of areas with a high risk of landslides / mudflow*» in the specific area of study,
- (iii)** What levels of information (based on field analysis techniques) generated by available free geographic data will be involved in the composition of the spatial query,
- (iv)** How to formalization the question described in step (ii) in an open source geographic information system, and
- (v)** Evaluating potential outcomes and checking whether they can be used or assist in decision making.

The methodological approach of the dissertation was structured on the basis of spatial questions and geographic data, according to the following research sequence, such as:

- (i)** The meaningful recruitment of the problem and the interrelated its geographical parameters,
- (ii)** Identification of appropriate geographic data (with specific specifications) precision and spatial resolution),

- (iii) The composition of information levels and their derivatives in the environment open source software,
- (iv) Formalization of the software environment open source (QGIS) and implementation of spatial queries, as well as,
- (v) Control and evaluation.

In conclusion, the results of the dissertation for the study area can be developed on four main axes and can be further analyzed in individual domains, such as:

- (i) The use of free data access, in particular:
 - (a) The SRTM Digital Terrain Model,
 - (b) Landsat 7 Satellite Photography,
 - (c) CORINE Land Cover Thematic Maps, and
 - (d) Open (Vector) Data,

proved to be reliable sources that can be used in spatial modeling as well as in moderate discreet analysis studies such as potential environmental spatial pre-approval studies and regulatory spatial planning studies.

- (ii) SRTM altitude data allowed the determination of information levels which represent the geomorphological, hydrological, geomorphometric and hydro mechanical information in the study area.
- (iii) Information levels were successfully used to determine physics signing (locality) of the area in which landslides and marshlands occur in the study area.
- (iv) «Locality» was used to identify zones with corresponding features in the study area, allowing the creation of digital maps, which will make a decisive contribution to decision-making at local, regional and state level.

Keywords: «Landslides / Mudflows, GIS, Spatial Analysis, Open Data».

Στην οικογένειά μου...

Λίτσα,

Δημήτρη-Θάνο,

Μαριλένα

Ευχαριστίες

Μόλις και οι τελευταίες λέξεις γεμίσουν την κενή αυτή σελίδα, θα έχει διανυθεί η απόσταση, ολοκληρώνοντας τον προορισμό του ταξιδιού, την Ιθάκη...

...Ενός ταξιδιού πολύχρονου, ενίοτε επίπονου, αλλά ασφαλώς γεμάτου και ευχάριστου.

Αυτή τη διάσταση λαμβάνει η «κατάκτηση» της Γνώσης, ενός ταξιδιού, που για να το γνωρίσεις θα πρέπει να το πραγματοποιήσεις και να το κάνεις εν τέλει κτήμα σου.

Κάθε ταξίδι έχει μία αφορμή, έναν σκοπό για τον οποίο γίνεται και μία αιτία που σου δίνει το έναυσμα για να εκκινήσεις, στο δικό μου αυτό ταξίδι, το έναυσμα αλλά και την αδιάλειπτη ώθηση της πορείας, την οφείλω στη σύντροφο μου και συνοδοιπόρο στην κοινή μας ζωή, τη Σύζυγο μου Λίτσα.

Της πιστώνεται ο τερματισμός του ταξιδιού αυτού, δυνάμενος πλέον να αφιερωθώ ολοκληρωτικά στα κοινά μας όνειρα.

Στην ενθάρρυνση και προετοιμασία του ταξιδιού, αλλά και στην επιτυχία του κατάληξη, συνέβαλαν πλείστοι... Γονείς, Συγγενείς και Φίλοι αγαπημένοι, τους ευχαριστώ από καρδιάς και τους ευγνωμονώ.

Ευχαριστώ και τους Καθηγητές μου που εξ αρχής σχεδίασαν σε χάρτες ακαδημαϊκούς το ταξίδι αυτό, αλλά και το Πανεπιστήμιο, που ως αλλοτινό μέσο αποδείχθηκε σκαρί ανθεκτικό σε όλη την πορεία.

Διερωτώμαι μόνο για το ποιος μπορεί να είναι άραγε εκείνος ο ταξιδιώτης που δε θέλει το ταξίδι του να είναι πρίμο και με άνεμους ούριους, να έχει φάρους φωτεινούς για την αποφυγή των σκοπέλων...

Θα είμαι εσαεί ευγνώμων στον ακαδημαϊκό μου Δάσκαλο και επιβλέποντα του «ταξιδιού» Δρ. Γεώργιο Μηλιαρέση, που όταν οι σειρήνες τραγουδούσαν δε με άφησε να μαγευτώ αλλά έδειχνε τον πηγαίμο για την Ιθάκη...

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Summary.....	vi
Ευχαριστίες.....	ix
Περιεχόμενα	x
Ευρετήριο	xiii
I Εικόνες	xiii
II Πίνακες	xv
III Σχήματα	xvi
IV Διαγράμματα	xvi
Κεφάλαιο Πρώτο	01
1.1 Εισαγωγή	01
1.1.1 Κατολίσθηση (Landslide).....	03
1.1.2 Λασποροή (Mudflow) / Λασπολίσθηση (Mudslide).....	04
1.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν σε βάθος χρόνου το φαινόμενο των κατολισθήσεων	05
1.1.3.1 Κλιματική Αλλαγή και Κατολισθήσεις.....	06
1.2 Καταγραφή Προβλήματος.....	13
1.2.1 Φλύσχη (Flysch)	13
1.2.1.1 Ζώνη Ιονίου (Αδριατικοϊόνιος)	14
1.2.1.2 Ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως	15
1.2.1.3 Ζώνη Ωλονού (Πίνδου)	15
1.2.2 Αλλουβιακές Αποθέσεις (Alluvial Deposits)	16
1.2.2.1 Αλλουβιακά Ριπίδια (Alluvial Fans)	16
1.2.2.2 Πλημμυρικές Ζώνες (Floodplains).....	17
1.2.2.3 Δέλτα Ποταμών (Deltas).....	17
1.2.3 Κατολισθήσεις σε ιζηματογενείς σχηματισμούς Φλύσχη και Αλλουβιακών Αποθέσεων.....	18
1.2.4 Παραδείγματα Πεδίου	18
1.2.4.1 Τυμφορηστός.....	18
1.2.4.2 Τμήμα 2B Εγνατίας Οδού	19
1.2.4.3 Ραψομμάτη	20

1.3	Σημασία και Αναγκαιότητα της Διατριβής.....	21
1.4	Σκοπός της Διατριβής.....	22
1.4.1	Προσδοκώμενα Αποτελέσματα.....	22
1.4.2	Κύρια Ερευνητικά Ερωτήματα.....	22
1.4.3	Αρχικά Προτεινόμενη Μεθοδολογία.....	23
Κεφάλαιο Δεύτερο		24
2.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	24
2.2	Αίτια Κατολισθήσεων	28
2.3	Επιπτώσεις Κατολισθήσεων.....	30
2.3.1	Κοινωνικό-Οικονομικές	31
2.3.2	Περιβαλλοντικές.....	33
2.4	Παραμετροποίηση του Προβλήματος	34
2.5	Γεωχωρική Μοντελοποίηση και Χαρτογράφηση.....	36
2.5.1	Προσδιορισμός κινδύνου κατολισθήσεων με τη χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους και Γεωμορφομετρικών Κριτηρίων μέτριας ανάλυσης.....	37
2.5.2	Προσδιορισμός των κατολισθητικών φαινομένων με τη χρήση τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	39
2.5.3	Εκτίμηση επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων με τη χρήση του Γενετικού Αλγόριθμου NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) και των κατάλληλων Αντικειμενικών Συναρτήσεων.....	40
2.5.4	Γεωπληροφορικό προγνωστικό μοντέλο κινδύνου λασπορροής και λασπώδους ρύπανσης για το έδαφος των Ουκρανικών Καρπαθίων	43
2.5.5	Εκτίμηση κινδύνου κατολισθήσεων με τη χρήση μοντέλου προσδιοριστικών παραγόντων (Μονάδων Μοναδικής Κατάστασης)	45
2.6	Συμπέρασμα.....	47
Κεφάλαιο Τρίτο		50
3.1	Μεθοδολογία	50
3.2	Γεωγραφικά Δεδομένα Περιοχής Μελέτης	51
3.2.1	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, ΨΜΕ (DTM)	52
3.2.2	Δορυφορικές Φωτογραφίες Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).....	57
3.2.3	Θεματικός Χάρτης καλύψεων/χρήσεων γης CORINE Land Cover (CLC)	60

3.2.4	Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά.....	62
3.2.4.1	Κλίση (Slope, S)	62
3.2.4.2	Διάνυσμα Κλίσης (Aspect).....	63
3.2.4.3	Χάρτης Σκιασμένου Ανάγλυφου (Hillshade).....	63
3.2.5	Επιλεγμένοι Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες	65
3.2.5.1	Μεταβλητές πεδίου με μικρή συσχέτιση μεταξύ τους	67
3.2.5.2	Εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων για επιλεγμένες μεταβλητές πεδίου....	69
3.3	Γεωγραφία Κατολισθήσεων νομού Αχαΐας.....	77
Κεφάλαιο Τέταρτο.....		79
	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	79
Κεφάλαιο Πέμπτο		85
	Συμπεράσματα.....	85
Παράρτημα (Annex).....		89
A	Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες.....	89
B	Λογισμικά Προγράμματα ΓΣΠ Ελεύθερου Κώδικα.....	110
B.1	Quantum GIS (QGIS)	110
B.2	System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS)	110
Βιβλιογραφία (Reference).....		111
A	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	111
B	Διεθνής Βιβλιογραφία.....	112
Γ	Διαδικτυακές Αναφορές.....	121

Ευρετήριο

I Εικόνες

Εικόνα 1: Εικόνα από το δορυφόρο Landsat της κατολίσθησης στη περιοχή Saidmarreh του Ιράν. Η προέλευση της περιοχής ολίσθησης οριοθετείται στα νοτιοδυτικά από την κορυφή του αντικλίνου του Kabir Kuh. Τα κορρήματα από την ολίσθηση μεταφέρθηκαν κάτω από την πλευρά του αντικλίνου και δια μέσου του ποταμού Karkheh σε όλη την κοιλάδα.

Εικόνα 2: Η κατολίσθηση Παναγοπούλας με την αποκοπή της εθνικής οδού Αθηνών - Πατρών σε φωτογραφική λήψη από ελικόπτερο (28 Απριλίου 1971).

Εικόνα 3: Κατολίσθηση Αμυνταίου, διακρίνεται το μέτωπο εξόρυξης του ορυχείου της ΔΕΗ μήκους 3 km (10 Ιουνίου 2017).

Εικόνα 4: Ταχύτατη εκδήλωση λασποροής σε οδικό άξονα της πόλης Santa Clarita στην πολιτεία της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ, κατά τη διάρκεια έντονης βροχόπτωσης (16 Δεκεμβρίου 2016).

Εικόνα 5: Κατολίσθηση εδαφικής μάζας στα Μετέωρα (Μονή Βαρλαάμ), απόρροια των έντονων βροχοπτώσεων στην περιοχή (18 Νοεμβρίου 2017).

Εικόνα 6: Σχηματισμός Φλύσχη στην παραλία Itzurun στη χώρα των Βάσκων (βόρειος Ισπανία).

Εικόνα 7: Η κατολίσθηση του βουνού Huascarán, στην περιοχή του Áncash στο βόρειο Περού στις 31 Μαΐου του 1970.

Εικόνα 8: Η κατολίσθηση του 1995 στη μικρή παραλιακή κοινότητα της La Conchita, στην κομητεία Βεντούρα της βόρειας Καλιφόρνιας των ΗΠΑ.

Εικόνα 9: Ο τελικός παραγόμενος χάρτης που προέρχεται από δεδομένα AirSAR και δορυφορικές εικόνες WorldView-1. Όπου: α) Οι τύποι τοποθεσιών κατολισθήσεων που επικαλύπτονται από AirSAR DEM δεδομένα και β) Οι διευρυμένες απόψεις δύο θέσεων κατολισθήσεων σε δορυφορικές εικόνες WorldView-1 (πανχρωμική ζώνη).

Εικόνα 10: Βαθμίδες κλίσης: α) Προσανατολισμός Εικόνας (Σημείο κατηφορικής κλίσης) και β) Εικόνα πρανών (Το σκουρόχρωμο σημείο έχει τη μεγαλύτερη κλίση).

Εικόνα 11: Ο παραγόμενος χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις.

Εικόνα 12: Η θέση των λεκανών λασποροής στην περιοχή μελέτης.

Εικόνα 13: Γεωγραφικός χάρτης της Ελλάδας. Με σκουρόχρωμη κοκκινωπή σκίαση ο νομός Αχαΐας, περιοχή μελέτη της διατριβής.

Εικόνα 14: Ψηφιακά Υψομετρικά Δεδομένα SRTM 90 m (Έκδοση 4.1).

Εικόνα 15: Το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του νομού Αχαΐας. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα απεικονίζονται με σκουρόχρωμες διαβαθμίσεις του γκρι.

Εικόνα 16: Θεματικό Επίπεδο με τις οικιστικές συγκεντρώσεις (μαύρα σημεία), το οδικό δίκτυο (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και τις λίμνες (μπλε σκίαση) του νομού Αχαΐας.

Εικόνα 17: Οι Ισοϋψείς (Contours) του νομού Αχαΐας με τις αντίστοιχες τιμές τους.

Εικόνα 18: Το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του νομού Αχαΐας με τις Ισοϋψείς (Contours).

Εικόνα 19: Το αρχείο DEM του νομού Αχαΐας με το υδρογραφικό του δίκτυο (μπλε γραμμή).

Εικόνα 20: Οι ισοϋψείς του νομού Αχαΐας και η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου.

Εικόνα 22: Πολυφασματική δορυφορική φωτογραφία του Landsat 7 (ETM+) χωρικής ανάλυσης 30μ. του νομού Αχαΐας σε απόδοση έγχρωμου σύνθετου (R,G,B, = 7,4,2).

Εικόνα 23: Το Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς (WRS) 2 για τους δορυφόρους Landsat 4,5 και 7 όπως ορίζεται από τους αριθμούς PATH / ROW.

Εικόνα 24: Ο θεματικός χάρτης καλύψεων γης CORINE Land Cover (CLC) του νομού Αχαΐας.

Εικόνα 25: Η Κλίση της επιφάνειας όπως αποτυπώνεται στο αρχείο DEM του νομού Αχαΐας. Οι μεγαλύτερες κλίσεις παρουσιάζονται με σκουρόχρωμες διαβαθμίσεις του γκρι.

Εικόνα 26: Το διάνυσμα της Κλίσης (Aspect).

Εικόνα 27: Ο χάρτης Σκιασμένου Ανάγλυφου (HillShade) για αζιμούθιο 300° και ύψος 40°.

Εικόνα 28: Η χαρτογραφική αποτύπωση της χωρικής εξάπλωσης για κάθε μία από τις 8 τάξεις (clusters) του Πίνακα 9.

Εικόνα 29: Η συνολική χαρτογραφική αποτύπωση της χωρικής εξάπλωσης και για τις 8 τάξεις (clusters) του Πίνακα 9.

Εικόνα 30: Οι 82 θέσεις (κίτρινα σημεία) κατολισθήσεων στην ευρύτερη γεωγραφική περιοχή του νομού Αχαΐας.

Εικόνα 31: Η χωρική κατανομή των κατολισθήσεων στο νομού Αχαΐας και με ετικέτα (label) η ζώνη στην οποία ανήκουν.

Εικόνα 32: Η αποτύπωση των 82 θέσεων κατολισθήσεων με μαύρα σημεία καθώς και οι 3 κατηγορίες των τάξεων (clusters) που παρουσιάζουν επικινδυνότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων, όπου: 1 = Κίτρινο, 6 = Μπλε και 7 = Κόκκινο.

Εικόνα 33: Η τάξη 7 και το υδρογραφικό δίκτυο.

Εικόνα 34: Ο δείκτης Ταξινόμησης Εδάφους (Landform Classification, LC) βάσει των 10 κατηγοριοποιήσεων του Πίνακα 7.

Εικόνα 35: Ο δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Topographic Position Index, TPI).

Εικόνα 36: Ο δείκτης Θετικής Ανοικτότητας (Openness Positive, OP).

Εικόνα 37: Ο δείκτης Αρνητικής Ανοικτότητας (Openness Negative, ON).

Εικόνα 38: Ο δείκτης Τοπικό Βάθος Κοιλάδων (Valley Depth, VD).

Εικόνα 39: Ο δείκτης Κανονικοποιημένο Ύψος (Normalized Height, HNo).

Εικόνα 40: Ο δείκτης Τυποποιημένο Ύψος (Standardized Height, HSt).

Εικόνα 41: Ο δείκτης Σχετική Θέση ως προς την Κλίση (Relative Slope Position, RSP).

Εικόνα 42: Ο δείκτης Θέση Μέσης Κλίσης (mid Slope Position, HmA).

Εικόνα 43: Ο δείκτης Συντελεστή Μήκους (L) και Κλίσης (S) (LS Factor).

Εικόνα 44: Ο δείκτης Ύψος Κλίσης (Slope Height, SH).

Εικόνα 45: Ο δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας (Plan Curvature, PLC).

Εικόνα 46: Ο δείκτης Κατατομή Καμπυλότητας (Profile Curvature, PFC).

Εικόνα 47: Ο δείκτης Σύγκλισης Απορροής (Convergence Index, C).

Εικόνα 48: Ο δείκτης Καμπυλότητας Κατωφέρειας (Downslope Curvature, CD).

Εικόνα 49: Ο δείκτης Καμπυλότητας Ανωφέρειας (Upslope Curvature, CU).

Εικόνα 50: Ο δείκτης Απόστασης Δικτύου Καναλιών (Channel Network Distance, CND).

Εικόνα 51: Ο δείκτης Μήκους Διαδρομής Ροής (Flow Path Length, FPL).

Εικόνα 52: Ο δείκτης Ισορροπίας Μάζας (Mass Balance Index, MBI).

Εικόνα 53: Ο δείκτης Μορφομετρικής Προστασίας (Morphometric Protection Index, MPI).

Εικόνα 54: Ο δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας (Topographic Wetness Index, TWI).

II Πίνακες

Πίνακας 1: Ταξινόμηση μετακίνησης πρηνών κατά Varnes (1978).

Πίνακας 2: Τα αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων σύμφωνα με την WP / WLI (1994) της UNESCO.

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ETM+ του δορυφόρου Landsat 7.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών του αισθητήρα ETM+ του δορυφόρου Landsat 7.

Πίνακας 5: Οι κατηγοριοποιήσεις του συστήματος γεωταξινόμησης καλύψεων γης CORINE.

Πίνακας 6: Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες που χρησιμοποιούνται στη διατριβή.

Πίνακας 7: Η Ταξινόμηση Εδάφους (Landform Classification) στο λογισμικό περιβάλλον του SAGA GIS.

Πίνακας 8: Τυποποιημένα Εσωτερικά Γινόμενα (Συντελεστής Συσχέτισης).

Πίνακας 9: Τα κέντρα βάρους (centroids) των 8 τάξεων που προέκυψαν από την εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων (Ανάλυση των Κ-Μέσων) και την από-κανονικοποίηση τους (Δηλαδή απεικονίζονται τα πραγματικά εύρη τιμών και όχι τα κανονικοποιημένα στα οποία βασίστηκε η πραγματική ανάλυση συσσωρεύσεων).

Πίνακας 10: Περιοχές του Ν. Αχαΐας που έχουν εκδηλωθεί κατολισθήσεις.

Πίνακας 11: Ταξινόμηση επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων για τις θέσεις του νομού Αχαΐας.

Πίνακας 12: Ο Δείκτης Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων (HLI) ανά τάξη (cluster).

Πίνακας 13: Τα τυποποιημένα κέντρα βάρους ανά τάξη (cluster).

III Σχήματα

Σχήμα 1: Προσδιορισμός αλλουβιακών επιπέδων.

Σχήμα 2: Τύποι κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).

Σχήμα 3: Γεωτεχνικό μοντέλο εκτίμησης κινδύνου.

IV Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Αντιπαραβολή της κατολισθητικής δραστηριότητας των τελευταίων 11.000 ετών στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK), την Ισπανία (ES), την Πολωνία (PL), την Ελβετία (CH) και τη βόρεια Ιταλία (north IT as «this study») με κλιματικούς δείκτες βροχόπτωσης (rainfall) και θερμοκρασίας (temperature).

Διάγραμμα 2: Αντιπαραβολή περιόδων έντονης κατολισθητικής δραστηριότητας και περιόδων περιορισμένης κατολισθητικής δραστηριότητας με κλιματικούς δείκτες του Ολοκαίνου.

Διάγραμμα 3: Η γραφική παράσταση του ορίου βροχόπτωσης στο σύστημα συντεταγμένων Y και X, όπου για τον άξονα Y (η ένταση βροχόπτωσης) και για τον άξονα X (η διάρκεια βροχόπτωσης).

Διάγραμμα 4: Διατομή οπισθοδρομικών κατολισθήσεων στην περιοχή Τυμφρηστού.

Διάγραμμα 5: Διατομή της κατολίσθησης Πρινοτόπων.

Διάγραμμα 6: Διατομή της κατολίσθησης Ραψομαμάτη.

Διάγραμμα 7: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο CND (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 8: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο ProfC (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 9: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο Lsf (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 10: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο VD (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 11: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο DC (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 12: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο CI (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 13: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο FPL (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 14: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο PlanC (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 15: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο PO (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 16: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο TWI (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 17: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο TCA (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 18: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο MBI (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 19: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο UC (Πίνακας 9).

Διάγραμμα 20: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως ποσοστό % (Πίνακας 9).

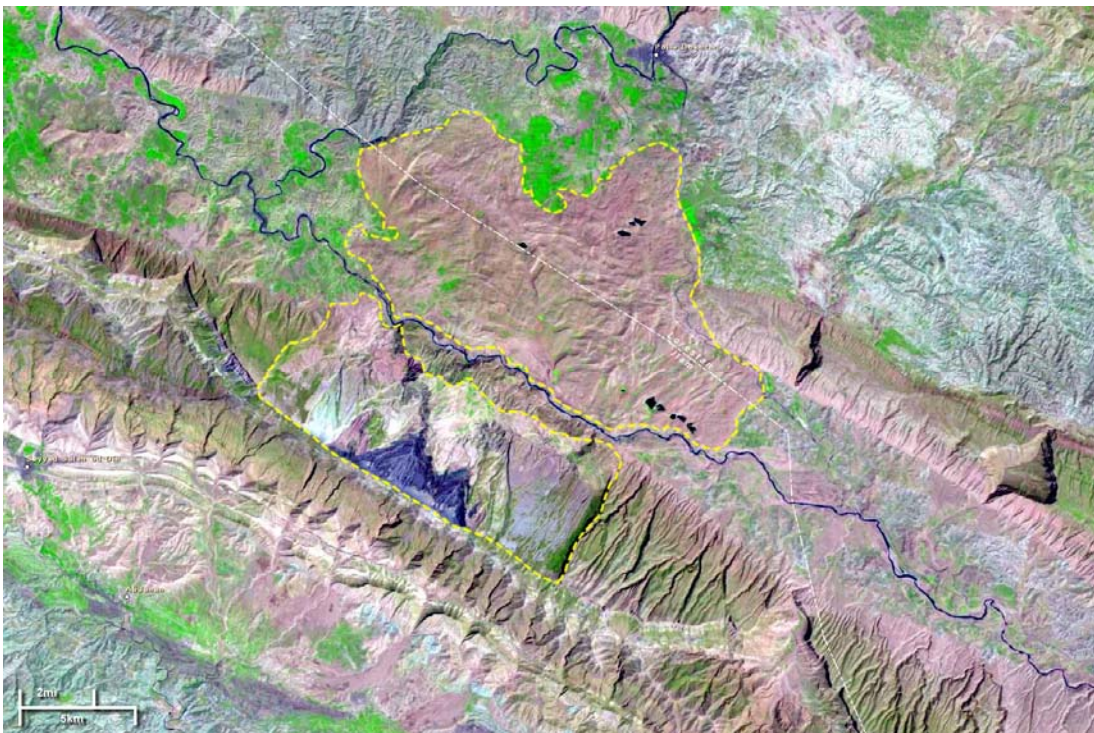
Διάγραμμα 21: Τα τυποποιημένα κέντρα βάρους ως προς τις παραμέτρους: Lsf, PO, UC, CI, CND, TCA, VD, DC, PlanC, ProfC, FPL και TWI.

Κεφάλαιο Πρώτο

1.1 Εισαγωγή

Οι κατολισθήσεις αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς τύπους φυσικών καταστροφών, σύμφωνα με το πόρισμα της Επιτροπής Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής της Τράπεζας της Ελλάδος. Η εκδήλωσή τους απειλεί και σε πολλές περιπτώσεις επιφέρει ζημιές στην ανάπτυξη υποδομών, την πραγματοποίηση τεχνικών έργων αλλά και την ίδια τη βιωσιμότητα οικισμών καθώς και τη ζωή και την ευημερία τμημάτων του ανθρώπινου πληθυσμού (ΤτΕ 2011).

Ιστορικά η μεγαλύτερη κατολίσθηση που έπληξε την επιφάνεια της γης εκδηλώθηκε στους προϊστορικούς χρόνους, περίπου πριν από 10.000 χρόνια στην περιοχή Saidmarreh στο Νοτιοδυτικό Ιράν (Εικόνα 1), όπου 20 km³ (5 miles³) ασβεστολιθικών στρωμάτων του κατώτερου Μειόκαινου και Ηώκαινου αποσπάστηκαν κατά μήκος της επίπεδης επιφάνειας



Εικόνα 1: Εικόνα από το δορυφόρο Landsat της κατολίσθησης στη περιοχή Saidmarreh του Ιράν. Η προέλευση της περιοχής ολίσθησης οριοθετείται στα νοτιοδυτικά από την κορυφή του anticlinal του Kabir Kuh. Τα κορρήματα από την ολίσθηση μεταφέρθηκαν κάτω από την πλευρά του anticlinal και δια μέσου του ποταμού Karkheh σε όλη την κοιλάδα.

Πηγή: Geology.com 2005. URL: <https://geology.com/landslides/saidmarreh-landslide.shtml>.

και ολίσθησαν κάτω από τη βόρεια πλευρά του αντίκλινου του Kabir Kuh η οποία οδήγησε στην δημιουργία αρκετών λιμνών μία εκ των οποίων είχε μήκος 40 km (Radbruch-Hall et al. 1976).

Η πλέον καταστροφική κατολίσθηση που αναφέρεται διεθνώς πραγματοποιήθηκε στην Κίνα το 1920 έπειτα από σεισμό, προκαλώντας το θάνατο σε 100.000 ανθρώπους, καθώς τα σπίτια τους σκεπάστηκαν από μάζες ασβεστούχων πηλών (αιολικοί σχηματισμοί) (Ρόζος 2007). Στην ευρωπαϊκή ήπειρο, η πιο καταστροφική κατολίσθηση με απολογισμό 2.600 νεκρούς και ανυπολόγιστες ζημιές σε τεχνικά έργα και υποδομές, έλαβε χώρα το 1963 στο φράγμα Vainot της βόρεια Ιταλίας, όπου οι κακές γεωλογικές συνθήκες και οι άστοχες επεμβάσεις στη διαμόρφωση της λεκάνης κατάκλισης του φράγματος, σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις που επικράτησαν στην περιοχή το προηγούμενο διάστημα, οδήγησαν στην κατολίσθηση των πρανών της λεκάνης με άμεσο επακόλουθο να μετακινηθούν περί τα 270.000.000 m³ φερτών υλικών (Veveakis et al. 2007).

Στην ελληνική επικράτεια, ιστορική μελέτη περίπτωσης αποτελεί η κατολίσθηση στην περιοχή της Παναγοπούλας του νομού Αχαΐας το 1971, που είχε ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό της παλαιάς εθνικής οδού Αθηνών – Πατρών για μεγάλο χρονικό διάστημα και μέχρι την απομάκρυνση της εδαφικής μάζας (Εικόνα 2) η οδική σύνδεση πραγματοποιούνταν μέσω θαλάσσης από την περιοχή του Ψαθόπυργου.



Εικόνα 2: Η κατολίσθηση Παναγοπούλας με την αποκοπή της εθνικής οδού Αθηνών – Πατρών σε φωτογραφική λήψη από ελικόπτερο (28 Απριλίου 1971). Πηγή: Αρχείο Γεωέρευνας Α.Ε.

Στις μέρες μας σημαντική θεωρείται η κατολίσθηση που πραγματοποιήθηκε στο ορυχείο της ΔΕΗ στην περιοχή του Αμυνταίου του νομού Φλωρίνης τον Ιούνιο του 2017 (Εικόνα 3). Η ενεργοποίηση της κατολίσθησης στο μέτωπο εξόρυξης του ορυχείου μήκους 3 km, είχε ως συνέπεια την αλλαγή του γεωμορφολογικού χάρτη της περιοχής, με τη μετακίνηση της εδαφικής μάζας να υπολογίζεται στα 80 εκατομμύρια m³ καλύπτοντας κατ' εκτίμηση 25 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος (λιγνίτη).



Εικόνα 3: Κατολίσθηση Αμυνταίου, διακρίνεται το μέτωπο εξόρυξης του ορυχείου της ΔΕΗ μήκους 3 km (10 Ιουνίου 2017). Πηγή: Γιώργος Τσομπανάκης, λήψη από drone.

1.1.1 Κατολίσθηση (Landslide)

Η επιφάνεια της γης αποτελεί μέρος ενός δυναμικού συστήματος το οποίο αναπτύσσεται, τόσο προοδευτικά όσο και επεισοδιακά, μέσω της δράσης γεωλογικών, γεωμορφολογικών και μετεωρολογικών διεργασιών. Οι κατολισθήσεις αποτελούν μία όψη αυτής της εξέλιξης (Hutchinson 1995). Το 1990 η Επιτροπή Κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG), παρουσίασε μία ολοκληρωμένη πρόταση για τον καθορισμό των χρησιμοποιούμενων όρων που περιγράφουν το φαινόμενο και καθορίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

Συγκεκριμένα, οι εδαφικές ή βραχώδεις μάζες που βρίσκονται είτε κάτω από οριζόντια μορφολογική επιφάνεια, είτε πίσω από κεκλιμένη (πρανές), μπορούν να υποστούν

διατάραξη της ισορροπίας τους, ύστερα από ορισμένες εσωτερικές ή εξωτερικές μεταβολές.

Οι διαταράξεις αυτές μπορούν να προκληθούν από εξωτερικές παρεμβάσεις με την άμεση ή την έμμεση συμβολή του ανθρώπου. Μπορούν ωστόσο να προκληθούν και χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις από διάφορες φυσικές διεργασίες, που εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου (Λέκκας 2000).

Εξετάζοντας από κινηματική άποψη το σύνολο των μεταβολών αυτών, διακρίνουμε δύο συνιστώσες κίνησης, μία οριζόντια και μία κατακόρυφη. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο κατακόρυφη μετακίνηση προς τα κάτω, το φαινόμενο καλείται καθίζηση ή κατάρρευση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου εκτός από την κατακόρυφη προς τα κάτω συνιστώσα, υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα κίνησης, το φαινόμενο καλείται κατολίσθηση με την ευρύτερη έννοια του όρου. Οι παραπάνω δύο βασικές συνιστώσες κίνησης, συνδέονται δυναμικά με την ανάπτυξη ορθής ή διατμητικής τάσης. Εφόσον δρα ορθή τάση σε οριζόντιο επίπεδο, σε περίπτωση μετακίνησης της μάζας υπάρχει κατακόρυφη κίνηση, δηλαδή καθίζηση. Στην περίπτωση που συνυπάρχει και διατμητική τάση, η οποία μάλιστα υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους ή ασυνέχειας βραχομάζας, θα υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα στην κίνηση, δηλαδή κατολίσθηση. Η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης συνήθως δεν παίρνει μεγάλες τιμές. Μερικές φορές όμως η συνιστώσα αυτή μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλη σε σχέση με την κατακόρυφη (Λέκκας 2000).

1.1.2 Λασποροή (Mudflow) / Λασπολίσθηση (Mudslide)

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν τη μορφή μιας ταχύτατης μαζικής κίνησης κορεσμένου εδάφους ή ιζήματος υπό τη δράση της βαρυτικής επιτάχυνσης, εδώ το επίθετο «ταχύτατη» σημαίνει ότι η τυπική ταχύτητα βρίσκεται εντός του εύρους των 1-25 m/s (Iverson 1997), αυτές οι μαζικές κινήσεις αναφέρονται συχνά ως «ροές κορημάτων». Όταν το ίζημα είναι πλούσιο σε αργιλώδη υλικά και φτωχό σε χονδρόκοκκα σωματίδια το ίζημα μοιάζει με λασπώδες υγρό (Coussot and Meunier 1996). Οι λασποροές ή λασπολισθήσεις αποτελούν το τελευταίο μέλος αυτής της μεγάλης οικογένειας των φυσικών διεργασιών (Εικόνα 4). Σημειώνεται πως δεν υπάρχει συναίνεση στην επιστημονική βιβλιογραφία για την ταξινόμηση και τον προσδιορισμό των λασπών, ο οποίος μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τους συγγραφείς.



Εικόνα 4: Ταχύτατη εκδήλωση λασπορροής σε οδικό άξονα της πόλης Santa Clarita στην πολιτεία της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ, κατά τη διάρκεια έντονης βροχόπτωσης (16 Δεκεμβρίου 2016).

Πηγή: ABC7.com 2016. URL: <http://abc7.com/weather/flash-mudslide-in-santa-clarita-triggered-by-heavy-rain/1660107/>.

1.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν σε βάθος χρόνου το φαινόμενο των κατολισθήσεων

Η κλιματική αλλαγή, η αργή και σταθερή μεταβολή του γήινου κλίματος, όπως έχει καθιερωθεί να λέγεται το φαινόμενο αυτό, σχετίζεται με την υπερβολική παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου - κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), αλλά και άλλων, όπως του μεθανίου (CH₄) και των χλωροφθορανθράκων (CFCs), τα οποία συντελούν στην παγίδευση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται από τη Γη (φαινόμενο του θερμοκηπίου) και συνακόλουθα στην παγκόσμια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με ό,τι αυτή η αύξηση συνεπάγεται.

Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2007) η ανοδική τάση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας θα συνεχιστεί στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη και κατά τον 21^ο αιώνα. Ειδικότερα, βάσει του μέσου όρου ενός συνόλου κλιματικών προσομοιώσεων, η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αναμένεται να αυξηθεί, ανάλογα με την εξέλιξη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, από 1.8 °C έως 4 °C κατά τον τρέχοντα αιώνα.

Όσον αφορά τις πιθανολογούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αυτές θα μπορούσαν να συνοψισθούν ως ακολούθως (Καρβούνης και Γεωργακέλλος 2003, Κουϊμτζής κ.ά. 1998):

- Ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούμε συχνά να εμφανίζονται τις τελευταίες δεκαετίες, όπως είναι οι θύελλες, οι τυφώνες, οι ανεμοστρόβιλοι και οι σχεδόν κατακλυσμιαίες βροχοπτώσεις.
- Άνοδος της στάθμης της θάλασσας από 15 έως 95 εκατοστά (cm) μέχρι το τέλος του αιώνα. Κατά συνέπεια, αρκετές παραλιακές περιοχές θα απειληθούν (αρκετές βέβαια ήδη απειλούνται) άμεσα με πλημμύρες, όπως συνέβη στην περίπτωση των νησιών Τουβαλού στον Ειρηνικό ωκεανό. Στην περίπτωση αυτή οι κάτοικοι του μικροσκοπικού νησιωτικού αυτού συμπλέγματος αναγκάστηκαν να μεταναστεύσουν στη γειτονική Αυστραλία εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας που απειλούσε άμεσα την ίδια τους την επιβίωση.
- Βλάβες σε ευαίσθητα οικοσυστήματα, όπως είναι τα τροπικά δάση και οι κοραλλιογενείς περιοχές εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και της μείωσης των βροχοπτώσεων.
- Μετακίνηση των ζωνών βροχοπτώσεων από τον Ισημερινό προς βορρά και ερημοποίηση του κάτω τμήματος της εύκρατης ζώνης μεταξύ του 20^{ου} και του 40^{ου} παραλλήλου.

Τα αποτελέσματα επιστημονικών ερευνών απέδειξαν πως τα ακραία καιρικά φαινόμενα, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, και οι φυσικές καταστροφές μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την διάρκεια ζωής, τη λειτουργικότητα αλλά και την ίδια την ασφάλεια των κρίσιμων υποδομών (critical infrastructures) (Σφέτσος κ.ά. 2016).

1.1.3.1 Κλιματική Αλλαγή και Κατολισθήσεις

Οι κλιματικές παράμετροι και οι μεταβολές τους έχουν συνδεθεί σε πολλές περιπτώσεις με τις διεργασίες της κατολισθητικής δραστηριότητας. Οι Borgatti and Soldati (2010) ισχυρίζονται ότι το ξεκίνημα κατολισθητικών φαινομένων είναι περισσότερο το αποτέλεσμα μίας μακροχρόνιας διεργασίας παρά η άμεση απόκριση σε ένα συγκεκριμένο κλιματικό συμβάν. Θεωρούν όμως ότι η περιεχόμενη υγρασία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επαναδραστηριοποίηση κατολισθήσεων, την επίσπευση ενεργών εδαφικών μετακινήσεων και την άμεση πρόκληση τους (triggering).

Με αφορμή την πρωτοποριακή εργασία του Caine (1980), πολλοί ερευνητές συσχέτισαν την ένταση της βροχόπτωσης (Cannon 1988, Bacchini and Zannoni 2003, Cannon and Gartner 2005, Guzzetti et al. 2007, Guzzetti et. al. 2008) και το συνολικό ετήσιο ύψος υετού (Ayalew 1999, Buma and Dehn 2000, Collison et al. 2000) αλλά και άλλα παρόμοια κλιματικά μεγέθη (Corominas and Moya 1996) με την εκδήλωση κατολισθήσεων.

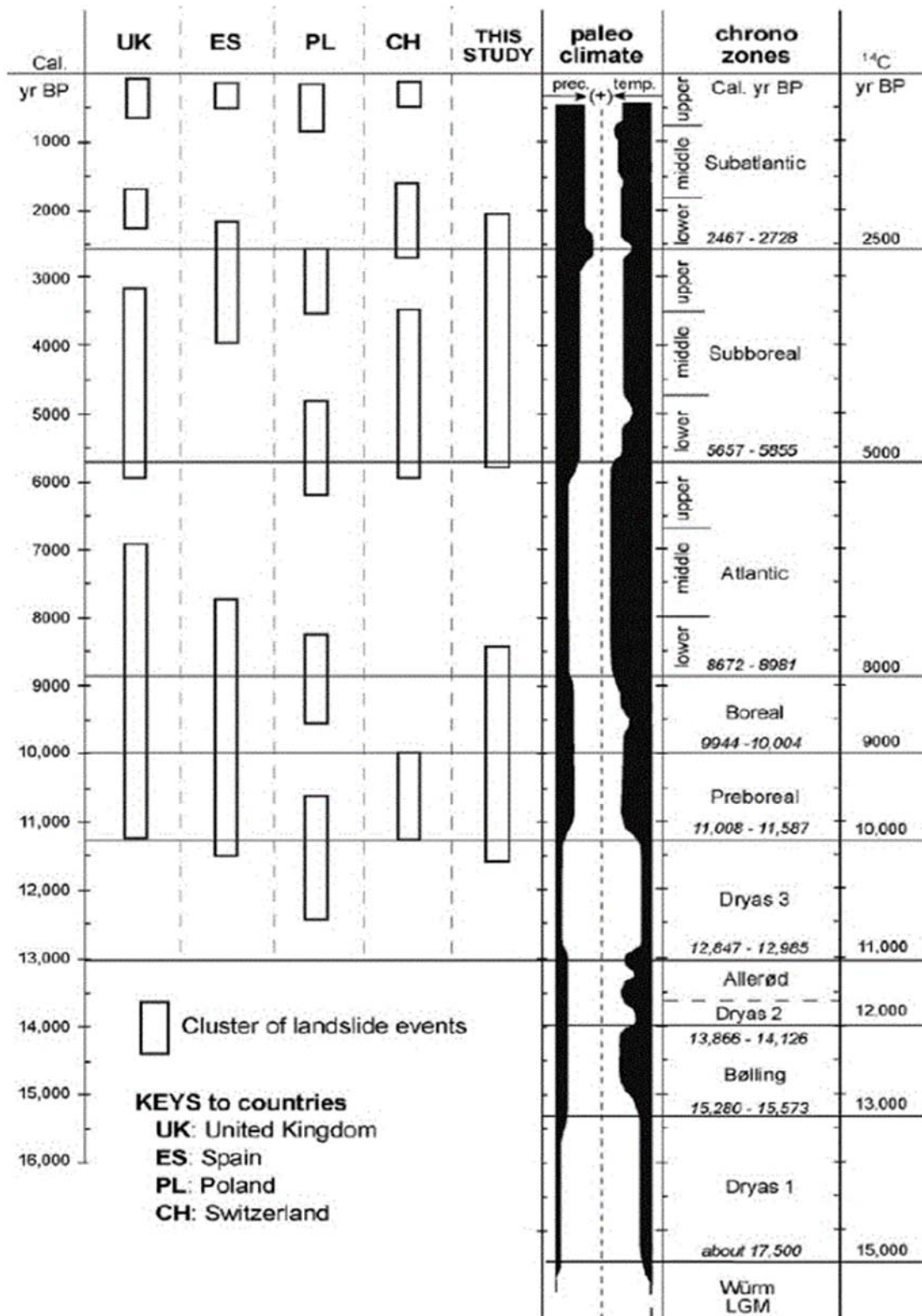
Η σημασία του παράγοντα της βροχόπτωσης στις κατολισθήσεις τις καθιστά εξαρτώμενες από το εκάστοτε κλιματικό καθεστώς (Εικόνα 5) και επομένως ευπαθείς σε πιθανές αλλαγές του. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο θα έχει σημαντικότερες συνέπειες στον χώρο της Μεσογείου ο οποίος θεωρείται ιδιαίτερα ευπαθής σε αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων (Mulligan 1998) και ταυτόχρονα συνδυάζει πολλούς από τους προκαταρκτικούς παράγοντες που οξύνουν τα κατολισθητικά φαινόμενα (λιθολογία, τεκτονική, μορφολογία, ανθρώπινος παράγοντας κ.ά.).



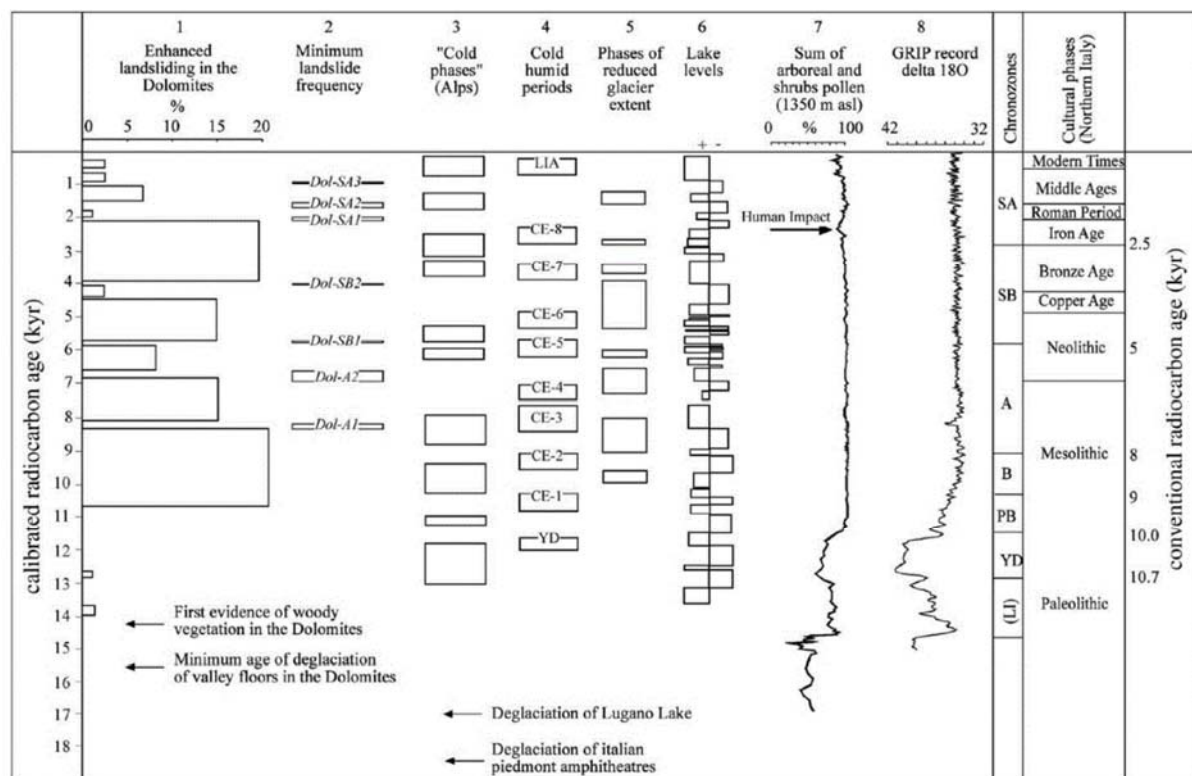
Εικόνα 5: Κατολίσηση εδαφικής μάζας στα Μετέωρα (Μονή Βαρλαάμ), απόρροια των έντονων βροχοπτώσεων στην περιοχή (18 Νοεμβρίου 2017). Πηγή: stagonnews.gr 2017. URL: <https://www.stagonnews.gr/katolisthisi-sta-meteora-ypochorise-megalo-kommati-tis-plagias-kato-apo-tin-iera-moni-varlaam/>.

Οι Soldatti et al. (2004) μελετώντας κατολισθητικά φαινόμενα των τελευταίων 11.000 χρόνων στις Άλπεις, διαπιστώνουν σύνδεση της κατολισθητικής δραστηριότητας με κλιματικούς παράγοντες όπως η βροχόπτωση και η θερμοκρασία (Διάγραμμα 1).

Οι Borgatti and Soldati (2010) θεωρούν ότι η συχνότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων εξαρτάται από την υδρολογική κατάσταση των κλιτύων, η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από το κλίμα. Στη μελέτη τους («this study») συγκρίνοντας τη συχνότητα των κατολισθήσεων στην περιοχή της βόρειας Ιταλίας μέσα στο Ολόκαινο, με ενδείξεις του παλαιοκλίματος της ίδιας περιόδου, διαπίστωσαν ότι οι διεργασίες κίνησης εδαφικών μαζών μπορούν να θεωρηθούν ακόμα και γεωμορφολογικοί δείκτες των κλιματικών αλλαγών του παρελθόντος (Διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 1: Αντιπαραβολή της κατολισθητικής δραστηριότητας των τελευταίων 11.000 ετών στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK), την Ισπανία (ES), την Πολωνία (PL), την Ελβετία (CH) και τη βόρεια Ιταλία (north IT as «this study») με κλιματικούς δείκτες βροχόπτωσης (rainfall) και θερμοκρασίας (temprature). Πηγή Soldati et al. 2004.



Διάγραμμα 2: Αντιπαραβολή περιόδων έντονης κατολισθητικής δραστηριότητας και περιόδων περιορισμένης κατολισθητικής δραστηριότητας με κλιματικούς δείκτες του Ολοκαίνου. Πηγή: Borgatti and Soldati 2010.

Μελετώντας την κατολισθητική δραστηριότητα κατά το Ολόκαινο σε αντιπαραβολή με αναγνωρισμένες περιόδους αυξημένης υγρασίας στην περιοχή των Άλπεων διαπιστώνουν καλή συσχέτιση μεταξύ των περιόδων αυξημένης κατολισθητικής δραστηριότητας και αυτών με αυξημένη υγρασία. Αυτό κατά τους Borgatti and Soldati (2010) αποδεικνύει ότι οι φάσεις αυξημένης κατολισθητικής δραστηριότητας σχετίζονται με τις υγρές περιόδους.

Επίσης οι Borgatti and Soldati (2010) σημειώνουν ότι οι περίοδοι στο παρελθόν με μικρή κατολισθητική δραστηριότητα συμπίπτουν με τις περιόδους κατά τις οποίες το κλίμα της γης ήταν ξηρό. Σε σχέση με την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή οι Beniston and Douglas (1996) υποστηρίζουν ότι μια ενδεχόμενη αύξηση στη συχνότητα ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης θα οδηγήσει σε συχνότερη αύξηση των υδραυλικών πιέσεων των πόρων στα πετρώματα. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει σε περισσότερα κατολισθητικά γεγονότα.

Επιπρόσθετα οι Borgatti and Soldati (2010) ισχυρίζονται ότι αλλαγές στη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία και την εξατμισοδιαπνοή θα επηρεάσουν απευθείας το υδρολογικό καθεστώς

στις κλιτύες. Το καθεστώς αυτό θα επιδράσει στο τύπο, το ρυθμό και τη χρονική και χωρική κατανομή των εδαφικών κινήσεων.

Ο Caine (1980) διαπιστώνει την εξάρτηση των εδαφικών μαζών από την ένταση και τη διάρκεια της βροχόπτωσης και προτείνει ένα όριο (rainfall threshold) από το οποίο προκύπτει αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης ρηχών κατολισθήσεων και λασπορροών (Διάγραμμα 3).

