ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Τμήμα Γεωγραφίας
Π.Μ.Σ: «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και διαχείριση του χώρου»
Κατεύθυνση: Γεωπληροφορική

Χρήση ΣΓΠ για την αξιολόγηση της επίδρασης των γεωκινδύνων στους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου

Διπλωματική εργασία

Γεράρδης Ιωάννης

Αθήνα, 2022

HAROKOPIO UNIVERSITY
Department of Geography
Postgraduate Programme “Applied Geography and Spatial Planning”
Stream: Geo-informatics

Use of GIS for geohazards impact assessment on natural gas pipelines

Postgraduate Thesis

Gerardis Ioannis

Athens, 2022

Εικόνα εξωφύλλου: Έργα κατασκευής στην περιοχή Βεράτι, Αλβανία, Δεκέμβριος 2016

Πηγή: http://www.tap-ag.gr

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Τμήμα Γεωγραφίας
Π.Μ.Σ: «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και διαχείριση του χώρου»
Κατεύθυνση: Γεωπληροφορική

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Χρήστος Χαλκιάς (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας,

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ευθύμιος Καρύμπαλης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας,

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ισαάκ Παρχαρίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας,

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ο Ιωάννης Γεράρδης δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Αφιερώνεται

στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία κλείνει ο κύκλος των μεταπτυχιακών σπουδών, ένα όμορφο ταξίδι στην επιστημονική γνώση. Τόσο για την εκπόνηση της όσο και για την συνολική πορεία στο πρόγραμμα των μαθημάτων, έλαβα την ηθική και πρακτική υποστήριξη από πολλούς, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου.

Πρώτα από όλα την οικογένειά μου που με στήριξε στον μέγιστο βαθμό ειδικά σε δύσκολες στιγμές. Τους καθηγητές που ακόμα και στους δύσκολους καιρούς των τελευταίων μηνών βοήθησαν στην πρόοδό μου.

Τους συναδέλφους μου, που με ενθάρρυναν να ξεκινήσω και να ολοκληρώσω το εγχείρημα των μεταπτυχιακών σπουδών. Τους συμφοιτητές μου, που πάντα πρόθυμοι συνεργάστηκαν μαζί μου και λίγο παραπάνω κάποιους εξ αυτών που βοήθησαν σαν φίλοι.

Τίποτα δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την συνδρομή όλων των παραπάνω.

Φεβρουάριος, 2022

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη 8
Abstract 9
Κατάλογος Πινάκων 11
Κατάλογος Διαγραμμάτων 12
Κατάλογος Χαρτών 13
1. Εισαγωγή 14
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας 14
1.2 Το πρόβλημα των γεωκινδύνων 15
1.3 Πιλοτική εφαρμογή της διπλωματικής 16
1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας 17
2. Δίκτυα μεταφοράς ενέργειας και γεωκίνδυνοι 19
2.1 Φυσικό Αέριο 19
2.2 Φυσικό Αέριο και διακίνηση αέριων καυσίμων 20
2.3 Διακίνηση Φυσικού Αερίου και αγωγοί μεταφοράς 21
2.4 Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα 23
2.5 Φυσικοί Κίνδυνοι και διακίνηση αέριων καυσίμων 25
2.6 Γεωκίνδυνοι στους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου 26
2.7 Ταξινόμηση γεωκινδύνων 27
2.8 Επίδραση των φυσικών καταστροφών στα συστήματα μεταφοράς φυσικού αερίου 34
2.9 Περιπτώσεις επίδρασης των γεωκινδύνων σε αγωγούς φυσικού αερίου 35
2.10 Η σημαντικότητα της εκτίμησης του κινδύνου στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών. 40
2.11 Η συμβολή της χαρτογράφησης κινδύνων στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών. 41
3. Γεωπληροφορική και χαρτογράφηση γεωκινδύνων 42
3.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) 42
3.2 Πλεονεκτήματα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών 42
3.3 Μειονεκτήματα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών 44