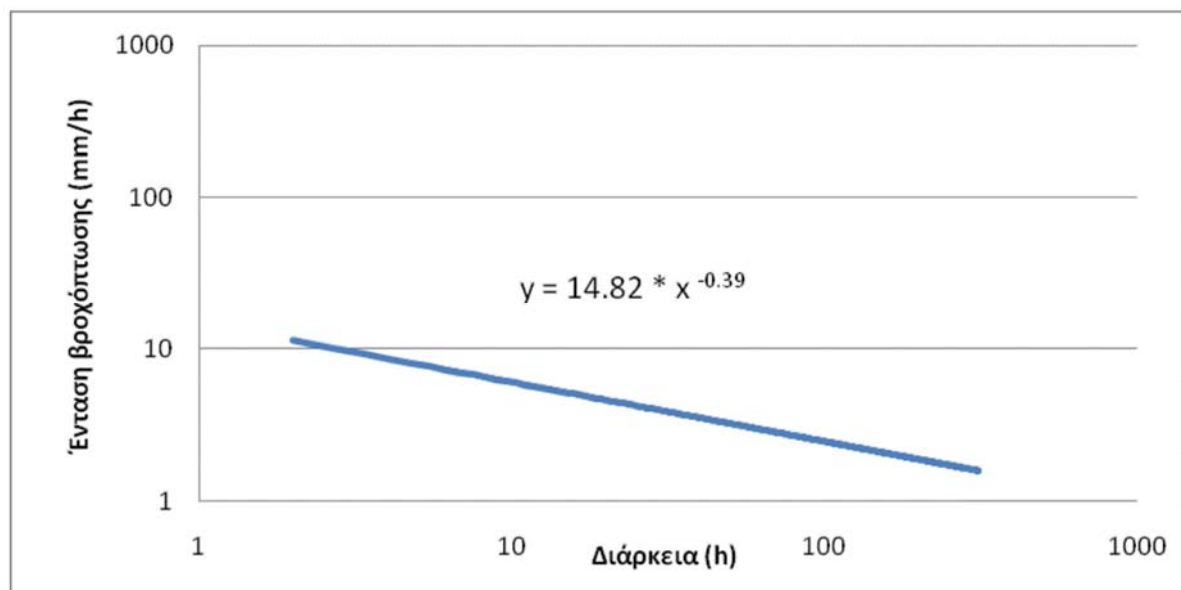
Το όριο αυτό δίνεται από το γενικό τύπο:

$$I = 14.82 \times D^{-0.39}$$

όπου D είναι η διάρκεια της βροχής σε ώρες και I η ένταση σε χιλιοστά ανά ώρα (mm / hr).

Αντίστοιχα ο Innes (1983) προτείνει για την έναρξη λασπορροών το όριο που δίνεται από τον τύπο:

$$I = 4.93 \times D^{-0.50}$$



Διάγραμμα 3: Η γραφική παράσταση του ορίου βροχόπτωσης στο σύστημα συντεταγμένων Y και X , όπου για τον άξονα Y (η ένταση βροχόπτωσης) και για τον άξονα X (η διάρκεια βροχόπτωσης).

Πηγή: Caine 1980.

Στο πεδίο των ορίων που συσχετίζουν την ένταση της βροχόπτωσης με τη διάρκεια, οι Guzzetti et al. (2008) προτείνουν για το Μεσογειακό χώρο το όριο που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = 4.81 \times D^{-0.49}$$

Για όλους τους τύπους κατολισθήσεων οι Calcaterra et al. (2000) προτείνουν για την ευρύτερη περιοχή της Καμπανίας (επαρχία της βορειοανατολικής Γαλλίας) το όριο που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = 28.10 \times D^{-0.74}$$

Από τη πληθώρα των ορίων αυτών, το όριο των Calcaterra et al. (2000) είναι εκείνο που αφορά περισσότερο των ελληνικό γεωγραφικό χώρο, καθώς η περιοχή στην οποία εφαρμόζεται είναι η πιο κοντινή και με παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά, σε σχέση με αυτές στις οποίες αναφέρονται άλλα όρια.

Το καθεστώς κατολισθητικής επικινδυνότητας μπορεί να εκφραστεί ως η πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων σε μια τυχαία χρονική στιγμή. Με τη σειρά του το μέγεθος αυτό μπορεί να αποδοθεί ως η πιθανότητα υπέρβασης του ορίου της έντασης της βροχόπτωσης πέρα από το οποίο προκαλούνται κατολισθήσεις. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η κατολισθητική επικινδυνότητα μπορεί να εκφραστεί ως η πιθανότητα υπέρβασης των ορίων της βροχόπτωσης πέρα από τα οποία δημιουργούνται κατολισθήσεις.

1.2 Καταγραφή προβλήματος

Η γεωμορφολογία της βορειοδυτικής Πελοποννήσου, ένα σύμμεκτο αποτέλεσμα νεοτεκτονικής ανύψωσης και παραγόντων διάβρωσης, παρουσιάζει έντονα κατολισθητικά φαινόμενα και λασπορροές, συνέπεια των βροχοπτώσεων μεγάλης έντασης και διάρκειας, σε γεωμορφολογικές ζώνες συγκέντρωσης και επιτάχυνσης της απορροής με μικρή κατείσδυση. Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει μεγάλες σχετικά μορφολογικές κλίσεις και στενές απότομες πεδιάδες, που σε συνδυασμό με τις λιθολογικές ενότητες και την ανθρώπινη παρέμβαση ευνοούν τις συνθήκες για τη δημιουργία ασταθών πρανών και κατολισθητικών φαινομένων. Λιθολογικοί σχηματισμοί όπως ο φλύσχης και οι αλλουβιακές αποθέσεις έχουν μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση στην περιοχή. Η προέλευση των σχηματισμών αυτών (ιζηματογενής) σε συνδυασμό με την έντονη καταπόνηση που έχουν υποστεί κατά την τελευταία φάση της ορογένεσης, τους κάνουν ιδιαίτερα ευάλωτους στην διάβρωση και κατ' επέκταση στη δημιουργία ζωνών χαμηλής διατμητικής αντοχής (μανδύες αποσάθρωσης) σημαντικού πάχους. Σε επίπεδο ανάλυσης φαινομένου, μία πρώτη προσπάθεια χάραξης πιθανής επιφάνειας ολίσθησης με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία (εργασίες υπαίθρου, μετρήσεις κλισιομέτρων) οδηγείται σε αδιέξοδο αφού πολλές φορές οι επιφάνειες που προκύπτουν δεν είναι κινηματικώς δυνατές. Το πρόβλημα αυτό ωστόσο εξαφανίζεται εάν θεωρήσουμε όχι μία και ενιαία κατολισθημένη μάζα αλλά μία σταδιακή εξέλιξη του φαινομένου σε περισσότερες από μία κατολισθήσεις (Καβουνίδης κ.ά. 2010).

1.2.1 Φλύσχης (Flysch)

Ο φλύσχης είναι μια ετερογενής βραχώμαζα της οποίας η γεωτεχνική κατάσταση και συμπεριφορά ελέγχεται από τον τρόπο εναλλαγής του ποσοστού μεταξύ των πετρωμάτων που τον απαρτίζουν. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης διαφέρει κατά θέση και σε συνδυασμό με τυχόν υπόγειο ορίζοντα προσδιορίζει το βαθμό απομείωσης της αντοχής του σχηματισμού. Αποτελείται κυρίως από εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών και σε μικρότερη συχνότητα συμμετέχουν επίσης κροκαλοπαγή και ενδιάμεσοι λιθολογικοί τύποι. Σπανιότερα παρεμβάλλονται ασβεστολιθικοί σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι. Πρόκειται για θαλάσσια ιζήματα, πάχους κατά θέσεις μεγαλύτερου από 2000 m (Εικόνα 6). Σχηματισμός συνήθως λεπτοστρωματώδης, συχνά όμως με ψαμμιτικούς πάγκους 0,5 -

1,0 m. Τα στρώματα συχνά παρουσιάζουν έντονα ίχνη τεκτονικών παραμορφώσεων (πτυχές, στολιδώσεις, αναστροφές, διαρρήξεις και κερματισμό). Σε μικροκλίμακα είναι σχηματισμός στεγανός και επιτρέπει την εκδήλωση μικροπηγών, συνήθως μεταξύ κερματισμένου πετρώματος ή μανδύα αποσάθρωσης και υγιούς πετρώματος. Τα επιφανειακά στρώματα εμφανίζουν κατά κανόνα μέτρια ως ισχυρή αποσάθρωση και πυκνό δίκτυο ασυνεχειών που προκαλούν έντονη δευτερογενή χαλάρωση. Καλύπτει εκτεταμένες περιοχές ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα με σημαντική εμφάνιση στην οροσειρά της Πίνδου. Γενικά ο φλύσχος απαντάται στις γεωλογικές ζώνες του Ιονίου (Αδριατικοϊόνιος), Γαβρόβου (Τριπόλεως) και Ωλονού (Πίνδου) (Καβουνίδης κ.ά. 2010).



Εικόνα 6: Σχηματισμός Φλύσχη στην παραλία Itzurun στη χώρα των Βάσκων (βόρειος Ισπανία).

Πηγή: baskenlandblog.wordpress.com.

URL: https://baskenlandblog.files.wordpress.com/2014/06/20140621_121754.jpg.

1.2.1.1 Ζώνη Ιονίου (Αδριατικοϊόνιος)

Χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο στο βόρειο και κεντρικό τμήμα, ενώ στο νότιο η μορφολογία είναι η πλέον ήπια. Το γεωλογικό υπόβαθρο συνιστούν Τριαδικοί / Ιουρασικοί σχηματισμοί, ακολουθούν οι ασβεστόλιθοι με ραδιολαρίτες του Τριαδικού, οι ασβεστόλιθοι με πυριτόλιθους του Ηωκαίνου και τέλος ο φλύσχος. Τα νεογενή μικτών φάσεων έχουν μεγάλο πάχος και οι πρόσφατες αποθέσεις καλύπτουν εκτεταμένες περιοχές.

Τα γεωτεχνικά προβλήματα είναι πολλαπλά και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ένταση στα ιζήματα του φλύσχη, τις νεογενείς αποθέσεις και τα χαλαρά τεταρτογενή.

Οι κατολισθητικές κινήσεις ευνοούνται από το μεγάλο πάχος των κορημάτων, την έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλύσχη και τις ιδιαίζουσες υδρογεωλογικές συνθήκες, ενώ αποδεικνύονται καταστροφικές υπό την επίδραση ισχυρής σεισμικής φόρτισης.

1.2.1.2 Ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως

Το μορφολογικό ανάγλυφο, λόγω των έντονων τεκτονικών γεγονότων και της δράσης των διαβρωτικών παραγόντων εμφανίζει πολυσχιδή ανάγλυφο με επικράτηση του ορεινού ή ημιορεινού.

Το προαλπικό υπόβαθρο συνίσταται από σχιστόλιθους, χαλαζίτες και φυλλίτες, ενώ από τους αλπικούς σχηματισμούς επικρατούν οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες Τριαδικής / Κρητιδικής ηλικίας και τα ιζήματα του φλύσχη με εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και ιλυολίθων με επικράτηση της αδρομερούς φάσης. Τα προβλήματα στο βόρειο τμήμα διακρίνονται ιδιαίτερα στα ιζήματα του φλύσχη, τις νεογενείς αποθέσεις και τα χαλαρά τεταρτογενή. Στο νότιο τμήμα παρατηρούνται θραύσεις και ολισθήσεις των σχιστόλιθων, των χαλαρών υλικών του μανδύα, του φλύσχη, καθώς και καταπτώσεις βράχων στους νεότερους αλπικούς σχηματισμούς.

1.2.1.3 Ζώνη Ωλονού (Πίνδου)

Το προαλπικό υπόβαθρο δεν έχει αποκαλυφθεί, ενώ το αλπικό υπόβαθρο συνθέτουν δολομίτες, ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι σε εναλλαγές με αργιλικούς σχιστόλιθους, μάργες, ψαμμίτες, λατυποπαγή, φλύσχη, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη αστάθεια, ιδιαίτερα στις περιοχές που παρατηρούνται κορήματα η μεταβατική προς φλύσχη σειρά από αργιλομιγή ιζήματα και έντονα τεκτονισμένους ασβεστόλιθους / κερατόλιθους, καθώς και τα νεογενή.

1.2.2 Αλλουβιακές Αποθέσεις (Alluvial Deposits)

Οι αλλουβιακές αποθέσεις έχουν στο γεωλογικό παρελθόν παρασυρθεί από τρεχούμενο νερό (χειμάρρους) και έχουν αποθεθεί στους πυθμένες θαλασσών ή λιμνών. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική από εδαφογενετικής πλευράς διότι οι αποθέσεις αυτές καταλήγουν σε διαφορετικού τύπου εδάφη. Τρία είδη αλλουβιακών αποθέσεων (Σχήμα 1) αποτελούν συνήθη μητρικά υλικά για εδαφογένεση: κώνοι αποθέσεως που σχηματίζουν αλλουβιακά ριπίδια, πλημμυρικές ζώνες και δέλτα ποταμών (Καββαδάς κ.ά. 2007).

1.2.2.1 Αλλουβιακά Ριπίδια (Alluvial Fans)

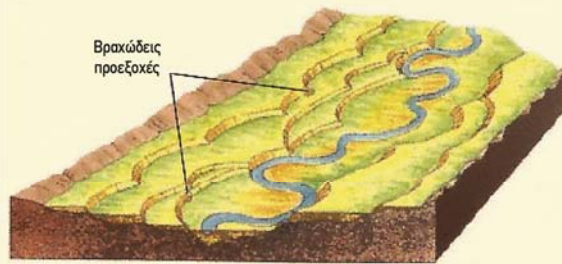
Καθώς το νερό ενός χειμάρρου κυλά στην πλαγιά ενός βουνού, αυξάνει η ταχύτητά του και παρασύρει σημαντικές ποσότητες φερτών υλικών. Όταν ο χειμάρρος φθάσει σε πεδιάδα, η ταχύτητα του νερού μειώνεται ξαφνικά, με αποτέλεσμα να αποθεθούν ως ιζήματα τα μεταφερόμενα φερτά υλικά. Οι κώνοι αποθέσεως που δημιουργούνται κατ' αυτόν τον τρόπο αποκαλούνται αλλουβιακά ριπίδια («ριπίδιο» σημαίνει βεντάλια).

Τα εδάφη που προέρχονται από αλλουβιακές αποθέσεις δεν είναι εξελιγμένα (δεν παρουσιάζουν δηλαδή ορίζοντες), κατά κανόνα δε χαρακτηρίζονται από καλή αποστράγγιση. Η σύσταση των εδαφών αυτών εξαρτάται από τα ορυκτά και τα πετρώματα που βρίσκονται στις ανάντη πλαγιές από τις οποίες ο χειμάρρος παρασύρει τα φερτά υλικά.

▼ Υποθέτουμε ότι το υπόστρωμα ενός προσχωματικού ρέματος διακόπτεται, για παράδειγμα, επειδή τα φύλλα πάγου που παρέχουν θραύσματα βράχου έχουν εξαφανιστεί. Επιπλέον, η αναδάσωση καλύπτει τις γειτονικές πλαγιές, εμποδίζοντας τα χονδρόκοκκα σωματίδια ορυκτών να εισέλθουν στο ρεύμα μέσω της χειρσαίας ροής. Το ρεύμα βρίσκεται πλέον κάτω από τη μεταφορική του ικανότητα.



▼ Στη συνέχεια, τα κανάλια γίνονται βαθύτερα και στενότερα και αρχίζουν να σχηματίζουν μαϊάνδρο. Ο μαϊάνδρος του ρέματος αναπτύσσει καμπύλες καθώς ανασκάπτει το προσχώσεις και τις μεταφέρει προς τα κάτω. Δεν μπορεί να αφαιρεθεί όλη η προσθήκη, επειδή το κανάλι συναντά σκληρό υπόβαθρο σε πολλά μέρη, εμποδίζοντας περαιτέρω κοπή.



▲ Αυτό αφήνει βαθμίδες—όπως αλλουβιακές επιφάνειες και στις δύο πλευρές της κοιλάδας. Τα πέλματα αυτών των βημάτων ονομάζονται αλλουβιακές αναβαθμίδες.



▲ Αυτές οι αναβαθμίδες ευθυγραμμίζουν το φαράγγι του ποταμού Rakaia στο νότιο νησί της νέας Ζηλανδίας. Η επίπεδη επιφάνεια της αναβαθμίδας στο προσκήνιο χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος για τα πρόβατα. Τα δύο υψηλότερα επίπεδα των αναβαθμίδων μπορούν να προβληθούν στα αριστερά της εικόνας.

Σχήμα 1: Προσδιορισμός αλλουβιακών επιπέδων. Πηγή: Geography.name.

URL: <http://geography.name/fluvial-landscapes/>. (Απόδοση στα ελληνικά του συγγραφέα).

1.2.2.2 Πλημμυρικές Ζώνες (Floodplains)

Τα εδάφη που δημιουργούνται σε πλημμυρικές ζώνες είναι σχετικά βαλτώδη, ενώ η σύστασή τους εξαρτάται από τη σύνθεση των φερτών υλικών. Επειδή αυτά προέρχονται από διάβρωση του εδαφικού ορίζοντα των ανάντη εδαφών είναι πιθανό να περιέχουν υψηλό ποσοστό οργανικών υλικών και ιλύος, γι' αυτό και είναι αρκετά γόνιμα. Σε περίπτωση που τα φερτά υλικά προέρχονται από αγροτικές εκτάσεις, τα εδάφη πλημμυρικών ζωνών μπορεί να είναι πλούσια σε θρεπτικές ουσίες.

1.2.2.3 Δέλτα Ποταμών (Deltas)

Τα δέλτα είναι συνήθως βαλτώδη, διασχίζονται από μικρές παραφυάδες του ποταμού και υπόκεινται σε συχνές πλημμύρες. Επειδή το μεγαλύτερο μέρος των χονδρόκοκκων φερτών υλικών που μεταφέρονται από τους ποταμούς έχουν ήδη αποτεθεί

ανάντη, τα δέλτα συνήθως καλύπτονται από άμμο, ιλύ και άργιλο. Δεδομένου ότι οι αλλουβιακές αποθέσεις είναι σχετικά πρόσφατες, τα εδάφη που προκύπτουν από αυτές είναι σχετικά νέα, οι δε θρεπτικές ουσίες δεν έχουν ακόμα εκπλυθεί από αυτά.

1.2.3 Κατολισθήσεις σε ιζηματογενείς σχηματισμούς Φλύσχη και

Αλλουβιακών Αποθέσεων

Η χρονική αλληλουχία των κατολισθητικών φαινομένων ποικίλλει κατά περιοχή και εξαρτάται από παράγοντες όπως η γεωμετρία του πρανούς, το καθεστώς της πίεσης των πόρων, το πάχος της εδαφικής ζώνης εντός της οποίας εκδηλώνονται οι κατολισθητικές κινήσεις. Εκδηλώνεται από τα κατώτερα τμήματα ενός πρανούς όπου εδαφικά ή βραχώδη τμήματα χαλαρώνουν και αστοχούν κάτω από την επίδραση διαβρωτικών φαινομένων (ύπαρξη ποταμού στον πόδα του πρανούς). Η διάδοση του φαινομένου προς τα ανάντη προκαλείται λόγω της απώλειας στήριξης των ανάντη τμημάτων και της συνακόλουθης υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε ζώνες αδυναμίας των άνωθεν τμημάτων.

Η εξέλιξη των ολισθήσεων αυτών είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αφού συνήθως ως φαινόμενα έχουν εκδηλωθεί σε πολύ παλαιότερους χρόνους. Γι' αυτό και είναι δύσκολο να αναγνωριστούν τα ιδιαίτερα εκείνα χαρακτηριστικά όπως τα όρια παλαιότερης και νεώτερης προς τα ανάντη κατολίστεσης, από την μορφολογία του ανάγλυφου αφού με την πάροδο του χρόνου τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν εξομαλυνθεί ή καλυφθεί (Καβουνίδης κ.ά. 2010).

1.2.4 Παραδείγματα Πεδίου

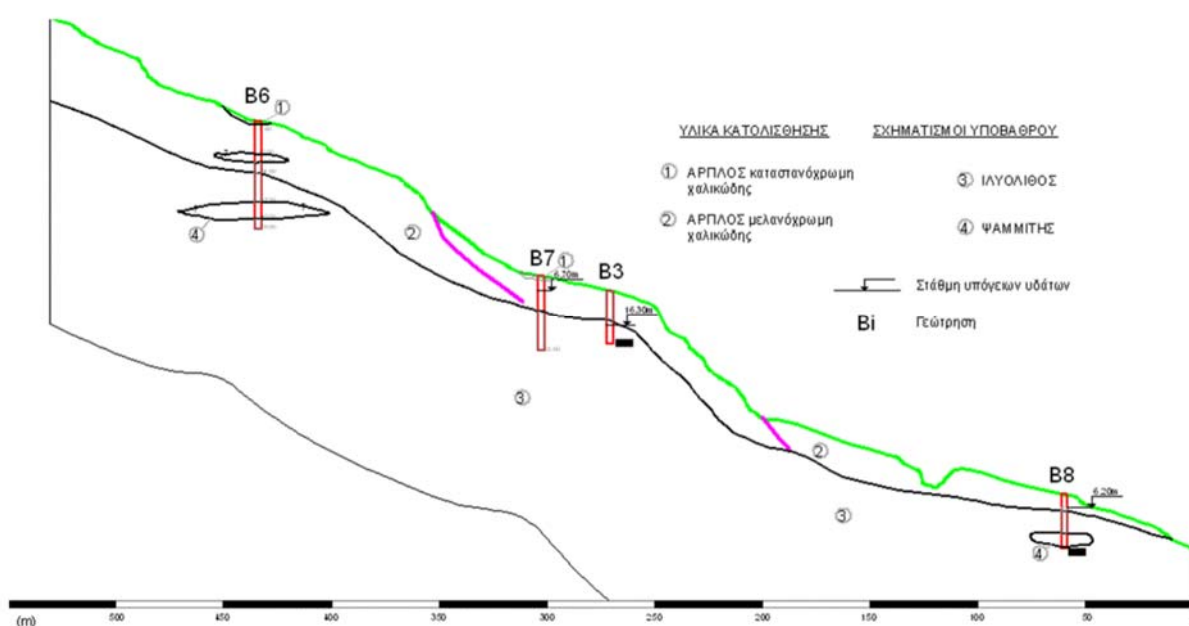
Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα πεδίου από την έρευνα των Καβουνίδη κ.ά. (2010) για να δοθεί έμφαση στην αλληλεπίδραση του φλυσχικού υπόβαθρου με τις τεκτονικές δυνάμεις στην εκάστοτε περιοχή μελέτης και την δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων.

1.2.4.1 Τυμφρηστός

Τα κατολισθητικά φαινόμενα που καλύπτουν τη βόρεια πλευρά του Τυμφρηστού εξετάστηκαν για το κατά πόσο επηρεάζουν το τμήμα που συνδέει το ανατολικό μέτωπο της σήραγγας Τυμφρηστού με το χωριό Πύργος. Το φλυσχικό υπόβαθρο της περιοχής

αποτελείται από ψαμμίτες και ιλυολίθους με κυμαινόμενα ποσοστά συμμετοχής. Βάση της έρευνας στην περιοχή μελέτης ο κυρίως φλύσχης ιλυολιθικής σύστασης συναντάται με λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη. Οι ψαμμίτες είναι έντονα κερματισμένοι και οι ιλυόλιθοι έντονα πτυχωμένοι ως αποτέλεσμα του έντονου τεκτονισμού που έχει υποστεί ο σχηματισμός.

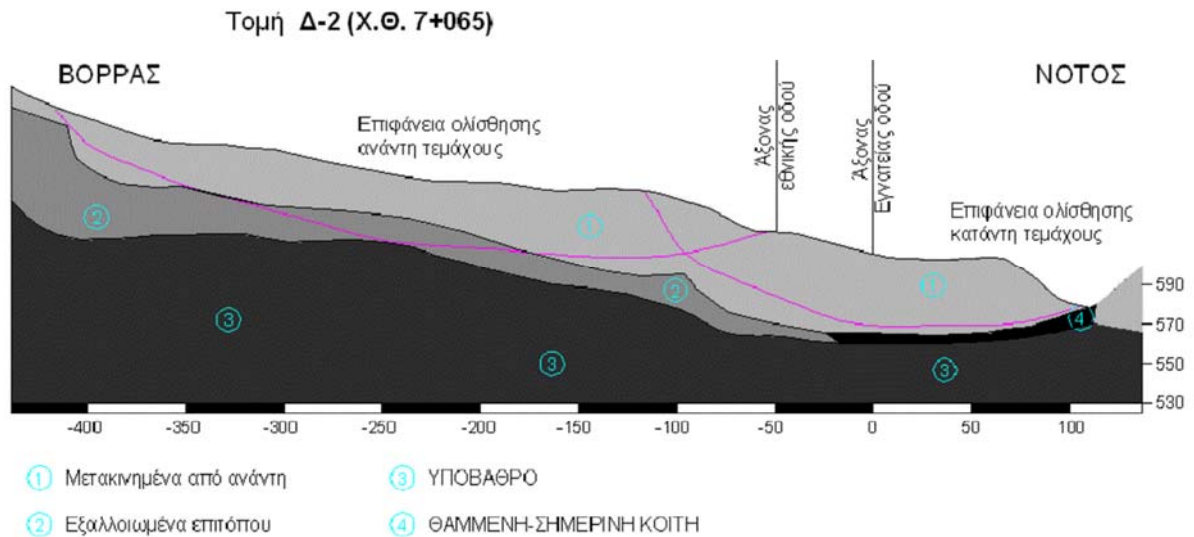
Η μεγάλη συμμετοχή του ιλυολίθου έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη παντού ενός επιφανειακού μανδύα μεγάλου πάχους (10 m ως 20 m) αργιλικής σύστασης, ο οποίος προέρχεται από την αποσάθρωση και διάβρωση του υποβάθρου και κυρίως από την ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4: Διατομή οπισθοδρομικών κατολισθήσεων στην περιοχή Τυμφρηστού. Πηγή: Καβουνίδης κ.ά. 2010.

1.2.4.2 Τμήμα 2.4B Εγνατίας Οδού

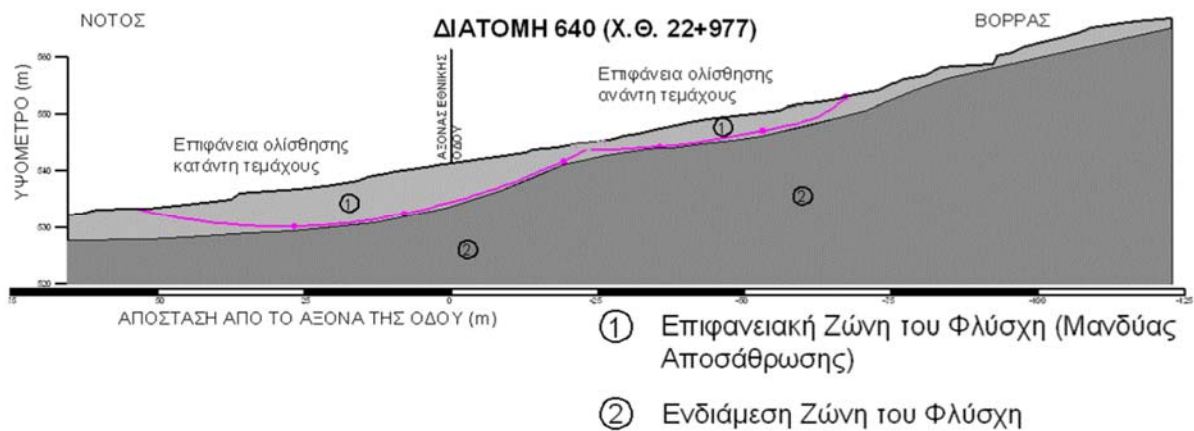
Η ευρύτερη περιοχή του βόρειου πρानού του ποταμού Μετσοβίτικου (Εγνατία οδός κοντά στον οικισμό Πρινοτόπων) καλύπτεται από υλικά κατολίσθησης φλυσχικής προέλευσης. Το υπόβαθρο καλύπτεται από τον φλύσχη της ζώνης Πίνδου και Ιονίου με την επώθηση του πρώτου επί του δευτέρου να αποτελεί το κύριο τεκτονικό γεγονός της περιοχής. Στην περιοχή ενδιαφέροντος υπήρχε ενεργός κατολίσθηση με διαπιστωμένα από μετρήσεις κλισιομέτρων βάθη ολίσθησης που ξεπερνούν τα 40 m (Διάγραμμα 5).



Διάγραμμα 5: Διατομή της κατολίστησης Πρινοτόπων. Πηγή: Καβουνίδης κ.ά. 2010.

1.2.4.3 Ραβομάττη

Το πρανές μελέτης εκτείνεται από τη Χ.Θ. 22 + 950 έως τη Χ.Θ. 23 + 025 της χάραξης του οδικού άξονα Τρίπολη - Καλαμάτα στην περιοχή του Ραβομάττη. Πρόκειται για πρανές με ανομοιόμορφη γεωμετρία και διακύμανση στις κλίσεις. Είναι καλυμμένο με επιφανειακή βλάστηση ενώ κατά τόπους υπάρχουν μικρά δέντρα και θάμνοι. Καλύπτει μια περιοχή με διαστάσεις κατά προσέγγιση: 120 - 130 m μήκος και 70 - 75 m πλάτος. Στην περιοχή το φλυσχικό υπόβαθρο εμφανίζεται ισχυρά παραμορφωμένο και τεκτονικά διαταραγμένο, λόγω, κυρίως, της γειτνιάσής του με τη ζώνη επώθησης (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6: Διατομή της κατολίστησης Ραβομάττη. Πηγή: Καβουνίδης κ.ά. 2010.

1.3 Σημασία και Αναγκαιότητα της Διατριβής

Τα κατολισθητικά φαινόμενα είναι φυσικές καταστροφές απόρροια της ελλιπούς ευστάθειας των πρανών λόγω στατικών ή σεισμικών φορτίων. Στην κατηγορία αυτή των φυσικών καταστροφών περιλαμβάνονται και οι λασπορροές (λασπολισθήσεις). Με δεδομένη την κλιματική αλλαγή και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, που μαζί με την υπερθέρμανση του πλανήτη και τη σταδιακή άνοδο της στάθμης της θάλασσας αποτελούν τις κύριες επιπτώσεις της, κρίνεται απαραίτητη η επαναχωροθέτηση των χρήσεων και καλύψεων γης. Συμπεριλαμβανομένου και του επανασχεδιασμού των τεχνικών έργων και των ρυθμιστικών - χωροταξικών σχεδίων οικισμών και βιομηχανικών ζωνών.

Στη διαδικασία της χωρικής ανάλυσης η διατύπωση προβλημάτων και η υλοποίηση ερωτημάτων προϋποθέτει την αξιοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων. Τα επίπεδα πληροφορίας που δημιουργούνται σε συνδυασμό με τις τεχνικές ανάλυσης πεδίου είναι οι βασικοί άξονες που απαντούν στα χωρικά ερωτήματα αποτελώντας παράλληλα και το εφαλτήριο για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων.

Η παραπάνω θεώρηση αποτελεί το αντικείμενο έρευνας της παρούσας διατριβής, λαμβάνοντας το νομό Αχαΐας στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου ως περιοχή μελέτης και αξιοποιώντας συνδυαστικά τα ελεύθερα (ανοικτά) δορυφορικά δεδομένα με τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους (ΨΥΜΕ), για τον εντοπισμό περιοχών υψηλής επικινδυνότητας στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων και λασπορροών.

1.4 Σκοπός της Διατριβής

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η χωροθέτηση ζωνών με μεγάλη επικινδυνότητα κατολισθήσεων / λασπορροών στο νομό Αχαΐας, μία περιοχή με ιδιαίτερα:

- Γεωλογικά χαρακτηριστικά (μεγάλη επιφανειακή εξάπλωση φλύσχη / αλλουβιακών αποθέσεων),
- Τεκτονική δραστηριότητα (εκτεταμένα συστήματα ρηγμάτων που συντάσσονται με το υδρογραφικό δίκτυο και τη μεγάλη σεισμικότητα της περιοχής),
- Έντονα και ακραία καιρικά φαινόμενα (βροχοπτώσεις) που επιδεινώνονται με τη συνεπαγόμενη κλιματική αλλαγή,
- Εξαιρετικά έντονο ανάγλυφο με μεγάλες κλίσεις και εκτεταμένη κατά βάθος διάβρωση.

1.4.1 Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Η δημιουργία ψηφιακών χαρτών, ενδεχομένως, θα οριοθετήσει ζώνες διαφορετικής επικινδυνότητας ως προς το υπό μελέτη φαινόμενο και κατ' επέκταση θα υποβοηθήσει τη λήψη αποφάσεων σε τοπικό, περιφερειακό και κρατικό επίπεδο.

1.4.2 Κύρια ερευνητικά ερωτήματα

Τα ερωτήματα της διατριβής συνοψίζονται ακολούθως ως προς το ποια:

- (i) Η διαθεσιμότητα ελεύθερων γεωγραφικών δεδομένων με συγκεκριμένους περιορισμούς ως προς τη γεωγραφική διακριτική ικανότητα και την ακρίβεια αλλά και το θεματικό πληροφοριακό περιεχόμενο (γεωμετρία και παραμετρική αναπαράσταση των γεωγραφικών οντοτήτων που εξάγονται), μας επιτρέπει να χωροθετήσουμε ζώνες και να τις αξιολογήσουμε ως προς την επικινδυνότητα κατολισθήσεων και λασπορροών;
- (ii) Η νοηματική διατύπωση του προβλήματος (conceptualization) «εντοπισμός ζωνών με μεγάλη επικινδυνότητα λασπορροών / κατολισθήσεων» στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης;
- (iii) Τα επίπεδα πληροφορίας (με τεχνικές ανάλυσης πεδίου) που θα δημιουργηθούν από τα διαθέσιμα ελεύθερα γεωγραφικά δεδομένα, θα συμμετάσχουν στη σύνθεση του χωρικού ερωτήματος;

- (iv) Πως θα υλοποιηθεί (formalization) το ερώτημα που περιγράφεται στο στάδιο (ii), σε γεωγραφικό πληροφοριακό σύστημα ελεύθερου κώδικα;
- (v) Η αξιολόγηση των δυνατικών αποτελεσμάτων και έλεγχος του κατά πόσον μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή να υποβοηθήσουν τη λήψη αποφάσεων σε:
- (a) Περιφερειακό επίπεδο (Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας) αλλά και Δημοτικό επίπεδο στο νομό Αχαΐας,
 - (b) Στη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (ΓΓΠΠ),
 - (c) Στο Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ).

1.4.3. Αρχικά Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της διατριβής βασίζεται σε μία στρωματοειδή ιεράρχηση, όπως αποτυπώνεται διαδοχικά:

- Στη νοηματική πρόσληψη του προβλήματος και των αλληλο-συσχετιζόμενων γεωγραφικών παραμέτρων του.
- Τον εντοπισμό κατάλληλων γεωγραφικών δεδομένων (με συγκεκριμένες προδιαγραφές ακρίβειας και χωρική διακριτική ικανότητα).
- Τη σύνθεση των επιπέδων πληροφορίας και των παράγωγων τους στο περιβάλλον λογισμικού ελεύθερου κώδικα (Saga GIS).
- Τη τυποποίηση του προβλήματος (formalization) στο περιβάλλον του λογισμικού ελεύθερου κώδικα (QGIS) και υλοποίηση των χωρικών ερωτημάτων.
- Στον έλεγχο και την αξιολόγηση.

Κεφάλαιο Δεύτερο

2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι κατολισθήσεις μαζί με το επιφανειακό νερό, τους παγετώνες, τον άνεμο, τα κύματα, αποτελούν τους εξωγενείς εκείνους φυσικούς παράγοντες που συντελούν στη διάβρωση και στην απόθεση νέων ιζημάτων και τελικά διαμορφώνουν ένα καινούργιο ανάγλυφο. Ιστορικά η πρώτη χρήση του όρου «κατολίσθηση» καταγράφηκε το 1838 (Gruden 2003), έκτοτε ο όρος κατολίσθηση όπως και ο αγγλικός «landslides» έχει επικρατήσει στη διεθνή επιστημονική κοινότητα, αν και δεν αποδίδει ετυμολογικά ορθά και με σαφήνεια το φαινόμενο στο οποίο περιλαμβάνεται η ολίσθηση, η πτώση, η ανατροπή και η ροή και δεν εκδηλώνεται μόνο στη στεριά.

Ο Sharpe (1938) ορίζει ως κατολίσθηση μια αντιληπτή προς τα κάτω ολίσθηση ή πτώση μιας σχετικά στεγνής μάζας εδάφους ή πετρώματος ή συνδυασμό και των δυο. Κατά τον Terzaghi (1950) ως κατολίσθηση ορίζεται μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος εναπομένοντος εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.

Ο ορισμός του Varnes (1958) υποδηλώνει μια προς τα κάτω και προς τα πλάγια κίνηση ενός πρανούς και του υλικού του, το οποίο είναι βράχος ή έδαφος ή συνδυασμός αυτών των υλικών.

Οι Zaruda & Mencl (1969) ορίζουν την κατολίσθηση ως μια γρήγορη κίνηση που οφείλεται στην ολίσθηση πετρωμάτων ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια.

Ο Coates (1977) ορίζει την κατολίσθηση ως ένα αιφνίδιο, σύντομο, γεωμορφολογικό γεγονός το οποίο συνιστά γρήγορη κίνηση και ευρύ φάσμα μετακινήσεων.

Ο Schuster (1978) περιόρισε τον όρο στην ομάδα εκείνη των μετακινήσεων πρανών όπου λαμβάνει χώρα διατμητική θραύση κατά μήκος μίας καθορισμένης επιφάνειας ή κατά μήκος πολλών επιφανειών.

Ενώ κατά τον Στεργιάδη (1989) κατολισθήσεις καλούνται οι πάσης φύσεως μετακινήσεις μεγάλων εδαφικών μαζών, οι οποίες δημιουργούνται με την επίδραση της βαρύτητας ή γεωλογικών αιτιών, με ή χωρίς τη συμβολή εξωτερικών επιδράσεων και εμφανίζονται είτε

βραδέως, είτε προοδευτικώς, είτε αιφνίδια.

Ο Varnes (1978) στην ειδική έκδοση για τις κατολισθήσεις του Οργανισμού Έρευνας και Μεταφορών των ΗΠΑ χρησιμοποιεί τον όρο «κίνηση πρανών» αντί του όρου «κατολίσθηση» και με αυτόν περιλαμβάνει κάθε κίνηση πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).

Τύπος Μετακίνησης (Αστοχίας)		Τύπος Σχηματισμού (Πριν την κίνηση)		
		Βραχώδης Σχηματισμός	Εδαφικά Υλικά	
			Επικρατούν τα αδρομερή υλικά, κορήματα (Debris)	Επικρατούν τα λεπτόκοκκα υλικά, γαίες (Earth)
Πτώσεις		Καταπτώσεις Βράχων	Καταπτώσεις Κορημάτων	Καταπτώσεις Γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές Βράχων	Ανατροπές Κορημάτων	Ανατροπές Γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Μικρή Καθίζηση (αρχικά) & Περιστροφή Βράχων	Μικρή Καθίζηση (αρχικά) & Περιστροφή Κορημάτων	Μικρή Καθίζηση (αρχικά) & Περιστροφή Γαιών
	Μεταθετικές (ή Στρωματοειδείς)	Ολίσθηση Ενιαίας Βραχομάζας (με παρουσία ή μη διακλάσεων)	Ολίσθηση Κορημάτων	Ολίσθηση Γαιών
Πλευρικές Εκτάσεις (Lateral Spreads) (ή Οριζόντιες Εξαπλώσεις)		Πλευρική Έκταση Βράχων	Πλευρική Έκταση Κορημάτων	Πλευρική Έκταση Γαιών
Ροές		Ροή Βράχων	Ροή Κορημάτων	Ροή Γαιών
Σύνθετες (Μικτές)		Συνδυασμός Δύο ή Περισσότερων Τύπων Μετακίνησης		
Ερπυσμοί (Εξελίσσονται σε Περιστροφικές Ολισθήσεις)		-	-	-
Ταχύτητα Κίνησης		(i) < 0.06 μ / χρόνο		
		(ii) 0.06 – 1.5 μ / χρόνο		
		(iii) 1.5 μ / χρόνο έως 1.5 μ / μήνα		
		(iv) 1.5 μ / μήνα έως 1.5 μ / ημέρα		
		(v) 1.5 μ / ημέρα έως 0.3 μ / λεπτό		
		(vi) 0.3 μ / λεπτό έως 3 μ / δευτερόλεπτο		
		(vii) >3 μ / δευτερόλεπτο		
Κατηγορία		(i) Πάρα πολύ αργή		
		(ii) Πολύ αργή		
		(iii) Αργή		
		(iv) Μέτρια		
		(v) Γρήγορη		
		(vi) Πολύ γρήγορη		
		(vii) Πάρα πολύ γρήγορη		

Ο όρος κατολίσθηση (landslide) αναφέρεται μόνο στις ταχέως εκδηλούμενες κινήσεις εδαφικών μαζών (όχι τεχνικά δόκιμος), και αφορά περιπτώσεις που η ελκτική δύναμη της βαρύτητας σε γεωλογικούς σχηματισμούς υπερβαίνει την αντίσταση τριβής για κίνηση προς τα κάτω (Ρόζος, 2007).

Ανάλογα δε με τον τύπο της κίνησης (Σχήμα 2), διακρίνουμε:

- Τις καταπτώσεις (Falls)
- Τις ανατροπές (Topples)
- Τις ολισθήσεις (Slides)
- Τις πλευρικές εξαπλώσεις (Lateral Spreads)
- Τις ροές (Flows)
- Τις σύνθετες κινήσεις (Complex)

Ας σημειωθεί επιπλέον ότι, ο τύπος της σύνθετης κατολίσθησης δεν εμφανίζεται στην επίσημη, ισχύουσα σήμερα ταξινόμηση, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθητικές κινήσεις είναι σύνθετες. Δηλαδή, συνδυάζουν περισσότερες του ενός τύπου κινήσεις, πλην όμως, σχεδόν πάντοτε ένας τύπος είναι ο χαρακτηριστικός που επικρατεί.

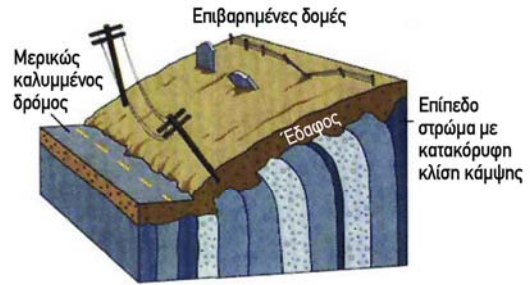
Τέλος, η Διεθνής Ομάδα Εργασίας της UNESCO στα πλαίσια της διεθνούς δεκαετίας (1990-2000) για τη μείωση των φυσικών καταστροφών, σε συνεργασία με Διεθνείς Γεωτεχνικές Ενώσεις (IAEG, ISSMFE, ISRM), υιοθέτησε τον ορισμό του Gruden (1991), ο οποίος ορίζει ως κατολίσθηση την προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου ή γαιών ή κορημάτων σε ένα πρηνές, και αναγνωρίζει ότι φαινόμενα τα οποία περιγράφονται ως κατολισθήσεις δεν περιορίζονται ούτε στη στεριά ούτε στην ολίσθηση. Αποτέλεσμα της προαναφερθείσας δεκαετούς εργασίας για την καταγραφή των κατολισθήσεων ήταν η διατύπωση προτάσεων και οδηγιών σχετικά με:

- Την περιγραφή των κατολισθήσεων (Landslide Report, WP / WLI 1990),
- Την ενεργότητα των κατολισθήσεων (Describing the Activity of a Landslide, WP / WLI 1993),
- Την καταγραφή των αιτιών που προκαλούν κατολισθήσεις (Reporting Landslide Causes, WP / WLI 1994),
- Την καταγραφή της ταχύτητας μετακίνησης (Describing the Rate of Movements, WP / WLI 1995),
- Την περιγραφή των μέτρων προστασίας (Reporting Landslide Remedial Measures, WP / WLI 2001).

Κινήσεις κατολισθήσεων



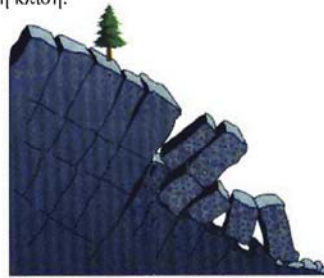
Ολίσθηση: Η παράλληλη κίνηση ως προς τα επίπεδα αδυναμίας και ταυτόχρονα η σποραδική παράλληλη κίνηση ως προς τη κλίση.



Ερπυσμός: βαθμιαία μετακίνηση των υλικών της κλίσης.



Καθίζηση: Σύνθετη κίνηση των υλικών σε μία κλίση, περιλαμβάνει περιστροφική καθίζηση.



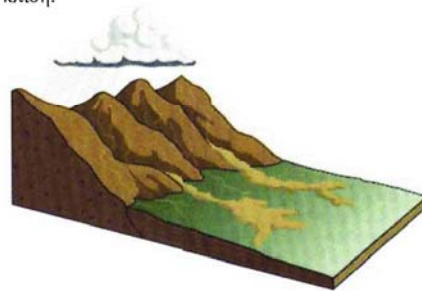
Ανατροπή: Η κίνηση πέρα από το πέρασμα πάνω από μία κλίση.



Κατάπτωση: Η ελεύθερη πτώση υλικών.



Ροή: Η ημίρρευστη προς ρευστή κίνηση των κορημάτων.



Χείμαρρος: Μία σποραδική και ξαφνική διοχέτευση νερού και κορημάτων.

Σχήμα 2: Τύποι κατολισθήσεων κατά Varnes (1978). Πηγή: British Columbia Ministry of Energy Mines and Petroleum Recourses. (Απόδοση στα ελληνικά του συγγραφέα).

2.2 Αίτια Κατολισθήσεων

Τα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονται σε σχηματισμούς, που θα βρεθούν σε κατάσταση οριακής ισορροπίας και θα επιδράσουν σε αυτούς δυνάμεις από εξωτερικά ή εσωτερικά αίτια, προκαλώντας τη διατάραξή τους και με τελικό αποτέλεσμα τη θραύση και μετακίνησή τους, ενώ μερικές φορές η δράση αυτών των αιτίων είναι ταυτόχρονη (Ρόζος 2007). Αυτά τα γεγονότα χαρακτηρίζονται ως αίτια της κατολίσθησης (landslide causes) και όταν συνδυάζονται θέτουν τη μάζα σε οριακή κατάσταση ισορροπίας. Ο τελικός παράγοντας που αποτελεί την αφορμή μετακίνησης της οριακά σταθερής μάζας χαρακτηρίζεται ως έναυσμα μετακίνησης (triggering factor) (WP / WLI 1994).

Από πλευράς φυσικής κατάστασης και ευστάθειας, ένα πρηνές διέρχεται από τρία στάδια:

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

Οι δυνάμεις αποσταθεροποίησης στα δύο πρώτα στάδια χαρακτηρίζονται αίτια ή προκαταρκτικοί παράγοντες, ενώ στο τρίτο στάδιο χαρακτηρίζονται ως το έναυσμα της μετακίνησης ή παράγοντες εναύσματος (Πίνακας 2).

Ανάλογα με την προέλευσή τους, οι παράγοντες αυτοί ταξινομούνται στις παρακάτω ομάδες:

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

Πίνακας 2: Τα αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων σύμφωνα με την WP / WLI (1994) της UNESCO.

Προκαταρκτικοί Παράγοντες (Casual Factors)			
Εδαφικές Συνθήκες	Παράγοντες Εναύσματος (Triggering Factors)		
	Γεωμορφολογικές Διεργασίες	Φυσικές Διεργασίες	Ανθρωπογενείς Διεργασίες
Πλαστικό, χαμηλής αντοχής υλικό	Τεκτονική ανύψωση	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση	Εκσκαφές στη βάση (πόδι) του πρανούς
Ευαίσθητο υλικό	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανούς
Υλικό επιρρεπές σε θραύση	Επίδραση παγετώνων	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμειυτήρες
Αποσαθρωμένο υλικό	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων	Άρδευση
Διατμημένο υλικό	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς	Σεισμοί	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
Ρωγματομένο ή διακλασμένο υλικό	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα	Εκρήξεις ηφαιστειών	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές κ.τ.λ.)
Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστειών	Αποψίλωση
Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)	Εσωτερική Διάβρωση	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους	Λατομεία και μεταλλεία
Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρανούς	Αποσάθρωση λόγω παγετού	Δημιουργία χωματερών
Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση, κ.τ.λ.)	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, κ.τ.λ.)

2.3 Επιπτώσεις Κατολισθήσεων

Η συνεχιζόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, μαζί με την ανάπτυξη που συντελείται, καθώς και η αποψίλωση και καύση των δασών, είναι παράγοντες που θα αυξάνουν τα κατολισθητικά φαινόμενα στον πλανήτη, εξαιτίας της κατακρήμνισης των πρανών.