3.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων διαχείρισης δικτύων με ΣΓΠ 45

3.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση μεθόδων διαχείρισης φυσικών καταστροφών σε αγωγούς φυσικού αερίου με ΣΓΠ 47

4. Μεθοδολογία και τρόπος οργάνωσης της Βάσης Δεδομένων 50

4.1 Εισαγωγή 50

4.2 Σχεδιασμός και δημιουργία Χωρικής Βάσης Δεδομένων 51

4.3 Επιλογή επηρεαζόμενης ζώνης 52

4.4 Διαδικασία ροής και ομογενοποίησης δεδομένων 53

4.5 Περιεχόμενα βάσης δεδομένων 53

4.6 Γεωτεχνικοί Γεωκίνδυνοι 56

4.6.1 Παράγοντες επίδρασης 56

4.6.2 Μεθοδολογία 57

4.6.3 Ποιοτικές μέθοδοι 58

4.6.4 Ποσοτικές μέθοδοι 60

4.7 Υδροτεχνικοί Γεωκίνδυνοι 63

4.7.1 Μεθοδολογία 63

4.7.2 Παράγοντες επίδρασης - Διαθέσιμα δεδομένα 64

4.8 Τεκτονικοί Γεωκίνδυνοι 64

4.8.1 Μεθοδολογία 64

4.8.2 Παράγοντες επίδρασης 65

5. Πιλοτική εφαρμογή στην αξιολόγηση επιδεκτικότητας στον κατολισθητικό κίνδυνο αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου 66

5.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης 66

5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά 66

5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγού φυσικού αερίου 68

5.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση με χρήση του Δείκτη Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων ή Landslide Susceptibility Index (LSI). 69

5.2.1 Εισαγωγή 69

5.2.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο 70

5.2.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο 72

5.2.4 Δεδομένα 73

5.3 Δεδομένα 75
5.3.1 Δημιουργία δευτερογενών μεταβλητών 76
5.3.2 Επαναταξινόμηση δεδομένων 76
5.3.3 Υπολογισμός της πυκνότητας κατολισθήσεων 78
5.4 Αποτελέσματα 79
5.4.1 Δείκτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (LSI) 79
5.4.2 Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση .88
5.4.3 Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση .90
5.5 Μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση με χρήση της τεχνικής της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MultiCriteria Decision Analysis) 92
5.5.1 Εισαγωγή 92
5.5.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο 93
5.5.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο 95
5.6 Αρχικές επεξεργασίες, δημιουργία δευτερογενών μεταβλητών και επαναταξινομήσεις σε ενιαία τακτική κλίμακα 96
5.7 Σύνθεση παραμέτρων και υπολογισμός του δείκτη επιδεκτικότητας 108
5.7.1 Επιδεκτικότητα κατολίσθησης κατά μήκος του αγωγού φυσικού αερίου 110
5.8 Έλεγχος ακριβείας 113
6. Συζήτηση και Συμπεράσματα 116
6.1 Γενικά 116
6.2 Εκτίμηση επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (LSI) 118
6.3 Πολυκριτηριακή ανάλυση επιδεκτικότητας κατολίσθησης 119
6.4 Αξιολόγηση και μελλοντικές επεκτάσεις 121

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή οι φυσικές καταστροφές επηρεάζουν εκατομμύρια ζωές παγκοσμίως κάθε χρόνο. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, είναι αποτέλεσμα της άμεσης επαφής του ανθρώπινου στοιχείου με τη γήινη επιφάνεια, γεγονός που το καθιστά επιρρεπές σε γεωκινδύνους και σε εδαφικές αστοχίες όπως για παράδειγμα σε πιθανή ενεργοποίηση κατολισθήσεων. Μεταξύ άλλων, μια από τις ανθρώπινες υποδομές που συχνά δοκιμάζονται από τις επιπτώσεις των γεωκινδύνων είναι τα δίκτυα των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής, αποτέλεσε ο σχεδιασμός των προδιαγραφών για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, η οποία θα περιλαμβάνει όλες εκείνες τις χωρικές πληροφορίες που απαιτούνται για τις μεθόδους αποτίμησης της επίδρασης των φυσικών κινδύνων, συγχρόνως με την αντίστοιχη οργάνωση που απαιτείται για την συγκέντρωση, ταξινόμηση και επεξεργασία τους από τα εργαλεία ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

Σε εφαρμογή των ανωτέρω, γίνεται εκτίμηση της επίδρασης ενός φυσικού κινδύνου όπως αυτός της κατολίσθησης για μία συγκεκριμένη περιοχή διέλευσης αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου. Ο τελικός βαθμός επιδεκτικότητας αποδόθηκε τόσο μέσω του δείκτη επιδεκτικότητας LSI (Landslide Susceptibility Index), όσο και με τη χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τα δε αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη χρήση θεματικών χαρτών και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά:

Φυσικές Καταστροφές, Γεωκίνδυνοι, Κατολισθήσεις, Φυσικό Αέριο, Σωληναγωγός, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), LSI, Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων

Abstract

Nowadays, natural disasters affect millions of lives globally every year. In most of the cases, natural disasters are result of the contact of human infrastructures with earth's surface. Because of this, many of the human elements are exposed to geohazards such as landslides. One of the human infrastructures that is often affected by the impact of geohazards is the natural gas transmission pipelines.

The object of this dissertation is, the design of specifications to create a database which will include all spatial information for the assessment of geohazards impact to the natural gas transmission pipelines, and in addition all the planning, which is necessary for collecting, assorting, and editing using the available tools of Geographic Information System (GIS).

Implementing the above, a landslide susceptibility assessment is developed for a specific area that includes a gas transmission pipeline corridor. The susceptibility analysis is applied using both Landslide Susceptibility Index (LSI) and spatial MultiCriteria analysis theory. Finally, the results are presented through thematic maps, combined with the relative conclusions.

Keywords:

Natural Disasters, Geohazards, Landslides, Natural gas, Pipeline, Geographic Information Systems (GIS), LSI, MultiCriteria Decision Analysis

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Κατολίσθηση..... 31
Εικόνα 2. Διάβρωση κοίτης – ρέμα Μαύρης Ώρας Ασπρόπυργος Αττικής 32
Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση της κατολίσθησης σε μια από τις περιοχές αστοχίας στο Περού. 36
Εικόνα 4. Ανατολική όψη της περιοχής Αντινίτσας. 38
Εικόνα 5. Διάβρωση ποταμού και αποκάλυψη αγωγού φυσικού αερίου, ρέμα Σούρες Μάνδρα Αττικής..... 39
Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής των ΓΣΠ στην διαχείριση δικτύων. 47
Εικόνα 7. Περιοχή μελέτης. 66
Εικόνα 8. Περιοχή μελέτης πλησίον της πόλης της Λαμίας. 67

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.Γεωκίνδυνοι σε αγωγούς μεταφοράς καυσίμων 28
Πίνακας 2.Γεωκίνδυνοι σε αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου στην Ελλάδα. 30
Πίνακας 3. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. 68
Πίνακας 4. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. 75
Πίνακας 5. LSI βάσει υψομέτρου. 80
Πίνακας 6. LSI βάσει μορφολογικών κλίσεων. 81
Πίνακας 7. LSI βάσει έκθεσης αναγλύφου. 82
Πίνακας 8. LSI βάσει γεωλογίας. 83
Πίνακας 9. LSI βάσει χρήσεων γης. 84
Πίνακας 10. LSI βάσει της απόστασης από το οδικό δίκτυο. 85
Πίνακας 11. LSI βάσει της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο. 86
Πίνακας 12. LSI βάσει της απόστασης από τα ρήγματα. 87