Οι κατολισθήσεις είναι υπεύθυνες για σημαντικά μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες απ' ό,τι συνήθως τους αναγνωρίζεται. Για παράδειγμα η τεράστια καταστροφή που προκάλεσε η κατολίσθηση του βουνού Huascarán, στην περιοχή του Áncash στο βόρειο Περού το 1970 (Εικόνα 7), η οποία σκότωσε περίπου 20.000 ανθρώπους, αναφέρεται συχνά σε δημοσιεύσεις ως σεισμική καταστροφή διότι η κατολίσθηση προκλήθηκε από σεισμό. Παραλείπεται ωστόσο το γεγονός ότι οι πραγματικές ζημιές (καταστροφές και θύματα) προκλήθηκαν άμεσα από μια τεράστια και υψηλής ταχύτητας ροής συντριμμιών.



Εικόνα 7: Η κατολίσθηση του βουνού Huascarán, στην περιοχή του Áncash στο βόρειο Περού στις 31 Μαΐου του 1970.

Πηγή: Mapio.net. URL: <https://mapio.net/pic/p-71742768/>.

2.3.1 Κοινωνικό-Οικονομικές

Οι απώλειες από τις κατολισθήσεις που επηρεάζουν τις ιδιωτικές και δημόσιες ιδιοκτησίες κατανέμονται στις άμεσες και έμμεσες.

Οι άμεσες απώλειες μπορούν να οριστούν ως έξοδα αντικατάστασης, ανακατασκευής, επισκευής ή συντήρησης που προκύπτουν από ζημιές που προκαλούνται από κατολισθήσεις ή από καταστροφή σε περιουσιακά στοιχεία ή εγκαταστάσεις (Schuster and Fleming 1986, Schuster 1996).

Οι έμμεσες απώλειες των κατολισθήσεων αφορούν σε:

- Μείωση των τιμών των ακινήτων σε περιοχές που απειλούνται από κατολισθήσεις.
- Απώλεια φορολογικών εσόδων από ακίνητα υποτιμημένα ως αποτέλεσμα κατολισθήσεων.
- Απώλεια της βιομηχανικής, γεωργικής και δασικής παραγωγικότητας και των τουριστικών εσόδων λόγω ζημιών σε γήπεδα ή εγκαταστάσεις ή διακοπής των μεταφορικών συστημάτων.
- Απώλεια ανθρώπινης ή οικιακής παραγωγικότητας λόγω θανάτου, τραυματισμού ή ψυχολογικού τραύματος.
- Δαπάνες για μέτρα πρόληψης ή μετριασμού της ενδεχόμενης κατολίπησης.

Οι πιο οικονομικά καταστροφικές κατολισθήσεις στις Ηνωμένες Πολιτείες τις τελευταίες δεκαετίες, ήταν εκείνες που πυροδότησαν ο σεισμός της Αλάσκας του 1964, οι κατολισθήσεις που προκάλεσαν βροχοπτώσεις στη νότια Καλιφόρνια το 1980, οι κατολισθήσεις του 1982 στην περιοχή του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο, οι κατολισθήσεις στην πολιτεία της Γιούτα και οι κατολισθήσεις του φαινομένου El Niño το 1998 στην Καλιφόρνια. Ο Youd (1978) εκτιμά ότι η αστοχία του εδάφους προκάλεσε το 60% των συνολικών ζημιών ύψους \$ 300 εκατομμυρίων (\$ 1,6 δισεκατομμύρια σε σημερινή αξία) από το σεισμό της Αλάσκας του 1964, ενώ πέντε μεγάλες κατολισθήσεις προκάλεσαν ζημιές σε κατοικίες, δημόσια και βιομηχανικά κτίρια στο Anchorage, τη μεγαλύτερη πόλη της Αλάσκας. Οι καταγίδες που προκαλούν κατολισθητικά φαινόμενα (πολλές από τις οποίες θεωρείται ότι σχετίζονται με τη νότια ταλάντωση του El Niño) έχουν μαστίσει την Καλιφόρνια τα τελευταία 50 χρόνια.

Οι σοβαρές χειμερινές καταγίδες τον Ιανουάριο και τον Μάρτιο του 1995 έφεραν πάνω από το φυσιολογικό όριο, βροχοπτώσεις που προκάλεσαν καταστροφικές ροές από συντρίμμια, βαθιές κατολισθήσεις και πλημμύρες στην πόλη του Λος Άντζελες και στην Κομητεία της Βεντούρα στη νότια Καλιφόρνια (Harp et al. 1999).

Αρκετές βαθιές κατολισθήσεις προκλήθηκαν από τις καταιγίδες, εκ των οποίων η πιο σημαντική ήταν η κατολίσθηση La Conchita (Εικόνα 8), η οποία, σε συνδυασμό με μια τοπική ροή συντριμμίων, κατέστρεψε ή προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε 11 - 12 σπίτια στη μικρή παραλιακή κοινότητα La Conchita, περίπου 20 km δυτικά της πόλης Βεντούρα (O'Tousa 1995). Υπήρχαν επίσης εκτεταμένες καταστροφές και πλημμύρες σε σπίτια, εμπορικά κτίρια, δρόμους και αυτοκινητόδρομους σε περιοχές κατά μήκος της ακτής του Malibu που είχαν καταστραφεί από πυρκαγιά 2 χρόνια πριν (Harp et al. 1999).



Εικόνα 8: Η κατολίσθηση του 1995 στη μικρή παραλιακή κοινότητα της La Conchita, στην Κομητεία Βεντούρα της βόρειας Καλιφόρνιας των ΗΠΑ.

Πηγή: USGS 2016. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0276/>.

2.3.2 Περιβαλλοντικές

Έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μελέτες σχετικά με την εύκρατη βλάβη των δασών λόγω κατολισθήσεων, σε μια λεπτομερή μελέτη των σχημάτων αναζωογόνησης των κατεστραμμένων δασικών συστημάτων από κατολίσθηση στα νησιά Queen Charlotte της Βρετανικής Κολομβίας, (Smith et al. 1986), διαπιστώθηκε ότι η δασική κάλυψη αναπτύχθηκε στις κατολισθήσιμες περιοχές με βραδύτερο ρυθμό από ό,τι στις υπάρχουσες δασικές εκτάσεις, ενώ η δασική παραγωγικότητα των κατολισθητικών περιοχών μειώθηκε κατά περίπου 70% σε σύγκριση με τις περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Επίσης, με βάση τη μελέτη των κατολισθήσεων που προκάλεσαν οι κατακρημνίσεις που σημειώθηκαν κατά τα έτη 1974 - 1976 στις δασωμένες βόρειες βραχώδεις περιοχές της Πολιτείας Αϊντάχο των ΗΠΑ (Megahan et al. 1978), διαπιστώθηκε ότι ο συνολικός όγκος των 183.040 m³ υλικού κατολίσθησης, παράχθηκε σε έκταση 5.670 km² με μέσο ετήσιο ρυθμό διάβρωσης περίπου 32 m³ / km² / έτος. Ομοίως, σε παρόμοιες δασωμένες πλαγιές στο Όρεγκον, την Ουάσιγκτον και τη Βρετανική Κολομβία, οι Swanston και Swanson (1976) ανέφεραν ετήσια ποσοστά απομάκρυνσης εδάφους / βράχου από τις χιονοστιβάδες που κυμαίνονταν από 11 έως 72 m³ / km².

Ως προς την άγρια ζωή, τα περισσότερα είδη είναι σε θέση να υποχωρήσουν αρκετά γρήγορα και να αποτρέψουν τραυματισμούς από τις κατολισθήσεις, εξαιρουμένων των κατολισθητικών φαινομένων που εξελίσσονται ταχύτερα. Οι υδρόβιοι οργανισμοί, πιθανότατα, επηρεάζονται περισσότερο από τις κατολισθήσεις, επειδή εξαρτώνται άμεσα από την πρόσβαση στη ροή και την ποιότητα των υδάτων για την επιβίωσή τους.

2.4 Παραμετροποίηση του Προβλήματος

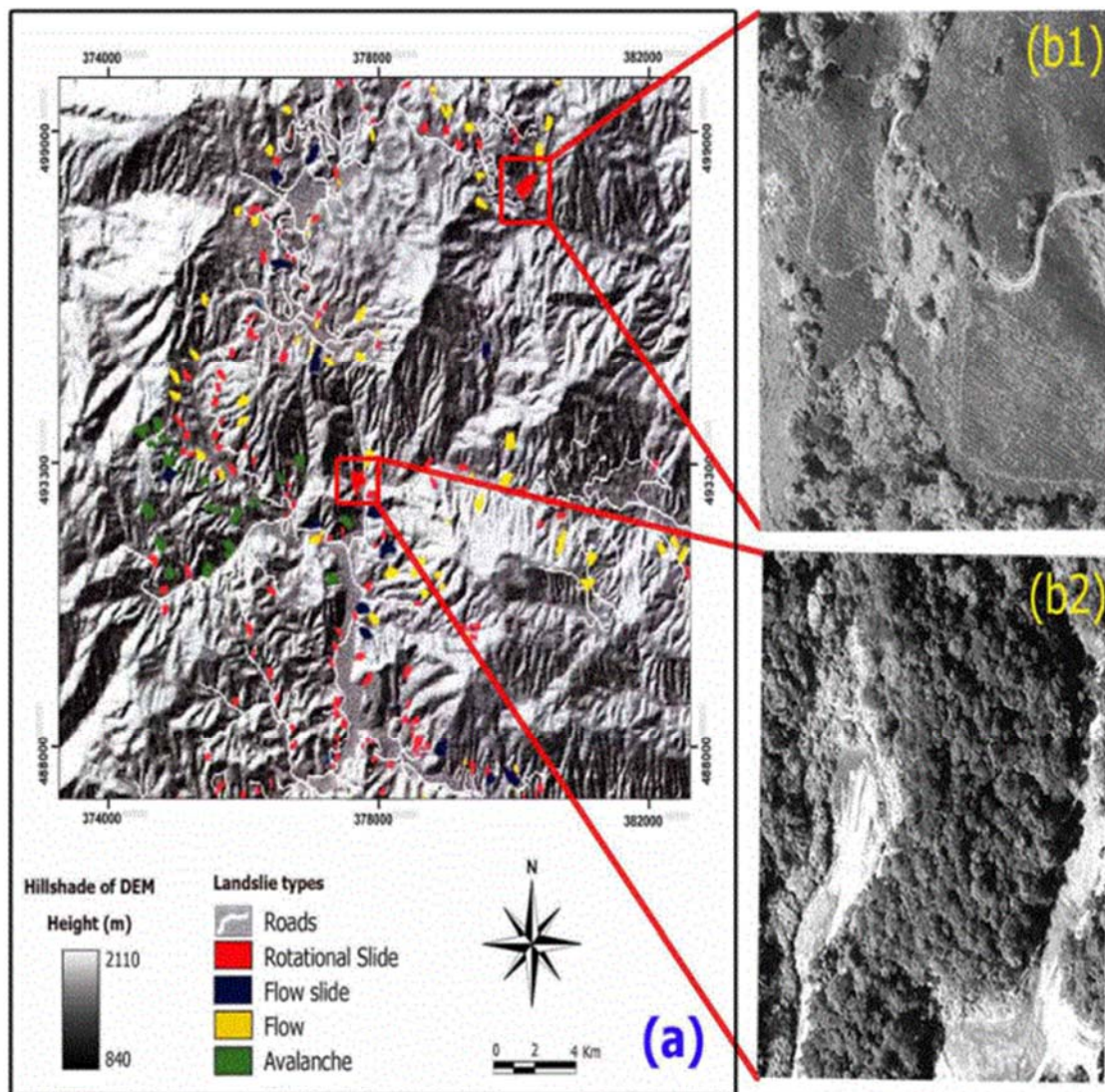
Η επιστημονική έρευνα έχει αναδείξει πλήθος μελετών που περιγράφουν και αναλύουν τα κατολισθητικά φαινόμενα με τη χρήση λογισμικών εφαρμογών (softwares) γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Στην εργασία των Shahabi and Hashim (2015) «*Αντιστοίχιση ευαίσθητων κατολισθήσεων με τη χρήση στατιστικών μοντέλων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και δεδομένων Τηλεπισκόπησης σε περιβάλλοντα τροπικού κλίματος*», τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, το υψόμετρο καθώς και τα ετήσια ποσοστά βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης, προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό την περιοχή έρευνας της παρούσας διατριβής.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία της μελέτης περίπτωσης, οι πληροφορίες των κατολισθητικών φαινομένων που λαμβάνονται από τηλεπισκοπικά δεδομένα είναι συνδεδεμένα με τη μορφολογία, τις υδρολογικές συνθήκες καθώς και την προκείμενη φυτοκάλυψη της περιοχής.

Εν αρχή δημιουργείται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης από το μοντέλο δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (TIN), χρησιμοποιώντας AirSAR DEM δεδομένα, με μέγεθος εικονοστοιχείου 10 m, καθώς οι φασματικές τιμές των εικονοστοιχείων που αντιπροσωπεύουν κατολισθήσεις μπορούν να διαφοροποιηθούν από τις φασματικές τιμές του περιβάλλοντος. Εν συνεχεία η ανάλυση για την πιθανή εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων αναπτύσσεται με μεθόδους αναλυτικής ιεραρχίας (AHP), σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού (WLC) και χωρικών μεθόδων πολλαπλών κριτηρίων (SMCE) σε ένα τμήμα των υψιπέδων Cameron της Μαλαισίας, χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα βασισμένα σε δεδομένα GIS και Τηλεπισκόπησης, ενώ η αξιοπιστία των χαρτών επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας μεθόδους R-Index και ROC.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Shahabi and Hashim (2015) αποδεικνύει ότι τα δεδομένα στους παλιούς χάρτες καταγραφής κατολισθήσεων είναι ανακριβή και η επικύρωσή τους από αεροφωτογραφίες απαραίτητη για τη συνέχεια της μελέτης και τον συνδυασμό τους με τα δεδομένα από τις δορυφορικές φωτογραφίες του WorldView-1. Ο τελικός παραγόμενος χάρτης (Εικόνα 9) αποτυπώνει 92 κατολισθήσεις σε μία χρονική περίοδο 25 ετών, γεγονός που αντιστοιχεί στο 4.05% της περιοχής μελέτης. Μία σημαντική παράμετρος των αποτελεσμάτων της μελέτης έχει να κάνει με την αναγνώριση των τύπων των κατολισθήσεων που εμφανίζονται. Τόσο από τις αεροφωτογραφίες όσο και από τις δορυφορικές εικόνες, οι περισσότερες κατολισθήσεις είναι τύπου ρηχές περιστροφικές ενώ εμφανίζονται και ορισμένες του τύπου της μεταθετικής ολίσθησης και του τύπου ροής.



Εικόνα 9: Ο τελικός παραγόμενος χάρτης που προέρχεται από δεδομένα AirSAR και δορυφορικές εικόνες WorldView-1. Οπου: α) Οι τύποι τοποθεσιών κατολισθήσεων που επικαλύπτονται από AirSAR DEM δεδομένα και β) Οι διευρυμένες απόψεις δύο θέσεων κατολισθήσεων σε δορυφορικές εικόνες WorldView-1 (πανχρωμική ζώνη). Πηγή: Shahabi and Hashim (2015).

Συμπερασματικά, η καταγραφή των κατολισθητικών φαινομένων σε ορεινές περιοχές είναι μία διαδικασία δύσκολη καθώς επηρεάζεται τόσο από την έντονη βλάστηση όσο και από τις καιρικές συνθήκες (κυρίως λόγω νέφωσης). Ενώ οι βροχοπτώσεις είναι και ο κυριότερος παράγοντας για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων στις ορεινές περιοχές. Έχει επιστημονικό ενδιαφέρον αν τα συμπεράσματα της εργασίας των Shahabi and Hashim (2015) που χρησιμοποιήθηκε ως μελέτης περίπτωσης, μπορούν να επιβεβαιωθούν στην παρούσα διατριβή, καθώς ορισμένα δεδομένα (γεωλογικό ανάγλυφο, υψόμετρο, καιρικές συνθήκες) προσομοιάζουν στο νομό Αχαΐας, ενώ άλλα διαφοροποιούνται (κλίμα, δορυφορικά δεδομένα).

2.5 Γεωχωρική Μοντελοποίηση και Χαρτογράφηση

Ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΓΣΠ) είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας και φαινομένων που εξελίσσονται στον γεωγραφικό χώρο (Goodchild 1985), αλλά και ένα ισχυρό εργαλείο για το μετασχηματισμό και την απεικόνιση χωρικών στοιχείων του πραγματικού κόσμου (Κουτσόπουλος 2002). Με τη χρήση ΓΣΠ γίνεται εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε τμήματα (ζώνες) μιας περιοχής έρευνας. Οι πληροφορίες οι οποίες συλλέγονται με συμβατικές μεθόδους συνδυάζονται με τηλεσκοπικά δεδομένα και επιτρέπουν τη δημιουργία αξιόπιστων προγνωστικών μοντέλων (Warshal and Hudak 2000, Lee and Min 2001, Lee and Choi 2004, Ayalew et al. 2004, Van Westen et al. 2006).

Οι κατολισθήσεις είναι ένα χωρικά προσδιορισμένο φαινόμενο που εξελίσσεται στον χρόνο, στα ΓΣΠ ο χώρος προσδιορίζεται με συντεταγμένες και επομένως οτιδήποτε ορίζεται σε συντεταγμένες μπορεί να συσχετιστεί με κάτι άλλο επίσης ορισμένο. Η επιστημονική έρευνα έχει αναπτύξει μεθόδους και μοντέλα ως δυναμικά εργαλεία που συμβάλουν στην κατανόηση της φύσης και του μηχανισμού εξέλιξης των κατολισθήσεων. Παρόλα αυτά, οι μελέτες σχετικά με τη χαρτογράφηση του κινδύνου εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων είναι συνήθως λιγότερο ενδελεχής (Remondo et al. 2005, Van Westen et al. 2006, Vranken et al. 2015). Η εκτίμηση ωστόσο για τον κίνδυνο κατολισθήσεων, προκύπτει μετά από γενικοποιήσεις και απλοποιήσεις, έτσι δεν έχει γίνει αποδεκτό από τους ερευνητές ένα «πρότυπο» μοντέλο πρόγνωσης κινδύνου κατολισθήσεων (Ercanoglu and Gokceoglu 2002, Van Westen 2006). Ως εκ τούτου, κατά τα πρώτα στάδια των κατολισθήσεων, ο προσδιορισμός του κινδύνου ορίζεται σύμφωνα με τη χωροταξική χρονική πιθανότητα εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων (Guzzetti et al. 2005, Van Western et al. 2006).

Από την άλλη πλευρά, η χαρτογράφηση των κατολισθητικών φαινομένων καθώς και η επικινδυνότητα τους, έχουν μελετηθεί ευρέως στην επιστημονική βιβλιογραφία (Carrara et al. 1991, Chung and Fabbri 2003, Bertolini et al. 2005, Guzzetti et al. 2005, Irigaray et al. 2007). Συνεπώς η κατολισθητική δραστηριότητα και ο προσδιορισμός εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων σε μία περιοχή, σε συνδυασμό με την έλλειψη χρονικών δεδομένων, είναι μεταξύ των πιο πολύπλοκων προβλημάτων αυτού του τύπου που η επιστημονική έρευνα καλείται να λύσει (Pellicani et al. 2014).

Εν συνεχεία παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί ως εργαλεία χωρικής ανάλυσης για τον εντοπισμό, προσδιορισμό και την επικινδυνότητα των κατολισθητικών φαινομένων και των λασποροών.

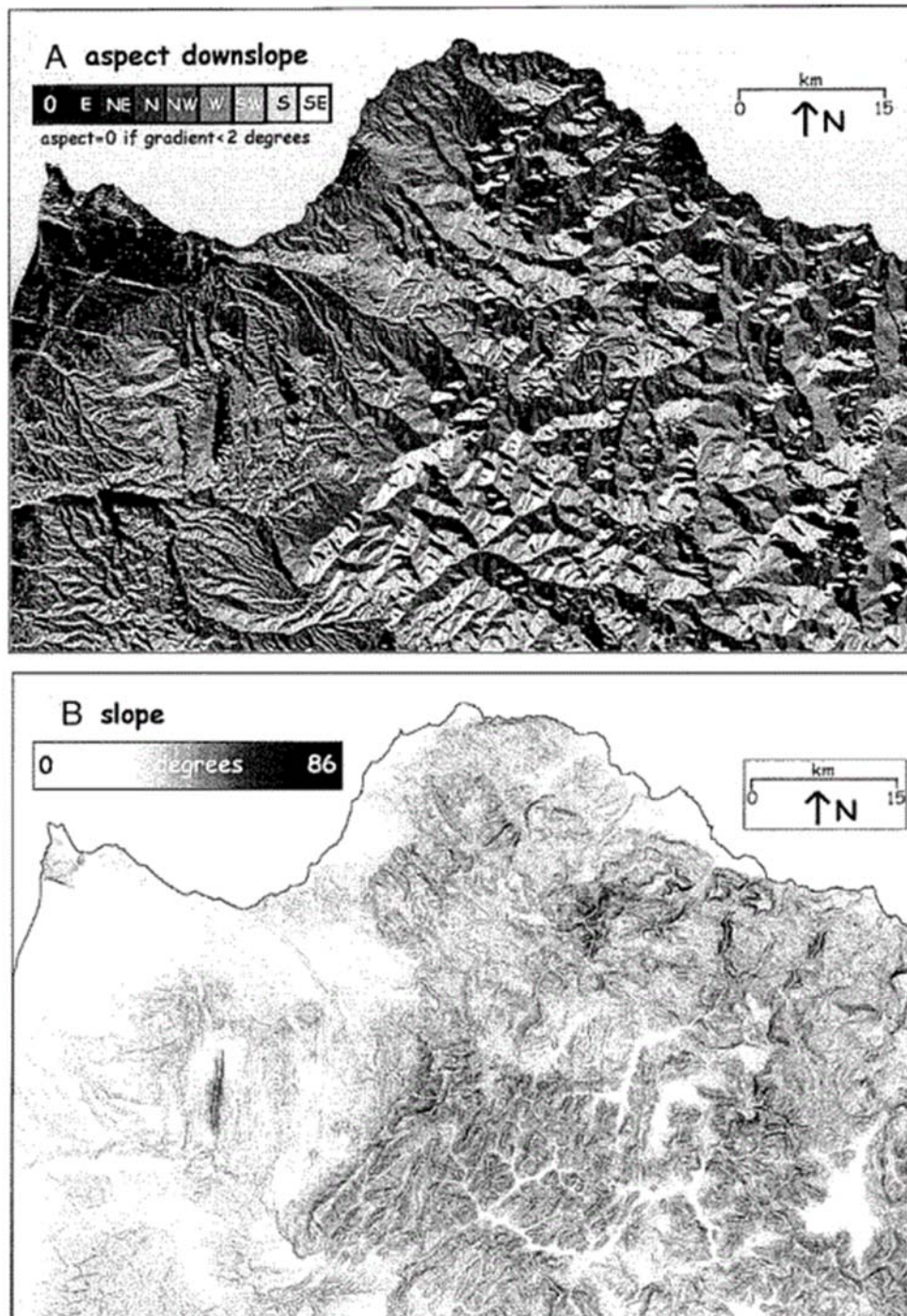
2.5.1 Προσδιορισμός κινδύνου κατολισθήσεων με τη χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους και Γεωμορφομετρικών Κριτηρίων μέτριας ανάλυσης

Η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων και τεχνικών επεξεργασίας εικόνας χρησιμοποιούνται εκτενώς στην επιστημονική έρευνα, τόσο για τη χαρτογράφηση των κατολισθητικών φαινομένων όσο και για τον προσδιορισμό των χρονικών συσχετίσεων μεταξύ των γεγονότων ολίσθησης και των επιφανειακών συνθηκών (Sangar and Kanungo 2004). Ταυτόχρονα, στα ΓΣΠ αναπτύσσονται ποικίλες ψηφιακές τεχνικές επεξεργασίες εικόνας για την αυτοματοποίηση και την ποιοτική ερμηνεία των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών (Miliareisis and Argialas 1999, Miliareisis and Argialas 2000, Miliareisis and Illiouroulou 2004). Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν εν αρχή την κατάτμηση του εδάφους σε στοιχειώδη γεωμορφολογικά αντικείμενα και μετέπειτα την παραμετρική αναπαράσταση τους βάση της τρισδιάστατης χωρικής τους ρύθμισης (Miliareisis et al. 2005).

Έχοντας εισάγει στα ΓΣΠ την περιοχή μελέτης και τα δεδομένα, αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χωρίζει το έδαφος σε στοιχειώδη γεωμορφολογικά αντικείμενα. Η ανάλυση της εδαφικής αποτύπωσης και η εννοιολογική διατύπωση (conceptualization) των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών, καθορίζουν τα αντικειμενικά εκείνα που είναι ευπαθή για εκδήλωση κατολίσθησης. Στη συνέχεια κάθε αντικείμενο παρουσιάζεται παραμετρικά και η επακόλουθη χωρική λήψη αποφάσεων, σε συνδυασμό με τη χαρτογράφηση επιτρέπει τη ταυτοποίηση των φυσικών ζωνών εδάφους με υψηλή ευαισθησία εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την προσέγγιση στη μεθοδολογία του προτεινόμενου μοντέλου, ο κίνδυνος κατολίσθησης συσχετίζεται με τη γωνία του επιπέδου διάτμησης (Summerfield 1996) υποθέτοντας ότι συμπίπτει με τη μέση κλίση ενός στοιχειώδους αντικειμένου εδάφους. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η μέση κλίση του αντικειμένου εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία κατολισθήσεων για μια συγκεκριμένη λιθολογία.

Επιπλέον, το έδαφος αποτελείται από περιοχές που έχουν κλίση προς την ίδια κατεύθυνση πτυχής και βρίσκονται κυρίως είτε μεταξύ των δικτύων κορυφογραμμής και των κοιλάδων είτε κατά μήκος των ορεινών ρηγματοειδών μετώπων (Dymond et al. 1995). Οι περιοχές αυτές είναι δυνατό να οριστούν από τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους και ερμηνεύονται

εύκολα στους σκιασμένους χάρτες (Εικόνα 10) του εδαφικού ανάγλυφου (Reichenbach et al. 1993), καθώς τα αντικείμενα που σχηματίζονται έχουν την ίδια γκρι σκίαση.



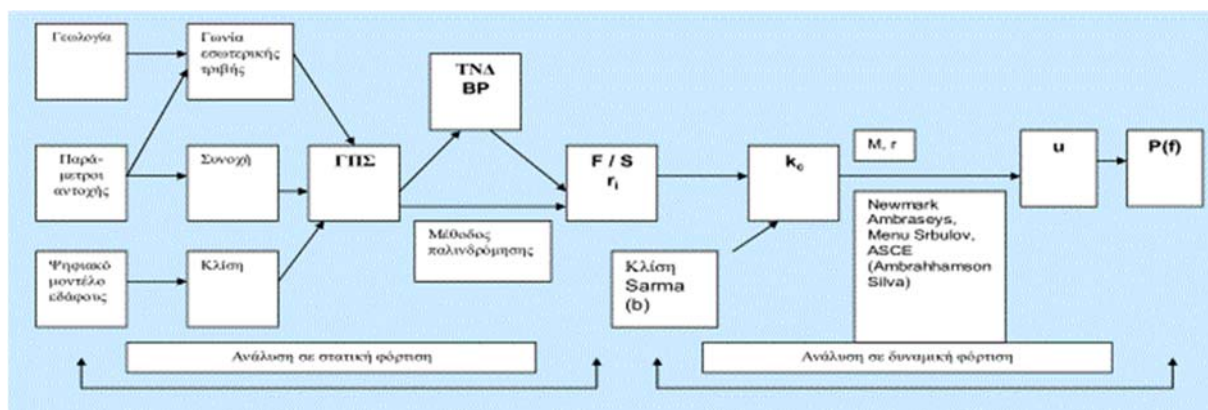
Εικόνα 10: Βαθμίδες κλίσης: α) Προσανατολισμός Εικόνας (Σημείο κατηφορικής κλίσης) και β) Εικόνα πρανών (Το σκουρόχρωμο σημείο έχει τη μεγαλύτερη κλίση). Πηγή: Miliareisis et al. 2005

2.5.2 Προσδιορισμός των κατολισθητικών φαινομένων με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η χρήση μοντέλων Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) στον προσδιορισμό των κατολισθήσεων αποτελεί μία δυναμική εφαρμογή στο ερευνητικό πεδίο, που σε συνδυασμό με τις κατάλληλες ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους δίνει τη δυνατότητα ολιστικής προσέγγισης του κατολισθητικού φαινομένου (Σακελλαρίου κ.ά. 2007).

Τα ΤΝΔ επιδεικνύουν χαρακτηριστικά δημιουργικής ικανότητας, αντίληψης και κρίσης. Πρόκειται για απλοποιημένες μορφές, των βιολογικών νευρωνικών δικτύων καθώς διατηρούν αρκετές από τις λειτουργίες και την οργάνωση η οποία έχει παρατηρηθεί στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Κύρια χαρακτηριστικά των νευρώνων είναι ότι αντιδρούν σε ερεθίσματα του εξωτερικού περιβάλλοντος, επεξεργάζονται και μεταφέρουν ερεθίσματα και πληροφορίες, επικοινωνούν με μια σειρά συνάψεων με άλλα νευρώνια. Ταυτόχρονα διατηρούν την πολυπλοκότητα του συστήματος το οποίο μοντελοποιούν γιατί έχουν και αυτά σύνθετη οργάνωση (Cilliers 1999).

Για την ανάπτυξη του γεωτεχνικού μοντέλου εκτίμησης του κινδύνου (Σχήμα 3) δημιουργείται το εξωτερικό μοντέλο της βάσης το οποίο προϋποθέτει τον καθορισμό του προβλήματος και του αντικειμενικού σκοπού.



Σχήμα 3: Γεωτεχνικό μοντέλο εκτίμησης κινδύνου. Πηγή: Σακελλαρίου κ.ά. 2007

Ως πρόβλημα θεωρούμε την εκτίμηση του κινδύνου έναντι κατολισθήσεων μέσα από τη δημιουργία μοντέλων εκτίμησης του κινδύνου τόσο σε στατικές όσο και δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας να συμβεί μια κατολίσθηση στο μέλλον μέσω της εκτίμησης της τιμής του συντελεστή ασφαλείας, ή της πιθανότητας εκδήλωσης.

Σε εννοιολογικό επίπεδο γίνεται ο προσδιορισμός των απαιτούμενων θεματικών επιπέδων μαζί με τα αντίστοιχα τους περιγραφικά χαρακτηριστικά, ο καθορισμός της κλίμακας μελέτης και του συστήματος αναφοράς. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής τροφοδοτεί το πρόγραμμα για την αναπαράσταση του αναγλύφου. Το τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα της περιοχής ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία και της ανάγκες της εκάστοτε μελέτης μπορεί να αφορά σε στοιχεία για το είδος :

- Των γεωλογικών σχηματισμών
- Τις οικογένειες ασυνεχειών
- Τα Ρήγματα
- Το χαρακτηρισμό των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν.

2.5.3 Εκτίμηση επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων με τη χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) και των κατάλληλων αντικειμενικών συναρτήσεων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), αποτελούν ένα δυναμικό εργαλείο που μπορεί να συμβάλλει θετικά στις πολυπαραμετρικές διαδικασίες σχεδιασμού του χώρου, αναζητώντας βέλτιστες λύσεις σύμφωνα με μαθηματικά προσδιορισμένα κριτήρια. Βασίζονται στη δημιουργία ενός πληθυσμού κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων εφαρμόζοντας τεχνικές Εξελεγκτικού Προγραμματισμού και Γενετικής. Βασικά πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων είναι πως μπορούν:

- (i) Να επιλύσουν προβλήματα σε εύλογο χρόνο και με ικανοποιητικό τρόπο,
- (ii) Να συνδυαστούν με υφιστάμενα μοντέλα και συστήματα,
- (iii) Να προσαρμοστούν σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης 1999).

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) βασίζονται στη δημιουργία ενός πληθυσμού κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων εφαρμόζοντας τεχνικές Εξελεγκτικού Προγραμματισμού και Γενετικής. Στο πλαίσιο αυτό, οι ΓΑ επιτρέπουν την προβολή της συμπεριφοράς των παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης και αξιολογώντας τις επιπτώσεις τους, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τους σχετικούς επιστήμονες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ο ΓΑ NSGA-II χρησιμοποιείται για να πετύχει την ταξινόμηση του πληθυσμού βάσει συγκεκριμένων στόχων ακολουθώντας την μέθοδο της μη κυριαρχικής ταξινόμησης (non-dominated ranking method) (Deb 2001, Cao et al. 2011), ενώ οι στόχοι του NSGA-II ορίζονται ως (Shaygan et al. 2013):

- (i) Η δημιουργία ενός πληθυσμού από άτομα (individuals),
- (ii) Η χρήση μιας μεθόδου για την κατάταξη (rank) και την ταξινόμηση (sort) των ατόμων,
- (iii) Η δημιουργία νέων σειρών απογόνων (offsprings),
- (iv) Ο συνδυασμός ατόμων και απογόνων για την κατάρτιση νέων προτύπων κατανομής (allocation patterns),
- (v) Η σχεδίαση ενός μετώπου Pareto μέσω του υπολογισμού της απόστασης μεταξύ των πιθανών λύσεων (crowding distance) στη νέα κατανομή.

Η απόσταση μεταξύ των πιθανών λύσεων είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία εκτίμησης της πυκνότητας των λύσεων που περιβάλλουν μια συγκεκριμένη λύση (Tajiri and Coello 2007) και αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για τον NSGA-II (Srinivas and Deb 1994, Liu et al. 2012).

Για κάθε πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζεται με χρήση ΓΑ, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στη μελέτη περίπτωση π.χ. της επέκτασης ενός ορεινού οικισμού είναι:

- Επικινδυνότητα κατολίσθησης (landslide risk),
- Ηλιασμός (insolation),
- Θέα (skyview),
- Απόσταση από οδικό δίκτυο (road distance),
- Απόσταση από οικισμό (urban distance),
- Καταλληλότητα προσανατολισμού πρανών (aspect suitability),
- Συμπαγότητα (compactness),
- Απόσταση από άλλα μέλη της κατηγορίας (cluster distance), και
- Καταλληλότητα μετατροπής χρήσης/ κάλυψης γης (transformation suitability).

Κατά τη διαδικασία της εκτέλεσης ο ΓΑ δημιουργεί σε κάθε επανάληψή του μία νέα κατανομή χρήσεων / καλύψεων γης σε όλη την περιοχή μελέτης, ωστόσο ενδιαφέρον έχει η αξιολόγηση μόνο των περιοχών που ενδείκνυνται για την επέκταση του οικισμού. Για την αξιολόγηση αυτή, οι αντικειμενικές συναρτήσεις μπορούν να εφαρμοστούν είτε μόνο στα pixel του προτεινόμενου νέου οικισμού, ή σε όλα τα pixel των νέων προτεινόμενων κατηγοριών χρήσης / κάλυψης γης (Κολοκούσης κ.ά. 2016).

Ειδικά για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων ο παραγόμενος χάρτης (Εικόνα 11) διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον ΓΑ και η αντικειμενική συνάρτηση για την επικινδυνότητα κατολίσθησης ορίζεται από τον τύπο:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^p R_i c w_i$$

Όπου:

R_i: Η επικινδυνότητα για κατολισθήσεις στο εικονοστοιχείο *i* σύμφωνα με το χάρτη επικινδυνότητας για κατολισθήσεις.

cw_i: Ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αναφορά την επικινδυνότητα για κατολισθήσεις. Αρνητικές τιμές συνεπάγονται αντιστροφή της συνάρτησης.

p: Ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης / κάλυψης γης (εικονοστοιχείων ή γονιδίων).



Εικόνα 11: Ο παραγόμενος χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις. Πηγή: Κολοκούσης κ.ά. 2016.

2.5.4 Γεωπληροφορικό προγνωστικό μοντέλο κινδύνου λασπορροής και λασπώδους ρύπανσης για το έδαφος των Ουκρανικών Καρπαθίων

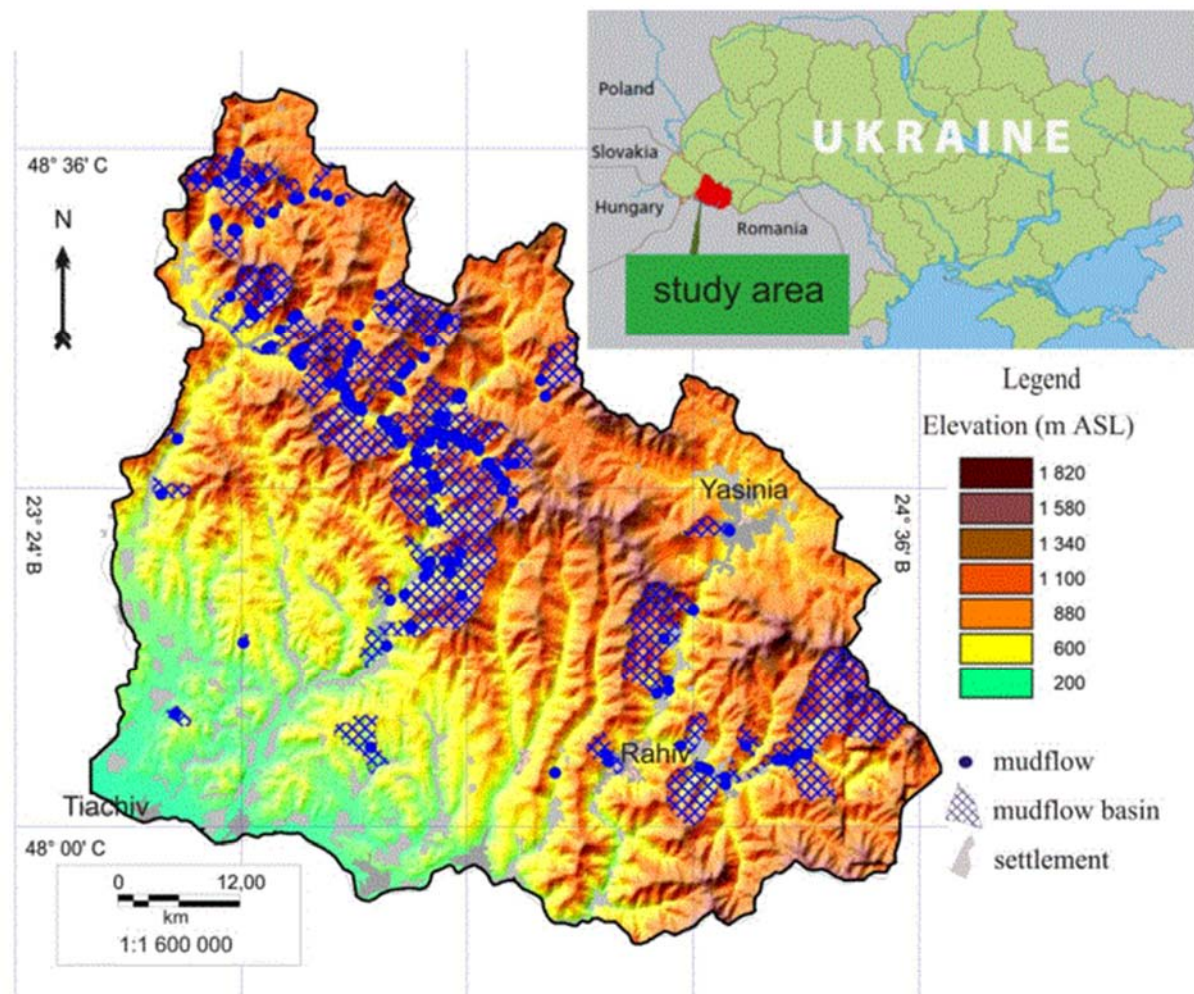
Η συγκεκριμένη διαδικασία για τη δημιουργία μιας μακροπρόθεσμης πρόβλεψης για το χρονικό διάστημα του κινδύνου εκδήλωσης λασπορροής, περιλαμβάνει τρεις κύριες φάσεις:

- (i)** Τον υπολογισμό της συνάρτησης SCSΙ με την πιθανότητα της κατανομής θέσεων λασπορροής.
- (ii)** Τον υπολογισμό των πολλαπλών λειτουργιών από την εκδήλωση της λασπορροής.
- (iii)** Τη δημιουργία μοντέλων γεωπληροφόρησης για την πρόβλεψη των κινδύνων από την εκδήλωση λασπορροών.

Πρώτα δημιουργείται μια χαρτογραφική βάση δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει χαρτογραφικά στρώματα τοποθεσιών λασπορροής και παράγοντες που επηρεάζουν την περιφερειακή εκδήλωση των λασπορροών μέσα στην περιοχή μελέτης, όπως:

- (i)** Η γεωλογία, που ανήκει στα λιθολογικά στοιχεία και στις τεκτονικές ζώνες (η ύπαρξη κατολισθήσεων και οι τεκτονικές βλάβες),
- (ii)** Η γεωμορφολογία (γωνία κλίσης, υψόμετρο χώρων λάσπης, λεκάνες απορροής, η βάση της διάβρωσης),
- (iii)** Οι τεχνογενείς (αποστάσεις από το δρόμο και τον οικισμό),
- (iv)** Η κλιματική (μεσαία ετήσια θερμοκρασία του αέρα) και
- (v)** Το τοπίο (απόσταση από το δάσος).

Στη συνέχεια διεξάγεται χωρική ανάλυση με εφαρμογή μετρικών πράξεων επικαλύψεων με σκοπό την επαλήθευση της ύπαρξης μοτίβων μεταξύ της κατανομής των θέσεων και των παραγόντων εκδήλωσης λασπορροής. Σε επίπεδο χαρτογράφησης αυτά τα σημεία είναι γραμμικά και επίπεδα αντικείμενα (Εικόνα 12). Ως αποτέλεσμα, υπολογίζονται οι τιμές των ακόλουθων χαρακτηριστικών παραγόντων: υψόμετρο, γωνία κλίσης της επιφάνειας, υψόμετρο της λεκάνης απορροής, μέση ετήσια ποσότητα βροχόπτωσης, απόσταση από το δρόμο έως τη βάση της διάβρωσης, μέχρι το όριο του δάσους και του οικισμού, στην πλησιέστερη κατολίσθηση, στο τεκτονικό σφάλμα, και στη λεκάνη απορροής. Η αναζήτηση της κατάλληλης σύνδεσης μεταξύ της χωρικής κατανομής των θέσεων και καθενός από τους παράγοντες εκδήλωσης λασπορροής, εκτελέστηκε με την επαλήθευση της κατανομής των τιμών χαρακτηριστικών παραγόντων από τις θεωρητικές κατανομές χρησιμοποιώντας το κριτήριο Kolmogorov - Smirnov (Cherurna 2011).



Εικόνα 12: Η θέση των λεκανών λασπορροής στην περιοχή μελέτης. Πηγή: Cherpurna et al., 2017

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στον υπολογισμό των χωρικών και χρονικών δεικτών και αναπτύσσεται βάσει της ακόλουθης αλληλουχίας έρευνας:

- (i) Δημιουργία της χαρτογραφικής βάσης με τους πιθανούς παράγοντες οι οποίοι θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ανάπτυξη λασπορροών.
- (ii) Επιλογή και αιτιολόγηση των σχετικών παραγόντων, με τη χρήση στατιστικής και χωρικής ανάλυσης,
- (iii) Υπολογισμό των τυπικών χωρικών δεικτών στη δημιουργία ενός μακροπρόθεσμου μοντέλου δραστηριότητας των λασπορροών
- (iv) Δημιουργία χαρτογραφικών προγνωστικών μοντέλων γεωπληροφόρησης για τον κίνδυνο λασπορροών.

2.5.5 Εκτίμηση κινδύνου κατολισθήσεων με τη χρήση μοντέλου προσδιοριστικών παραγόντων (Μονάδων Μοναδικής Κατάστασης)

Η διαδικασία εκτίμησης του κινδύνου κατολίσθησης με μοντέλα προσδιοριστικών παραγόντων, ξεκινά με την αναγνώριση και την οριοθέτηση της περιοχής κατολίσθησης ανεπτυγμένη σε τρία στάδια:

- (i) Τη γεωχωρική και χρονική βάση δεδομένων
- (ii) Την κατάσταση κατολίσθησης
- (iii) Τη χαρτογράφηση κατολίσθησης.

Η βάση δεδομένων περιέχει γεωχωρικές πληροφορίες (αντιστοίχιση κατολισθήσεων) αλλά και χρονικές πληροφορίες σχετικά με την εμφάνιση κατολισθήσεων (λιθολογία, τυπολογία, μέγεθος, αστοχία). Η εκτίμηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων βασίζεται στη στατιστική ανάλυση μεταξύ της χωρικής-χρονικής συχνότητας και της έντασης των κατολισθήσεων, ενώ αποτελεί και την πλέον ενδεδειγμένη μέθοδο χαρτογράφησης των κατολισθητικών φαινομένων (Van Westen 2006, Fell et al. 2008). Ωστόσο, οι παράγοντες που καθορίζουν τη χωρική κατανομή των κατολισθήσεων εξαρτώνται από τη φύση, τη μορφολογία και την κλίση του εδάφους (Irigaray et al. 2007, Costanzo et al. 2012).

Ο καθορισμός των ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε μορφή raster που μπορούν να προσδιορίσουν την κλίση της αστάθειας πραγματοποιείται σε μοντέλα μεγέθους 5 m / pixel, ενώ για την εκτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας καθορίζονται μονάδες χαρτογράφησης που ορίζουν τις βασικές χωρικές ή στατιστικές μονάδες για τις οποίες το μοντέλο είναι σε θέση να παράσχει μια τιμή κινδύνου. Για το σκοπό αυτό, αρχικά δημιουργούνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί μεταξύ των κατηγοριών του καλύτερου μοντέλου προσδιοριστικών παραγόντων που είναι Μονάδες Μοναδικής Κατάστασης (Unique Status Units, UCU). Κατά συνέπεια, οι UCU λαμβάνονται υπόψη ως μονάδες χαρτογράφησης. Η γεωστατιστική αυτή μέθοδος για την κατανομή της επιφάνειας εδάφους (UCU) είναι κατάλληλη για εκτιμήσεις επικινδυνότητας λόγω κατολισθήσεων βασισμένες σε ανάλυση υπό όρους που απαιτεί την επικάλυψη των διαβαθμισμένων στρωμάτων του κάθε προσδιοριστικού παράγοντα σε μία μόνο και οι κατολισθήσεις με γνωστό μέγεθος και σχήμα (σύνολο δεδομένων πολυγώνων) (Carrara et al. 1991, Rotigliano et al. 2012, Capitani et al. 2013).

Σύμφωνα με τη θεωρία της υπό όρους πιθανότητας, αναφορικά με το θεώρημα του Bayes (θεώρημα ολικής πιθανότητας), η πιθανότητα $P(A | B)$ ορίζει ότι το γεγονός A

(εξαρτώμενο συμβάν) για να συμβεί εξαρτάται από την εμφάνιση του συμβάντος B (συμβάν προδιάθεσης) και προσδιορίζεται ως η αναλογία μεταξύ των πιθανών συμβάντων των δύο συμβάντων που συμβαίνουν ταυτόχρονα $P(A \cap B)$ και της εμφάνισης του συμβάντος κλιματισμού $P(B)$.

Στις μελέτες κατολίσθησης, αυτό ισοδυναμεί με την πιθανότητα (πιθανότητα χωρικής εμφάνισης σε αυτή την περίπτωση) ενός δεδομένου UCU (συντελεστής προδιαθέτησης) που επηρεάζεται από κατολισθήσεις. Επομένως, το $P(L | UCU) = (\text{περιοχή πηγής κατολίσθησης} \cap \text{UCU περιοχή}) / (\text{περιοχή UCU})$ (Carrara et al. 1991, Capitani et al. 2013), όπου $L = \text{Κατολίσθηση}$.

Συνεπώς, η χωρική πιθανότητα εμφάνισης κατολισθήσεων σε κάθε UCU κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1, όπου 1 αντιπροσωπεύει ολόκληρη την έκταση που καταλαμβάνεται από έναν τέτοιο συνδυασμό κλάδων συντελεστών (περιοχή UCU) που επηρεάζονται από κατολισθήσεις. Δηλαδή, το $P(L | UCU) = 1$ και το 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις κατολισθήσεων στην UCU ή το ισοδύναμο $P(L | UCU) = 0$.

Σε κάθε περίπτωση, σύμφωνα με τους συνιστώμενους περιγραφικούς δείκτες για την κατολίσθηση και τη ζώνη κινδύνου (Fell et al. 2008), το επίπεδο κινδύνου περιγράφηκε ως η περιοχή που επηρεάζεται από κατολίσθηση σε κάθε UCU (σε ποσοστό ή όμοια, πιθανότητα χωρικής εμφάνισης) από την περίοδο επιστροφής σε έτη. Με αυτόν τον τρόπο, η συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων αντικατοπτρίζεται στο χάρτη κινδύνου κατολισθήσεων και αποτελεί εναλλακτική λύση για την απεικόνιση πολλών χαρτών σύμφωνα με την περίοδο επιστροφής.

2.6 Συμπέρασμα

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων με βάση την ανασκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας αποδεικνύεται ότι είναι ένα φαινόμενο που εκδηλώνεται με διαφορετικές μορφές (παραδείγματα οι λασπορροές, οι καταπτώσεις βράχων, η ολίσθηση των μαζών φλύσχη σε αργιλικό υπόστρωμα) ανάλογα με την λιθολογία, την τεκτονική, την υδρογεωλογία, την υδρολογία, τη γεωμορφολογία, τη σεισμική δραστηριότητα και τις βροχοπτώσεις. Έτσι μπορεί να έχουμε ταχύτατη μεταφορά μεγάλων μαζών σε εκτεταμένη περιοχή ικανές να προκαλέσουν απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και ανθρωπογενείς κατασκευές (οδικό δίκτυο, φράγματα, οικισμούς) ανάλογα με την εγγύτητα τους με τη ζώνη εκδήλωση της κατολίσθησης..

Οι φυσικό-γεωλογικές συνθήκες που επιτρέπουν την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, αποδείχθηκε ότι είναι δύσκολο έως αδύνατον να καταγραφούν στο σύνολο τους. Παράδειγμα, γεωμορφολογία μιας περιοχής, οι υδρολογικές λεκάνες, η επιφανειακή απορροή είναι δυνατόν να καταγραφούν σε κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας από δορυφορικά χαρτογραφικά συστήματα και εργασίες πεδίου. Από την άλλη η διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, η τεκτονική και η λιθολογία στο υπέδαφος είναι αδύνατον ή εξαιρετικά ασύμφορες οικονομικά να προσδιορισθούν σε κάθε σημείο της επιφάνειας της Γης, όμως η δειγματοληψία σε σημεία ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν μεγάλη επικινδυνότητα είναι δυνατόν να γίνει με εργασίες πεδίου όπως για παράδειγμα μικρές γεωτρήσεις ή σταθμήμετρα που μετρούν τη διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Βέβαια ενώ η διαδικασία πυροδότησης μιας κατολίσθησης είναι ένα φαινόμενο που ωριμάζει σταδιακά ως συνάρτηση της μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων, ακραία καιρικά φαινόμενα και σεισμοί μπορούν να επιταχύνουν δραματικά την εκδήλωση των κατολισθήσεων που είναι σε διαδικασία ωρίμασης. Όμως η πρόβλεψη των σεισμικών συμβάντων και ο προσδιορισμός των επιταχύνσεων βαρύτητας (που προκαλεί τις κατολισθήσεις) σε κάθε σημείο της επιφάνειας είναι ακόμη σε νηπιακό επίπεδο ενώ η χωροχρονική κατανομή της έντασης της βροχόπτωσης στη διάρκεια ενός ακραίου καιρικού φαινομένου είναι ουτοπία.

Τι μπορεί να γίνει όμως σε επιστημονικό επίπεδο για την περαιτέρω μελέτη αυτού του φαινομένου; Η απάντηση είναι πως πολλά μπορούν να γίνουν ακόμα και πολλά ήδη έχουν γίνει! Καταρχήν προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στις κατολισθήσεις που εκδηλώνονται εγγύτατα σε οικισμούς ή τους απειλούν άμεσα, τα τεχνικά έργα (π.χ. φράγματα), το οδικό δίκτυο, και τις οικονομικές δραστηριότητες (π.χ. χρήσεις γης που αφορούν καλλιέργειες μόνιμες ή παρακλαδικές, βιομηχανικά πάρκα κ.ά.). Επομένως μπορεί να υπάρξει μια ζωνοποίηση της μελέτης του φαινομένου και απαιτούμενες έρευνες να περιοριστούν στη μελέτη συγκεκριμένων περιοχών. Από την άλλη πλευρά πολλές φορές μέσα στους αιώνες ή σε δεκαετίες έχουμε επαναληπτική εκδήλωση κατολισθήσεων σε περιοχές με βεβαρυμένο ιστορικό. Το φυσικό περιβάλλον βρίθεται από ίχνη παλαιότερων κατολισθήσεων που πρέπει να μελετηθούν και να προσδιορισθεί η χωροχρονική τους επαναληψιμότητα ως συνάρτηση του αντίστοιχου γενετικού αίτιου (π.χ. σεισμός, ακραία βροχόπτωση κ.ά.).

Η σύγχρονη τεχνολογία και οι τεχνικές ανάλυσης δεδομένων έχουν συνεισφέρει σημαντικά στη μελέτη του φαινομένου των κατολισθήσεων. Παράδειγμα είναι τα σύγχρονα δεδομένα που περιλαμβάνουν τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους και επιτρέπουν υδρολογικές αναλύσεις και προσδιορισμό γεωμορφολογικών παραμέτρων όπως η κλίση (μέτρο και διάνυσμα), οι δορυφορικές εικόνες που καταγράφουν τις καλύψεις γης και τις χρήσεις σε πολύ μεγάλες κλίμακες. Στον αντίποδα οι τεχνικές ανάλυσης δεδομένων και χωρικής λήψης αποφάσεων επιτρέπουν την επεξεργασία επιπέδων πληροφορίας προκειμένου να προσδιορισθεί ο κίνδυνος ή η πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιοχές από στατιστικά δεδομένα (περιοχές εκπαίδευσης) .

Υπάρχουν βέβαια συγκεκριμένα προβλήματα που έχουν σχέση με το εννοιολογικό πλαίσιο μελέτης του φαινομένου, αφού στο πρώτο στάδιο η μελέτη βασίζεται στην κατάτμηση του γεωγραφικού χώρου σε ένα τετραγωνικό δίκτυο καθώς και στη μελέτη της πιθανότητας εκδήλωσης του φαινομένου σε κάθε στοιχειώδες τετράγωνο, σε αντιπαραβολή με τα υπόλοιπα.

Μια πρόοδος στη μελέτη του φαινομένου είναι η κατάτμηση του γεωγραφικού χώρου σε ένα ακανόνιστο υποσύνολο επιφανειών που είναι σε επαφή μεταξύ τους και συμπίπτει με τις ομόρροπες περιοχές (aspect regions). Δηλαδή μια ομόρροπη περιοχή αποτελείται από ένα δίκτυο σημείων που σχηματίζουν στοιχειώδεις επιφάνειες που κλίνουν προς την ίδια γεωγραφική διεύθυνση (Miliareisis et al. 2005).

Έτσι η υδροστρωματοροή αλλά και τα φαινόμενα βαρυτικής ροής είναι κατευθυνόμενα και μεγιστοποιούνται προς συγκεκριμένη γεωγραφική διεύθυνση, επιταχύνοντας την εξέλιξη κατολισθητικών φαινομένων.

Σε αυτό το ακανόνιστο δίκτυο επιφανειών οι Miliareis et al. (2005) ολοκλήρωσαν συγκεκριμένες φυσικές παραμέτρους που υπολογίσθηκαν εντός του κάθε υποσυνόλου ακανόνιστης επιφάνειας και αποτέλεσαν τα διανύσματα στα οποία βασίσθηκε η λήψη απόφασης. Ένα πρόβλημα που δεν έχει μελετηθεί ακόμη αφορά την ολοκλήρωση φυσικών παραμέτρων που δεν αφορούν μια στοιχειώδη κανονική ή ακανόνιστη κατάτμηση αλλά διαπερνούν / διαχέονται μέσα στις κανονικές ή ακανόνιστες κατατμήσεις.

Κεφάλαιο Τρίτο

3.1 Μεθοδολογία

Στην επιστημονική ερευνητική διαδικασία, η μεθοδολογία αναφέρεται στις παραμέτρους εκείνες οι οποίες αφορούν στις γενικές προσεγγίσεις, στις τεχνικές, στα μέσα, στα υλικά και στις διαδικασίες που ο ερευνητής έχει επιλέξει για τη διεξαγωγή της έρευνάς του (Δημητρόπουλος 2004).

Αντικείμενο έρευνας της παρούσας διατριβής αποτελεί ο εντοπισμός περιοχών υψηλής επικινδυνότητας για εκδήλωση κατολισθήσεων και λασποροών μέσω δορυφορικών δεδομένων και ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων εδάφους. Περιοχή μελέτης για την εφαρμογή της έρευνας αποτέλεσε το γεωγραφικό διαμέρισμα της βορειοδυτικής Πελοποννήσου και ειδικότερα ο νομός Αχαΐας. Περιοχή με έντονη κατολισθητική δραστηριότητα εξαιτίας του σύνθετου γεωλογικού υπόβαθρου, της έντονης σεισμικής δραστηριότητας αλλά και του αυξημένου ύψους βροχοπτώσεων που παρατηρούνται σε ετήσια βάση.

Η ερευνητική μεθοδολογία βασίστηκε στην ελεύθερης πρόσβασης χρήση δεδομένων, όπως:

- (i) Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) διακριτικής ανάλυσης 90 m,
- (ii) Οι δορυφορικές φωτογραφίες Landsat 7 (Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+), χωρικής ανάλυσης 30 m,
- (iii) Οι δορυφορικές εικόνες καλύψεων γης CORINE Land Cover (Coordination of Information on the Environment Land Cover, CLC) σε κλίμακα 1:100.000 και
- (iv) Τα ανοικτά (ελεύθερα) γεωχωρικά (διανυσματικά) δεδομένα (geodata.gov.gr).

Τα ελεύθερης πρόσβασης δεδομένα αποδείχθηκε ότι είναι αξιόπιστες πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες χωρικής μοντελοποίησης και μελέτες μέτριας διακριτικής ανάλυσης, όπως δυνητικά περιβαλλοντικές μελέτες προέγκρισης χωροθέτησης και ρυθμιστικές / χωροταξικές μελέτες.

Ενώ τα στάδια χωρικής υλοποίησης της έρευνας διαρθρώθηκαν κατά σειρά ως:

- (i) Ο νοηματικός προσδιορισμός και η νοηματική διατύπωση (conceptualization) του αντικειμένου μελέτης,
- (ii) Τα γεωγραφικά δεδομένα και η τυποποίησή τους, και
- (iii) Η υλοποίηση σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ).

3.2 Γεωγραφικά Δεδομένα Περιοχής Μελέτης

Το γεωγραφικό διαμέρισμα της βορειοδυτικής Πελοποννήσου και ειδικότερα ο νομός Αχαΐας (Εικόνα 13) αποτελούν την περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής. Ο νομός Αχαΐας καταλαμβάνει έκταση συνολικής επιφάνειας 3.271 km². Πάνω από το 60% του εδάφους του καλύπτεται από ορεινή επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο 24% και 16% καλύπτεται από πεδινή και ημιορεινή επιφάνεια αντιστοίχως.



Εικόνα 13: Γεωγραφικός χάρτης της Ελλάδας. Με κοκκινωπή σκουρόχρωμη σκίαση ο νομός Αχαΐας, περιοχή μελέτης της διατριβής.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό αλλά ποικίλει ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα. Στις παράκτιες περιοχές το κλίμα είναι τυπικό μεσογειακό ενώ όσο το υψόμετρο ανεβαίνει το κλίμα είναι περισσότερο ψυχρό και με περισσότερες βροχοπτώσεις.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης αποτελείται από λιθολογικούς (αλπικούς) σχηματισμούς φλύσχη που διαστρώνονται σε μία ρυθμική εναλλαγή ανοικτοφαιών αργιλών, ψαμμιτών και μαργών.

Συνήθως τα στρώματα του φλύσχη είναι πτυχωμένα και επομένως τεκτονικά καταπονημένα (πολλαπλές ρωγμές, πολλαπλοί θρυμματισμοί) και εγκλείουν υπολειμματικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές σε συνδυασμό με το ορεινό της γεωμορφολογίας, τα επικλινή σημεία και τις έντονες βροχοπτώσεις, είναι η κύρια αιτία κατά την οποία εδαφικές μάζες αποσπώνται και δημιουργούν κατολισθητικά φαινόμενα.

3.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, ΨΜΕ (DTM)

Το ανάγλυφο της φυσικής γήινης επιφάνειας είναι ένα τρισδιάστατο συνεχές χωρικό φαινόμενο. Στους τοπογραφικούς χάρτες αναπαριστάται συνήθως με τη μορφή ισοϋψών καμπυλών, σκίασης, γραμμοσκιάς κ.ά. Ανάλογα με τον τρόπο αναπαράστασης, υφίσταται ή όχι η δυνατότητα εξαγωγής ποσοτικών αποτελεσμάτων για την τιμή του υψομέτρου. Η διαχείριση του ανάγλυφου σε ψηφιακό περιβάλλον, γίνεται μέσω των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ) που εξασφαλίζουν την αναπαράσταση της φυσικής γήινης επιφάνειας με διαφορετικές δομές και αλγορίθμους παρεμβολής (Τσούλος κ.ά. 2015).

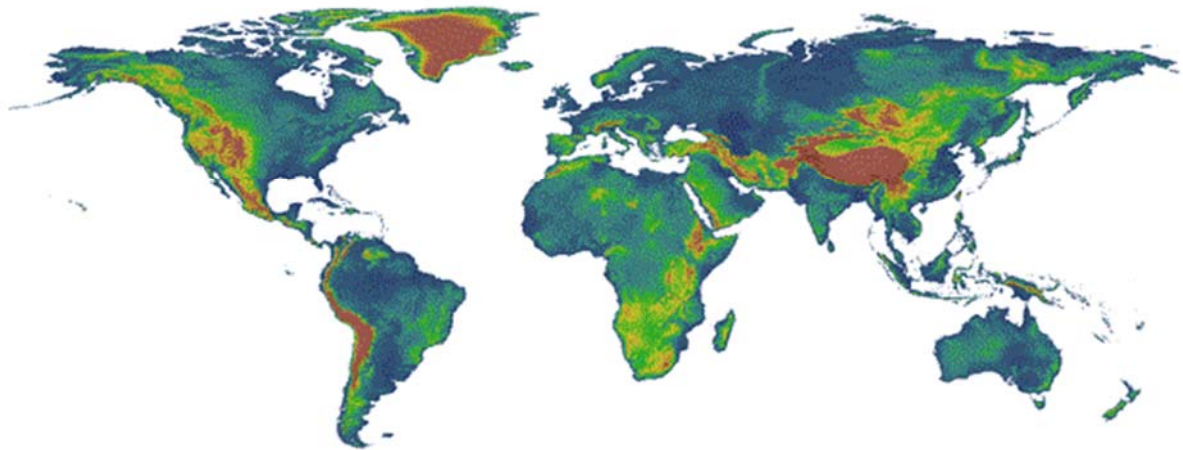
Ως Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους, ΨΥΜΕ (DEM) ορίζεται ένα σύνολο ψηφιακών καταγραφών (X Y Z) που απεικονίζουν μία επιφάνεια. Κατά τη χρήση των ΨΥΜΕ θα πρέπει να ορίζεται και η επιφάνεια για την οποία έχουν καταγραφεί οι τιμές του μοντέλου.

Τα γεωγραφικά δεδομένα του ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκαν για το ερευνητικό σκέλος της διατριβής ελήφθησαν από τον ιστότοπο της Συμβουλευτικής Ομάδας για την Διεθνή Γεωργική Έρευνα – Κοινοπραξία για τη Χωρική Πληροφορία (Consultative Group for International Agricultural Research / Consortium for Spatial Information, CGIAR-CSI) που αποτελεί μία επιστημονική γεω-πύλη για την ελεύθερη πρόσβαση στη χωρική πληροφορία. Τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) παρήχθησαν αρχικά από την από την Εθνική Υπηρεσία Γεωγραφικών Πληροφοριών (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA) σε συνεργασία με την Εθνική Υπηρεσία

Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration, NASA) των ΗΠΑ και πλέον αποτελούν σημαντική εξέλιξη στον τομέα της ψηφιακής χαρτογράφησης.

Τα δεδομένα των ΨΜΕ SRTM 90 m (Εικόνα 14) έχουν ανάλυση 90 m από τον ισημερινό και παρέχονται σε ψηφιδωτά πλακάκια των 5 X 5 degree (όπου 1 degree στον ισημερινό αντιστοιχεί σε περίπου 110 km επιφάνειας). Όλα παράγονται από ένα απλό σύνολο δεδομένων που επιτρέπει την εύκολη δημιουργία μωσαϊκών και είναι διαθέσιμα είτε σε μορφή (format) GeoTiff είτε σε ArcInfo ASCII Grid, για την περαιτέρω διαχείριση και επεξεργασία τους σε περιβάλλον ΓΣΠ.

SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1



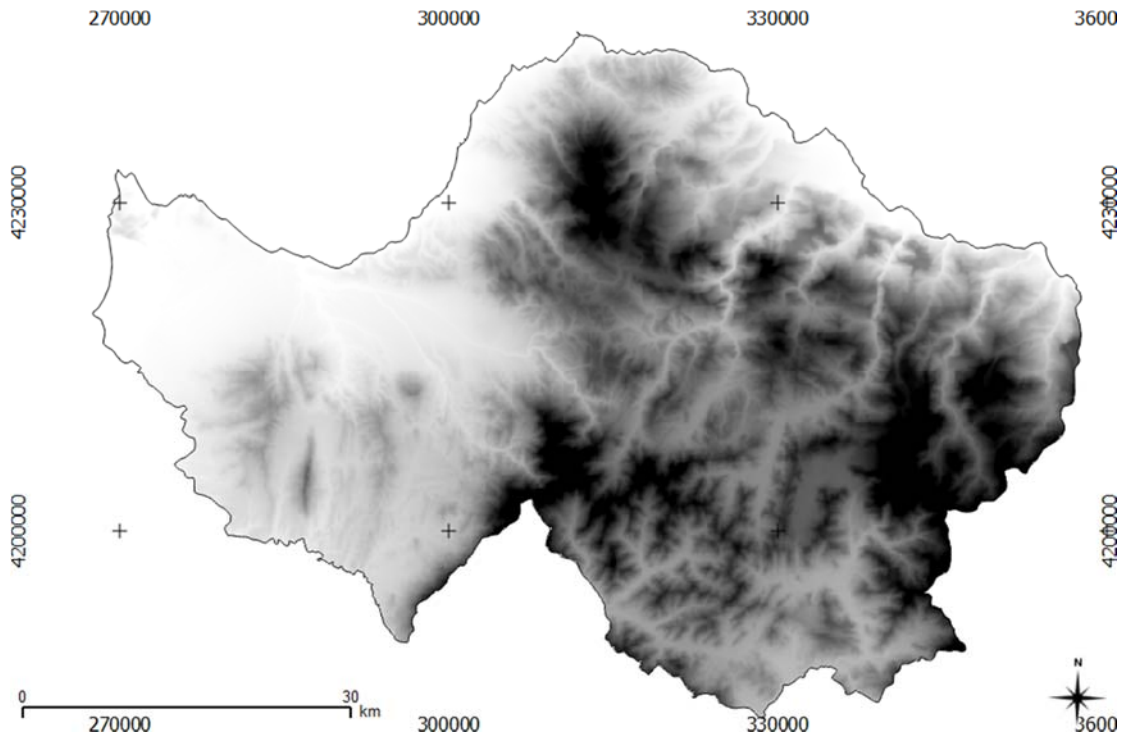
Εικόνα 14: Ψηφιακά Υψομετρικά Δεδομένα SRTM 90 m (Έκδοση 4.1).

Πηγή: Στιγμιότυπο από την ιστοσελίδα του CGIAR-CSI (SRTM) 2017. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

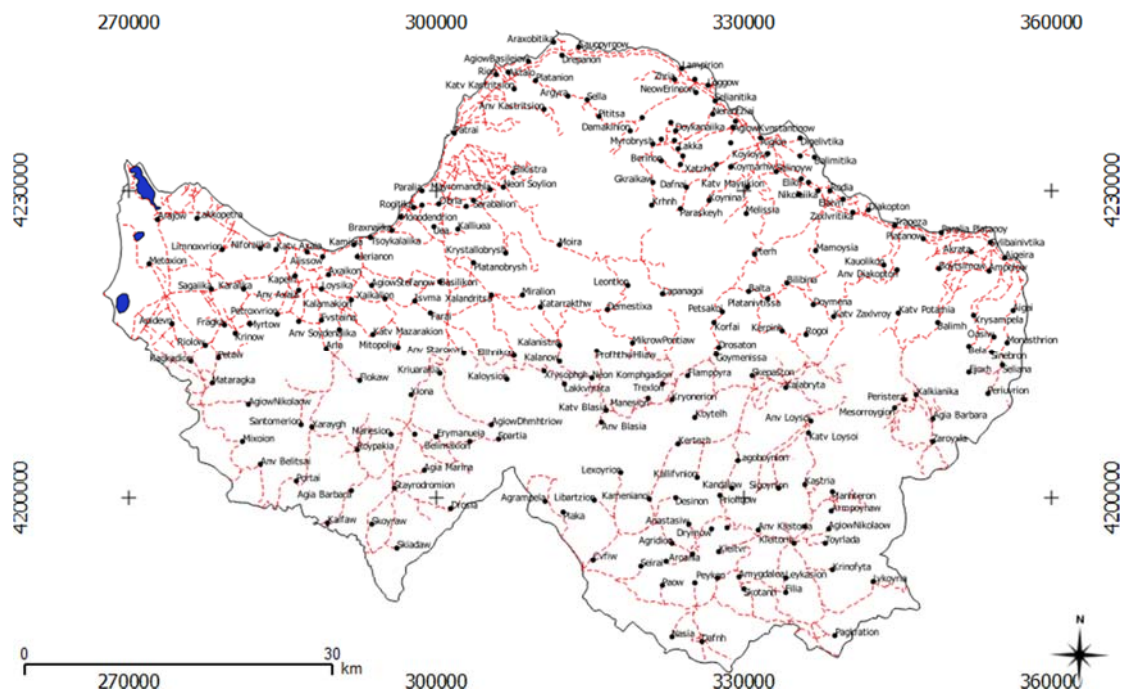
Για τη βέλτιστη αναπαράσταση των χωρικών στοιχείων (features) της διατριβής αλλά και των γεωγραφικών οντοτήτων (feature class) που αποτελούν το αντικείμενο της έρευνας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα Quantum GIS (QGIS) και η έκδοση 2.18.16 "Las Palmas". Το QGIS αποτελεί το πλέον διαδεδομένο λογισμικό (ανοικτού κώδικα) στα ΓΣΠ, ενώ οι νεότερες εκδόσεις ενσωματώνουν και άλλα αντίστοιχα λογισμικά ΓΣΠ όπως το System for Automated Geoscientific Analyses GIS (SAGA GIS).

Το SAGA GIS και η έκδοση 6.2.0 που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διατριβής, διαθέτει μία δυναμική εργαλειοθήκη (toolkit) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ορισμένων παραμέτρων της έρευνας.

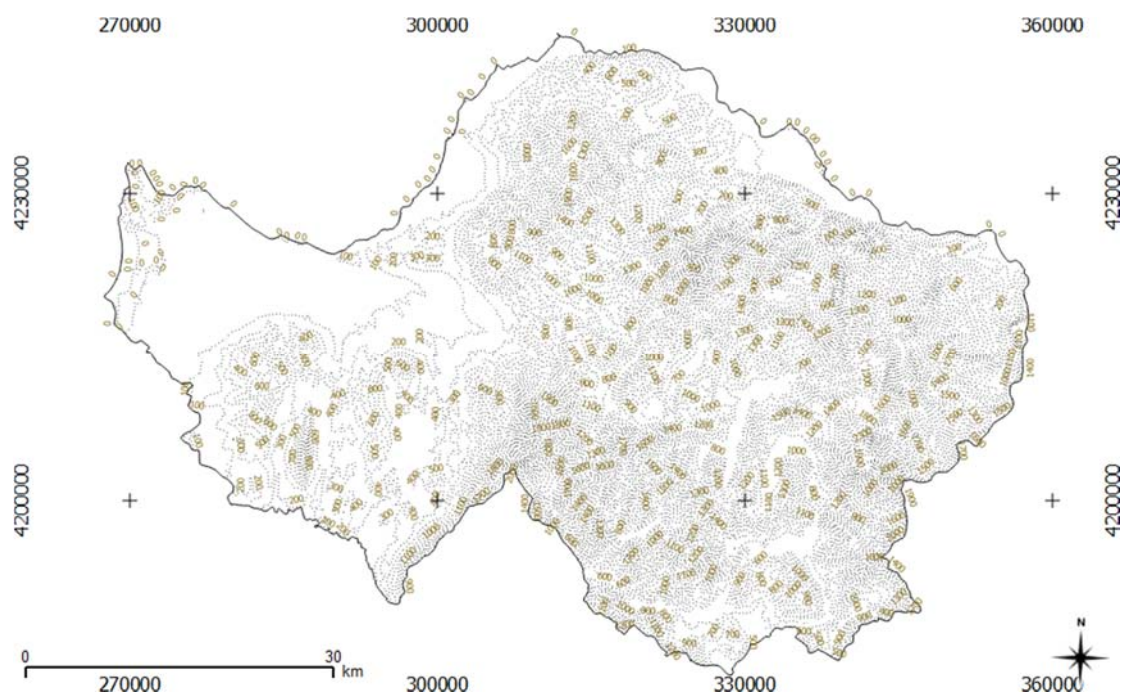
Στη συνέχεια παραθέτονται σχήματα (Εικόνα 15 ως Εικόνα 20) των θεματικών επιπέδων (layers) που εισήχθησαν σε περιβάλλον ΓΣΠ και αποτυπώνουν τον «πραγματικό κόσμο» της περιοχής μελέτης.



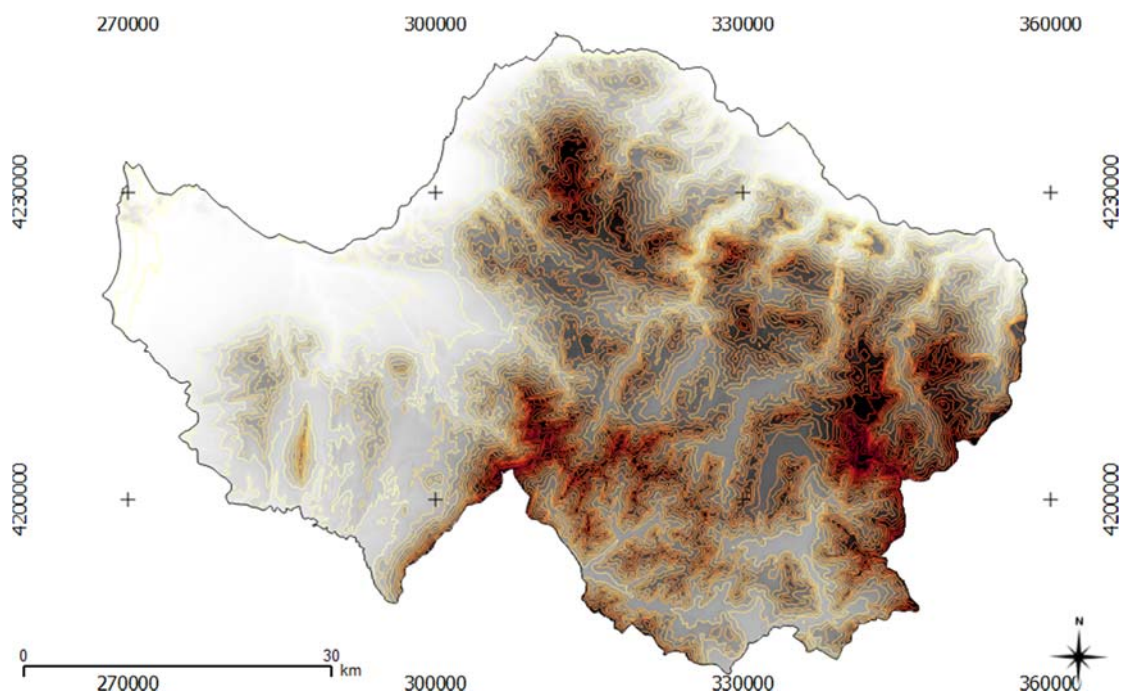
Εικόνα 15: Το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του νομού Αχαΐας. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα απεικονίζονται με σκουρόχρωμες διαβαθμίσεις του γκρι.



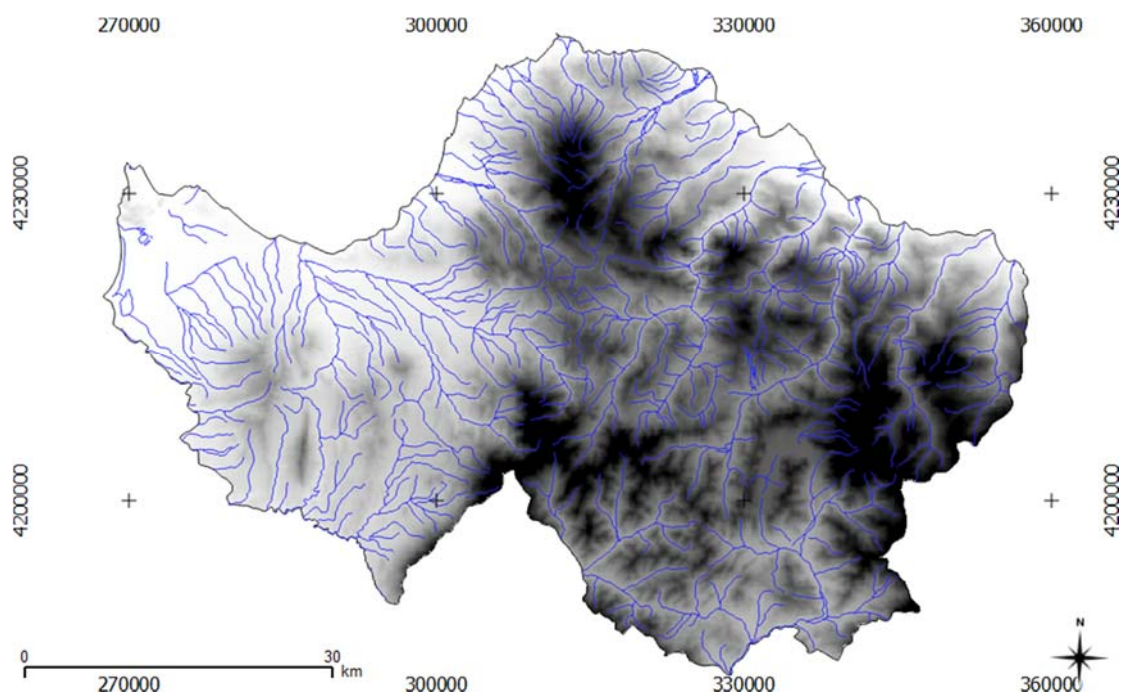
Εικόνα 16: Θεματικό Επίπεδο με τις οικιστικές συγκεντρώσεις (μαύρα σημεία), το οδικό δίκτυο (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και τις λίμνες (μπλε σκίαση) του νομού Αχαΐας.



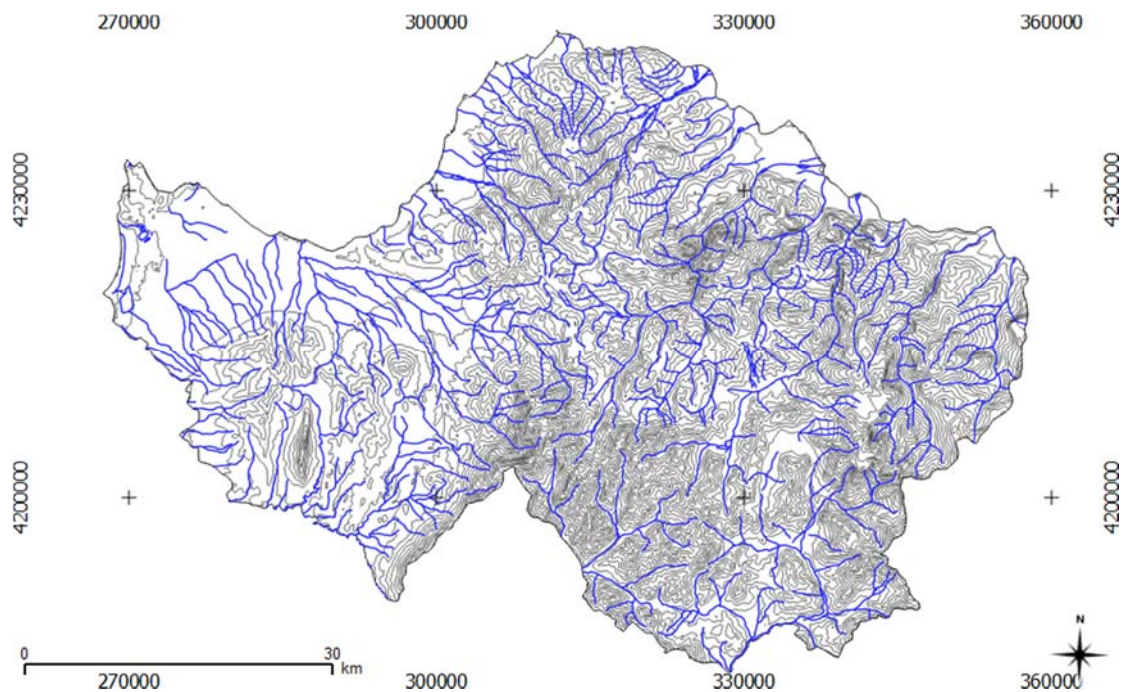
Εικόνα 17: Οι Ισοϋψείς (Contours) του νομού Αχαΐας με τις αντίστοιχες τιμές τους.



Εικόνα 18: Το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του νομού Αχαΐας με τις Ισοϋψείς (Contours).



Εικόνα 19: Το αρχείο DEM του νομού Αχαΐας με το υδρογραφικό του δίκτυο (μπλε γραμμή).



Εικόνα 20: Οι ισοϋψείς του νομού Αχαΐας και η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου.

3.2.2 Δορυφορικές Φωτογραφίες Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Το πρόγραμμα Landsat είναι μία σειρά εν εξελίξει δορυφόρων που αναπτύχθηκαν σε συνεργασία από την United States Geological Survey (USGS) και τη National Aeronautics and Space Administration (NASA). Αποτελεί την πιο μακροχρόνια επιχείρηση για την απόκτηση δορυφορικών φωτογραφιών της Γης, ξεκίνησε στις 23 Ιουλίου 1972 και παραμένει ενεργό ως τις μέρες μας, ενώ παράλληλα προσφέρει το μεγαλύτερο διαρκές διαστημικό αρχείο της Γης που υπάρχει.

Ο αισθητήρας Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) του δορυφόρου Landsat 7, λαμβάνει φωτογραφίες της Γης σχεδόν αδιάλειπτος από τον Ιούλιο του 1999 μέχρι σήμερα, έχοντας κύκλο επανάληψης 16 ημερών (Πίνακας 3). Είναι ένας πολυφασματικός σαρωτής σχεδιασμένος να καταγράφει ακτινοβολία σε 8 κανάλια, στο ορατό, στο κοντινό υπέρυθρο, στο μέσο υπέρυθρο και στο μακρινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Η χωρική διακριτική ικανότητα των καναλιών 1 έως 5 και 7 είναι 30 μέτρα. Το κανάλι 6 έχει χωρική διακριτική ικανότητα 60 μέτρων και το πανχρωματικό κανάλι 8 έχει χωρική διακριτική ικανότητα 15 μέτρων (Πίνακας 4). Οι δορυφορικές φωτογραφίες του Landsat 7 (Εικόνα 22) αναφέρονται στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς (WRS) 2, το οποίο είναι ένα παγκόσμιο σύστημα σημειογραφίας για δεδομένα Landsat. Δίνει τη δυνατότητα σε έναν χρήστη να διερευνήσει δορυφορικές φωτογραφίες σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου, καθορίζοντας ένα ονομαστικό κέντρο σκηνών που ορίζονται από τους αριθμούς PATH και ROW (Εικόνα 23).

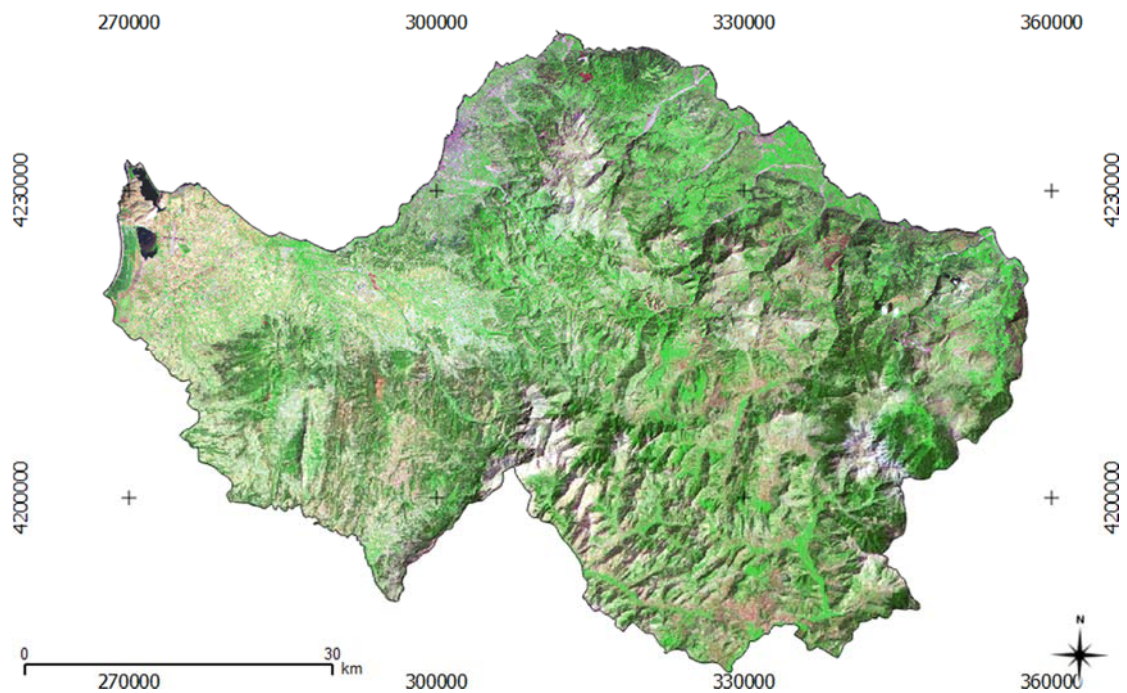
Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ETM+ του δορυφόρου Landsat 7.

Πηγή: NASA 2018. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/>.

ETM+ Technical Specifications	
Sensor Type	Opto-Mechanical
Spatial Resolution	30 m (120 m – thermal, 15 m pan)
Spectral Range	0.45 – 12.5 μm
Number of Bands	8
Temporal Resolution	16 days
Image Size	184 km X 185.2 km
Swath	184 km
Programmable	Yes

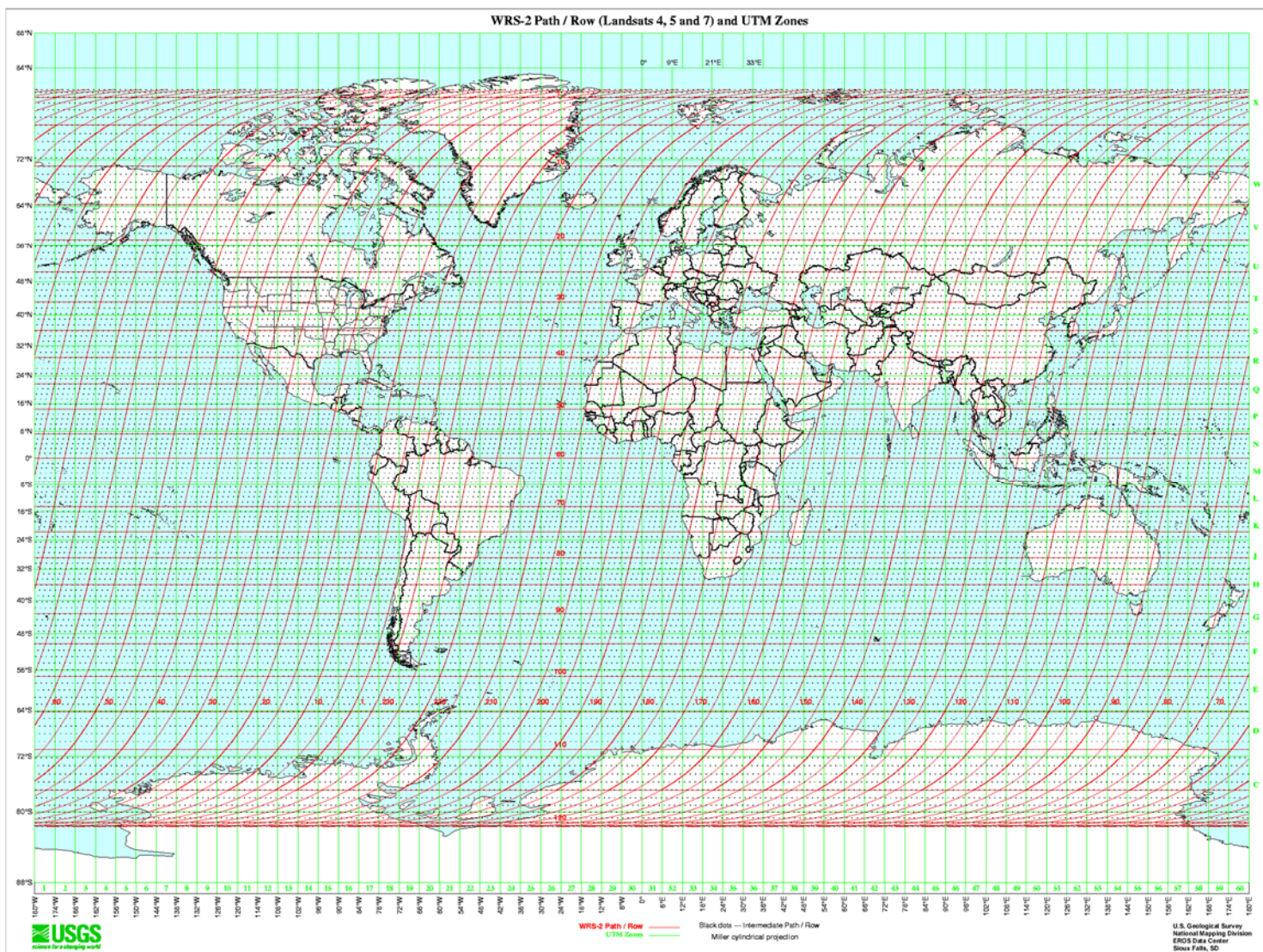
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών του αισθητήρα ETM+ του δορυφόρου Landsat 7.
 Πηγή: USGS 2018. URL: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites-0?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products.

Enhanced Thematic Mapper (ETM+)			
Φασματικά Κανάλια	Μήκος Κύματος	Διακριτική Ικανότητα	Εφαρμογές
Band 1 - Blue	0,45 – 0,52 μm	30 m	Βυθομετρική χαρτογράφηση, διάκριση εδαφών από βλάστηση και φυλλοβόλων από κωνοφόρων ειδών
Band 2 - Green	0,52 – 0,60 μm	30 m	Αναδεικνύει το μέγιστο βλάστησης για εκτίμηση της ευρωστίας της
Band 3 - Red	0,63 – 0,69 μm	30 m	Διάκριση φυτικών ειδών
Band 4 - Near Infrared	0,76 – 0,90 μm	30 m	Περιεκτικότητα βιομάζας υδάτινων μαζών και ακτογραμμές
Band 5 - Short-wave Infrared	1,55 – 1,75 μm	30 m	Εκτίμηση υγρασίας βλάστησης και εδάφους, διαπερνά λεπτά νέφη
Band 6 - Thermal Infrared	10,41 – 12,5 μm	120 m	Θερμική χαρτογράφηση και εκτίμηση υγρασίας εδάφους
Band 7 - Short-wave Infrared	2,08 – 2,35 μm	30 m	Καταγραφή υδροθερμικής εξαλλοίωσης που συνδέεται με κοιτάσματα ορυκτών
Band 8 - Panchromatic	0,52 – 0,9 μm	15 m	Πιο ευκρινής εικόνα



Εικόνα 22: Πολυφασματική δορυφορική φωτογραφία του Landsat 7 (ETM+) χωρικής ανάλυσης 30 m του νομού Αχαΐας σε απόδοση έγχρωμου σύνθετου (R,G,B, = 7,4,2).

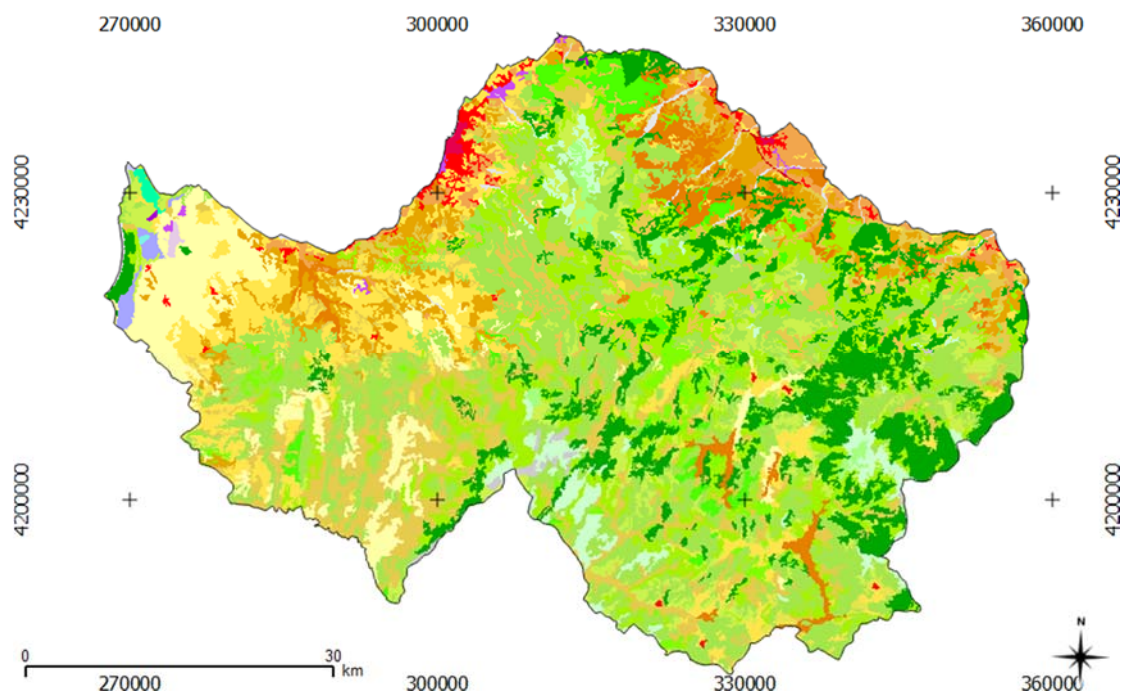
Πηγή: LandInfo 2000. URL: <https://library.mcmaster.ca/maps/geospatial/geocover-landsat-7>.



Εικόνα 23: Το Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς (WRS) 2 για τους δορυφόρους Landsat 4,5 και 7 όπως ορίζεται από τους αριθμούς PATH / ROW.
 Πηγή: NASA 2018. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-worldwide-reference-system/>.

3.2.3 Θεματικός Χάρτης καλύψεων/χρήσεων γης CORINE Land Cover (CLC)

Η εφαρμογή του προγράμματος «Συντονισμός Πληροφοριών για το Περιβάλλον» (Coordination of Information on the Environment, CORINE) ξεκίνησε στις 27 Ιουνίου 1985 στην τότε Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα, ΕΟΚ), ως μία προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Περιβάλλοντος (European Environment Agency, EEA) να κατανοήσει τη μεταβολή των χαρακτηριστικών της βιόσφαιρας και να καθορίσει μία ενιαία ευρωπαϊκή στρατηγική προστασίας του περιβάλλοντος για όλα τα κράτη μέλη. Το έργο (project) Land Cover αποτέλεσε μέρος του προγράμματος CORINE και αποσκοπούσε στη δημιουργία μίας βάσης δεδομένων θεματικών χαρτών (CORINE Land Cover, CLC) οι οποίοι προέρχονταν από την ερμηνεία δορυφορικών εικόνων στο ΓΣΠ ArcGIS της ESRI. Σήμερα (από το 2000 και μετά) το πρόγραμμα είναι σε κατάσταση Αναθεώρησης / Ενημέρωσης / Βελτιστοποίησης της βάσης δεδομένων του, ενώ πλέον έχει επεκταθεί και σε χώρες της βορείου Αφρικής (Μαρόκο, Τυνησία). Το σύστημα ταξινόμησης (Πίνακας 5) είναι σχετικά απλό και περιλαμβάνει 5 κύριες 45 δευτερεύοντες (υποδιαίρεσεις) κατηγοριοποιήσεις κάλυψης γης (Μηλιαρέσης 2003). Στην εικόνα 24 που ακολουθεί παρατίθεται ο θεματικός χάρτης CORINE Land Cover του νομού Αχαΐας.





Εικόνα 24: Ο θεματικός χάρτης καλύψεων γης CORINE Land Cover (CLC) του νομού Αχαΐας. Πηγή: European Environment Agency 1995. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.

Πίνακας 5: Οι κατηγοριοποιήσεις του συστήματος γεωταξινόμησης καλύψεων γης CORINE. Πηγή: European Environment Agency 2006. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2006-by-country-1/legend/fancybox.html>. (Απόδοση στα ελληνικά του συγγραφέα).