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Διάγραμμα συσχέτισης γεωκινδύνων 33
Διάγραμμα 2. 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 2010 – 2019) 35
Διάγραμμα 3. Σχηματική αναπαράσταση σταδίων εργασίας. 50
Διάγραμμα 4. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας. 71
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας. 94

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 1. Επιδεκτικότητα βάσει υψομέτρου. 80
Χάρτης 2. Επιδεκτικότητα βάσει μορφολογικών κλίσεων. 81
Χάρτης 3. Επιδεκτικότητα βάσει έκθεσης αναγλύφου. 82
Χάρτης 4. Επιδεκτικότητα βάσει γεωλογίας. 83
Χάρτης 5. Επιδεκτικότητα βάσει χρήσεων γης..... 84
Χάρτης 6. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από το οδικό δίκτυο. 85
Χάρτης 7. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο. 86
Χάρτης 8. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από τα ρήγματα..... 87
Χάρτης 9. Συνολική επιδεκτικότητα κατολισθήσεων..... 89
Χάρτης 10. Συνολική επιδεκτικότητα κατολισθήσεων κατά μήκος του αγωγού..... 91
Χάρτης 11. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει μορφολογικών κλίσεων..... 97
Χάρτης 12. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει της γεωλογίας..... 99
Χάρτης 13. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει των χρήσεων γης. 101
Χάρτης 14. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει εγγύτητας στο οδικό δίκτυο. ... 103
Χάρτης 15. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει εγγύτητας στο υδρογραφικό δίκτυο. 105
Χάρτης 16. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει απόστασης από τα σεισμικά ρήγματα..... 107
Χάρτης 17. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων χωρίς τη χρήση βαρών..... 109
Χάρτης 18. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων χωρίς τη χρήση βαρών κατά μήκος του αγωγού. 111
Χάρτης 19. Σύγκριση επιδεκτικότητας μεταξύ των 2 μεθοδολογιών. 115

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος "Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου" με κατεύθυνση την "Γεωπληροφορική" και αποτελεί το επιστέγασμα αυτού του κύκλου μεταπτυχιακών σπουδών.

Αντικείμενο της διατριβής αποτέλεσε ο σχεδιασμός των προδιαγραφών για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, η οποία θα περιλαμβάνει όλες εκείνες τις χωρικές πληροφορίες που απαιτούνται για τις μεθόδους αποτίμησης της επίδρασης των φυσικών κινδύνων, συγχρόνως με την αντίστοιχη οργάνωση που απαιτείται για την συγκέντρωση, ταξινόμηση και επεξεργασία τους από τα εργαλεία ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

Ειδικότερα, η εν λόγω βάση δεδομένων (για την οποία ο σχεδιασμός της θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο) σχετίζεται με τα συστήματα μεταφοράς καυσίμων, και πιο συγκεκριμένα τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου. Οι αγωγοί είναι κατασκευές ως επί τω πλείστον μεγάλου μήκους, μέσω των οποίων μεταφέρονται ενεργειακά αποθέματα σε υγρή ή αέρια μορφή. Παρότι έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι μεταφοράς των διαφόρων ενεργειακών αποθεμάτων (φορτηγά, τραίνα, πλοία), οι αγωγοί χαρακτηρίζονται ως τα πλέον ασφαλή και παραγωγικά μέσα κι έχουν καθοριστικό ρόλο στο παγκόσμιο δίκτυο ενέργειας, μεταφέροντας ενεργειακά αποθέματα από τις πηγές παραγωγής είτε στις μονάδες επεξεργασίας (π.χ. διυλιστήρια) , είτε στην απευθείας τροφοδότηση δισεκατομμύρια καταναλωτών.

Ως εκ τούτου τα χωρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται, εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι σε άμεση συνάρτηση με τους παράγοντες που επηρεάζουν κάθε φυσικό κίνδυνο, καθίστανται διαφορετικά για κάθε έναν από αυτούς. Πέραν αυτών ωστόσο, σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των

χωρικών δεδομένων αποτελεί και η ίδια η φύση του έργου των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά του έργου (π.χ. γραμμικό, μέγεθος, περιοχές διέλευσης κ.α.) κατευθύνουν σε συγκεκριμένες επιλογές χωρικών δεδομένων, ούτως ώστε να έχουν την δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής και περιγραφής των φαινομένων.