Κατηγορίες Corine Land Cover (CLC)

1. Τεχνητές επιφάνειες




1.1 Αστικός ιστός

-  1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός
-  1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός



1.2 Βιομηχανικές-εμπορικές ζώνες και δίκτυα μεταφορών

-  1.2.1 Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
-  1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα & συσχετισμένη γη
-  1.2.3 Ζώνες λιμένων
-  1.2.4 Αεροδρόμια

1.3 Ορυχεία, χώροι απορρίψεως απορριμμάτων & χώροι οικοδόμησης




-  1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών
-  1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων
-  1.3.3 Χώροι οικοδόμησης

1.4 Τεχνητές μη γεωργικές ζώνες πράσινου




-  1.4.1 Περιοχές αστικού πράσινου
-  1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής

2. Γεωργικές περιοχές

2.1 Αρόσιμη γη

-  2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
-  2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη
-  2.1.3 Ορυζώνες





2.2 Μόνιμες καλλιέργειες

-  2.2.1 Αμπελώνες
-  2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα & φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
-  2.2.3 Ελαιώνες

2.3 Λιβάδια




-  2.3.1 Λιβάδια

2.4 Ετερογενείς γεωργικές περιοχές





-  2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες
-  2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες
-  2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
-  2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές

3. Δάση και ημι-φυσικές περιοχές






3.1 Δάση

-  3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων
-  3.1.2 Δάσος κωνοφόρων
-  3.1.3 Μικτό δάσος

3.2 Συνδυασμοί θαμνώδους ή/και πωύδους βλάστησης



-  3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι
-  3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι
-  3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση
-  3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις

3.3 Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστησης




-  3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
-  3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι
-  3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
-  3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις
-  3.3.5 Παγετώνες και ανέασ χιόνι

4. Υγρότοποι

4.1 Υγρότοποι ενδοχώρας



-  4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα
-  4.1.2 Τυρφώνες

4.2 Παραθαλάσσιοι υγρότοποι




-  4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι
-  4.2.2 Αλυκές
-  4.2.3 Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροϊκά ύδατα

5. Υδάτινες επιφάνειες

5.1 Χερσαία ύδατα

-  5.1.1 Υδατορρεύματα
-  5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος

5.2 Θαλάσσια ύδατα

-  5.2.1 Παράκτες λιμνοθάλασσες
-  5.2.2 Εκβολές ποταμών
-  5.2.3 Θάλασσες και ωκεανοί

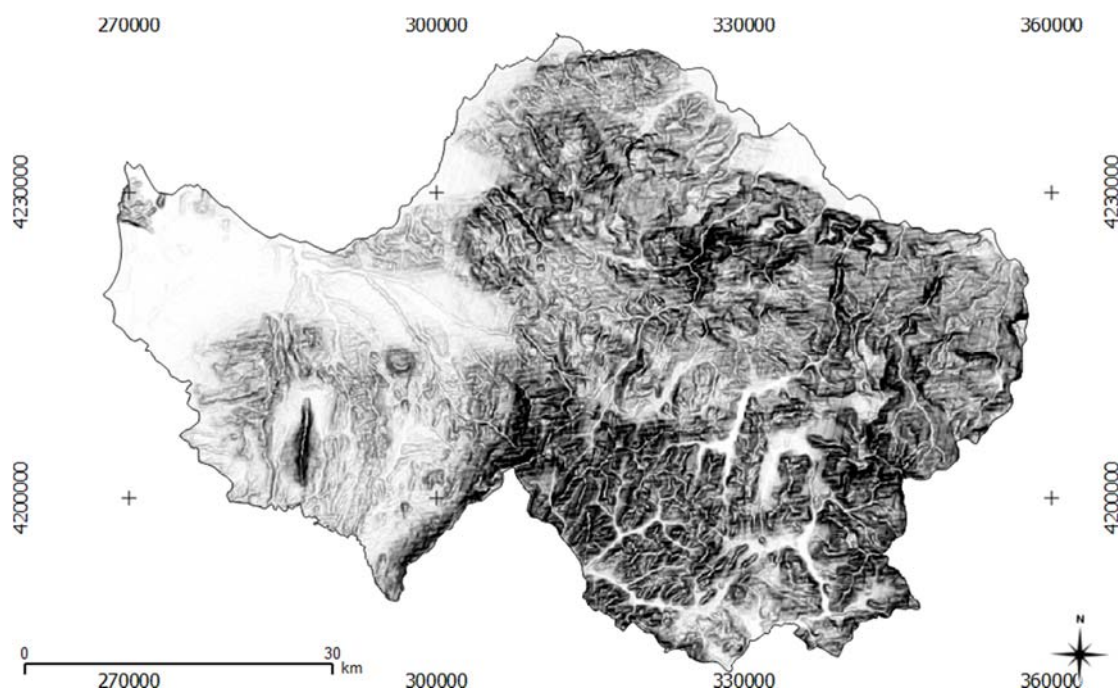
3.2.4 Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά

Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά παρέχουν αριθμητικές περιγραφές εδάφους που ταξινομούνται ως πρωτεύοντα και δευτερεύοντα χαρακτηριστικά (Moore et al. 1998). Επίσης, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μπορούν να εξαχθούν από ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (DEM), σε ένα μοντέλο γεωμορφολογικών και υδρολογικών διεργασιών και να προβλεφθεί η χωρική κατανομή των ιδιοτήτων του εδάφους καθώς και η τοπογραφική θέση των ειδών εντός μιας περιοχής (Gallant and Wilson 2000, Coops et al. 1998, Blaszczyński 1997, Zevenbergen and Thorne 1987).

3.2.4.1 Κλίση (Slope, S)

Στα ΓΣΠ τα εργαλεία υπολογισμών κλίσης βασισμένα σε πλεγματικά μοντέλα (raster) υπολογίζουν το ρυθμό μεταβολής μεταξύ κάθε κελιού και των γειτόνων του. Η κλίση στο raster εξόδου υπολογίζεται είτε ως ποσοστό (σε Βαθμούς Κλίσης στο διάστημα 0% - 100%) είτε εκφράζεται ως γωνιακό μέγεθος (σε Μοίρες στο διάστημα 0° - 90°) (Εικόνα 25).

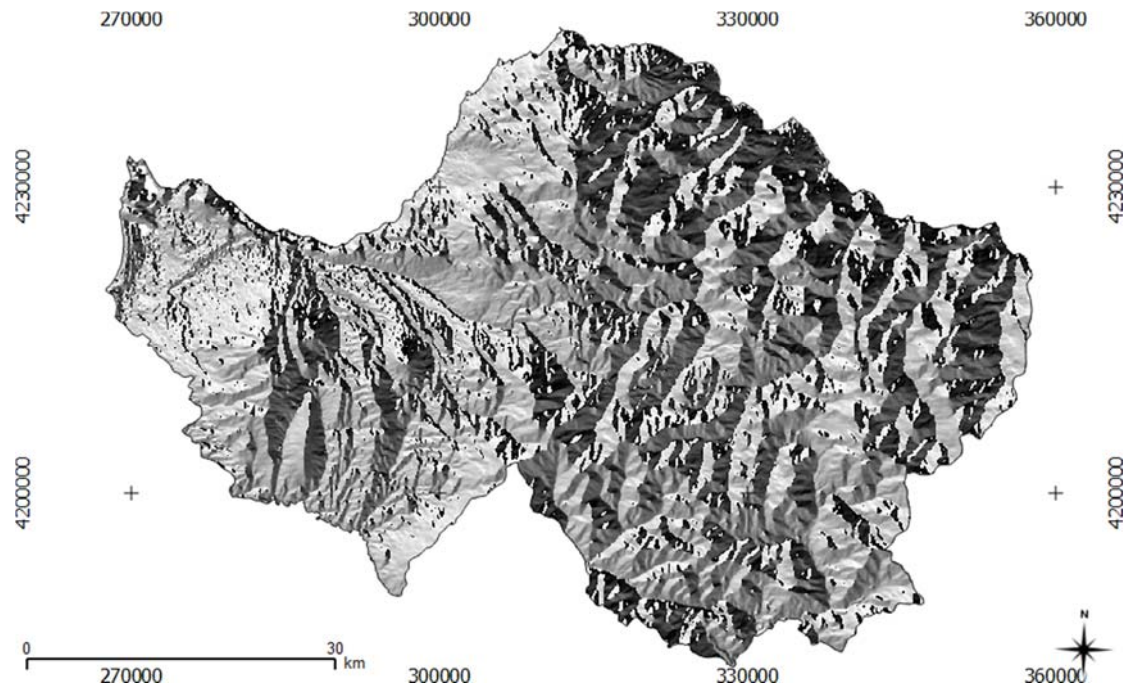
Το μέτρο της Κλίσης προσδιορίζει την επιδεκτικότητα της επιφάνειας στη διάβρωση, ως ένα βαθμό προσδιορίζει τη ταχύτητα απορροής καθώς και τη βατότητα της επιφάνειας (Minar and Evans 2008).



Εικόνα 25: Η Κλίση της επιφάνειας όπως αποτυπώνεται στο αρχείο DEM του νομού Αχαΐας. Οι μεγαλύτερες κλίσεις παρουσιάζονται με σκουρόχρωμες διαβαθμίσεις του γκρι.

3.2.4.2 Διάνυσμα Κλίσης (Aspect)

Το διάνυσμα Κλίσης (Εικόνα 26) προσδιορίζει την διεύθυνση (από 0° – 360°) προς την οποία κλίνει η επιφάνεια σε ένα σημείο του ΨΥΜΕ (Romstad and Etzelmüller 2009). Χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί η ηλιακή έκθεση ενός εικονοστοιχείου ανά γεωγραφικό πλάτος, προσδιορίζει την κατεύθυνση της απορροής και των ροών βαρύτητας (κατολισθήσεις / λασπορροές).



Εικόνα 26: Το διάνυσμα της Κλίσης.

3.2.4.3 Χάρτης Σκιασμένου Ανάγλυφου (Hillshade)

Ο χάρτης Σκιασμένου Ανάγλυφου (Εικόνα 27) σχηματίζεται αν υποθεθεί ότι η επιφάνεια ανακλά ίσες ποσότητες φωτός προς όλες τις διευθύνσεις (Lambertian reflector), τότε σε κάθε σημείο η τυποποιημένη ανακλαστικότητα (normalized reflectance) προσδιορίζεται από τη σχέση που ακολουθεί (Reichenbach et al. 1993):

$$R = \frac{1 + p_o * p + q_o * q}{\sqrt{1 + P^2 + q^2} + \sqrt{1 + p_o^2 + q_o^2}}$$

Με εύρος τιμών στο διάστημα [0,1]

Όπου: p και q οι μερικές παράγωγοι ως προς τις διευθύνσεις X και Y αντίστοιχα,

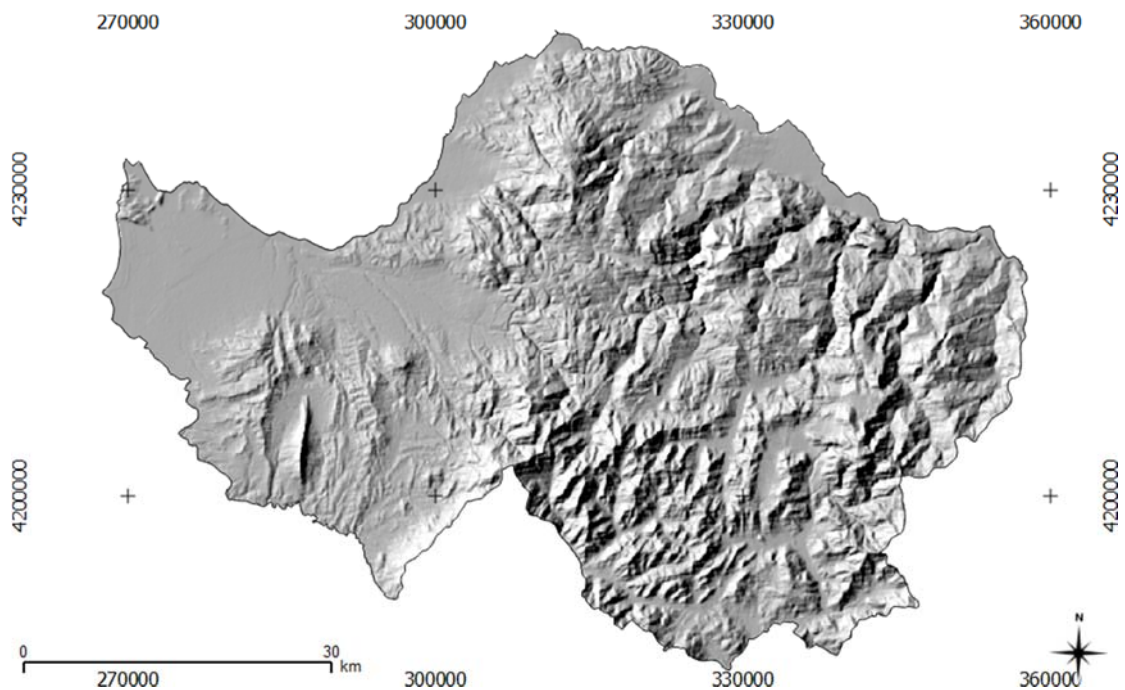
$$P_0 = -\sin(\varphi) * \epsilon\varphi(\theta)$$

$$q_0 = -\eta\mu(\varphi) * \epsilon\varphi(\theta)$$

φ = Το αζιμούθιο του ήλιου (η μέτρηση γίνεται από την ανατολή και αντίστροφα με την φορά των δεικτών του ρολογιού και το εύρος των τιμών είναι $0^\circ - 360^\circ$).

θ = Το ύψος του ηλίου από την κατακόρυφο με εύρος τιμών $0^\circ - 90^\circ$.

Χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των σκιάσεων και την προσομοίωση των συνθηκών φωτισμού μιας δορυφορικής εικόνας που έχει ληφθεί συνήθως 09:00 – 10:00 το πρωί (την ώρα επίσκεψης μας στην περιοχή για εργασίες πεδίου) (Μηλιαρέσης 2006).



Εικόνα 27: Ο χάρτης Σκιασμένου Ανάγλυφου (Hillshade) για αζιμούθιο 300° και ύψος 40° .

3.2.5 Επιλεγμένοι Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιλεγμένοι γεωμορφολογικοί και υδρολογικοί δείκτες που συσχετίζονται με συγκεκριμένες φυσικές / βιοφυσικές συνθήκες και πιθανόν να έχουν εφαρμογή στο ερευνητικό σκέλος (θεματικό πεδίο) της παρούσας διατριβής.

Η χαρτογραφική παράθεση των δεικτών γίνεται στο Παράρτημα Α ενώ στον πίνακα 6 αποδίδεται η ορολογία των δεικτών στην ελληνική γλώσσα.

Πίνακας 6: Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες που χρησιμοποιούνται στη διατριβή. (Απόδοση στα ελληνικά του συγγραφέα).

Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες		
Αγγλική Ορολογία	Συντομογραφία	Ελληνική Ορολογία
Landform Classification	LC	Δείκτης Ταξινόμησης Εδάφους
Topographic Position Index	TPI	Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης
Openness Positive	OP	Δείκτης Θετικής Ανοικτότητας
Openness Negative	ON	Δείκτης Αρνητικής Ανοικτότητας
Valley Depth	VD	Δείκτης Τοπικό Βάθος Κοιλάδων
Normalized Height	HNo	Δείκτης Κανονικοποιημένο Ύψος
Standardized Height	HSt	Δείκτης Τυποποιημένο Ύψος
Relative Slope Position	RSP	Δείκτης Σχετική Θέση ως προς την Κλίση
mid Slope Position	HmA	Δείκτης Θέση Μέσης Κλίσης
LS Factor	LS	Δείκτης Συντελεστή Μήκους (L) και Κλίσης (S)
Slope Height	SH	Δείκτης Ύψος Κλίσης
Plan Curvature	PLC	Δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας
Profile Curvature	PFC	Δείκτης Κατατομή Καμπυλότητας
Convergence Index	C	Δείκτης Σύγκλισης Απορροής
Downslope Curvature	CD	Δείκτης Καμπυλότητας Κατωφέρειας
Upslope Curvature	UC	Δείκτης Καμπυλότητας Ανωφέρειας
Channel Network Distance	CND	Δείκτης Απόστασης Δικτύου Καναλιών
Flow Path Length	FPL	Δείκτης Μήκους Διαδρομής Ροής
Mass Balance Index	MBI	Δείκτης Ισορροπίας Μάζας
Morphometric Protection Index	MPI	Δείκτης Μορφομετρικής Προστασίας
Topographic Wetness Index	TWI	Δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας

Στον πίνακα 7 αποτυπώνεται η Ταξινόμηση Εδάφους (Landform Classification) όπως αυτή διαρθρώνεται για το λογισμικό περιβάλλον του SAGA GIS, βάση της οποίας θα γίνει και η ταξινόμηση των τάξεων (clusters) που θα προκύψουν από τις καλύψεις γης της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 7: Η Ταξινόμηση Εδάφους (Landform Classification) στο λογισμικό περιβάλλον του SAGA GIS.

Πηγή: Geomatics and Landscape Ecology Research Laboratory 2016.

URL: http://gracilis.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Exploring_a_subset_of_SAGA%27s_Terrain_Analysis_tools.

A/A	Color (Χρώμα)	Name (Όνομα)	Description (Περιγραφή)	Minimum (Ελάχιστο)	Maximum (Μέγιστο)
1		Streams	Canyons, Deep	0.000000	0.000000
2		Midslope Drainage	Midslope Drainage	1.000000	1.000000
3		Upland Drainage	Upland Drainage	2.000000	2.000000
4		Valleys	U-Shaped Valley	3.000000	3.000000
5		Plains	Plains	4.000000	4.000000
6		Open Slopes	Open Slopes	5.000000	5.000000
7		Upper Slopes	Upper Slopes	6.000000	6.000000
8		Local Ridges	Local Ridges, Hill	7.000000	7.000000
9		Midslope Ridges	Midslope Ridges	8.000000	8.000000
10		High Ridges	Mountain Top	9.000000	9.000000

3.2.5.1 Μεταβλητές πεδίου με μικρή συσχέτιση μεταξύ τους

Ο Συντελεστής Συσχέτισης του Pearson (Pearson Correlation Coefficient) υποδεικνύει εάν, σε τι βαθμό και με ποιο τρόπο συσχετίζονται δύο μεγέθη, δηλαδή εάν οι τιμές ενός μεγέθους επηρεάζονται από τις τιμές ενός άλλου μεγέθους.

Οι Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα αποτελούν ένα σύνολο μεταβλητών πεδίου με κάποια μεταξύ τους συσχέτιση. Ο υπολογισμός των μεταβλητών πεδίου θα καθοριστεί από τον προσδιορισμό του τυποποιημένου εσωτερικού γινομένου των διανυσμάτων για όλα τα δυνατά ζεύγη καλύψεων γης (Miliareisis 2009).

Αφού υπολογιστεί ο πίνακας συσχέτισης όλων των τοπογραφικών και βιοφυσικών παραμέτρων, αφαιρούνται οι παράμετροι που παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους έτσι ώστε να προκύψει ένα υποσύνολο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και θα αναλυθεί με τη μέθοδο της Εξερευνητικής Ανάλυσης Συσσωρεύσεων (K-Means Cluster Analysis).

Η συγκέντρωση (άθροισμα) K-Μέσων είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση συσσώρευσης, ειδικά στην εξόρυξη δεδομένων και την στατιστική.

Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση ομάδων στα δεδομένα, με τον αριθμό των ομάδων που αντιπροσωπεύει η μεταβλητή K. Ο αλγόριθμος λειτουργεί επαναληπτικά για να εκχωρήσει κάθε σημείο δεδομένων σε μία από τις ομάδες K με βάση τα χαρακτηριστικά που παρέχονται (MacQueen 1967). Τα σημεία δεδομένων συγκεντρώνονται βάσει ομοιότητας χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ομαδοποίησης K-Μέσων είναι:

- (i) Τα Κεντροειδή (Centroids) των συστάδων K, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισήμανση νέων δεδομένων και
- (ii) Ετικέτες για τα δεδομένα της κατάρτισης, όπου κάθε σημείο δεδομένων αντιστοιχεί σε ένα ενιαίο σύμπλεγμα.

Έπειτα από την αφαίρεση των παραμέτρων που έχουν μεγάλη συσχέτιση προκύπτει ο Πίνακας 8 στον οποίο απεικονίζεται η συσχέτιση του υποσυνόλου των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 8: Τυποποιημένα Εσωτερικά Γινόμενα (Συντελεστής Συσχέτισης).

Cross Correlation	CC	CND	ProfC	Lsf	VD	DC	CI	FPL	PlanC	PO	TWI	TCA	MBI	UC
Channel network distance	CND	1	0,42	0,36	-0,28	0,13	0,26	0,48	0,30	-0,09	-0,46	-0,10	0,22	0,44
Profile Curvature	ProfC	0,42	1	-0,10	-0,45	0,50	0,37	0,17	0,51	0,39	-0,29	-0,12	0,37	0,55
LS-Factor	Lsf	0,36	-0,10	1	0,21	-0,48	-0,08	0,23	-0,12	-0,49	-0,34	0,01	-0,19	0,14
Valley Depth	VD	-0,28	-0,45	0,21	1	-0,33	-0,37	-0,07	-0,47	-0,39	0,43	0,12	-0,30	-0,44
Downslope Curvature	DC	0,13	0,50	-0,48	-0,33	1	0,42	0,02	0,58	0,69	-0,22	-0,14	0,46	0,52
Convergence Index	CI	0,26	0,37	-0,08	-0,37	0,42	1	0,12	0,68	0,28	-0,47	-0,22	0,34	0,44
Flow Path Length	FPL	0,48	0,17	0,23	-0,07	0,02	0,12	1	0,07	-0,06	-0,27	-0,09	0,06	0,17
Plan curvature	PlanC	0,30	0,51	-0,12	-0,47	0,58	0,68	0,07	1	0,34	-0,41	-0,11	0,45	0,61
Positive Openness	PO	-0,09	0,39	-0,49	-0,39	0,69	0,28	-0,06	0,34	1	0,12	-0,07	0,44	0,14
Topographic Wetness Index	TWI	-0,46	-0,29	-0,34	0,43	-0,22	-0,47	-0,27	-0,41	0,12	1	0,40	-0,41	-0,51
Total catchment area	TCA	-0,10	-0,12	0,01	0,12	-0,14	-0,22	-0,09	-0,11	-0,07	0,40	1	-0,11	-0,11
Mass Balance Index	MBI	0,22	0,37	-0,19	-0,30	0,46	0,34	0,06	0,45	0,44	-0,41	-0,11	1	0,76
Upslope Curvature	UC	0,44	0,55	0,14	-0,44	0,52	0,44	0,17	0,61	0,14	-0,51	-0,11	0,76	1

3.2.5.2 Εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων για επιλεγμένες μεταβλητές πεδίου

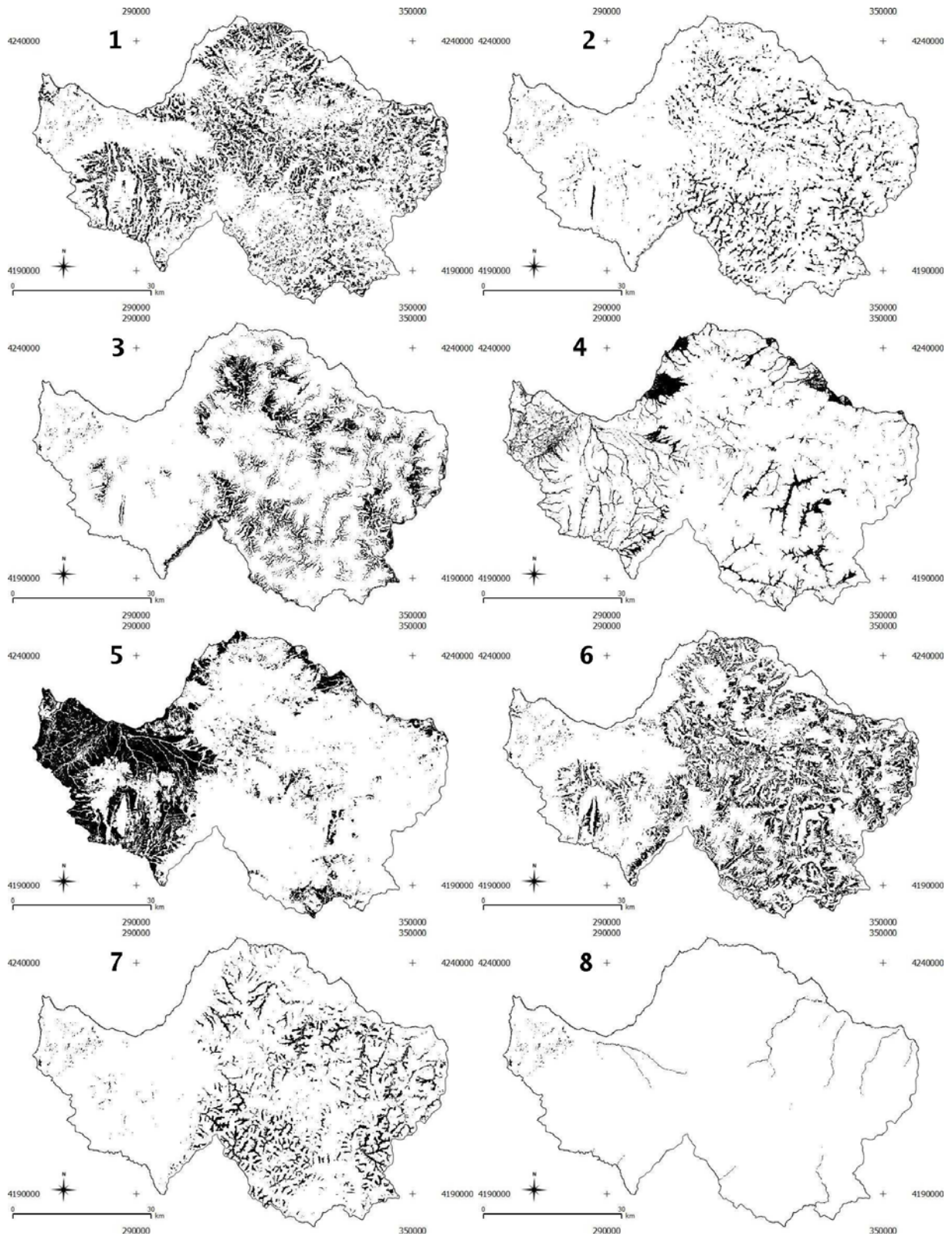
Όπως αναφέρει ο Mather (1987) ο αλγόριθμος των K-Μέσων (K-Means Clustering Algorithm) περιγράφει την ευκλείδεια απόσταση κάθε αντικειμένου από τα κέντρα των τάξεων, καθορίζοντας παράλληλα την ένταξη τους ή μη σε κάποια από τις τάξεις. Στο τέλος κάθε επανάληψης υπολογίζονται τα καινούργια κέντρα για κάθε τάξη. Το καινούργιο κέντρο προσδιορίζεται από τις τιμές των παραμέτρων του αντικειμένου που είναι εγγύτερα στο κέντρο βάρους των αντικειμένων που απαρτίζουν (κατά την τρέχουσα επανάληψη) την συγκεκριμένη τάξη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται επαναληπτικά μέχρι να μην παρατηρείται πλέον αλλαγή στα κέντρα βάρους.

Η εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων για το ερευνητικό σκέλος της διατριβής ολοκληρώθηκε σε 131 επαναλήψεις, έχοντας ως αποτέλεσμα την οργάνωση των καλύψεων γης σε 8 τάξεις με διαφορετική τοπογραφική αναπαράσταση (Εικόνα 28). Το κριτήριο σύγκλισης ήταν να σταματήσει η επαναληπτική διαδικασία όταν παρατηρηθεί μηδενική αλλαγή στα εκτιμώμενα κέντρα βάρους των κατηγοριών.

Μετά το τέλος των 131 επαναλήψεων οι καλύψεις γης ομαδοποιήθηκαν σε 8 τάξεις (clusters) ανάλογα με την τοπογραφική έκφραση. Τα κέντρα βάρους κάθε κατηγορίας ως προς την τυποποιημένη τοπογραφική έκφραση των διανυσμάτων δίνονται στον Πίνακα 9. Στην εικόνα 29 παρουσιάζεται η χαρτογραφική αναπαράσταση της χωρικής εξάπλωσης και για τις 8 τάξεις του Πίνακα 9.

Πριν την εφαρμογή της εξερευνητικής ανάλυσης συσσωρεύσεων, οι παράμετροι τυποποιήθηκαν έτσι ώστε να έχουν μέση τιμή 0 και μέγιστη 1 (δηλαδή για κάθε παράμετρο προσδιορίστηκε μέση τιμή και τυπική απόκλιση και αφαιρέθηκε η μέση τιμή από κάθε μέτρηση ενώ το αποτέλεσμα διαιρέθηκε με την τυπική απόκλιση).

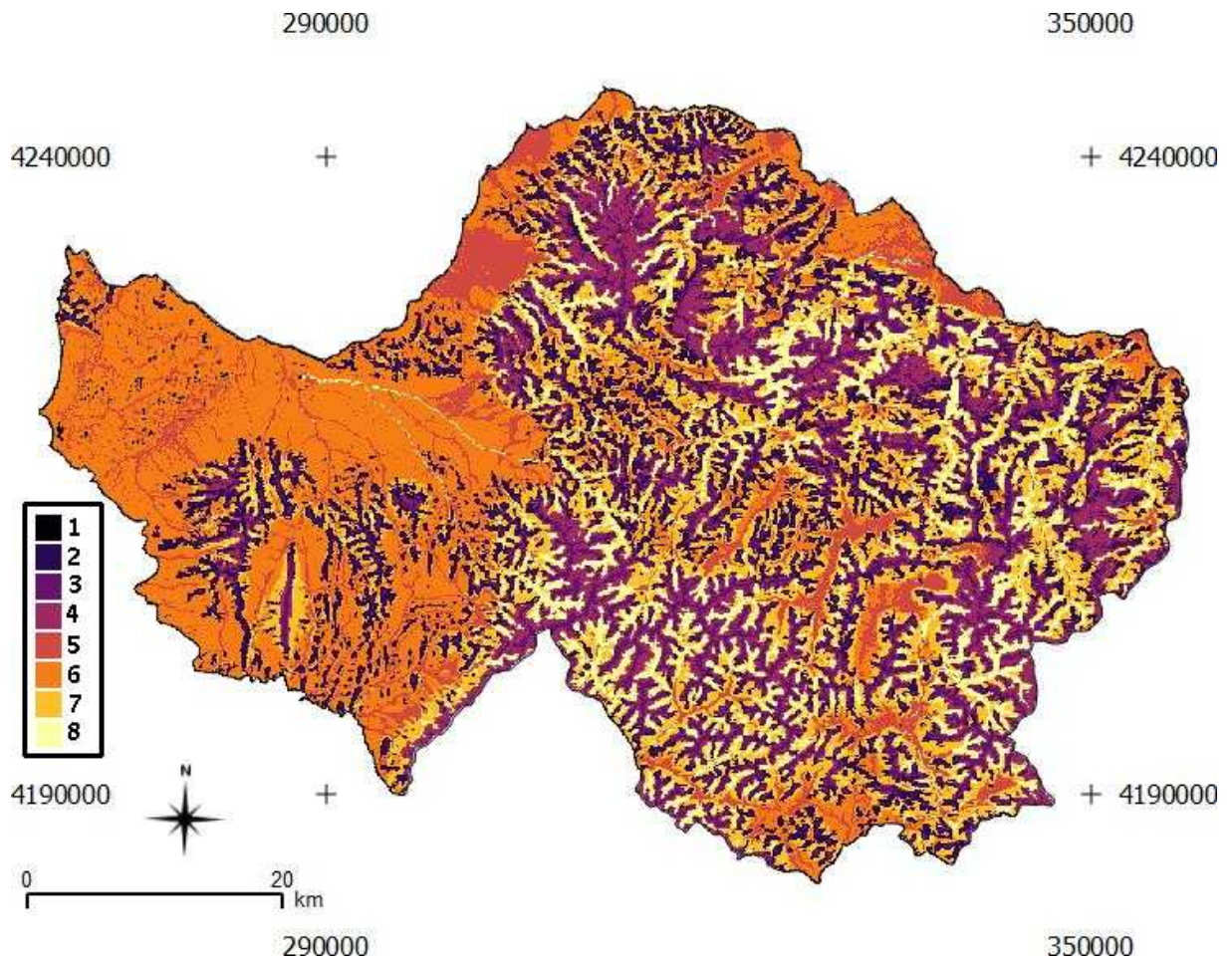
Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύχθηκε να δοθεί μεγάλο βάρος στον προσδιορισμό της ευκλείδειας απόστασης των μετρήσεων από τα κέντρα βάρους των τάξεων σε σχέση με τις παραμέτρους που παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος αριθμητικών τιμών.



Εικόνα 28: Η χαρτογραφική αποτύπωση της χωρικής εξάπλωσης για κάθε μία από τις 8 τάξεις (clusters) του Πίνακα 9.

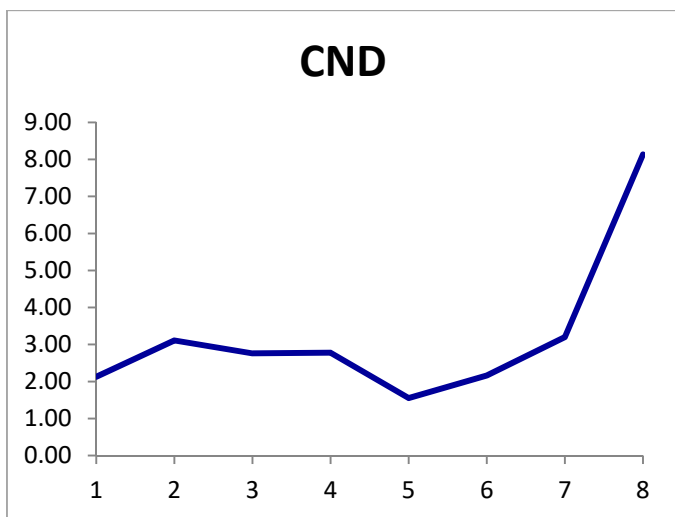
Πίνακας 9: Τα κέντρα βάρους (centroids) των 8 τάξεων που προέκυψαν από την εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων (Ανάλυση των K-Μέσων) και την από-κανονικοποίηση τους (Δηλαδή απεικονίζονται τα πραγματικά εύρη τιμών και όχι τα κανονικοποιημένα στα οποία βασίστηκε η πραγματική ανάλυση συσσωρεύσεων).

Cluster	Area %	CND	ProfC	Lsf	VD	DC	CI	FPL	PlanC	PO	TWI	TCA	MBI	UC
1	18,47	2,13	210,0	0,0003	4,3	61,1	-0,0247	6,0	2090	0,0005790	1,457	6,317	27624	0,1247
2	8,01	3,11	491,5	0,00144	5,8	39,4	0,2249	13,2	3247	0,0017090	1,469	5,503	17317	0,2666
3	11,94	2,76	454,2	0,00035	8,8	107,0	-0,2934	0,8	4369	0,0002310	1,375	6,609	62207	-0,0415
4	9,31	2,78	14,9	-0,00031	1,4	277,2	-0,1677	-11,0	1081	-0,0003110	1,464	13,195	5596135	-0,0499
5	22,65	1,55	34,8	-0,00011	1,2	108,1	-0,0957	0,6	991	-0,0000090	1,506	9,064	132949	-0,0086
6	20,37	2,16	143,3	-0,00063	6,6	174,6	-0,3339	-1,9	1871	-0,0002630	1,370	7,571	137054	-0,0632
7	8,87	3,20	177,9	-0,0011	10,8	284,6	-0,7854	-9,4	2450	-0,0013280	1,275	8,941	1866839	-0,2140
8	0,38	8,14	0,1	-0,00126	5,8	245,3	-0,6747	-24,1	293	-0,0008200	1,353	18,314	144024360	-0,1850

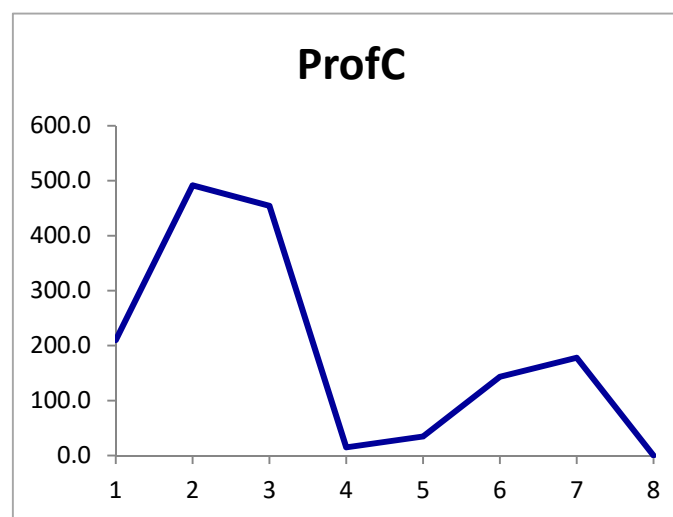


Εικόνα 29: Η συνολική χαρτογραφική αποτύπωση της χωρικής εξάπλωσης και για τις 8 τάξεις (clusters) του Πίνακα 9.

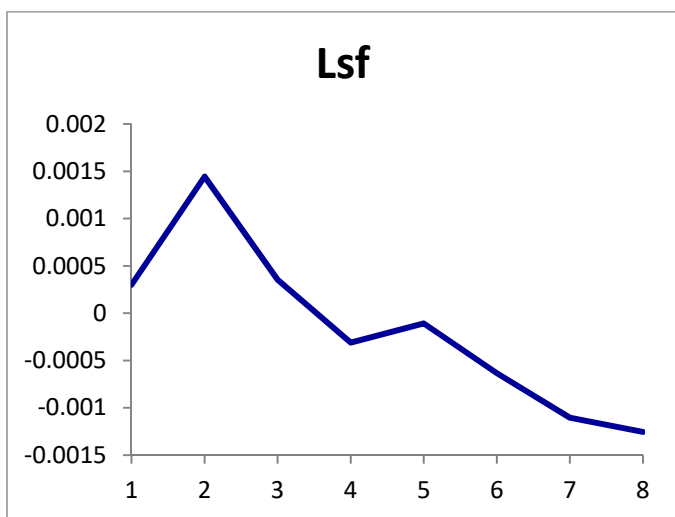
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κέντρα βάρους των 8 τάξεων (clusters) (Διάγραμμα 7 ως Διάγραμμα 19) ορισμένα ως προς κάθε παράμετρο ξεχωριστά, ενώ στο διάγραμμα 20 παρουσιάζεται το ποσοστό των καλύψεων γης σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).



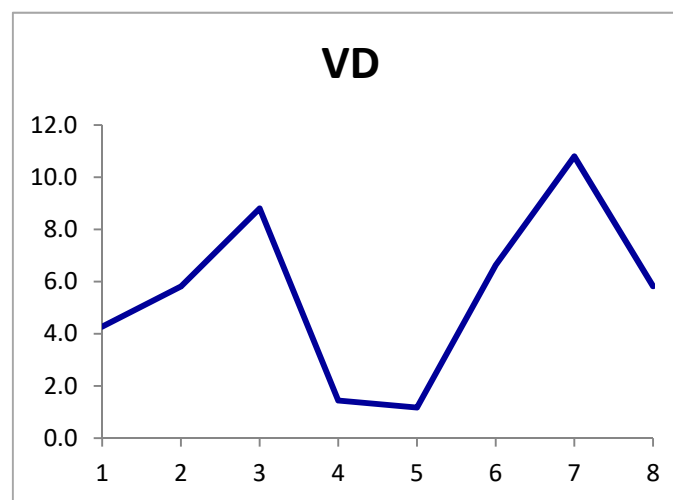
Διάγραμμα 7: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο CND (Πίνακας 9).



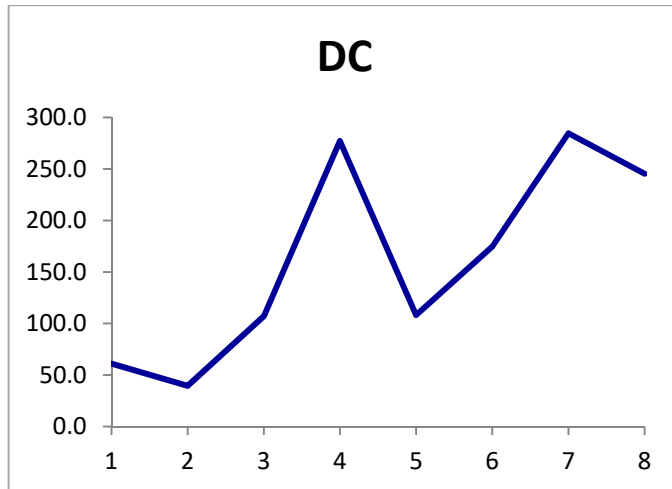
Διάγραμμα 8: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο ProfC (Πίνακας 9).



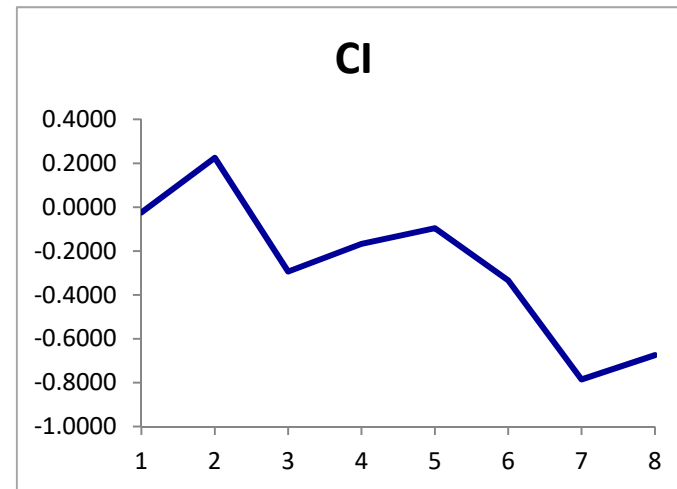
Διάγραμμα 9: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο Lsf (Πίνακας 9).



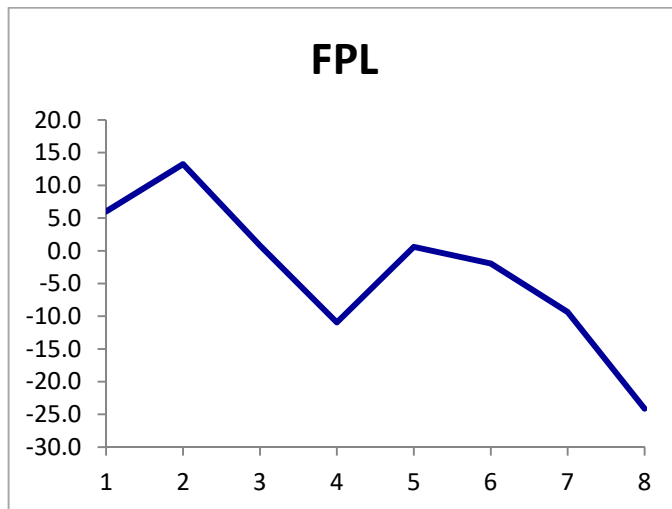
Διάγραμμα 10: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο VD (Πίνακας 9).



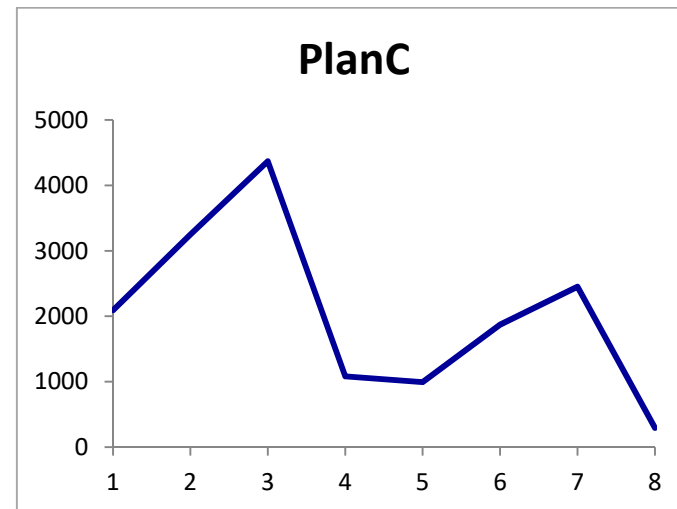
Διάγραμμα 11: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο DC (Πίνακας 9).



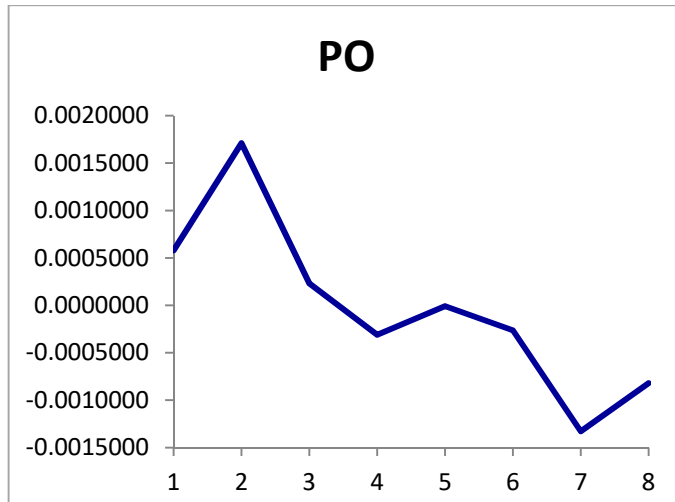
Διάγραμμα 12: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο CI (Πίνακας 9).



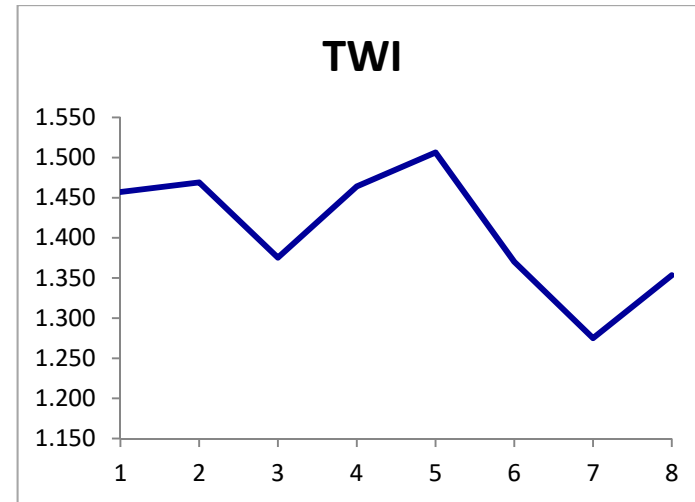
Διάγραμμα 13: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο FPL (Πίνακας 9).



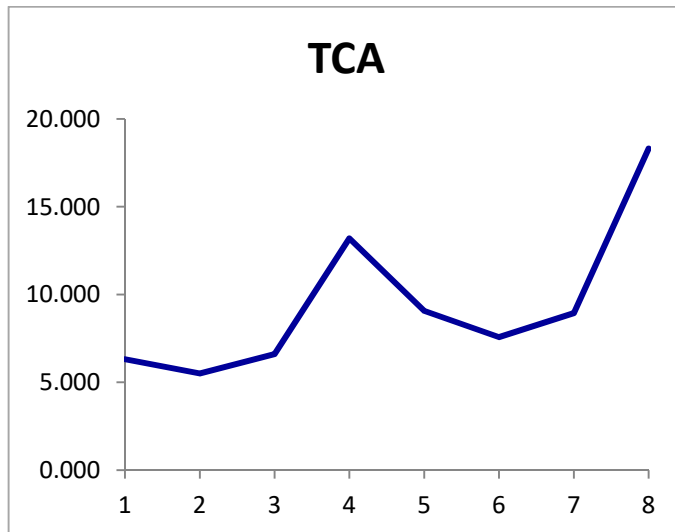
Διάγραμμα 14: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο PlanC (Πίνακας 9).



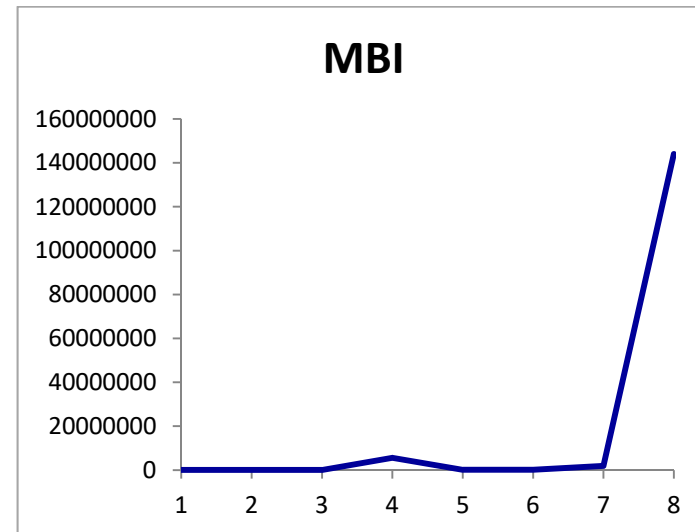
Διάγραμμα 15: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο PO (Πίνακας 9).