1.2 Το πρόβλημα των γεωκινδύνων

Τα έργα κατασκευής αγωγών, στην πλειονότητα των περιπτώσεων αποτελούν πρόκληση για όλους όσους εμπλέκονται σε αυτά. Οι προκλήσεις που ανακύπτουν, είναι αποτέλεσμα της άμεσης επαφής του εκάστοτε αγωγού με τη γήινη επιφάνεια, γεγονός που τους καθιστά επιρρεπείς σε γεωκινδύνους και σε εδαφικές αστοχίες όπως για παράδειγμα σε πιθανή ενεργοποίηση κατολισθήσεων, σε περιοχές κατά μήκος των αγωγών.

Παρά τη εφαρμογή αυστηρών προδιαγραφών κατά το στάδιο της χάραξης ενός αγωγού για την αποφυγή των επιπτώσεων των γεωκινδύνων, οι περισσότερες κατασκευές σήμερα, εξαιτίας της φρενήρους επέκτασης του παγκόσμιου δικτύου αγωγών μεταφοράς ενεργειακών αποθεμάτων, έχουν πραγματοποιηθεί σε περιοχές όπου οι γεωκίνδυνοι δεν ήταν ιδιαίτερα κρίσιμοι, παρόλα αυτά όμως υπαρκτοί.

Στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης για παράδειγμα, μέχρι σήμερα η πλειοψηφία των αγωγών είναι εγκαταστημένη στις βόρειες χώρες όπου οι εδαφικές αστοχίες και τα σεισμικά γεγονότα δεν αποτελούν ιδιαίτερο κίνδυνο. Η προσπάθεια όμως επέκτασης των αγωγών σε χώρες σαν την Ελλάδα, περιοχή με έντονη σεισμικότητα και ενδεχόμενη εδαφική αστάθεια, καθιστά τους γεωκινδύνους σημαίνοντα παράγοντα στο στάδιο επιλογής της κατάλληλης χάραξης των αγωγών. Προσθέτοντας κανείς σαν δεδομένες πλέον τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, οι κίνδυνοι εξαιτίας των γεωκινδύνων πολλαπλασιάζονται.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό συνεπώς, ότι η εγγενής αλληλεπίδραση των αγωγών με τη γήινη επιφάνεια δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης νέων εργαλείων για την κατάδειξη των επικίνδυνων αυτών περιοχών στα στάδια της χάραξης αγωγών και την πρόβλεψη πιθανών εδαφικών και δομικών αστοχιών στη μετέπειτα φάση της λειτουργίας τους.

1.3 Πιλοτική εφαρμογή της διπλωματικής

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, με την αξιοποίηση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και όλων των διαθέσιμων δεδομένων που πρέπει να περιλαμβάνει μια οργανωμένη βάση δεδομένων σχετικά με φαινόμενα κατολισθήσεων, έγινε διερεύνηση της επικινδυνότητας των κατολισθήσεων σε επιλεγμένη περιοχή της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας, και πιο συγκεκριμένα στην Περιφερειακή Ενότητα της Φθιώτιδας.

Στόχος αυτής της προσπάθειας, αποτέλεσε η ανάδειξη του προβλήματος των κατολισθήσεων σε περιοχές από τις οποίες υπάρχει όδευση δικτύου αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου. Τα κατολισθητικά φαινόμενα έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε τέτοιου είδους έργα, και αν και η σοβαρότητά τους υποεκτιμάται σε σχέση με άλλα φαινόμενα όπως είναι οι σεισμοί ή οι πλημμύρες, στην πραγματικότητα ωστόσο αποτελούν σοβαρότατο κίνδυνο για τη συνέχιση της ασφαλούς λειτουργίας ενός αγωγού.