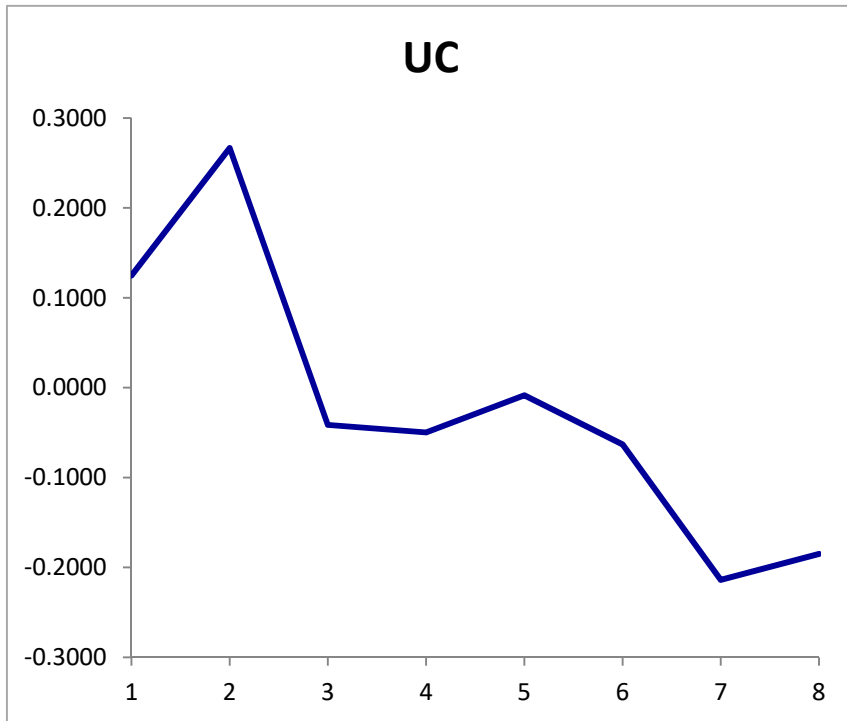
Διάγραμμα 16: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο TWI (Πίνακας 9).



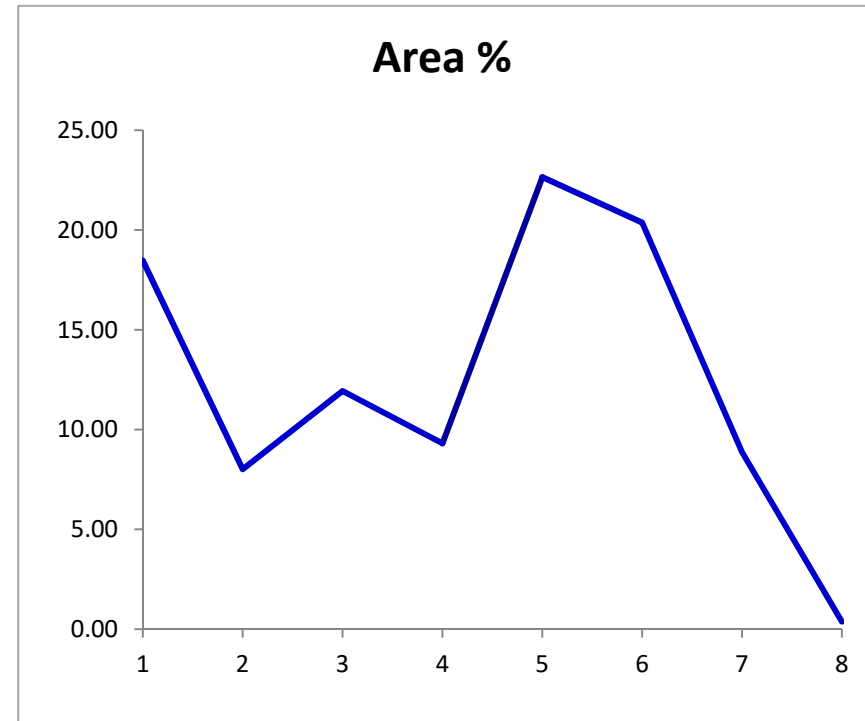
Διάγραμμα 17: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο TCA (Πίνακας 9).



Διάγραμμα 18: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο MBI (Πίνακας 9).



Διάγραμμα 19: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως προς την παράμετρο UC (Πίνακας 9).

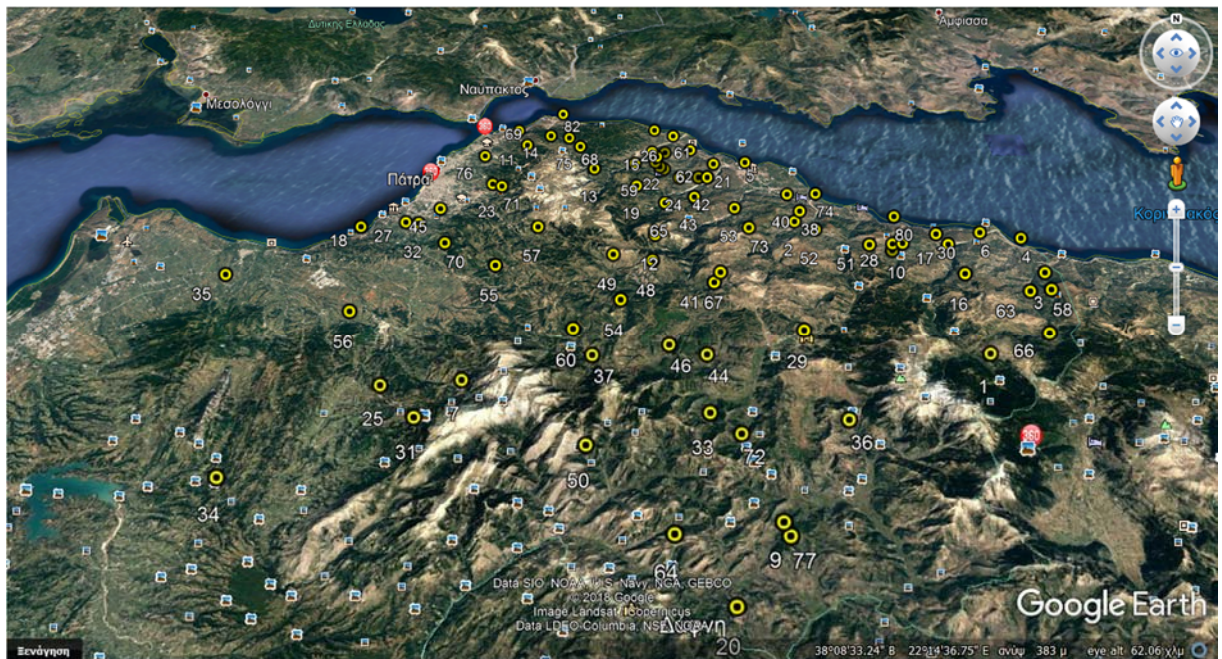


Διάγραμμα 20: Το κέντρο βάρους των 8 clusters ως ποσοστό % επί των καλύψεων γης (Πίνακας 9).

3.3 Γεωγραφία Κατολισθήσεων νομού Αχαΐας

Έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα προσδιορίστηκαν 82 θέσεις κατολισθήσεων στο νομό Αχαΐας, πρόκειται για Τεχνικές Εκθέσεις (Απογραφικά Δελτία) κατολισθήσεων του ΙΓΜΕ.

Η κάθε κατολίσθηση κωδικοποιείται με ένα αριθμό (ID) από 1 ως 82, το όνομα της ευρύτερης περιοχής που έλαβε χώρα (Πίνακας 10) και τη γεωγραφική της θέση (Εικόνα 30).



Εικόνα 30: Οι 82 θέσεις (κίτρινα σημεία) κατολισθήσεων στην ευρύτερη γεωγραφική περιοχή του νομού Αχαΐας. Πηγή: Google Earth 2018. URL: <https://earth.google.com/web>

Πίνακας 10: Περιοχές του νομού Αχαΐας που έχουν εκδηλωθεί κατολισθήσεις.

ID	Περιοχή
1	Αγιά Βαρβάρα
2	Άγιος Ανδρέας
3	Αίγες
4	Αιγείρα
5	Αίγιο
6	Ακράτα
7	Αλεποχώρι
8	Άλσος
9	Αμυγδαλιά
10	Άνω Διακοπτό
11	Άνω Καστρίτσι
12	Άνω Μαζαράκι
13	Άνω Σαλμένικο
14	Αργυρά
15	Αρραβωνίτσα
16	Βαλιμή
17	Βούτσιμος
18	Βραχναίκα
19	Γκραικάς
20	Δάφνη
21	Δημητρόπουλο
22	Δουκαναίικα
23	Ελικίστρα
24	Επταπίττα
25	Ερυμάνθεια
26	Ζήρια
27	Θέα
28	Καθολικό
29	Καλάβρυτα
30	Καλαμιάς
31	Καλέντζι
32	Καλλιθέα
33	Καλλιφώνι
34	Κάλφας
35	Καρυά
36	Καστριά
37	Κάτω Βλασία
38	Κάτω Πτέρη
39	Κερνίτσα
40	Κερόνεια
41	Κορφές

ID	Περιοχή
42	Κούμαρης
43	Κουνιά
44	Κούτελη
45	Κρήνη
46	Κρυονέρι
47	Λάκκα
48	Λαπαναγοί
49	Λεόντιο
50	Λιβαρτζινό
51	Λόφος
52	Μαμουσιά
53	Μελίσσια
54	Μικρός Ποντιάς
55	Μίραλι
56	Μιτόπολη
57	Μοίρα
58	Μοναστήρι
59	Μυρόβρυση
60	Νέο Κομπηγάδι
61	Νέος Ερινεός
62	Νεραντζιές
63	Όαση
64	Πάος
65	Παρασκευή
66	Περιθώριο
67	Πετσάκοι
68	Πιτίτσα
69	Πλατάνι
70	Πλατανόβρυση
71	Πουρναρόκαστρο
72	Πριόλιθος
73	Πτέρη
74	Ροδιά
75	Σελλά
76	Σκιοέσσα
77	Σκοτάνη
78	Συνανιά
79	Τούμπα
80	Τράπεζα
81	Χατζής
82	Ψαθόπυργος

Κεφάλαιο Τέταρτο

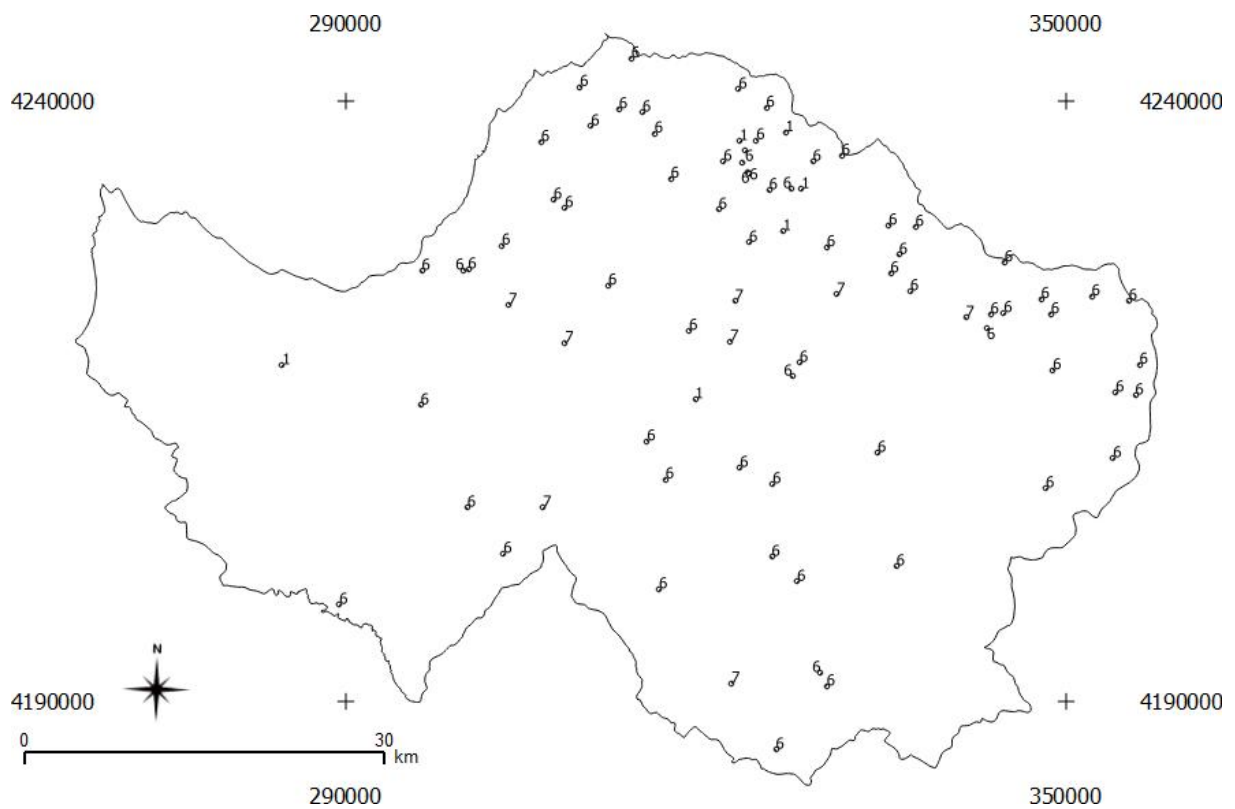
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Προβάλλουμε την κάθε θέση κατολίσθησης στο χάρτη με τις 8 τάξεις (clusters) και προσδιορίζουμε την τάξη στην οποία ανήκει η κάθε κατολίσθηση.

Η χωρική κατανομή αποτυπώνεται στην Εικόνα 31 και η τάξη στην οποία ανήκει η κάθε κατολίσθηση απεικονίζεται στον Πίνακα 11.

Το εύρος των κατολισθήσεων συγκεντρώνεται σε 3 από τις 8 τάξεις και ειδικότερα στις τάξεις 1,6 και 7.

Ενώ στην Εικόνα 32 απεικονίζονται οι τάξεις 1,6 και 7 με διαφορετικό χρώμα και για τις 82 θέσεις κατολισθήσεων.

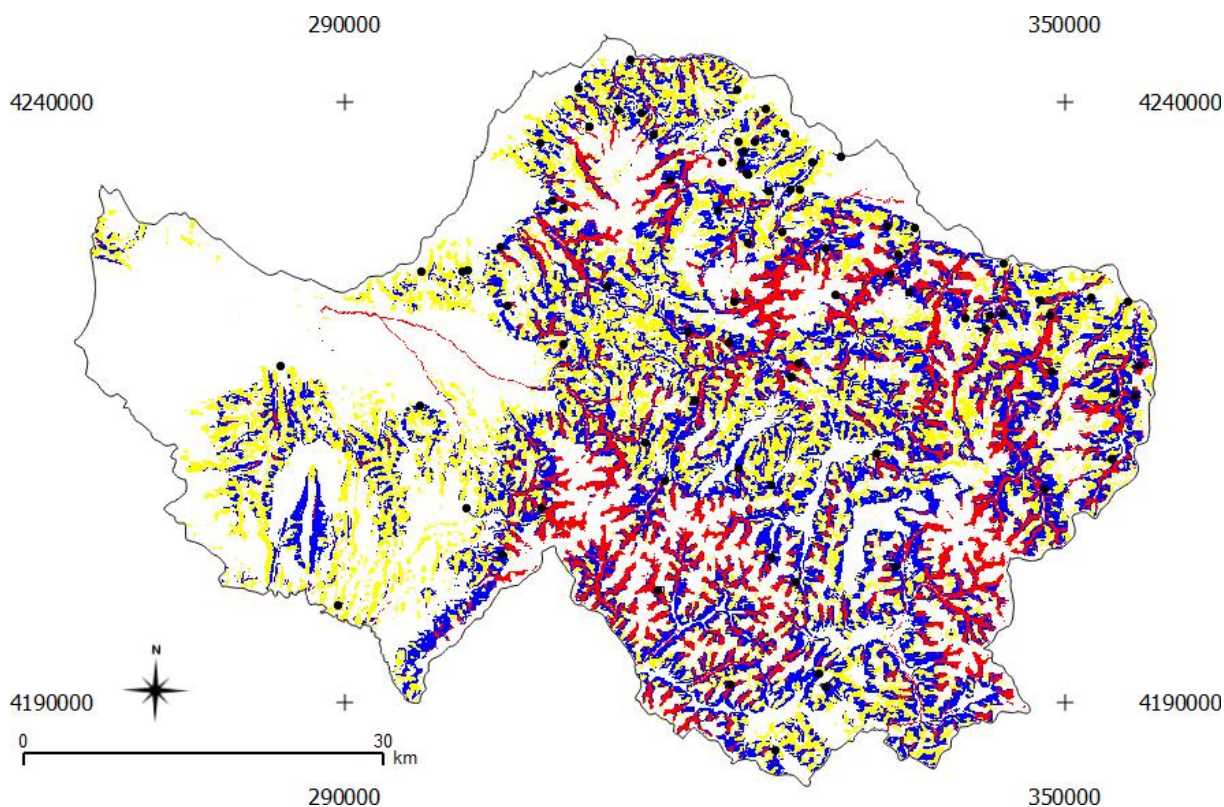


Εικόνα 31: Η χωρική κατανομή των κατολισθήσεων στο νομό Αχαΐας και με ετικέτα (label) η ζώνη στην οποία ανήκουν.

Πίνακας 11: Ταξινόμηση επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων για τις θέσεις του νομού Αχαΐας.

ID	Περιοχή	Τάξη
1	Αγιά Βαρβάρα	6
2	Άγιος Ανδρέας	6
3	Αίγες	6
4	Αιγείρα	6
5	Αίγιο	6
6	Ακράτα	6
7	Αλεποχώρι	7
8	Άλσος	6
9	Αμυγδαλιά	6
10	Άνω Διακοπτό	6
11	Άνω Καστρίτσι	6
12	Άνω Μαζαράκι	7
13	Άνω Σαλμένικο	6
14	Αργυρά	6
15	Αρραβωνίτσα	1
16	Βαλιμή	6
17	Βούτσιμος	6
18	Βραχναίικα	6
19	Γκραίκας	6
20	Δάφνη	6
21	Δημητρόπουλο	6
22	Δουκαναίικα	6
23	Ελικίστρα	6
24	Επταπίττα	6
25	Ερυμάνθεια	6
26	Ζήρια	6
27	Θέα	6
28	Καθολικό	6
29	Καλάβρυτα	6
30	Καλαμιάς	6
31	Καλέντζι	6
32	Καλλιθέα	6
33	Καλλιφώνι	6
34	Κάλφας	6
35	Καρυά	1
36	Καστριά	6
37	Κάτω Βλασία	6
38	Κάτω Πτέρη	6
39	Κερνίτσα	6
40	Κερύνεια	6
41	Κορφές	6

ID	Περιοχή	Τάξη
42	Κούμαρης	1
43	Κουνινά	1
44	Κούτελη	6
45	Κρήνη	6
46	Κρυονέρι	6
47	Λάκκα	6
48	Λαπαναγοί	7
49	Λεόντιο	6
50	Λιβαρτζινό	6
51	Λόφος	7
52	Μαμουσιά	6
53	Μελίσσια	6
54	Μικρός Ποντιάς	1
55	Μίραλι	7
56	Μιτόπολη	6
57	Μοίρα	6
58	Μοναστήρι	6
59	Μυρόβρυση	6
60	Νέο Κομπηγάδι	6
61	Νέος Ερινεός	6
62	Νεραντζιές	1
63	Όαση	6
64	Πάος	7
65	Παρασκευή	6
66	Περιθώριο	6
67	Πετσάκοι	6
68	Πιτίτσα	6
69	Πλατάνι	6
70	Πλατανόβρυση	7
71	Πουρναρόκαστρο	6
72	Πριόλιθος	6
73	Πτέρη	7
74	Ροδιά	6
75	Σελλά	6
76	Σκιοέσσα	6
77	Σκοτάνη	6
78	Συνανιά	6
79	Τούμπα	6
80	Τράπεζα	6
81	Χατζής	6
82	Ψαθόπυργος	6



Εικόνα 32: Η αποτύπωση των 82 θέσεων κατολισθήσεων με μαύρα σημεία καθώς και οι 3 κατηγορίες των τάξεων (clusters) που παρουσιάζουν επικινδυνότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων, όπου: 1 = Κίτρινο, 6 = Μπλε και 7 = Κόκκινο.

Η κατανομή των σημείων στις τάξεις 1,6 και 7 είναι διαφορετική με τη μέγιστη συχνότητα να παρατηρείται για την τάξη 6 και την ελάχιστη για την τάξη 1, όπως αποτυπώνεται στον Πίνακα 12.

Ο αριθμός των σημείων που εντάσσονται σε κάθε μία από τις 3 τάξεις εκφράζεται και με ποσοστό % (Πίνακα 12) όπως και η επιφανειακή (ποσοστιαία) γεωγραφική εξάπλωση της κάθε τάξης ως προς τη συνολική έκφραση του νομού Αχαΐας (occurrence).

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε μία καινούργια παράμετρο η οποία θα εκτιμά την επικινδυνότητα εκδήλωσης κατολίσθησης σε κάθε τάξη με γεωγραφικά / χωρικά και όχι με χρονικά κριτήρια.

Η παράμετρος αυτή ισούται με το ποσοστό του συνολικού αριθμού κατολισθήσεων που έλαβαν χώρα εντός της συγκεκριμένης τάξης προς την ποσοστιαία γεωγραφική εξάπλωση της τάξης (occurrence), δηλαδή του ποσοστού των κατολισθήσεων ανά μονάδα επιφανείας για κάθε τάξη, Η παράμετρος αυτή ονομάζεται Δείκτης Επικινδυνότητας Κατολίσθησης (HLI).

Πίνακας 12: Ο Δείκτης Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων (HLI) ανά τάξη (cluster).

Τάξη	Αριθμός Σημείων (NP)*	Ποσοστό Σημείων %	Ποσοστιαία Γεωγραφική Εξάπλωση (Area)**	Δείκτης Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων (HLI)***
1	6	7,3	18,5	0,4
6	68	82,9	20,4	4,1
7	8	9,8	8,9	1,1
Total	82	100		

* Αριθμός Σημείων (Number of Points, NP)

** Ποσοστιαία Γεωγραφική Εξάπλωση (Area from the Centroids table).

*** Δείκτης Επικινδυνότητας Κατολισθήσεων (Hazard Landslide Index, HLI) προκύπτει ως το ποσοστό των κατολισθήσεων ανά μονάδα επιφάνειας ανά τάξη και δίνεται από τον τύπο:

$$HLI = NP\% / Area$$

Ο δείκτης HLI είναι για την τάξη 6 τετραπλάσιος από την τάξη 7 και δεκαπλάσιος από την τάξη 1. Ενώ στις τάξεις 2,3,4,5 και 8 δεν παρατηρούνται κατολισθήσεις.

Στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας της διαφοροποίησης των τοπογραφικών παραμέτρων (κέντρα βάρους ανά τάξη 1,6 και 7) για να προσδιορίσουμε τους παράγοντες ανάγλυφου και απορροής που σχετίζονται με εκδήλωση κατολισθήσεων στις συγκεκριμένες τάξεις.

Στον Πίνακα 13 με τα τυποποιημένα κέντρα βάρους ανά τάξη, φαίνεται πως η κατηγορία με το μεγαλύτερο ποσοστό αριθμού κατολισθήσεων ανά μονάδα επιφάνειας παρουσιάζει:

- Μέγιστο Flow Path Length (FPL) και
- Μέγιστο Topographic Wetness Index (TWI).

Επομένως:

- Το μήκος απορροής μεγιστοποιείται (δηλαδή η εμφάνιση κατολισθήσεων στην τάξη 6 συσχετίζεται με τη δυναμική ενέργεια «ορμή απορροής») και
- Ο τοπογραφικός δείκτης συγκέντρωσης υγρασίας μεγιστοποιείται (δηλαδή η εμφάνιση κατολισθήσεων στην τάξη 6 συσχετίζεται και με το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και κατ' επέκταση με το αν τα πετρώματα είναι κορεσμένα με νερό.

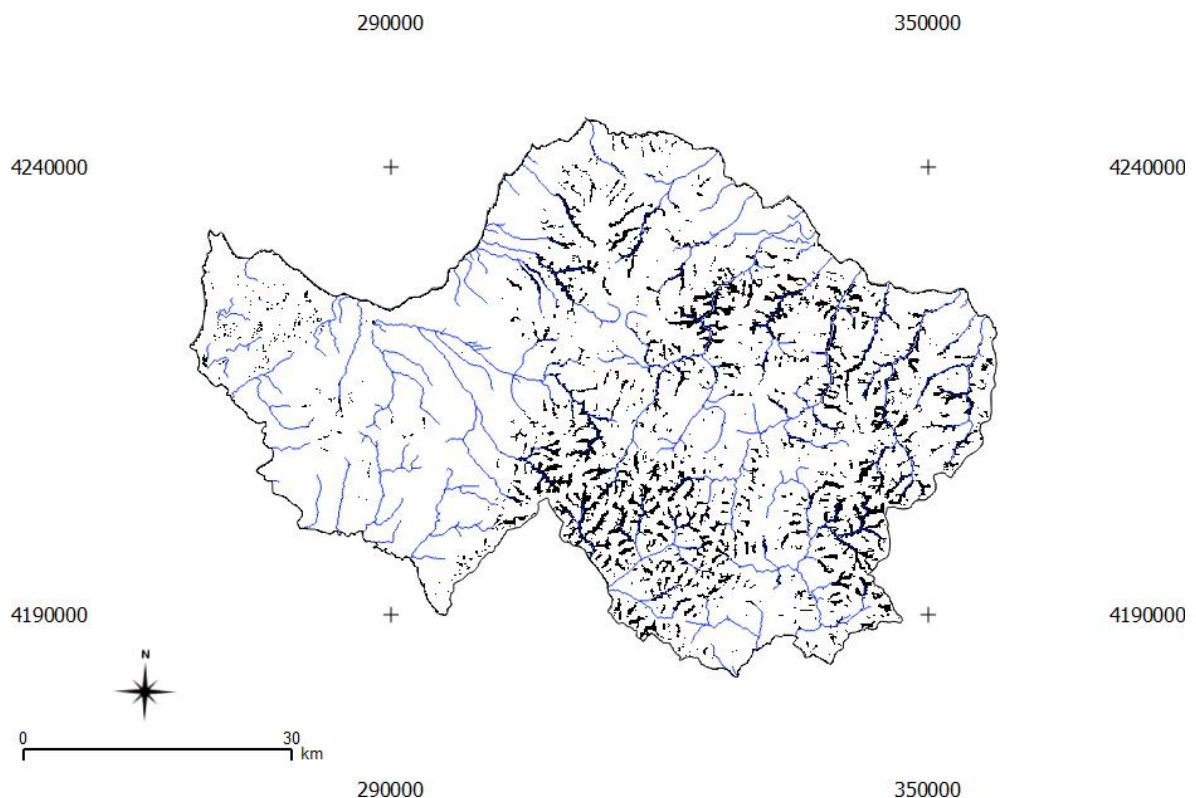
Οι δύο αυτοί δείκτες FPL και TWI καθορίζουν τη γειτονιά που λαμβάνουν χώρα κατά κύριο λόγο κατολισθητικά φαινόμενα.

Ως προς τους άλλους δείκτες, η τάξη 6 είναι μεταξύ των τάξεων 1 και 7. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει προφανώς κατολισθήσεις στην τάξη 1 που έχουν άλλη γενεσιουργό αιτία από την τάξη 7.

Η απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου σε υπέρθεση στην τάξη 7 δείχνει ότι αναπτύσσεται χωρικά επί του υδρογραφικού δικτύου (Εικόνα 54) και η τοπογραφική έκφραση είναι ελάχιστη, δηλαδή η διαφοροποίηση του ανάγλυφου στη γειτονιά εκατέρωθεν της περιοχής κατολίσθησης με βάση το διάγραμμα 21 τείνει στο μηδέν.

Επομένως η τάξη 7 περιλαμβάνει κατολισθήσεις που αντιστοιχούν σε λασπορροές, δηλαδή δεν οφείλονται σε αστοχία πρανών λόγω ανόδου του υδροφόρου ορίζοντα που αυξάνει τη στατική καταπόνηση και την ορμή της υδροστρωματοροής που αποσαθρώνει τη βάση των πρανών, οδηγώντας τα σε αστοχία όπως οι κατολισθήσεις της τάξης 6.

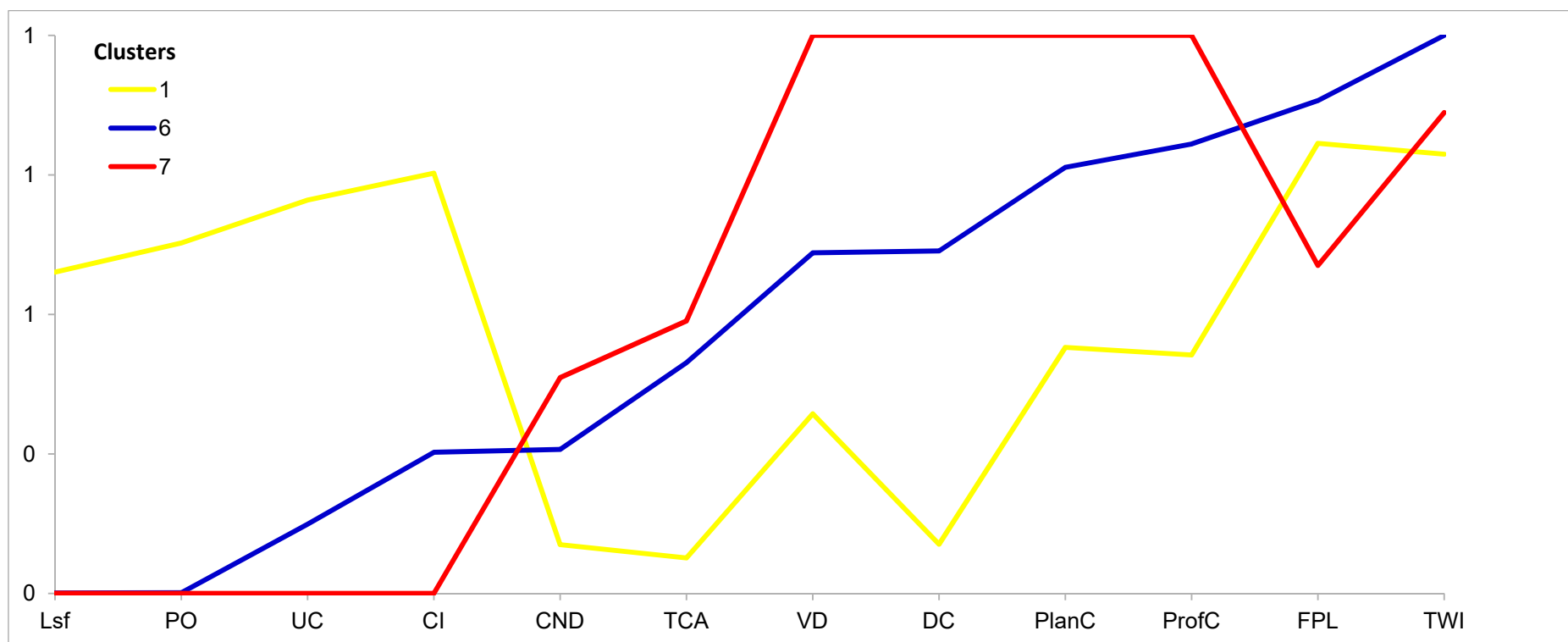
Η τάξη 1 με βάση την τοπογραφική έκφραση και σύμφωνα με το διάγραμμα 21 ερμηνεύεται να παρουσιάζει γενεσιουργό αιτία που είναι μεταξύ της κατηγορίας 6 που παρουσιάζει αστοχία λόγω απότομης μεταβολής της στατικής καταπόνησης και των λασπορροών της κατηγορίας της τάξης.



Εικόνα 33: Η τάξη 7 και το υδρογραφικό δίκτυο.

Πίνακας 13: Τα τυποποιημένα κέντρα βάρους ανά τάξη (cluster).

Clusters	Lsf	PO	UC	CI	CND	TCA	VD	DC	PlanC	ProfC	FPL	TWI	Points of Numbers	Area %
1	0,58	0,63	0,70	0,75	0,09	0,06	0,32	0,09	0,44	0,43	0,81	0,79	6	18,5
6	0	0	0,12	0,25	0,26	0,41	0,61	0,61	0,76	0,81	0,88	1	68	20,4
7	0	0	0	0	0,39	0,49	1	1	1	1	0,59	0,86	8	8,9
Total													82	47,7



Διάγραμμα 21: Τα τυποποιημένα κέντρα βάρους ως προς τις παραμέτρους: Lsf, PO, UC, CI, CND, TCA, VD, DC, PlanC, ProfC, FPL και TWI.

Κεφάλαιο Πέμπτο

Συμπεράσματα

Με δεδομένη την κλιματική αλλαγή, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, την υπερθέρμανση του πλανήτη και τη σταδιακή άνοδο της στάθμης της θάλασσας, κρίνεται απαραίτητη η επαναχωροθέτηση των χρήσεων και καλύψεων γης, συμπεριλαμβανομένου και του επανασχεδιασμού των τεχνικών έργων και των ρυθμιστικών - χωροταξικών σχεδίων οικισμών και βιομηχανικών ζωνών.

Η κλιματική αλλαγή, η αργή και σταθερή μεταβολή του γήινου κλίματος, όπως έχει καθιερωθεί να λέγεται το φαινόμενο αυτό, σχετίζεται με την υπερβολική παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), αλλά και άλλων, όπως του μεθανίου (CH₄) και των χλωροφθορανθράκων (CFCs)), τα οποία συντελούν στην παγίδευση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται από τη Γη (φαινόμενο του θερμοκηπίου) και συνακόλουθα στην παγκόσμια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με ό,τι αυτή η αύξηση συνεπάγεται.

Ειδικότερα, βάσει του μέσου όρου ενός συνόλου κλιματικών προσομοιώσεων, η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αναμένεται να αυξηθεί, ανάλογα με την εξέλιξη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, από 1.8 °C έως 4 °C κατά τον τρέχοντα αιώνα.

Όσον αφορά τις πιθανολογούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αυτές θα μπορούσαν να συνοψισθούν ως ακολούθως (Καρβούνης και Γεωργακέλλος 2003, Κουϊμτζής κ.ά. 1998):

- (i)** Ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούμε συχνά να εμφανίζονται τις τελευταίες δεκαετίες, όπως είναι οι θύελλες, οι τυφώνες, οι ανεμοστρόβιλοι και οι σχεδόν κατακλυσμιαίες βροχοπτώσεις.
- (ii)** Άνοδος της στάθμης της θάλασσας από 15 έως 95 εκατοστά (cm) μέχρι το τέλος του αιώνα.
- (iii)** Βλάβες σε ευαίσθητα οικοσυστήματα, όπως είναι τα τροπικά δάση και οι κοραλλιογενείς περιοχές εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και της μείωσης των βροχοπτώσεων.

(iv) Μετακίνηση των ζωνών βροχοπτώσεων από τον Ισημερινό προς βορρά και ερημοποίηση του κάτω τμήματος της εύκρατης ζώνης μεταξύ του 20^{ου} και του 40^{ου} παραλλήλου.

Τα αποτελέσματα επιστημονικών ερευνών απέδειξαν πως τα ακραία καιρικά φαινόμενα, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, και οι φυσικές καταστροφές μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την διάρκεια ζωής, τη λειτουργικότητα αλλά και την ίδια την ασφάλεια των κρίσιμων υποδομών (critical infrastructures) (Σφέτσος κ.ά. 2016).

Οι κλιματικές παράμετροι και οι μεταβολές τους έχουν συνδεθεί σε πολλές περιπτώσεις με τις διεργασίες της κατολισθητικής δραστηριότητας. Η σημασία του παράγοντα της βροχόπτωσης στις κατολισθήσεις τις καθιστά εξαρτώμενες από το εκάστοτε κλιματικό καθεστώς και επομένως ευπαθείς σε πιθανές αλλαγές του. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο θα έχει σημαντικότερες συνέπειες στον χώρο της Μεσογείου ο οποίος θεωρείται ιδιαίτερα ευπαθής σε αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων (Mulligan 1998) και ταυτόχρονα συνδυάζει πολλούς από τους προκαταρκτικούς παράγοντες που οξύνουν τα κατολισθητικά φαινόμενα (λιθολογία, τεκτονική, μορφολογία, ανθρώπινος παράγοντας κ.α.).

Οι Soldatti et al. (2004) μελετώντας κατολισθητικά φαινόμενα των τελευταίων 11.000 χρόνων στις Άλπεις, διαπιστώνουν σύνδεση της κατολισθητικής δραστηριότητας με κλιματικούς παράγοντες όπως η βροχόπτωση και η θερμοκρασία .

Η δημιουργία ψηφιακών χαρτών στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα οριοθετήσει ζώνες διαφορετικής επικινδυνότητας ως προς το υπό μελέτη φαινόμενο και κατ' επέκταση θα υποβοηθήσει τη λήψη αποφάσεων σε τοπικό, περιφερειακό και κρατικό επίπεδο. Για να γίνει αυτόματα αυτό απαιτείται:

- (i)** Η διαθεσιμότητα ελεύθερων γεωγραφικών δεδομένων με κατάλληλη γεωγραφική διακριτική ικανότητα, ακρίβεια αλλά και θεματικό πληροφοριακό περιεχόμενο μ
- (ii)** Η νοηματική διατύπωση του προβλήματος (conceptualization) «εντοπισμός ζωνών με μεγάλη επικινδυνότητα λασπορροών / κατολισθήσεων» στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης;
- (iii)** Τα επίπεδα πληροφορίας (με τεχνικές ανάλυσης πεδίου) που θα δημιουργηθούν από τα διαθέσιμα ελεύθερα γεωγραφικά δεδομένα, θα συμμετάσχουν στη σύνθεση του χωρικού ερωτήματος;
- (iv)** Πως θα υλοποιηθεί (formalization) το ερώτημα που περιγράφεται στο στάδιο (ii), σε γεωγραφικό πληροφοριακό σύστημα ελεύθερου κώδικα;

Η μεθολογία της διατριβής βασίστηκε σε μία στρωματοειδή ιεράρχηση, όπως αποτυπώνεται διαδοχικά:

- (i) Στη νοηματική πρόσληψη του προβλήματος και των αλληλο-συσχετιζόμενων γεωγραφικών παραμέτρων του.
- (ii) Τον εντοπισμό κατάλληλων γεωγραφικών δεδομένων (με συγκεκριμένες προδιαγραφές ακρίβειας και χωρική διακριτική ικανότητα).
- (iii) Τη σύνθεση των επιπέδων πληροφορίας και των παράγωγων τους στο περιβάλλον λογισμικού ανοικτού κώδικα (SAGA GIS).
- (iv) Τη τυποποίηση του προβλήματος (formalization) στο περιβάλλον του λογισμικού ελεύθερου κώδικα (QGIS) και υλοποίηση των χωρικών ερωτημάτων.

Ο νομός Αχαΐας διαιρέθηκε με εξερευνητική ανάλυση συσσωρεύσεων σε 8 κατηγορίες κατολισθήσεων με βάση παραμέτρους που συσχετίζονται με την απορροή, την τοπογραφική έκφραση και τη μορφολογία αλλά και τη σχετική θέση στο γεωμορφολογικό περιβάλλον, υπό την προϋπόθεση πως οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν μικρή έως μέτρια συσχέτιση μεταξύ τους.

Προφανώς αυτό το υποσύνολο παραμέτρων μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με την απορροή, την τοπογραφική έκφραση, τη μορφολογία και τη σχετική θέση στο γεωμορφολογικό περιβάλλον μιας άλλης περιοχής. Αυτό δεν είναι μειονέκτημα αλλά πλεονέκτημα αφού η μεθοδολογία είναι προσαρμόσιμη στο εκάστοτε περιβάλλον και στις εκάστοτε γενεσιουργές αιτίες που προκαλούν τις κατολισθήσεις / λασπορροές.

Ορίστηκε ένας καινούργιος δείκτης επικινδυνότητας κατολισθήσεων, ο δείκτης HLI που προσδιόρισε την ποσοστιαία εμφάνιση κατολισθήσεων ανά μονάδα επιφανείας.

Κατά τον τρόπο αυτό ο δείκτης HLI είναι για την τάξη 6 τετραπλάσιος από την τάξη 7 και δεκαπλάσιος από την τάξη 1 στην επικινδυνότητα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων, ενώ στις τάξεις 2,3,4,5 και 8 δεν παρατηρούνται κατολισθήσεις.

Η ερμηνεία της παραμετρικής αναπαράστασης των κέντρων βάρους για τις τάξεις 1,6 και 7 προσδιόρισε τη γενεσιουργό αιτία ανά τάξη ως εξής:

- (i) Τάξη 6, περιλαμβάνει κατολισθήσεις που οφείλονται σε αστοχία πρανών λόγω ανόδου του υδροφόρου ορίζοντα που αυξάνει τη στατική καταπόνηση και της ορμής της υδροστρωματοροής που αποσαθρώνει τη βάση των πρανών, οδηγώντας τα στην αστοχία τους.
- (ii) Τάξη 7, περιλαμβάνει κατολισθήσεις που οφείλονται σε λασπορροές αφού χωρικά η τάξη αναπτύσσεται επί του υδρογραφικού δικτύου και η τοπογραφική έκφραση είναι ελάχιστη.

(iii) Τάξη 1, που η τοπογραφική και χωρική της έκφραση είναι μεταξύ των τάξεων 6 και 7 και επομένως η γενεσιουργός αιτία είναι είτε αστοχία πρανών είτε λασπορροών είτε συνδυασμός και των δύο αιτιών (π.χ. η λασπορροή που προκαλεί και αστοχία πρανών).

Η παρούσα διατριβή περιορίζεται από τις 82 καταγραφές κατολισθήσεων στο νομό Αχαΐας. Είναι πιθανό στο νομό να λαμβάνουν χώρα κατολισθήσεις σε δυσπρόσιτες περιοχές που είναι μακριά από οδικό δίκτυο, οικισμούς, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και πιθανώς να μην έχουν καταγραφεί.

Αυτό όμως δεν αναιρεί τη σημασία της διατριβής, καθώς σε ερευνητικό επίπεδο προσδιορίζει χωρικά τις ζώνες επικινδυνότητας ως προς την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, που εν δυνάμει καταγράφονται στην περιοχή μελέτης, λόγω της εγγύτητάς τους με το οδικό δίκτυο, τις οικιστικές περιοχές και τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Αυτές οι κατηγορίες έχουν πρωταρχική σημασία για την ασφάλεια των κατοίκων αλλά και την τοπική οικονομία του νομού Αχαΐας.

Ο καινούργιος δείκτης HLI και οι τρεις ζώνες επικινδυνότητας που προσδιορίστηκαν, δύναται να εφαρμοστούν στην αναθεώρηση χωροταξικών, ρυθμιστικών σχεδίων του νομού Αχαΐας αλλά και να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό / χωροθέτηση τεχνικών έργων καθώς και να βρουν να συμπεριληφθούν στην εκπόνηση μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ).

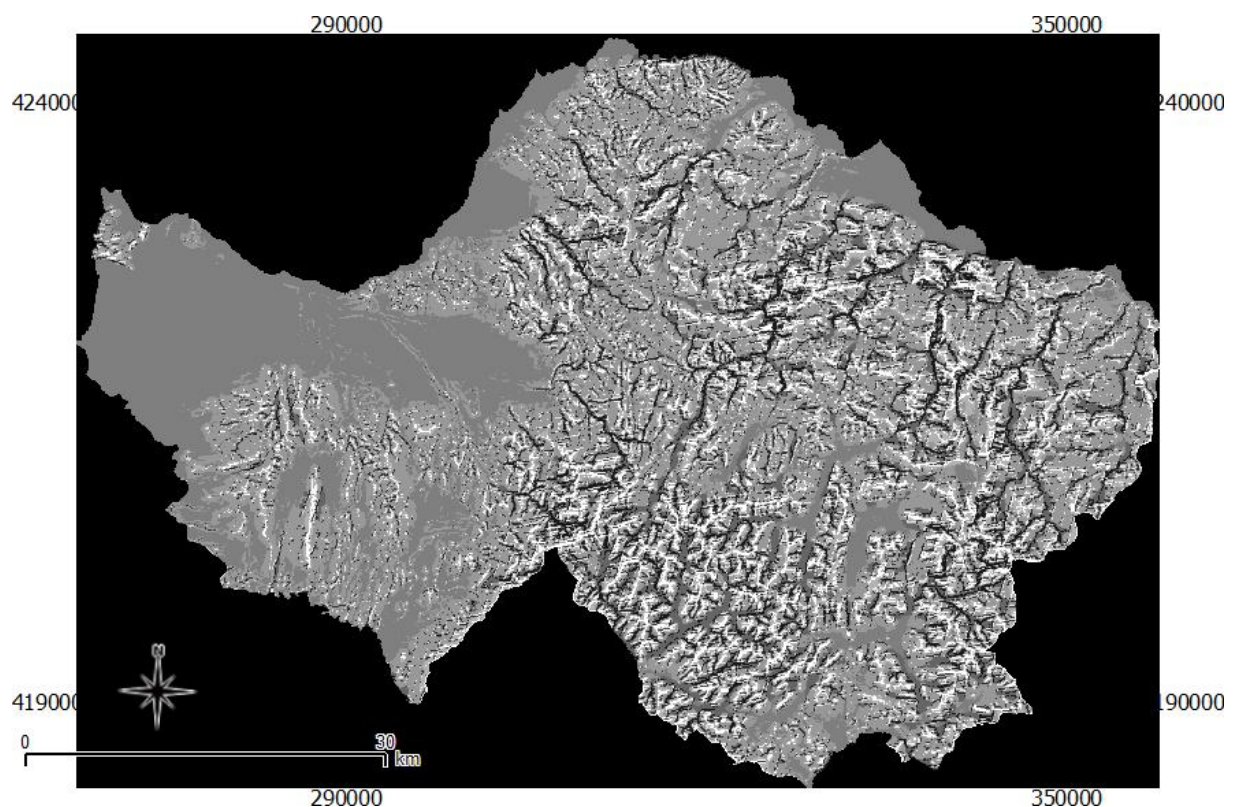
Παράρτημα (Annex)

A Γεωμορφολογικοί και Υδρολογικοί / Βιοφυσικοί Δείκτες

- Δείκτης Ταξινόμησης Εδάφους (Landform Classification, LC)

Ο Δείκτης Ταξινόμησης Εδάφους (Εικόνα 34) βασίζεται σε «μη επιτηρούμενους φωλευμένους αλγόριθμους» και με γεωμετρικό ίχνος τριών μερών. Η βαθμίδα της κλίσης, η υφή της επιφάνειας και η τοπική κυρτότητα, υπολογίζονται σε ένα δεδομένο μέγεθος παραθύρου και ταξινομούνται σύμφωνα με τις εγγενείς ιδιότητες του συνόλου των δεδομένων (Iwahashi and Pike 2007).

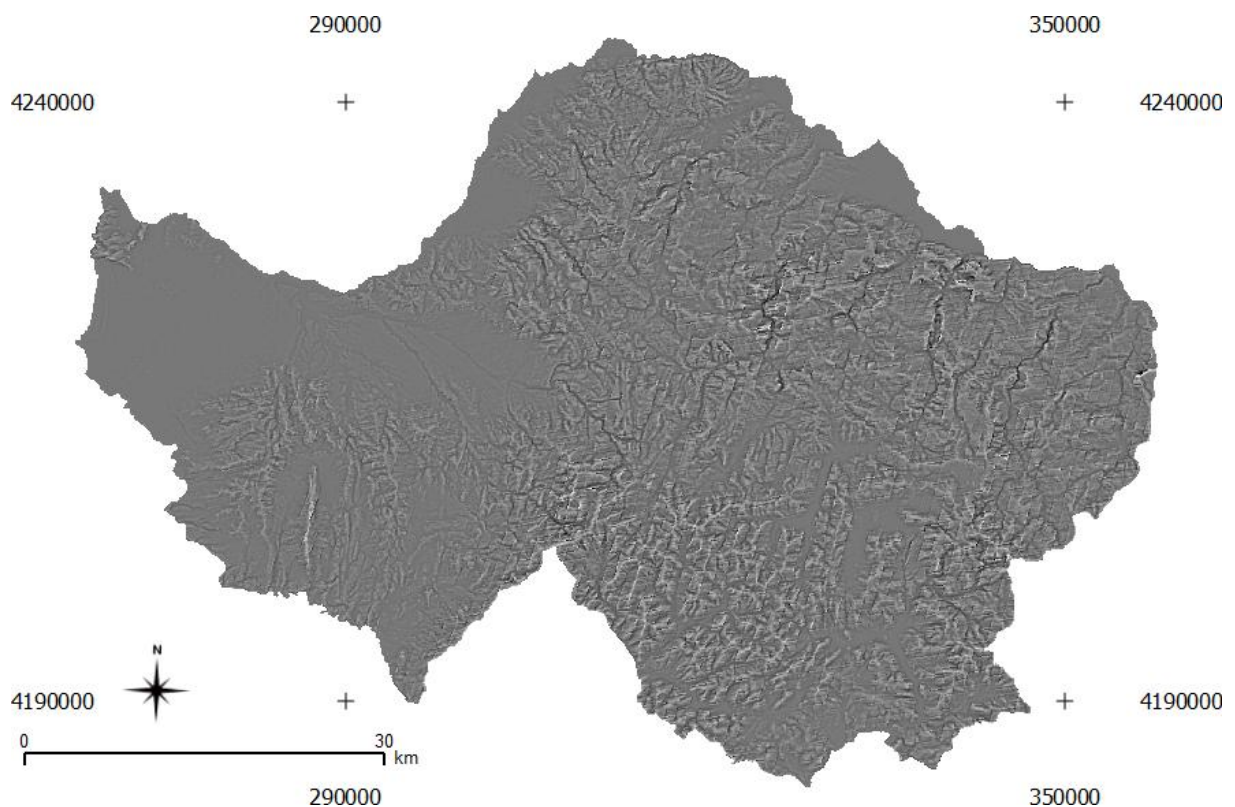
Ο δείκτης αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί (από άποψη κατώτατων ορίων) ως μια δυναμική μέθοδος ταξινόμησης της γης.