Η εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε κατολισθήσεις στηρίχτηκε σε ορισμένους παράγοντες-μεταβλητές. Οι παράγοντες αυτοί είναι οκτώ (υψόμετρο, κλίση, προσανατολισμός, γεωλογία, χρήσεις γης, απόσταση από οδικό δίκτυο, απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο, τεκτονισμός) και επιλέχτηκαν για την περαιτέρω διερεύνηση της επιδεκτικότητας των κατολισθήσεων, ως παράγοντες που προκαλούν ή επιδρούν στην εμφάνιση τέτοιων φαινομένων.

Η διεθνής βιβλιογραφία, βρίθει από διάφορα στατιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του δείκτη επιδεκτικότητας. Στην παρούσα διπλωματική, ο τελικός βαθμός επιδεκτικότητας αποδόθηκε μέσω του δείκτη επιδεκτικότητας LSI (Landslide Susceptibility Index). Σύμφωνα με τον δείκτη αυτό, αναλύεται η χωρική σχέση ανάμεσα στην έκταση των παραγόντων επίδρασης ως προς την εκδήλωση κατολισθήσεων και στην έκταση που έχει υποστεί κατολίσθηση. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η σημαντικότητα των παραγόντων.

Τέλος, είναι αξιόλογο να αναφερθεί ότι η στατιστική μέθοδος LSI δομείται επάνω στην καταγραφή και χαρτογράφηση προηγούμενων κατολισθήσεων, εξαιτίας της πιθανότητας επανεκδήλωσης κατολισθήσεων στην ίδια περιοχή.

Κάτι επιπλέον που θα πρέπει να αναφερθεί είναι ότι, στην παρούσα διπλωματική εφαρμόζεται και η μεθοδολογία της Χωρικής Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με χαρτογραφική υπέρθεση. Με την υπέρθεση πολλαπλών θεματικών χαρτών τείνουν να αποκαλυφθούν οι τοποθεσίες με την μέγιστη και την ελάχιστη επιδεκτικότητα, σύμφωνα με τα κριτήρια της πολυκριτηριακής ανάλυσης που προηγήθηκε.

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται συνολικά από τέσσερεις ενότητες. Οι πρώτες τρεις συγκροτούν το θεωρητικό μέρος της εργασίας, ενώ στις δύο τελευταίες ενότητες περιλαμβάνεται το εμπειρικό μέρος και η μελέτη περίπτωσης. Πιο αναλυτικά:

Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στο θεωρητικό πλαίσιο που σχετίζεται με το φυσικό αέριο και τους αγωγούς μεταφοράς ενεργειακών αποθεμάτων. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους γεωκινδύνους και στο πως αυτοί επηρεάζουν τέτοια

τεχνικά έργα, και τέλος, γίνεται αναφορά σε μερικές περιπτώσεις όπου οι γεωκίνδυνοι προκάλεσαν ζημιές σε υφιστάμενα δίκτυα ενέργειας.

Στην δεύτερη ενότητα, αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο γύρω από τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, τα πλεονέκτημα και τα μειονεκτήματά τους, κι επιπλέον γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων διαχείρισης δικτύων με ΣΓΠ. Επιπλέον, ασχολείται με τη μεθοδολογία και τον τρόπο οργάνωσης της Βάσης Δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά στο σχεδιασμό και τη δημιουργία της βάσης, στις επηρεαζόμενες ζώνες και στην οργάνωση των περιεχομένων. Επιπλέον θα αναπτυχθεί το θεωρητικό πλαίσιο γύρω από τις μεθοδολογίες και τις μεθόδους ανάλυσης των δεδομένων, ανά τύπο γεωκινδύνου.