Εικόνα 34: Ο Δείκτης Ταξινόμησης Εδάφους (Landform Classification, LC) βάσει των 10 κατηγοριοποιήσεων του Πίνακα 7.

- Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Topographic Position Index, TPI)

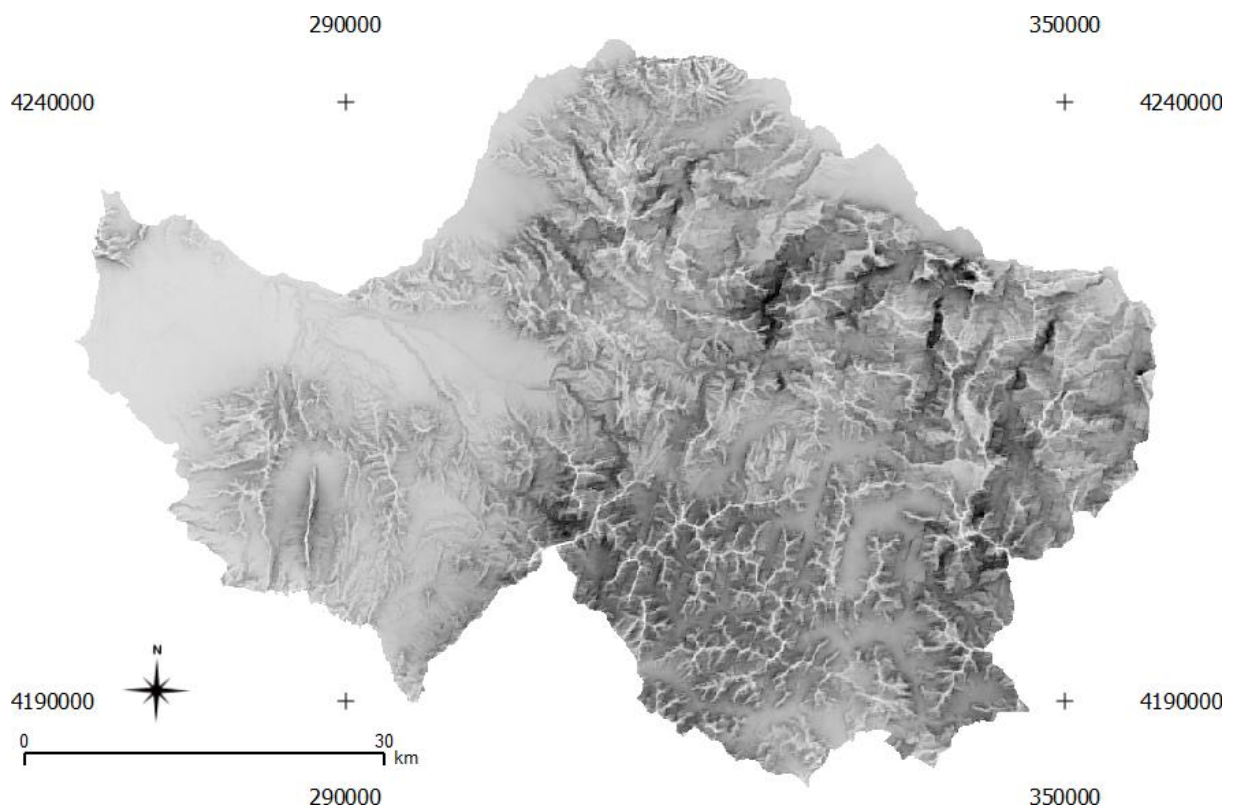
Ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Εικόνα 35) συγκρίνει το υψόμετρο κάθε εικονοστοιχείου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, με το υψόμετρο μία συγκεκριμένης περιοχής γύρω από το εικονοστοιχείο. Θετικές τιμές του δείκτη τοπογραφικής θέσης, αναπαριστούν περιοχές οι οποίες έχουν μεγαλύτερο υψόμετρο από το μέσο υψόμετρο των γειτονικών τους περιοχών και χαρακτηρίζονται ως κορυφές, ενώ αρνητικές τιμές του δείκτη τοπογραφικής θέσης αναπαριστούν περιοχές οι οποίες βρίσκονται σε μικρότερο υψόμετρο σε σχέση με το υψόμετρο των γειτονικών τους περιοχών και χαρακτηρίζονται ως κοιλάδες. Περιοχές όπου οι τιμές του δείκτη τοπογραφικής θέσης είναι κοντά στο μηδέν, είτε είναι επίπεδες περιοχές (εάν η κλίση είναι κοντά στο μηδέν), είτε είναι περιοχές σταθερής κλίσης (αν η κλίση είναι αρκετά μεγαλύτερη από το μηδέν) (Weiss 1999).



Εικόνα 35: Ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Topographic Position Index, TPI).

- Δείκτης Θετικής Ανοικτότητας (Openness Positive, OP)

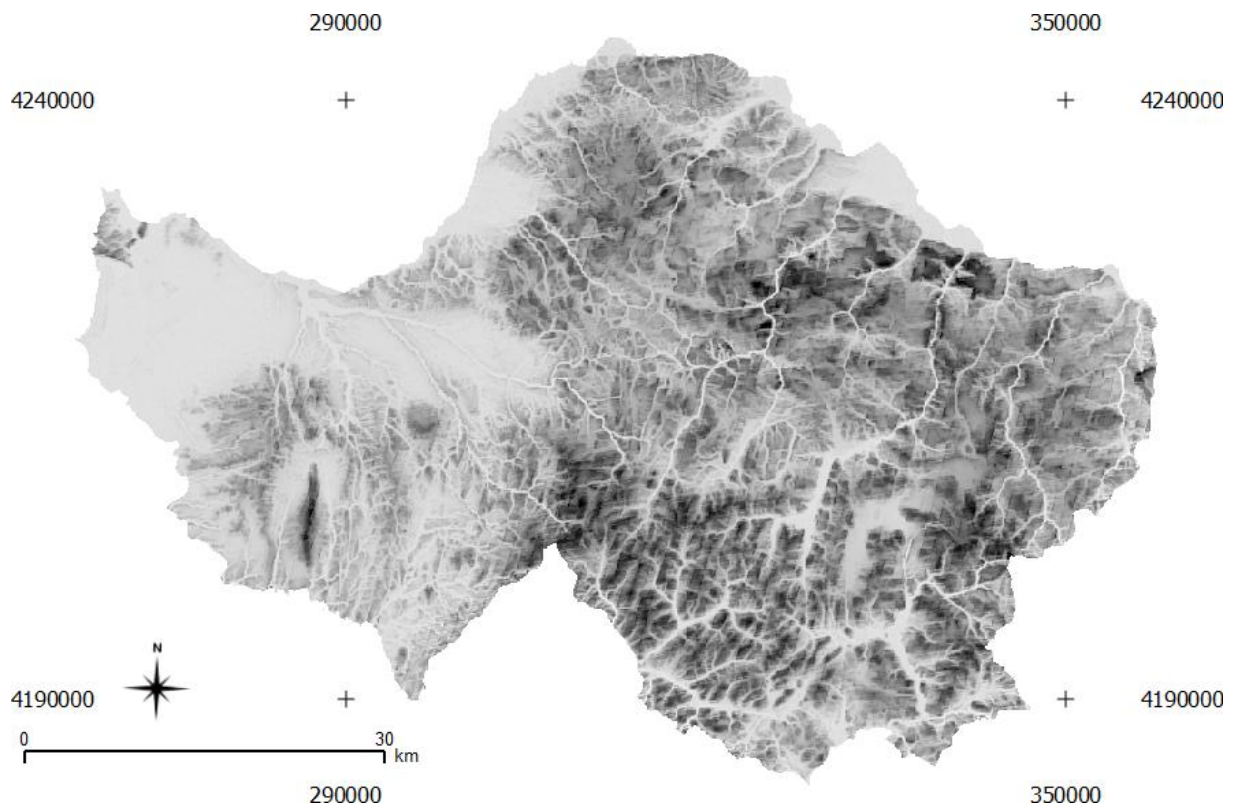
Η Ανοικτότητα είναι ένα γωνιακό μέτρο της σχέσης μεταξύ της επιφάνειας και της ελεύθερης επιφάνειας στη μέγιστη οριζόντια απόσταση. Μοιάζει με τις ψηφιακές εικόνες σκιασμένης ανακούφισης ή γωνίας κλίσης, αλλά δίνει έμφαση στις κυρίαρχες επιφανειακές κοιλότητες και τις κυρτώσεις. Ο Δείκτης Θετικής Ανοικτότητας (Εικόνα 36), εκφράζει το άνοιγμα πάνω από την επιφάνεια, ενώ οι θετικές τιμές του είναι υψηλές για κυρτές μορφές (Yokoyama et al. 2002).



Εικόνα 36: Ο Δείκτης Θετικής Ανοικτότητας (*Openness Positive, OP*).

- Δείκτης Αρνητικής Ανοικτότητας (Openness Negative, ON)

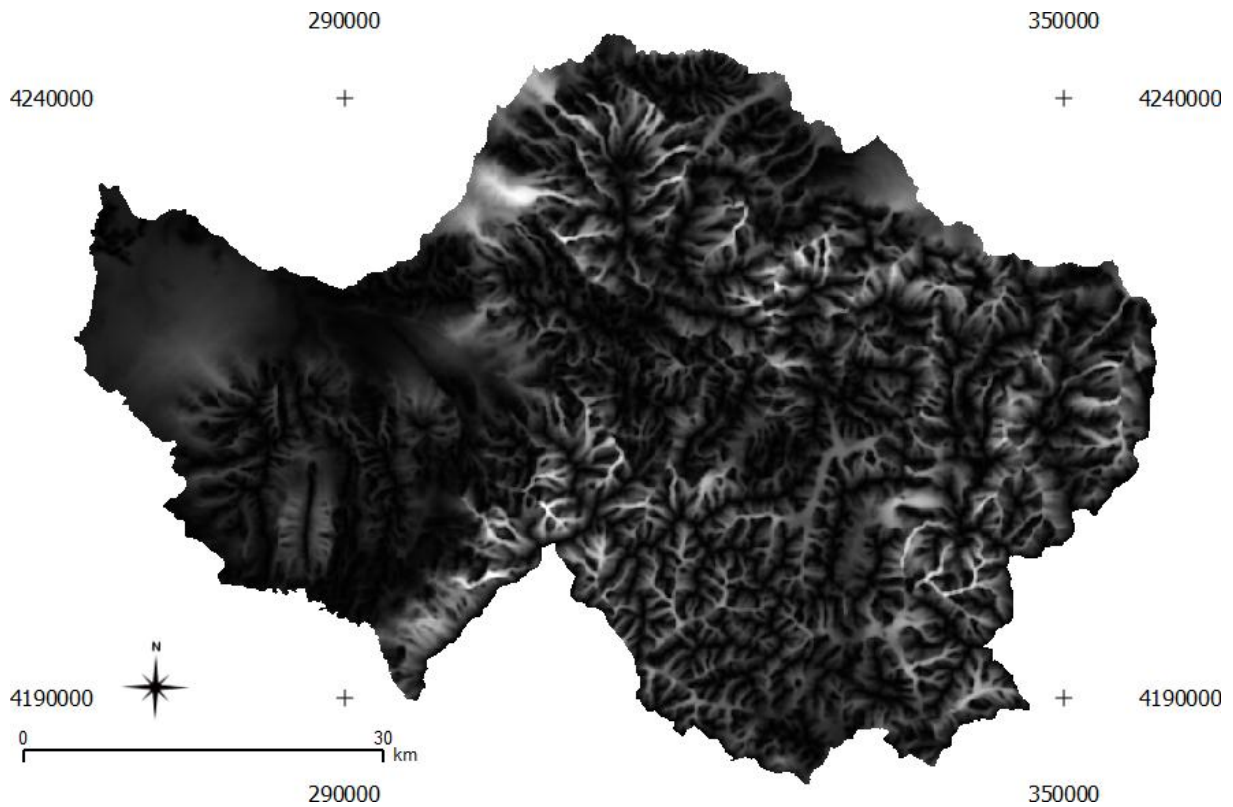
Αντιστοίχως, ο Δείκτης Αρνητικής Ανοικτότητας (Εικόνα 37) εκφράζει το άνοιγμα κάτω από την επιφάνεια, ενώ οι αρνητικές τιμές του είναι υψηλές για κοίλες μορφές (Yokoyama et al. 2002).



Εικόνα 37: Ο Δείκτης Αρνητικής Ανοικτότητας (*Openness Negative, ON*).

- Δείκτης Τοπικό Βάθος Κοιλάδων (Valley Depth, VD)

Ο Δείκτης Τοπικό Βάθος Κοιλάδων (Εικόνα 38) αποτυπώνει την υψομετρική διαφορά σε μία γειτονιά διαστάσεων 3 x 3 ή 5 x 5 (Qin et al. 2009, Miliarisis 2006).

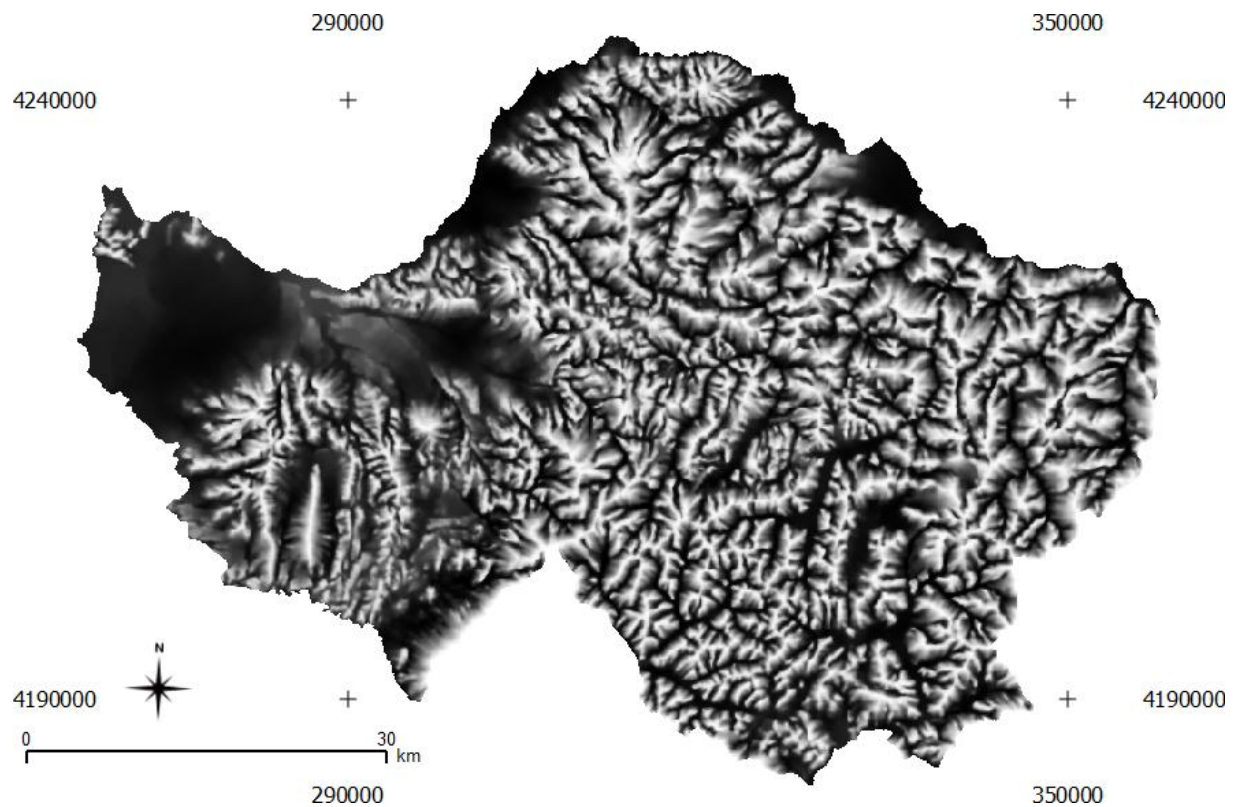


Εικόνα 38: Ο Δείκτης Τοπικό Βάθος Κοιλάδων (*Valley Depth, VD*).

- Δείκτης Κανονικοποιημένο Ύψος (Normalized Height, HNo)

Εκτός από την κατακόρυφη μετατόπιση ενός κελιού πλέγματος, το Κανονικοποιημένο Ύψος (HNo) και το Τυποποιημένο Ύψος (HSt), θεωρούν επίσης την επέκταση μιας λεκάνης απορροής, από το χαμηλότερο έως το υψηλότερο σημείο εδάφους, εκφρασμένο ως ποσοστό ή κανονικοποιημένη τιμή (Böhner & Selige 2006).

Ο Δείκτης Κανονικοποιημένο Ύψος (Εικόνα 39) αποδίδει την τιμή 1 στην υψηλότερη τιμή και την τιμή 0 στη χαμηλότερη θέση εντός μιας περιοχής αναφοράς (Thamm 2000).

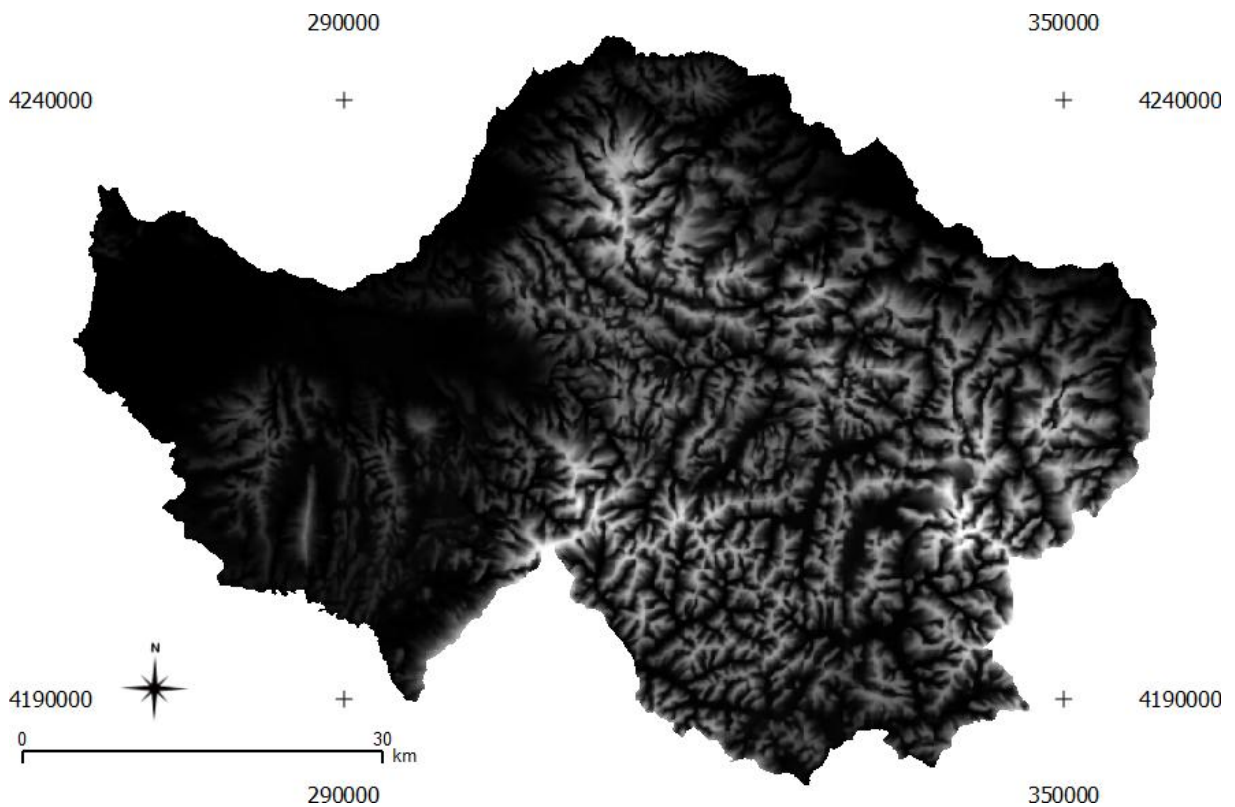


Εικόνα 39: Ο Δείκτης Κανονικοποιημένο Ύψος (Normalized Height, HNo).

- Δείκτης Τυποποιημένο Ύψος (Standardized Height, HSt)

Ο Δείκτης Τυποποιημένο Ύψος (Εικόνα 40) είναι το προϊόν του δείκτη κανονικοποιημένου ύψους πολλαπλασιασμένο με απόλυτο ύψος.

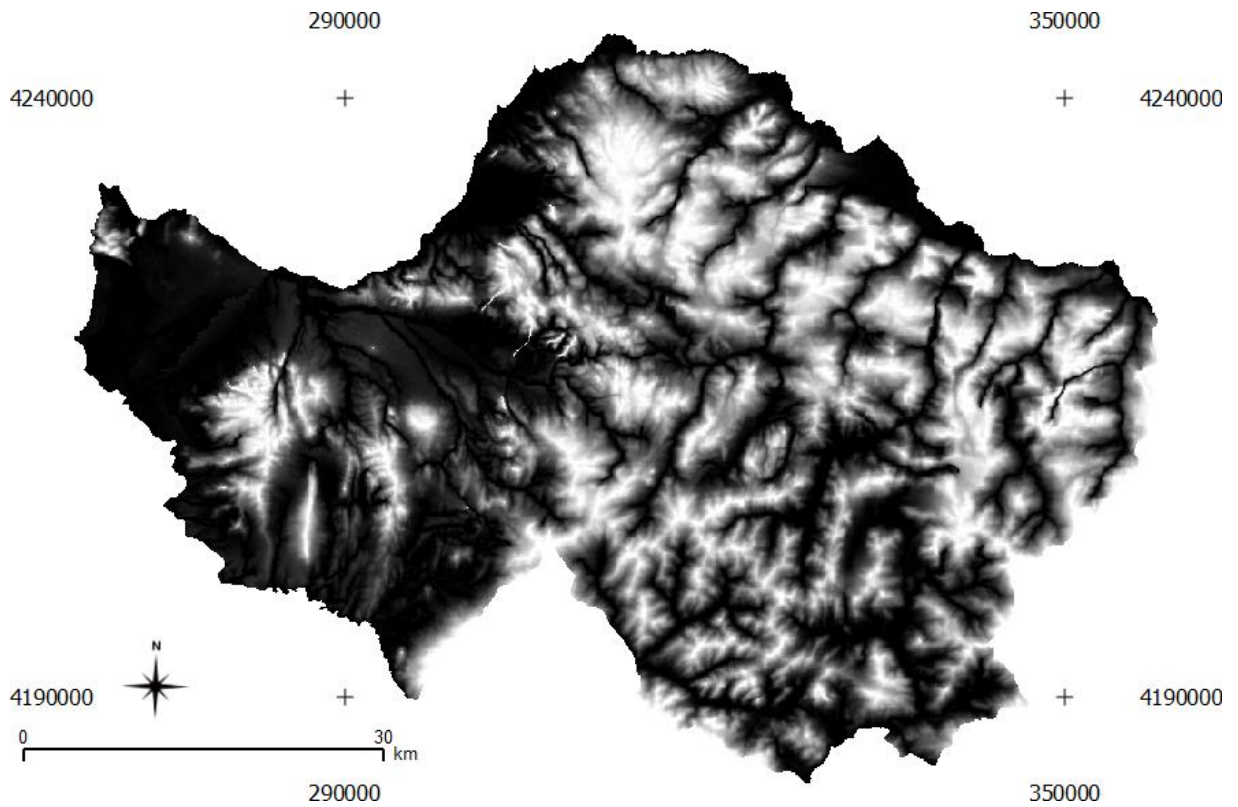
Και οι δύο παράμετροι (κανονικοποιημένο / τυποποιημένο ύψος) δεν σχετίζονται με παρακείμενες γραμμές καναλιών και κορυφών, αλλά με την ευρέως διαδεδομένη τοπολογία. Αυτό είναι απαραίτητο για να επεξηγηθεί μια διαδικαστική διαφοροποίηση της τοπικής ροής αέρα, λόγω της αποκλίνουσας, συγκλίνουσας και γραμμικής ροής ψυχρού αέρα, η οποία εξαρτάται από το άμεσο περιβάλλον, την περιοχή της λεκάνης απορροής και τις σχετικές διαφορές ύψους ταυτόχρονα (Thamm 2000).



Εικόνα 40: Ο Δείκτης Τυποποιημένο Ύψος (Standardized Height, HSt).

- Δείκτης Σχετική Θέση ως προς την Κλίση (Relative Slope Position, RSP)

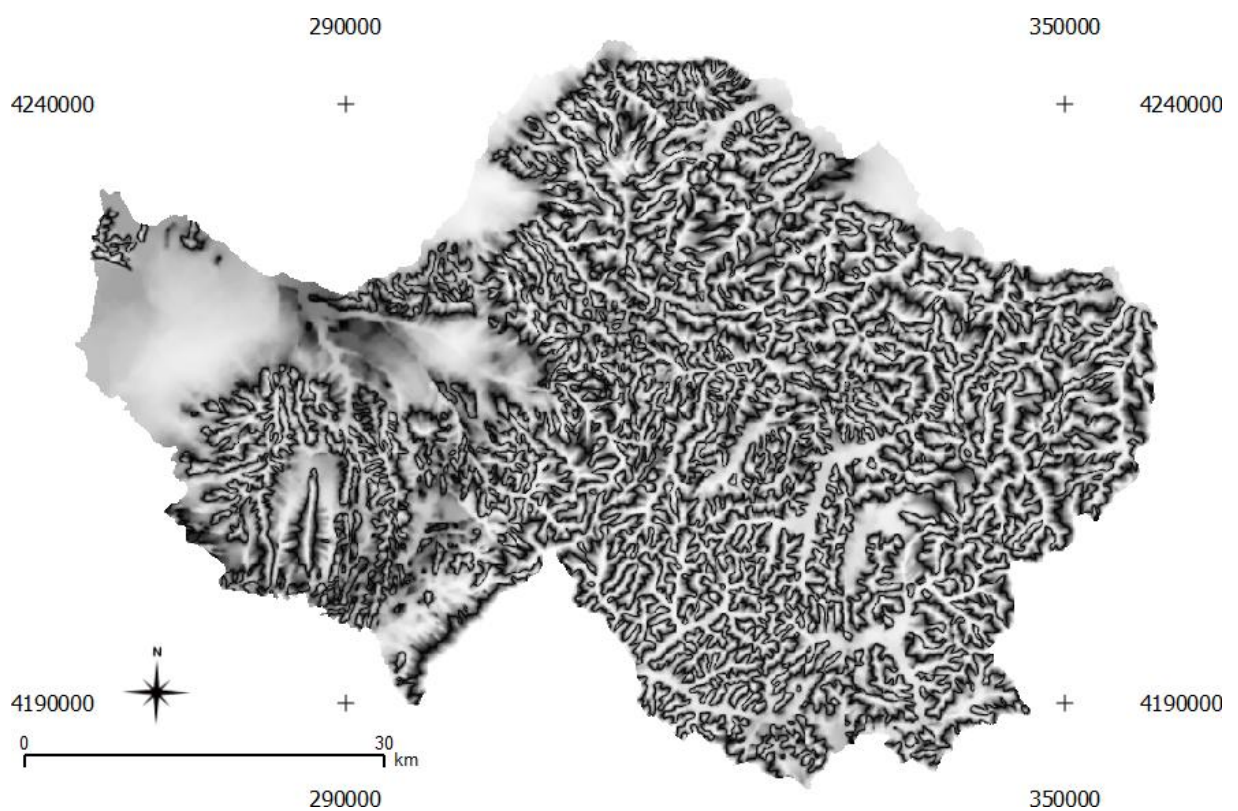
Η Σχετική Θέση ως προς την Κλίση (Εικόνα 41) είναι ένας ποσοστιαίος δείκτης με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1 και υποδηλώνει την απόσταση (ποσοστιαία) από τις εγγύτερες επίπεδες περιοχές (Reuter et al. 2006).



Εικόνα 41: Ο Δείκτης Σχετική Θέση ως προς την Κλίση (Relative Slope Position, RSP).

- Δείκτης Θέση Μέσης Κλίσης (mid Slope Position, HmA)

Ο Δείκτης Θέση Μέσης Κλίσης (Εικόνα 42) χρησιμοποιείται συνήθως στην τοποκλιματική ανάλυση για την κάλυψη των θερμότερων ζωνών των πλαγιών (Bendix 2004). Αυτή η παράμετρος αποδίδει τις θέσεις μέσης κλίσης με 0 ενώ οι μέγιστες κατακόρυφες αποστάσεις με τη μέση κλίση και στις δύο κατευθύνσεις της κοιλάδας ή της κορυφής, έχουν εκχωρηθεί με 1 για να αντιπροσωπεύουν τη σταγόνα θερμοκρασίας προς τα πάνω και προς τα κάτω τμήματα μιας κλίσης.

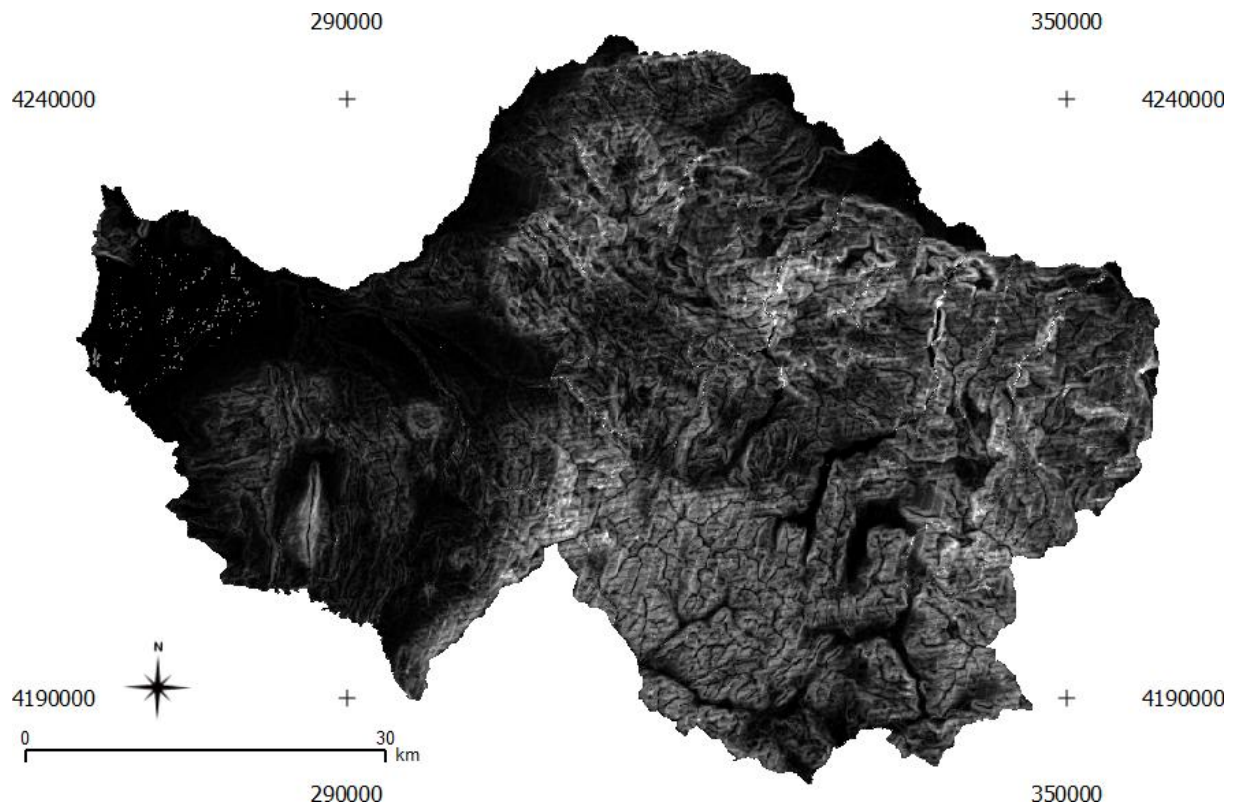


Εικόνα 42: Ο Δείκτης Θέση Μέσης Κλίσης (mid Slope Position, HmA).

- Δείκτης Συντελεστή Μήκους (L) και Κλίσης (S) (LS Factor)

Ο Συντελεστής LS (Εικόνα 43) είναι ένας συνδυασμός μήκους κλίσης και πλάτους, είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό για την πρόβλεψη του δυναμικού διάβρωσης.

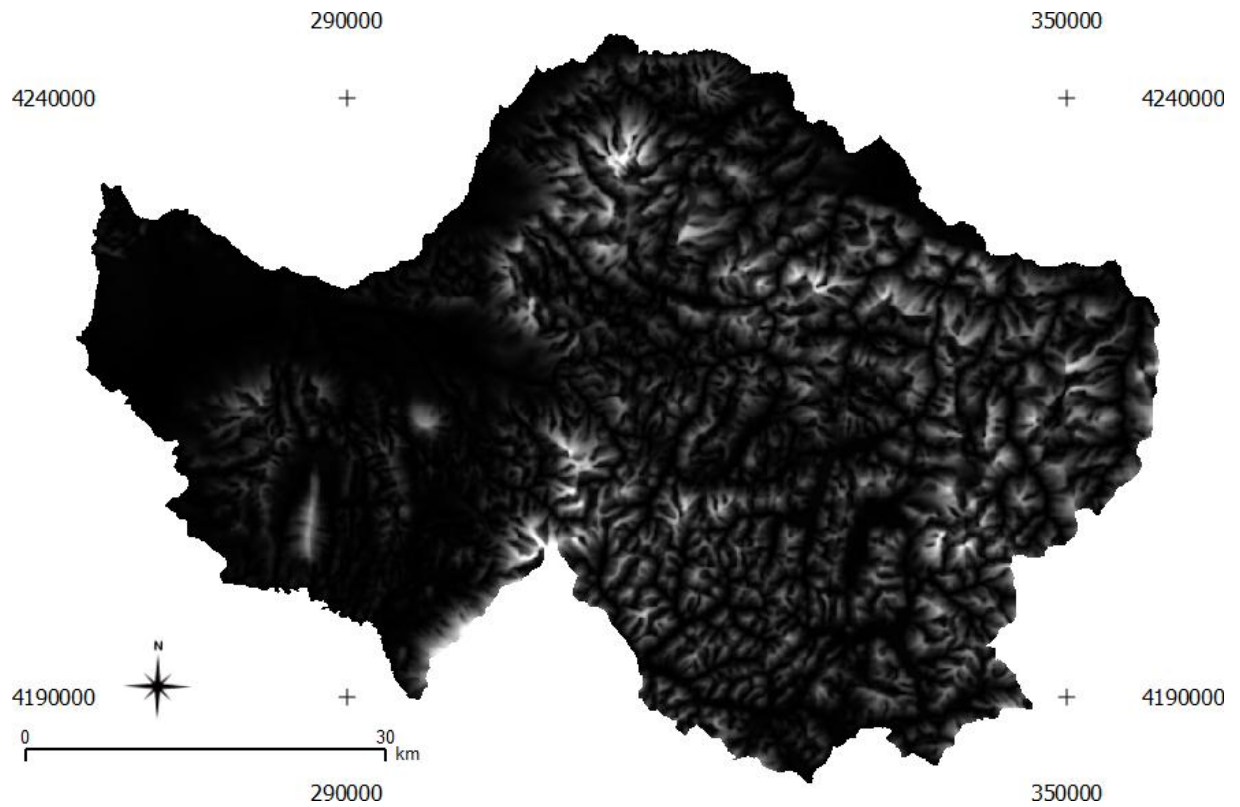
Ο συντελεστής μήκους κλίσης (L) υπολογίζει την επίδραση του μήκους κλίσης στη διάβρωση και ο συντελεστής απότομης κλίσης (S) υπολογίζει την επίδραση της απότομης κλίσης στη διάβρωση (SAGA GIS 2012).



Εικόνα 43: Ο Δείκτης Συντελεστή Μήκους (L) και Κλίσης (S) (LS Factor).

- Δείκτης Ύψος Κλίσης (Slope Height, SH)

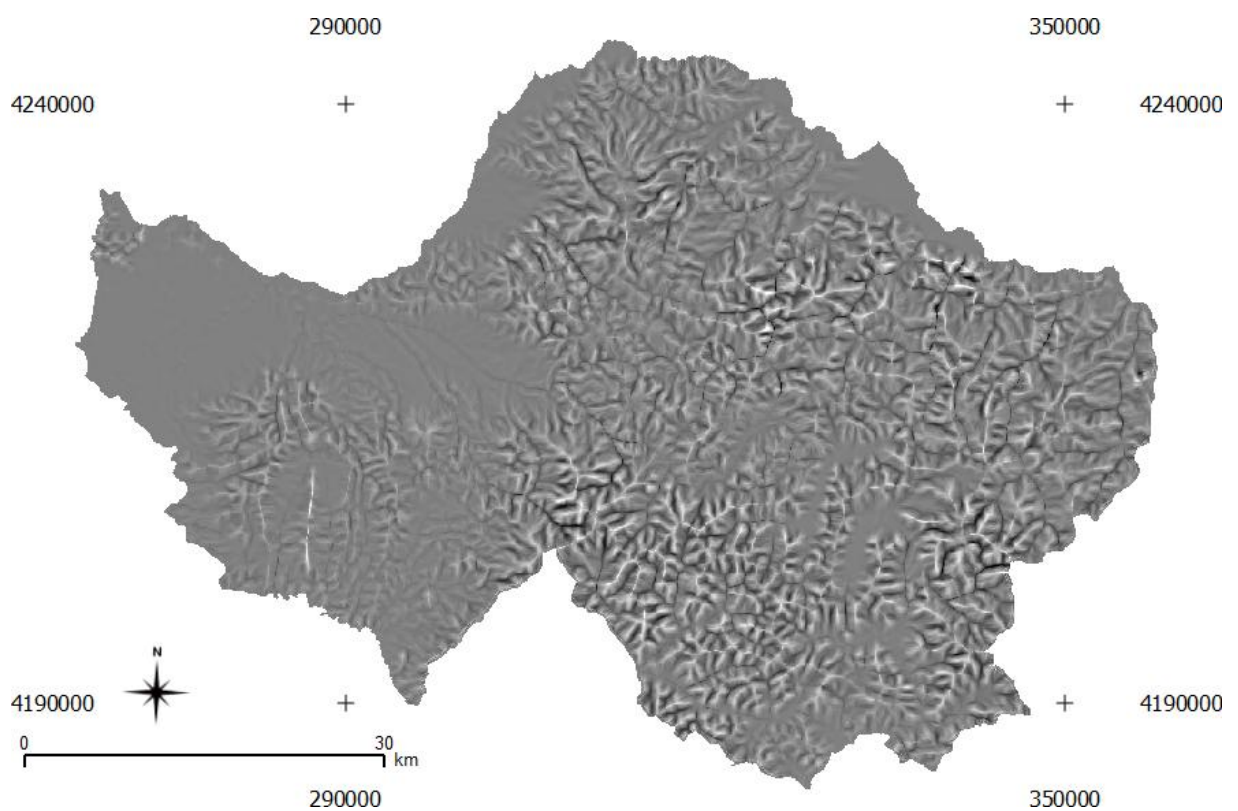
Ο Δείκτης Ύψος Κλίσης (Εικόνα 44) παρέχει το σχετικό ύψος πάνω από την πλησιέστερη συσσωρευμένη αποστράγγιση (Böhner and Selige 2006, Böhner and Antonic 2009) και ως εκ τούτου, ενισχύει το ανάγλυφο ενός επιμήκη λόφου (τύμβου).



Εικόνα 44: Ο Δείκτης Ύψος Κλίσης (*Slope Height, SH*).

- Δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας (Plan Curvature, PLC)

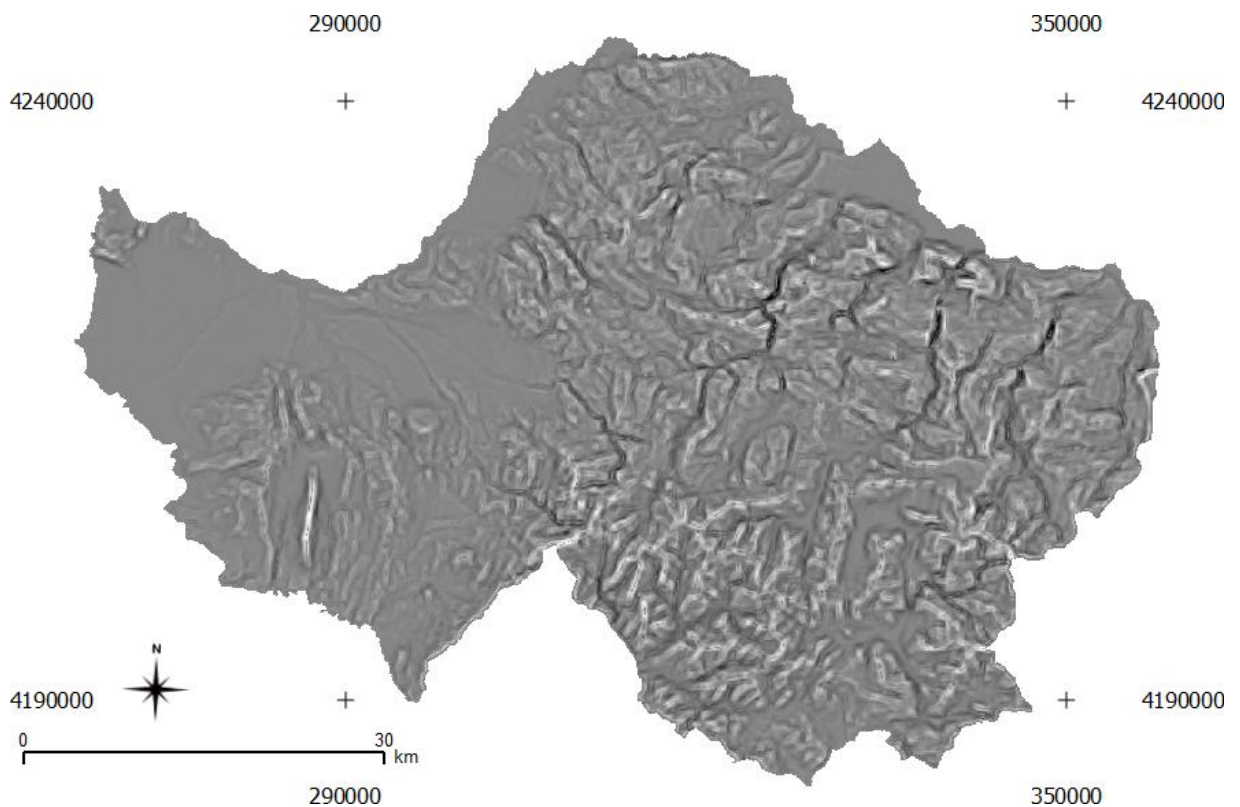
Ο Δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας (Εικόνα 45) εξ ορισμού είναι η καμπυλότητα σε οριζόντιο επίπεδο. Οι τιμές θετικής καμπυλότητας υποδηλώνουν ένα κυρτό περίγραμμα εντός του πλεγματοειδούς κελιού και οι τιμές αρνητικής καμπυλότητας υποδεικνύουν ένα κοίλο περίγραμμα εντός πλεγματοειδούς κελιού. Ο Δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας είναι σημαντικός για τη μελέτη και κατανόηση των παραλλαγών στο φυσικό και τεχνητό έδαφος, ενώ χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς μεταξύ των οποίων και η χαρτογράφηση των λεκανών απορροής (Zevenbergen et al. 1987).



Εικόνα 45: Ο Δείκτης Σχεδίου Καμπυλότητας (Plan Curvature, PLC).

- Δείκτης Κατατομή Καμπυλότητας (Profile Curvature, PFC)

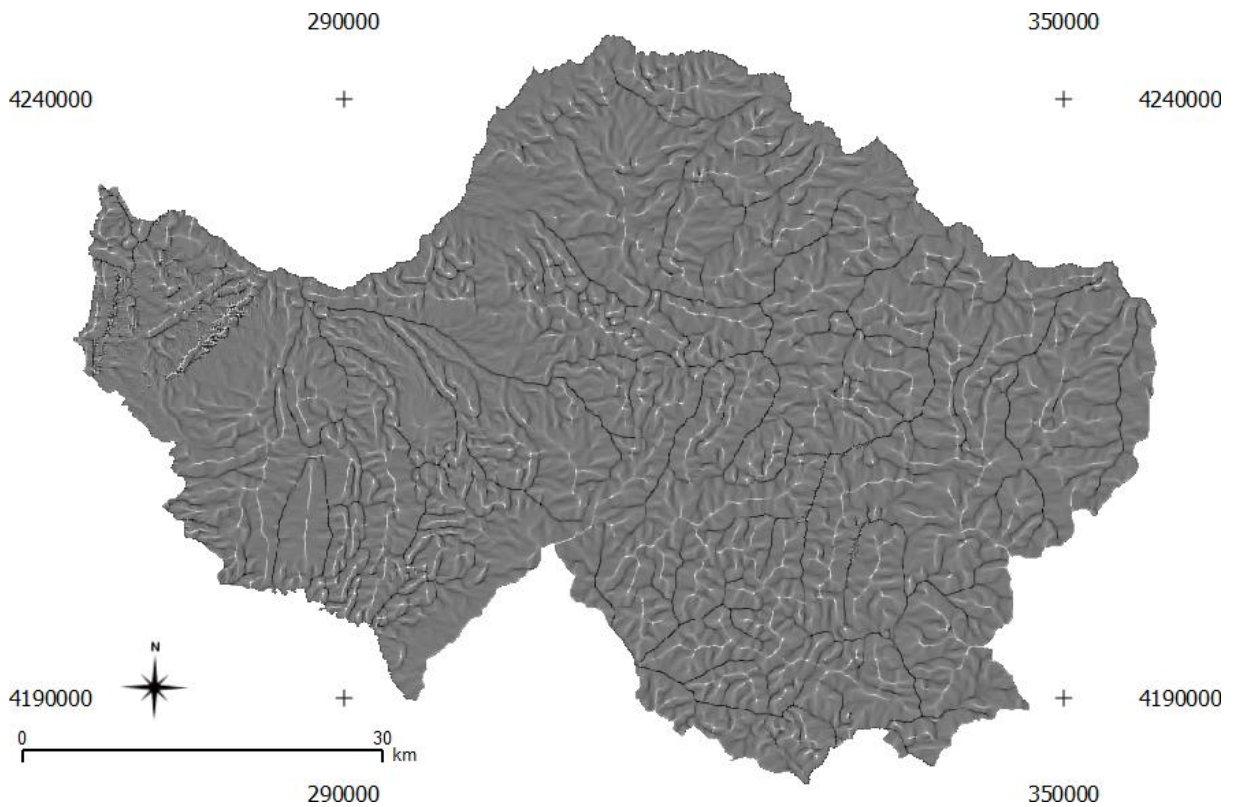
Ο Δείκτης Κατατομή Καμπυλότητας (Εικόνα 46) είναι το μέτρο της κατακόρυφης καμπυλότητας της επιφάνειας της γης. Είναι η καμπυλότητα της γραμμής που σχηματίζεται από τη διασταύρωση του κατακόρυφου επιπέδου κατά μήκος της πιο απότομης κλίσης, με την επιφάνεια της γης. Οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν κυρτές επιφάνειες και οι θετικές τιμές δείχνουν κοίλες επιφάνειες (Shary 1995).



Εικόνα 46: Ο Δείκτης Κατατομή Καμπυλότητας (Profile Curvature, PFC).

- Δείκτης Σύγκλισης Απορροής (Convergence Index, C)

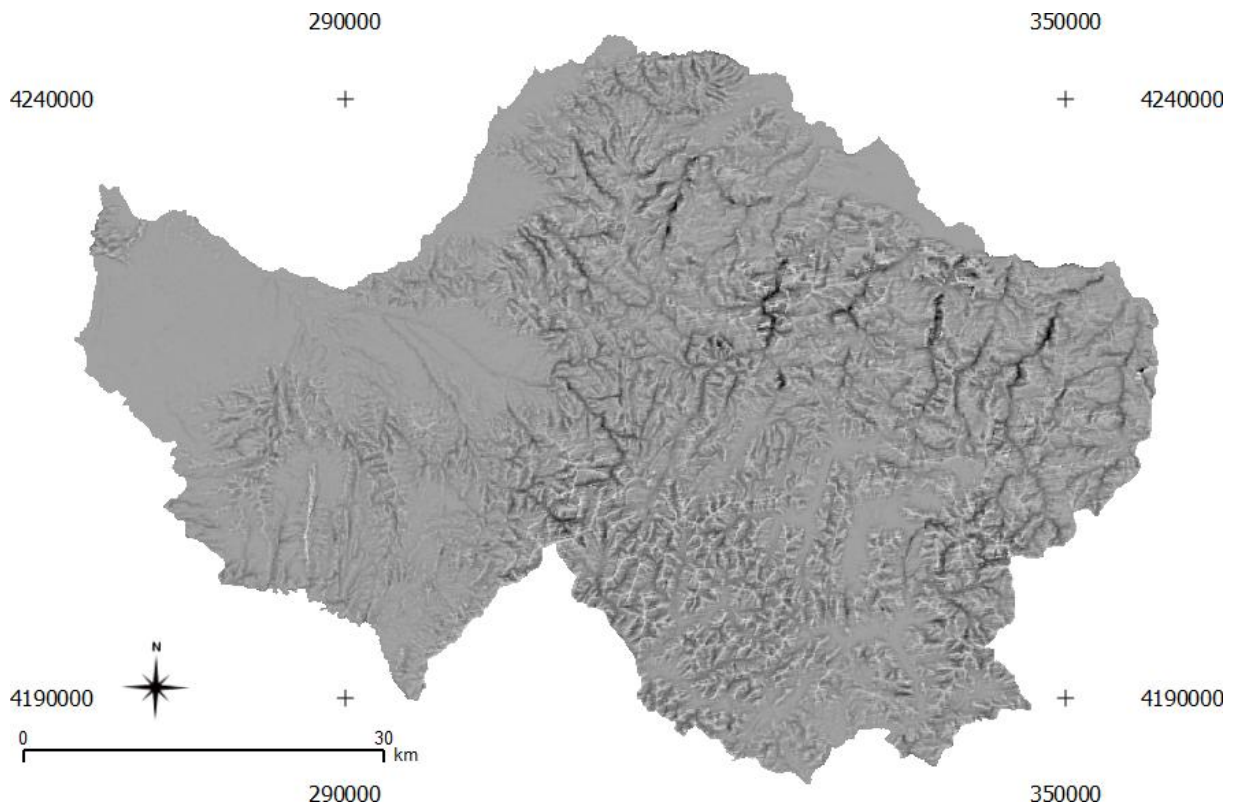
Ο Δείκτης Σύγκλισης Απορροής (Εικόνα 47) προσδιορίζει τον αριθμό των σταγόνων που περνάνε από ένα σημείο, κατά την ισοδυναμική προσομοίωση της ροής σε ένα κελί 3 x 3 (Pike et al. 2008).



Εικόνα 47: Ο Δείκτης Σύγκλισης Απορροής (Convergence Index, C).

- Δείκτης Καμπυλότητας Κατωφέρειας (Downslope Curvature, CD)

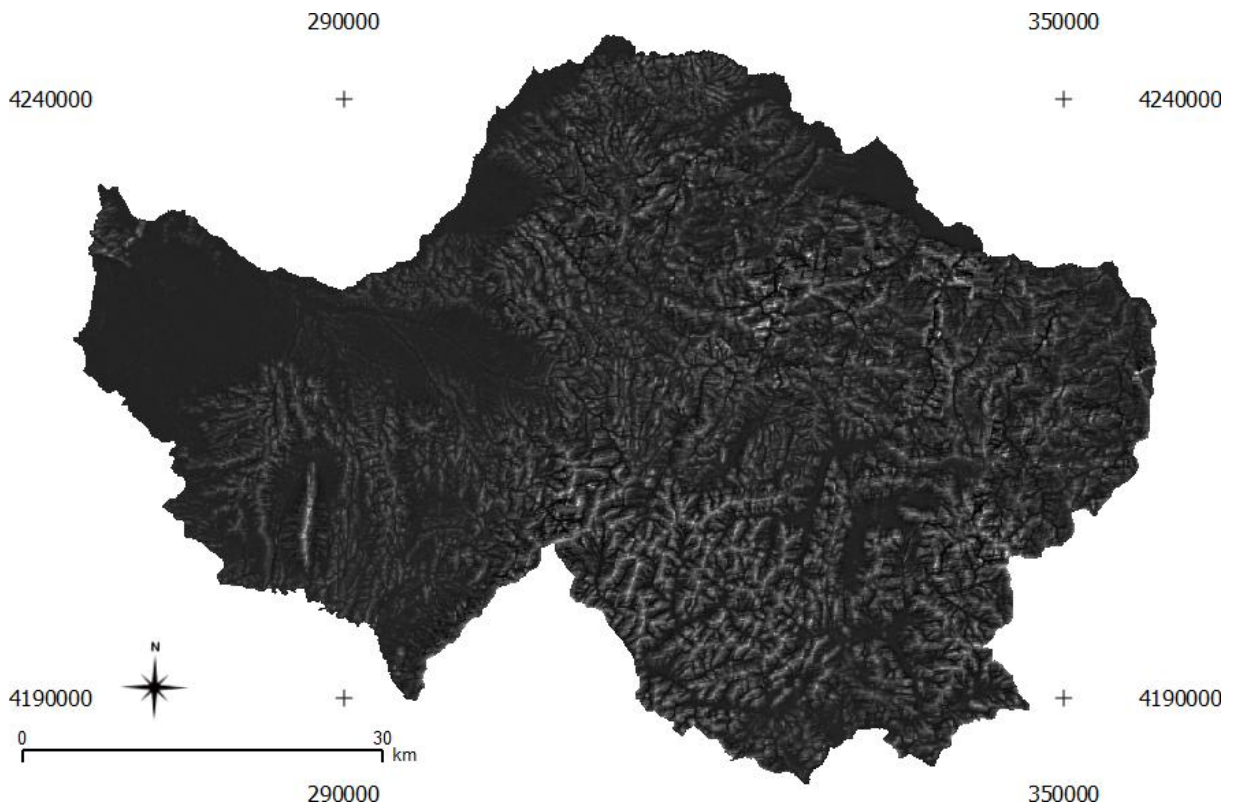
Ο Δείκτης Καμπυλότητας Κατωφέρειας (Εικόνα 48) επηρεάζει την ταχύτητα ροής του νερού κάτω από μια κλίση και ως εκ τούτου επηρεάζει τη διάβρωση και την κίνηση του εδάφους και του νερού (Aspinall et al. 2015).



Εικόνα 48: Ο Δείκτης Καμπυλότητας Κατωφέρειας (*Downslope Curvature, CD*).

- Δείκτης Καμπυλότητας Ανωφέρειας (Upslope Curvature, UC)

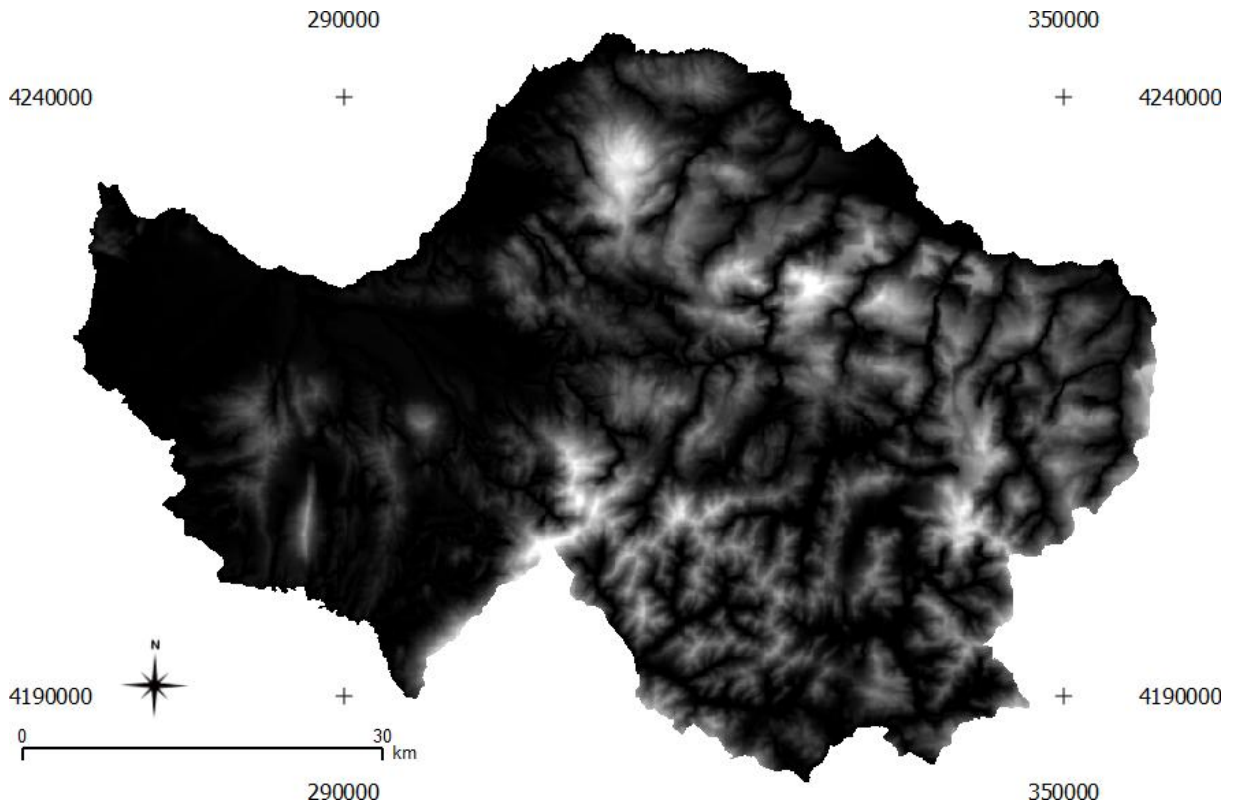
Ο Δείκτης Καμπυλότητας Ανωφέρειας (Εικόνα 49) είναι το διάστημα από τη μέση σταθμική τοπική καμπυλότητα της ανωφέρειας του κελιού της περιοχής συμβολής, βασισμένη στην πολλαπλή κατεύθυνση ροής (Freeman 1991).



Εικόνα 49: Ο Δείκτης Καμπυλότητας Ανωφέρειας (*Upslope Curvature, UC*).

- Δείκτης Απόστασης Δικτύου Καναλιών (Channel Network Distance, CND)

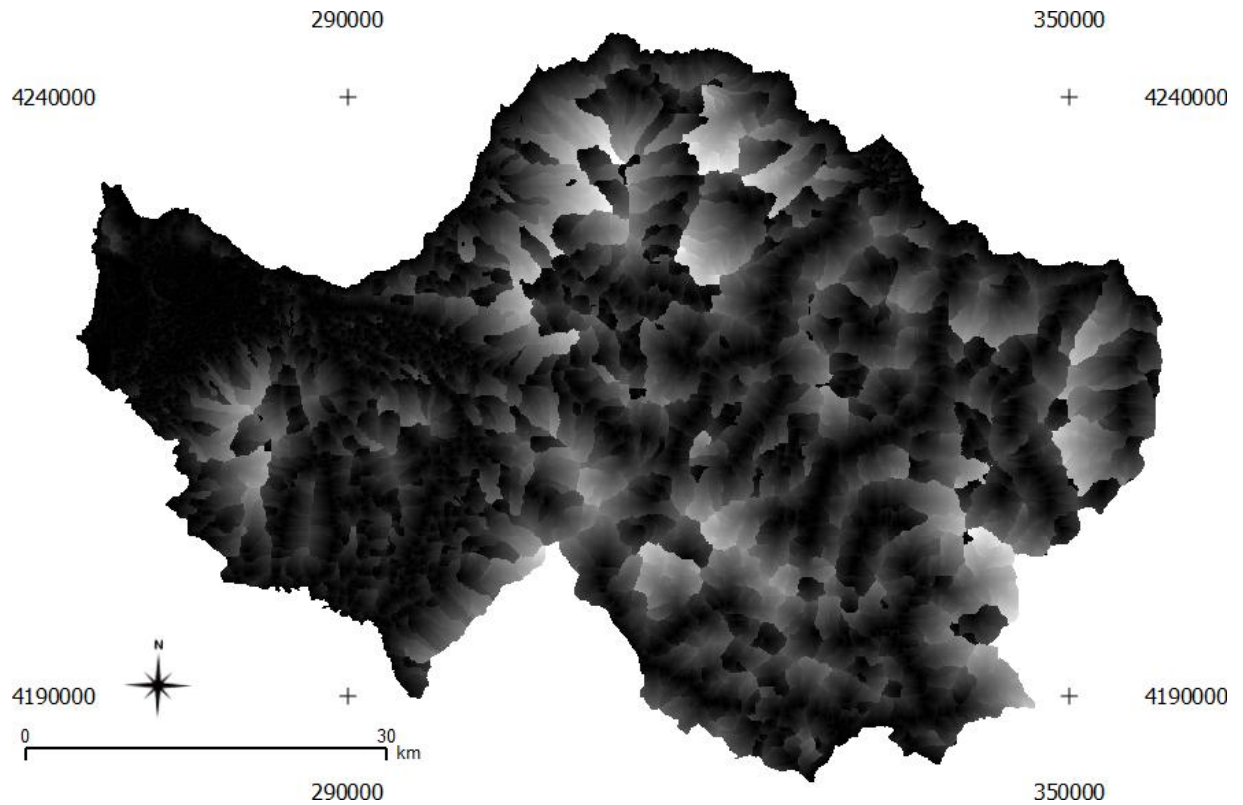
Ο Δείκτης Απόστασης Δικτύου Καναλιών (Εικόνα 50) αντιπροσωπεύει τη στρωματογραφική σχέση ή τη διαδικασία αποκοπής, που δημιουργεί αστάθειες στη βάση των κλίσεων (Märker et al. 2016).



Εικόνα 50: Ο Δείκτης Απόστασης Δικτύου Καναλιών (Channel Network Distance, CND).

- Δείκτης Μήκους Διαδρομής Ροής (Flow Path Length, FPL)

Ο Δείκτης Μήκους Διαδρομής Ροής (Εικόνα 51) ορίζεται ως η απόσταση από την προέλευση της οριζόντιας ροής μέχρι εκεί που εισέρχεται σε μια κύρια συγκεντρωμένη περιοχή ροής, όπως ένα ποτάμι, ένα ρέμα ή μία εκτροπή (Renard et al. 1997).



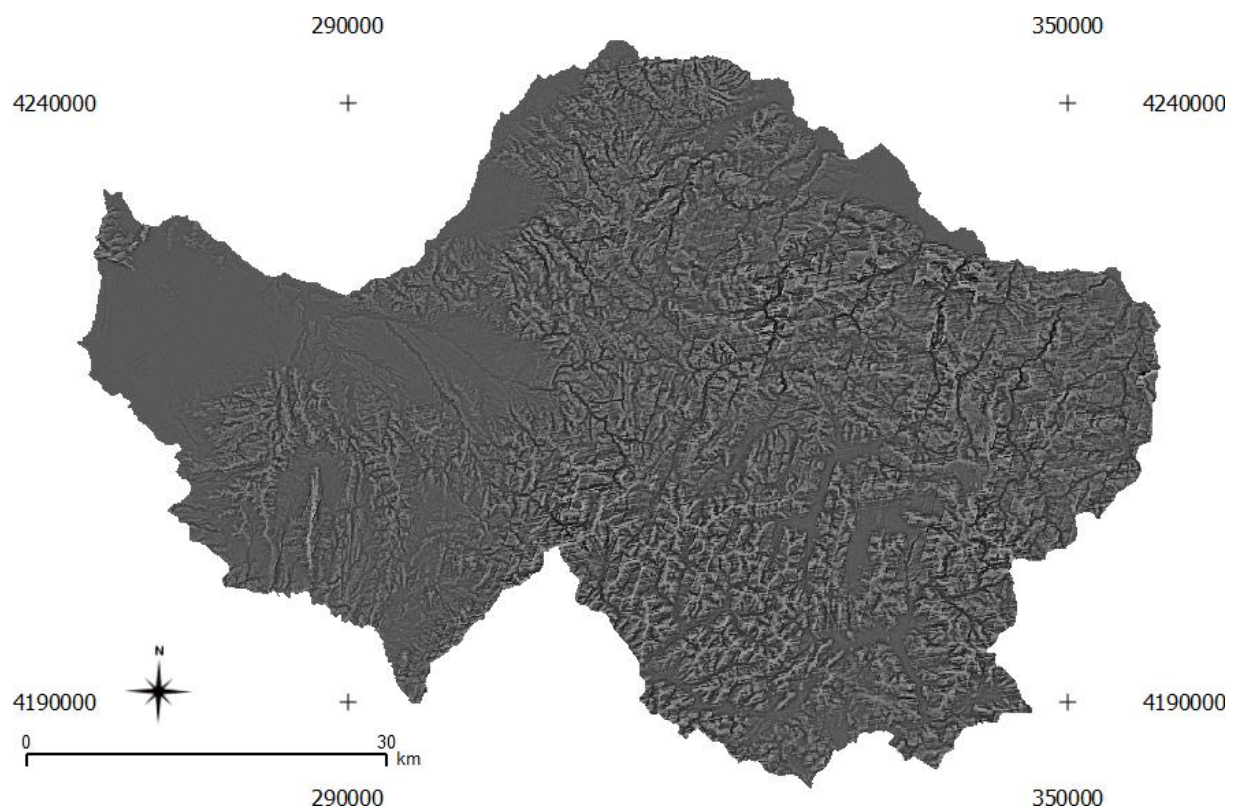
Εικόνα 51: Ο Δείκτης Μήκους Διαδρομής Ροής (Flow Path Length, FPL).

- Δείκτης Ισορροπίας Μάζας (Mass Balance Index, MBI)

Ο Δείκτης Ισορροπίας Μάζας (Εικόνα 52) είναι μία γεωμορφομετρική μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μίας περιοχής.

Οι αρνητικές τιμές του Δείκτη Ισορροπίας Μάζας αντιπροσωπεύουν περιοχές καθαρής εναπόθεσης όπως κοιλάματα και κοιλάδες, ενώ οι θετικές τιμές του Δείκτη Ισορροπίας Μάζας αντιπροσωπεύουν περιοχές διάβρωσης όπως κυρτές κλίσεις λόφων.

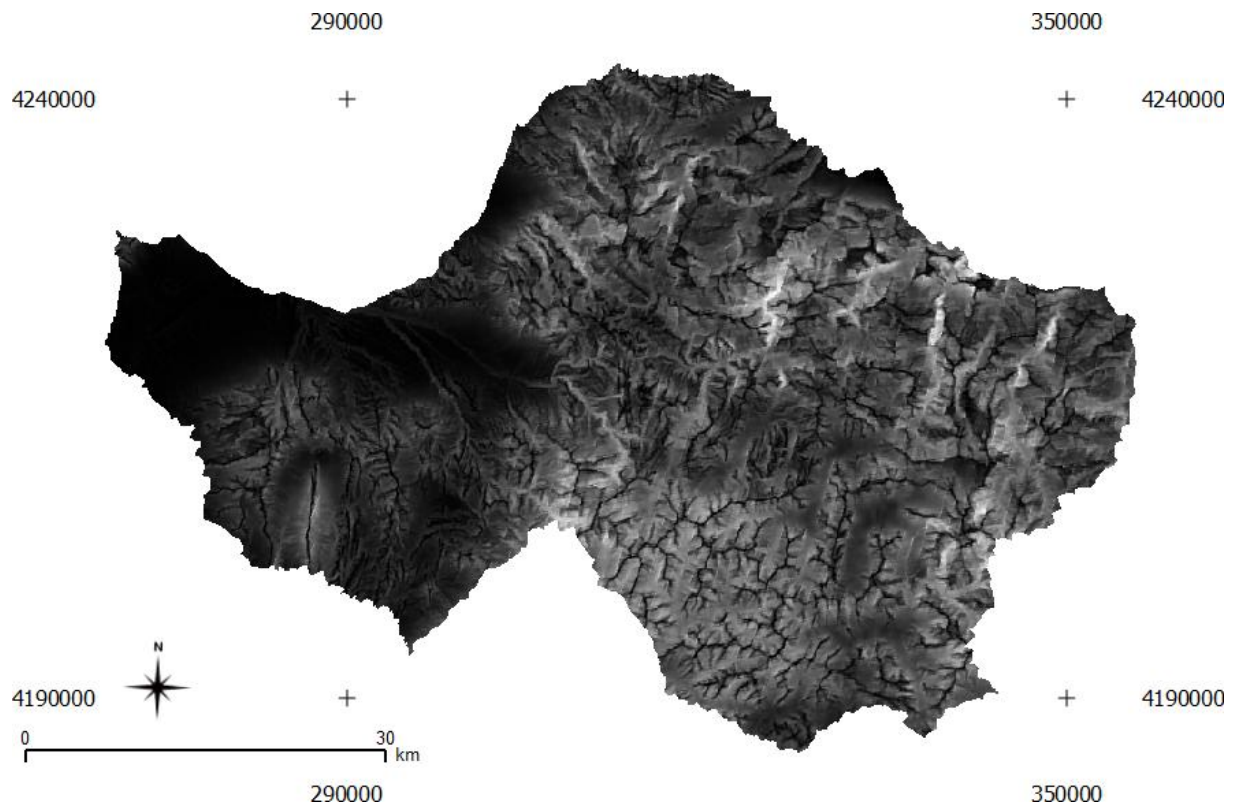
Οι τιμές του Δείκτη Ισορροπίας Μάζας κοντά στο 0 αναφέρονται σε περιοχές με ισορροπία μεταξύ διάβρωσης και εναπόθεσης όπως πεδιάδες (Möller et al. 2008).



Εικόνα 52: Ο Δείκτης Ισορροπίας Μάζας (Mass Balance Index, MBI).

- Δείκτης Μορφομετρικής Προστασίας (Morphometric Protection Index, MPI)

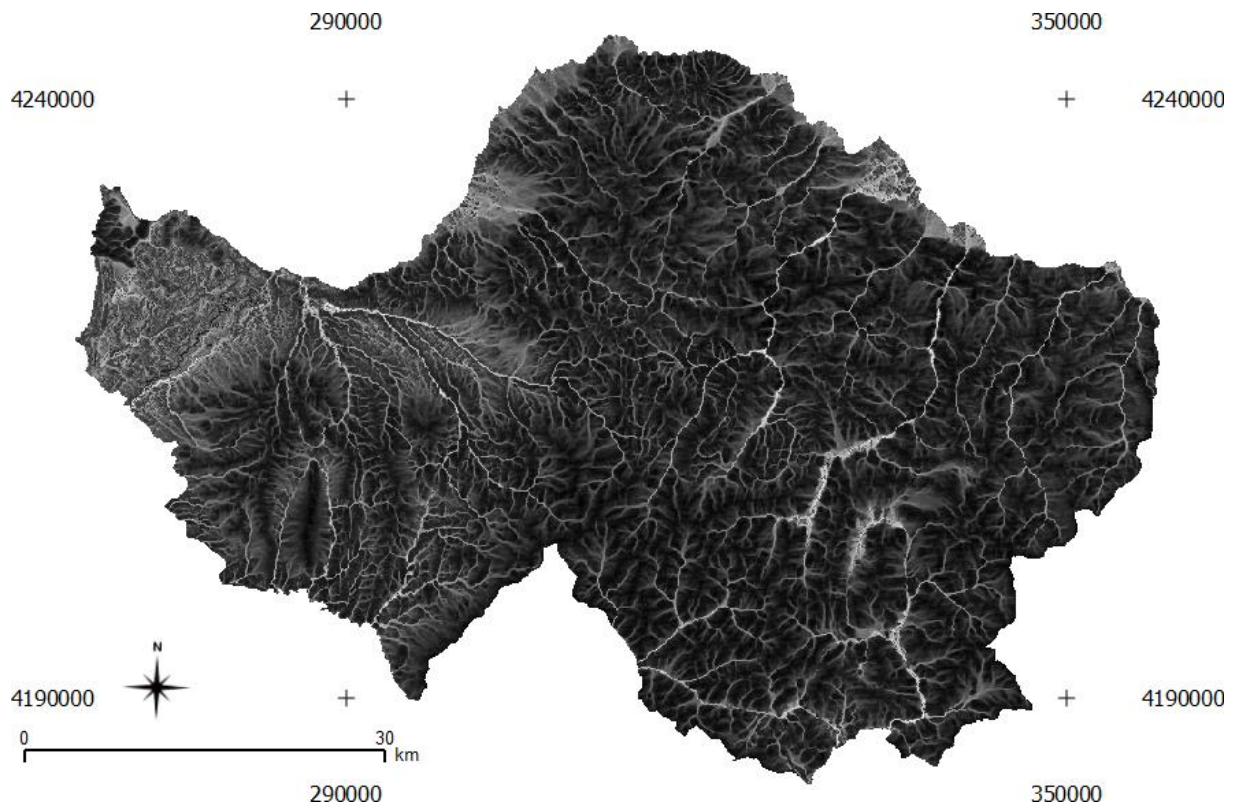
Ο Δείκτης Μορφομετρικής Προστασίας (Εικόνα 53) είναι ένα αλγόριθμος που αναλύει το άμεσο περιβάλλον κάθε κελιού μέχρι μια δεδομένη απόσταση και αξιολογεί πώς προστατεύει το ανάγλυφο (Yokoyama et al. 2002).



Εικόνα 53: Ο Δείκτης Μορφομετρικής Προστασίας (*Morphometric Protection Index, MPI*).

- Δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας (Topographic Wetness Index, TWI)

Ο Δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας (Εικόνα 54) είναι ένας δείκτης σταθερής κατάστασης που είναι σε θέση να προβλέψει περιοχές ευαίσθητες σε κορεσμένες επιφάνειες γης και περιοχές που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν χερσαία ροή (Ballarín 2016).



Εικόνα 54: Ο Δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας (Topographic Wetness Index, TWI).

B Λογισμικά Προγράμματα Ελεύθερου Κώδικα

Παρόλο που τα γεωχωρικά λογισμικά ανοιχτού κώδικα είναι δωρεάν, δεν είναι καθόλου κατώτερα από τις εμπορικές εφαρμογές ΓΣΠ. Αντίθετα, τα λογισμικά ελεύθερου και ανοιχτού κώδικα θεωρούνται συνήθως πιο ασφαλή, αξιόπιστα και προσαρμόσιμα στις αντίστοιχες εμπορικές εκδόσεις (Fisher et al 2017).

B.1 Quantum GIS (QGIS)



Το λογισμικό GIS διαθέτει φιλικό γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας με το χρήστη και ενσωματώνει εργαλεία και λειτουργίες όπως η σχεδίαση και η ταυτόχρονη σχεδίαση διανυσματικών και κανονικοποιημένων γεωχωρικών δεδομένων, η διαχείριση και ο μετασχηματισμός του Συστήματος Αναφοράς Συντεταγμένων (ΣΑΣ), η διερεύνηση των δεδομένων και η χαρτοσύνθεση, η συλλογή, η επεξεργασία, η διαχείριση και η εξαγωγή, η χωρική ανάλυση και η γεωεπεξεργασία των δεδομένων, η δημοσιοποίηση στο διαδίκτυο κ.ά. Υποστηρίζει πολλαπλούς μορφότυπους διανυσματικών και κανονικοποιημένων δεδομένων και επικοινωνεί με χωρικές βάσεις δεδομένων. Προσφέρει ισχυρές αναλυτικές δυνατότητες μέσω της συνεργασίας του με το GRASS GIS και άλλες βιβλιοθήκες εργαλείων (Τσούλος κ.ά. 2015).

B.2 System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS)



Το λογισμικό SAGA GIS παρέχει μια σειρά ισχυρών και άκρως λειτουργικών εφαρμογών που συχνά υπερβαίνουν τις εμπορικές επιλογές. Παράλληλα, ενημερώνεται συνεχώς από τους προγραμματιστές και την κοινότητα των χρηστών, διατηρώντας το συναφές με τις πρωτοποριακές γεωδιαστημικές έρευνες. Σήμερα το SAGA GIS προσφέρει περισσότερα από 700 γεω-επιστημονικά τμήματα που ανταποκρίνονται σε επιστημονικά ερωτήματα και ανάγκες (Conrad et al. 2015). Επιπλέον, η ευελιξία και η ανταπόκριση που το διακρίνει, επιτρέπουν στο γεωπεριφερειακό λογισμικό ανοιχτού κώδικα να ενσωματώνει γρήγορα και απρόσκοπτα προσαρμοσμένες λειτουργίες για τη διευκόλυνση συγκεκριμένων διαδικασιών ή για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ζητημάτων σε θέματα διαχείρισης φυσικών πόρων.

Βιβλιογραφία (Reference)

A Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γεωργόπουλος, Ε. Φ., Λυκοθανάσης, Σ. Δ. (1999) Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους, Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα.
- Δημητρόπουλος, Ε., (2004). Εισαγωγή στη μεθοδολογία της επιστημονικής έρευνας. Ένα συστηματικό δυναμικό μοντέλο. Εκδόσεις Έλλην, Αθήνα.
- Καββαδάς, Μ., Πανταζίδου, Μ. (2007) Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- Καβουνίδης, Σ., Σωτηρόπουλος, Λ., Παπαδόπουλος, Κ., Μπαρδάνης, Μ. (2010) Διαδοχικές κατολισθήσεις σε φλύσχη. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Περιβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 - 01/10/2010, Βόλος.
- Καρβούνης, Σ., Γεωργακέλλος, Δ. (2003) Διαχείριση του Περιβάλλοντος. Επιχειρήσεις και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
- Κολοκούσης, Π., Λάζογλου, Μ., Γαλανού, Ε., Δημοπούλου, Ε. (2016) Σχεδιασμός χρήσεων γης σε ορεινές περιοχές με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων. 8^ο Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο του ΕΜΠ και του ΜΕΚΔΕ του ΕΜΠ: Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη των Ορεινών και των Γεωγραφικά Απομονωμένων Περιοχών, 22-24 Σεπτεμβρίου, Μέτσοβο.
- Κουϊμτζής, Θ., Φυτιάνος, Κ., Σαμαρά, Κ. (1998) Χημεία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Κουτσόπουλος, Κ. (2002) Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Λέκκας, Λ. Ε. (2000) Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές. Β΄ Έκδοση, Αθήνα.
- Μηλιαρέσης, Γ. Χ. (2006) Ειδικές Εφαρμογές στο ArcGIS. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Μηλιαρέσης, Γ. Χ. (2003) Φωτοερμηνεία Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
- Σφέτσος, Α., Ελευθεριάδου, Α. (2016) EU-CIRCLE: Πανευρωπαϊκό πρόγραμμα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των κρίσιμων υποδομών έναντι των φυσικών καταστροφών. Conference Paper: Νέες Τεχνολογίες & Πολιτική Προστασία, Έβρος.
- Ρόζος, Δ. (2007) Τεχνική Γεωλογία Ι, Αθήνα.
- Σακελλαρίου, Μ., Φερεντίνου, Μ., Χαραλάμπους, Σ., Ματζιάρης, Β. (2007) Πρόληψη - Διαχείριση των Φυσικών Καταστροφών. Ο ρόλος του Αγρονόμου Τοπογράφου Μηχανικού, ΤΕΕ, ΠΣΔΑΤΜ, ΕΜΠ, 11 Δεκεμβρίου, Αθήνα.

- Στεργιάδης, Γ. (1989) Δασική Οδοποιία (Β' Μέρος), Κατασκευή δασικών δρόμων, Θεσσαλονίκη.
- Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., Στάμου, Λ. (2015) Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον. (Ηλεκτρονικό βιβλίο, διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2506>) Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα.
- ΤτΕ (2011) Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής: Μεταβολές στην ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών. Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα.

B Διεθνής Βιβλιογραφία

- Aspinall, D., Rabe, N., McDonald, I. (2015) Understanding precision agriculture: Mapping Elevation and Topographic Modelling. *Ontario Grain Farmer Magazine*.
- Ayalew, L. (1999) The effect of seasonal rainfall on landslides in the highlands of Ethiopia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **58**:09-19.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., and Ugawa, N. (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination: The case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*. **01**:73-81.
- Bacchini, M., Zannoni, A., (2003) Relations between rainfall and triggering of debris-flow: A case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **03**:71-79.
- Ballerine, C. (2016) Topographic Wetness Index: A GIS Approach to Identifying Areas At Risk of Urban Flooding. University of Illinois Urbana-Champaign.
- Bendix, J. (2004) *Geländeklimatologie - Studienbücher der Geographie*. Gebrüder Borntraeger. Berlin, Stuttgart.
- Bertolini, G., Guida, M., and Pizziolo, M. (2005) Landslides in Emilia-Romagna region (Italy): Strategies for hazard assessment and risk management. *Landslides* **02**(4):302-312.
- Blaszczynski, J. S. (1997): Landform Characterization with Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **63**(2):183-191.
- Böhner J., and Antonic, O. (2009) Chapter 8 land-surface parameters specific to topoclimatology. In: Hengl, T., Reuter, H., I., editors. *Geomorphometry: Concepts*,

- Software, Applications*. Elsevier; Amsterdam. **33**:195-226. (Developments in Soil Science).
- Böhner, J., and Selige T. (2006) Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In: Böhner, J., McCloy, K., R. & Strobl, J. (Eds.): *Göttinger Geographische Abhandlungen*. **115**:13-28, 118-120.
- Borgatti, L., and Soldati, M. (2010) Landslides as a geomorphological proxy for climate change: A record from the Dolomites (northern Italy).
- Buma, J., and Dehn, M. (2000) Impact of climate change on a landslide in South East France, simulated using different GCM scenarios and downscaling methods for local precipitation. *Climate Research*. **15**:69-81.
- Caine, N. (1980) Rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*. **62**(A):23-27.
- Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B., and Pelella, L. (2000) The influence of meteoric events in triggering shallow landslides in pyroclastic deposits of Campania, Italy. Cardiff, UK, 26-30 June, *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. **01**:209-214.
- Cannon, S. H. (1988) Regional rainfall-threshold conditions for abundant debris-flow activity. In: Landslides, Floods, and Marine Effects of the Eform of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay Region, California (Ellen SD, Wieczorek GF, eds). *US Geological Survey Professional Paper*. **1434**:35-42.
- Cannon, S. H. and Gartner, J. E. (2005) Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. In: Debris flow Hazards and Related Phenomena (Jakob, M. and Hungr, O. eds). Springer Berlin Heidelberg, 363-385.
- Cao, K., Batty, M., Huang, B., Liu, Y., Yu, L. and Chen, J. (2011) Spatial Multi-Objective Land Use Optimization: Extensions to the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II, *International Journal of Geographical Information Science*. **25**:1949-1969.
- Capitani, M., Ribolini, A., and Bini, M. (2013) The slope aspect: A predisposing factor for landsliding? *Comptes rendus Geoscience*. **345**(11-12):427-438.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and Reichenbach, P. (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*. **16**(5):427-445.
- Chepurna T. B. (2011) Regional spatial-temporal prediction of mudflow hazard using GIS technology. Dissertation, Taras Shevchenko National University of Kyiv.

- Chung, C. J. F., Fabbri, A. G. (2003) Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*. **30**(3):451-472.
- Cilliers, P. (1999) Complexity & Postmodernism, Rutledge, Taylor & Francis Group.
- Coates, D. R. (1977) Landslide perspective. In: D.R. Coates (Editor), *Reviews In Engineering Geology: Landslides*, Geological Society of America. **03**:03-28.
- Collison, A., Wade, S., Griffiths, J., Dehn, M. (2000) Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. *Engineering Geology*. **55**:205-218.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann V., Böhner, J. (2015) System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. **8**:1991-2007:DOI:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Coops, N. C., Gallant, J. C., Loughhead, A. N., Mackey, B. J., Ryan, P. J., Mullen, I. C. & Austin, M. P. (1998) Developing and testing procedures to predict topographic position from Digital Elevation Models (DEMs) for species mapping (Phase 1). *Report to Environment Australia, Client Report 271*:56. CSIRO FFP, Canberra.
- Corominas, J, Moya, J (1996) Historical landslides in the Eastern Pyrenees and their relation to rainy events. In: Landslides (Chacon, J., Irigaray, C., and Fernandez, T., eds). Rotterdam: A. A. Balkema, 125-132.
- Costanzo, D., Rotigliano, E., Irigaray, C., Jiménez - Perálvarez, J.D., Chacón, J. (2012) Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the GIS matrix method: application to the river Beiro basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **12**(2):327-340.
- Coussot, P., and Meunier, M. (1996) Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*. **03-04**:209-227.
- Cruden, D. M. (2003) The First Classification of Landslides, *Environmental & Engineering Geosciences*. **09**:197-200.
- Cruden, D. M. (1991) A Simple Definition of a Landslide, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. **43**:27-29.
- Deb, K. (2001) Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons Ltd., New York.
- Dymond, J., Derose, R., and Harmsworth, G. (1995) Automated mapping of land components from digital elevation data: *Earth Surface Processes and Landforms*. **20**:131-137.

- Ercanoglu, M., and Gokceoglu, C. (2002) Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach, *Environmental Geology*. **41**:720-730.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W.Z. (2008) On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*. **102**(03-04):85-98.
- Fischer, R., P., Hobgen, S., E., Haleberek, K., Sula, N., Mandaya, I. (2017) Free satellite imagery and digital elevation model analyses enabling natural resource management in the developing world: Case studies from Eastern Indonesia. *Singapore Journal of Tropical Geography*. **39**:45-61:DOI:10.1111/sjtg.12210.
- Freeman, G., T. (1991) Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*. **17**:413-422.
- Gallant, J. C. and Wilson, J. P. (2000) Primary Topographic Attributes. In: Wilson, J. P. & Gallant J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. 51-85. Wiley.
- Goodchild, M. F. (1985) Geographic Information Systems in undergraduate geography: A contemporary dilemma. *The Operational Geographer*. **08**:34-38.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2007) Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*. **98**:239-267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2008) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*. **05**:03-17.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005) Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*. **72**(01-04):272-299.
- Harp, E. L., Jibson, R. W., Savage, W. Z., Highland, L. M., Larson, R. A. and Tan, S. S. (1999) Landslides triggered by January and March 1995 storms in southern California. In K. Sassa, ed., *Landslides of the world*, Japan Landslide Society, Kyoto University Press, 268-273.
- Hutchinson, J. N. (1995) Keynote paper: Landslide hazard assessment, Christchurch, Balkema, Rotterdam, *Proceedings 6th International Symposium on Landslides*. **03**:1805-1841.

- Imhof, E. (1982) Cartographic Relief Presentation, (Steward, H.J., Ed.). Walter de Gruyter, Berlin. p.389.
- Innes, J. L. (1983) Debris flows. *Progress in Physical Geography*. **07**:469-501.
- IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis, in Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, New York. 996.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J. (2007) Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*. **41**(01):61-79.
- Iverson, R. M. (1997) The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*. **35**:245-296.
- Iwahashi, J., Pike, R. J. (2007) Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*. **86**:409-440.
- Lee, S., and Choi, J. (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model, *International Journal of Geographical Information Science*. **18**:789-814.
- Lee, S., and Min, K., (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yon gin, Korea, *Environmental Geology*. **40**:1095-1113.
- Liu, Y., Liu, D., Liu, Y., He, J., Jiao, L., Chen, Y., and Hong, X. (2012) Rural Land Use Spatial Allocation in the Semiarid Loess Hilly Area in China: Using a Particle Swarm Optimization Model Equipped with Multi-Objective Optimization Techniques, *Science China Earth Sciences*. **55**:1166-1177.
- MacQueen, J. B. (1967) Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Berkeley, University of California Press, **01**:281-297.
- Märker, M., Hochschild, V., Maca, V. and Vilímek, V. (2016) Stochastic assessment of landslides and debris flows in the Jemma basin, Blue Nile, Central Ethiopia. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. **39**:51-58:DOI 10.4461/ GFDQ 2014.39.5.
- Mather, P. (1987) Computer Processing of Remotely-Sensed Images. John Wiley & Sons. New York.

- Megahan, W.F., Day, N.F. and Bliss, T.M. (1978) Landslide occurrence in the western and central Northern Rocky Mountain Physiographic Province in Idaho. In C.T. Youngberg (ed.), *Forest soils and land use*. Proceedings of the 5th North American Forestry Soils Conference, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 116-139.
- Miliaresis, G. (2009). The terrain signatures of administrative units: a tool for environmental assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. **150**(1-4):385-396.
- Miliaresis, G. (2006) Geomorphometric mapping of Asia Minor from GLOBE digital elevation model. *Geografiska Annaler Series A: Physical Geography*. **88**(3):209-221.
- Miliaresis, G., Sabatakakis, N., and Koukis, G. (2005) Terrain Pattern Recognition and Spatial Decision Making for Regional Slope Stability Studies. **14**:91-100.
- Miliaresis, G., and Illiopolou, P. (2004) Clustering of Zagros Ranges from the Globe DEM representation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **05**:17-28.
- Miliaresis, G., and Argialas, D. (2000) Extraction and delineation of alluvial fans from DEMs & Landsat TM images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **66**:1093-1101.
- Miliaresis, G., and Argialas, D. (1999) Segmentation of physiographic features from the global digital elevation model/GTOPO30. *Computers & Geosciences*, **25**(07):715–728.
- Minár, J. and Evans, I. (2008) Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*. **95**(3-4):236-259.
- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L. (2008) Placing soil genesis and transport processes into a landscape context: A multi-scale terrain analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. **171**:419-430.
- Moore, J. M., Asphaug, E. B., Michael, J. S., Bierhaus, B., Breneman, H. H., Brooks, S. M., Chapman, C. R., Chuang, F. C., Collins, G. C., Giese, B., Greeley, R., Head III, J. W., Kadel, S., Klaasen, K. P., Klemaszewski, J. E., Magee, K. P., Moreau, J., Morrison, D., Neukum, G., Pappalardo, R. T., Phillips, C. B., Schenk, P. M., Senske, D. A., Sullivan, R. J., Turtle, E. P., Williams, K. K. (1998) Large impact features on Europa: Results of the Galileo nominal mission. *Icarus*. **135**:127-145:DOI:10.1006/icar.1998.5973.

- Mulligan, M. (1998) Modelling the geomorphological impact of climatic variability and extreme events in a semiarid environment. *Geomorphology*. **24**(01):59-78.
- O'Tousa, J. (1995) La Conchita landslide, Ventura County, California. *AEG News*, Association Environmental & Engineering Geologists. **38**(4):22-24.
- Pellicani, R., Van Westen, C., and Spilotro, G. (2014) Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslides*. **11**(03):463-480.
- Pike R. J., Evans I. S. and Hengl T. (2008) Geomorphometry: A brief guide. In: T. Hengl and H. Reuter, Elsevier Eds. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Amsterdam. **33**:03-30.
- Qin, C., Zhu, A., Li, B., Pei, T, Zhou, C, and Shi, X. (2009) Quantification of spatial gradation of slope positions. *Geomorphology*. **110**(3-4):152-161.
- Radbruch-Hall, D. H., and Varnes, D. J. (1976) Landslides: Cause and effect. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. **14**:205-216.
- Reichenbach, P., Pike, R., Acevedo, W., and Mark, R. (1993) A new landform map of Italy in computer-shaded relief. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*. **52**(01):21-44.
- Remondo, J., Bonachea, J., and Cendrero, A. (2005) A statistical approach to landslide risks modelling at basin scale: From landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*. **02**(4):321-328.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*. **703**:384.
- Reuter, H., Wendroth, O. and Kersebaum, K. (2006) Optimisation of relief classification for different levels of generalization. *Geomorphology*. **77**(1-2):79-89.
- Romstad, B. and Etzelmüller, B. (2009) Structuring the digital elevation model into landform elements through watershed segmentation of curvature. In: Purves, R., Gruber, S., Straumann, R., and Hengl, T. (Eds.) *Proceedings of Geomorphometry*. 55-60. University of Zurich. Zurich, Switzerland.
- Rotigliano, E., Cappadonia, C., Conoscenti, C., Costanzo, D., and Agnesi, V. (2012) Slope units based flow susceptibility model: using validation tests to select controlling factors. *Natural Hazards*. **61**(01):143-153.
- Sangar, S., and Kanungo, D. (2004) An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **70**:617-625.

- Schuster, R. L. and Fleming, R. W. (1986) Economic losses and fatalities from landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **23**:11-28.
- Schuster, R., and Krizek, R. (1978) Landslides analysis and their control. USA, *National Academy of Science, Special Report*. **176**:234.
- Schuster, R. L., Nieto, A. S., O'Rourke, T.D., Crespo, E. and Plaza-Nieto, G. (1996) Mass wasting triggered by the 5 March 1987 Ecuador earthquakes. *Engineering Geology*. **42**(1):1-23.
- Shahabi, H., and Hashim, M., (2015) Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific Reports*. **5** (9899):DOI:10.1038/srep09899.
- Sharpe, C. (1938) Landslides and related phenomena: A study of mass-movements of soil and rock, Columbia University Press, New York.
- Shary, P. A. (1995) Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*. **27**(3):373–390.
- Shaygan, D. M., Alimohammadi, A., Mansourian, A., Govara, Z.S. and Kalami, S.M. (2013) Spatial Multi-Objective Optimization Approach for Land Use Allocation Using NSGA-II, IEEE, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. **07**:906-916.
- Smith, R. B., Commandeur, P. R. and Ryan, M. W. (1986) Soil, vegetation, and forest growth on landslides and surrounding logged and old-growth areas on the Queen Charlotte Islands. British Columbia Ministry of Forests. *Land Management Handbook*. **41**:95
- Soldati, M., Corsini, A., and Pasuto, A. (2004) Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late glacial. *Catena*. **55**:141-161.
- Srinivas, N., and Deb, K. (1994) Multiobjective Optimization Using Non-dominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*. **02**:221-248.
- Swanston, D. N. and Swanson, F. J. (1976) Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest. In D.R. Coates, (ed.), *Geomorphology and engineering*, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pennsylvania. 199-221.
- Thamm, H., P. (2000) Modellierung von Flächendatensätzen der Oberflächentemperatur, Strahlungsbilanz und Kaltluftproduktion in Strahlungsnächten. – Dissertation. Selbstverlag der Universität Freiburg.

- Tapia, M. G. C., and Coello, C. A. C. (2007) Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance: A Survey, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 25-28 September 2007, Singapore. 532-539.
- Terzaghi, K. (1950) Mechanism of Landslides In: S. Paige (ed.), Application of geology to engineering practice, Geological Society of America, Berkley. 83-123.
- Chepurna, T. B., Kuzmenko, E. D., Chepurnyj, I. V. (2017) Geoinformational prognostic model of mudflows hazard and mudflows risk fo the territory of Ukrainian Carpathians. *Contemporary Trends in Geoscience*. **6**(1):57-69. DOI: 10.1515/cgt-2017-0005.
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., and Soeters, R. (2006) Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **65**:167-184.
- Varnes, D. J. (1958) Landslide types and processes, In: E.B. Eckel (ed.) Landslides and engineering practice. *Highway Research Board Special Report*. **247**(29):20-47.
- Varnes, D. J. (1978) Slope movement Types and Processes, TRB, National Research Council, Wessington D.C. *Landslides (Special Report): Analysis and Control (Schuster, R. L., and Kriezsek, R.)*. **176**:11-33.
- Veveakis, E., Vardoulakis, I., Di Toro, G. (2007) Thermo-poro-mechanics of creeping landslides: The 1963 Vaiont slide, Northern Italy. *Journal of Geophysical Research*. **112**(F03026):DOI:10.1029/2006JF000702.
- Vranken, L., Vantilt, G., Van Den Eeckhaut, M., Vandekerckhove, L., and Poesen, J. (2015) Landslide risk assessment in a densely populated hilly area. *Landslides*. **12**(4):787-798
- Wachal, D. J., and Hudak, P. F., (2000) Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *GeoJournal*. **51**:245-253.
- Weiss A. D. (1999) Topographic Position and Landforms, The Nature Conservancy. (Conference Poster).
- WP/WLI (1990) A suggested method for reporting a landslide. International Geotechnical Societies, UNESCO, Working Party on World Landslide Inventory (Chairman: Cruden, D.) *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **41**(1):5-12.
- WP/WLI (1991) A suggested method for a landslide summary. International Geotechnical Societies, UNESCO, Working Party on World Landslide Inventory (Chairman: Cruden, D.) *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **43**:101-110.

- WP/WLI (1993) Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies, UNESCO, Working Party on World Landslide Inventory (Chairman: Cruden, D). BiTech Publishers, Richmond. 59.
- WP/WLI (1994) A suggested method for reporting landslide causes. International Geotechnical Societies, UNESCO, Working Party for World Landslide Inventory (Chairman: Popescu, M.E.) *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **50**(1):71-74.
- WP/WLI (1995) A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (Chairman: Popescu, M.E.) *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **52**(1):75-78.
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R. J. (2002) Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **68**:251-266.
- Youd, T. L. (1978) Major cause of earthquake damage is ground failure. *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers. **48**(4):47-51.
- Zaruba, Q., and Mencl, V. (1969) Landslides and their control, Czechoslovak Academy of Sciences and American, 1st Edition, Elsevier.
- Zevenbergen, L. W., and Thorne C. R. (1987) Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*. **12**:47-56.

Γ Διαδικτυακές Αναφορές

- ABC7 (1949) Los Angeles and Southern California News. URL: <http://abc7.com/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Baskenlandblog: Euskadi - Ein Blog über das Baskenland. URL: <https://baskenlandblog.wordpress.com/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- European Environment Agency, EEA (1990). URL: <https://www.eea.europa.eu/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Geodata (2010) Ανοικτά γεωχωρικά δεδομένα και υπηρεσίες για την Ελλάδα. URL: <http://geodata.gov.gr/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Geography. URL: <http://geography.name/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).

- Geology: Geoscience News and Information (2005). URL: <https://geology.com/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS. IRIS SeismoArchive for 1970 Peru earthquake. URL: <https://www.iris.edu/hq/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- LandInfo (2000). URL: <https://library.mcmaster.ca/maps/geospatial/geocover-landsat-7> Worldwide Mapping LLC. *GeoCover Orthorectified Landsat 7 Thematic Mapper Mosaics*. Highland's Ranch, CO: NASA Applied Science & Technology Project Office.
- Ontario Grain Farmer Magazine, GFO (2009). URL: <http://ontariograinfarmer.ca/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Stagon News: Η ηλεκτρονική εφημερίδα της Καλαμπάκας (2011). URL: <https://www.stagonnews.gr/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- Shuttle Radar Topography Mission, SRTM (2004). URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).
- United States Geological Survey, USGS (1879). URL: <https://www.usgs.gov/> (Τελευταία προσπέλαση Απρίλιος 2018).