Στην τρίτη ενότητα και έπειτα, περιλαμβάνεται το εμπειρικό μέρος και η μελέτη περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, θα αναπτυχθεί το μεθοδολογικό πλαίσιο, θα αναλυθούν οι μεταβλητές και τα δεδομένα, και θα γίνει εφαρμογή του δείκτη επιδεκτικότητας LSI και έλεγχος ακρίβειας με τη χρήση της απλής αθροιστικής υπέρθεσης, καθώς και πραγματικών δεδομένων.

Στην τέταρτη και τελευταία ενότητα, διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα, ενώ τέλος γίνεται ο απολογισμός της διπλωματικής εργασίας και αναπτύσσονται οι προοπτικές που διακρίνονται, σαν προέκταση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

2. Δίκτυα μεταφοράς ενέργειας και γεωκίνδυνοι

2.1 Φυσικό Αέριο

Το Φυσικό Αέριο, είναι ένα ορυκτό καύσιμο σε μορφή μείγματος αέριων υδρογονανθράκων και θεωρείται η καθαρότερη πηγή ενέργειας μετά τις Ανανεώσιμες. Η σύσταση του φυσικού αερίου αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH4), όμως συνυπάρχουν σε αυτό και άλλα μικρά ποσά αερίων όπως το αιθάνιο (C2H6), το προπάνιο (C3H8), το βουτάνιο (C4H10) καθώς και άλλες χημικές ενώσεις (ΔΕΣΦΑ Α.Ε., 2021).

Το Φυσικό Αέριο είναι άχρωμο, αόρατο και άοσμο. (Καραπάνος, 2008) Χαρακτηρίζεται ως ορυκτό καύσιμο, γιατί εξορύσσεται από υπόγειες κοιλότητες γεωλογικών σχηματισμών στις οποίες βρισκόταν υπό υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες εκατομμύρια χρόνια πριν έως σήμερα. Είναι μια φυσική μορφή ενέργειας με τον τρόπο σχηματισμού της να παρομοιάζει με τον τρόπο σχηματισμού του πετρελαίου, ενώ επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία.

Το Φυσικό Αέριο σύμφωνα με ιστορικές πηγές, ανακαλύφθηκε τυχαία στην αρχαία Κίνα ενώ γινόταν διάτρηση για εξόρυξη αλατιού. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Κινέζους περίπου το 500 π.Χ. και το αέριο μεταφερόταν με αγωγούς από μπαμπού με κέρινη μόνωση (Μήρτσιος, 2018). Στο σύγχρονο δυτικό κόσμο τα επιτεύγματα αυτά ήταν άγνωστα επί αιώνες και το Φυσικό Αέριο ανακαλύφθηκε μόλις το 1659 μ.Χ. στην Αγγλία. Επιπροσθέτως, η πρώτη βιομηχανική εξαγωγή και χρήση Φυσικού Αερίου στον κόσμο ξεκίνησε στη πόλη Fredonia στην περιφέρεια της Νέας Υόρκης το 1825, για την φωταγώγηση των δρόμων.

Το Φυσικό Αέριο σήμερα είναι το πλέον περιζήτητο καύσιμο εξαιτίας της υψηλής του θερμογόνου δύναμης, της αποδοτικής του καύσης και της μειωμένης

περιβαλλοντικής του επιβάρυνσης, που οφείλεται στην χαμηλή περιεκτικότητα των καυσαερίων του σε ρυπογόνες ουσίες. Λόγω της φιλικότητάς του προς το περιβάλλον, έχει επικρατήσει ως το κατεξοχήν καύσιμο των αστικών περιοχών και βρίσκει ευρύτατη εφαρμογή στην οικιακή χρήση, στις μεταφορές και στις συγκοινωνίες (χερσαίες και θαλάσσιες), στη βιομηχανία καθώς και στην ηλεκτροπαραγωγή.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου με Φυσικό Αέριο, αποτελεί σήμερα την καθαρότερη διαθέσιμη πηγή ενέργειας με χρήση υδρογονανθράκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να παρουσιάζεται αυξημένη χρήση του Φυσικού Αερίου. Με δεδομένο την επέκταση και αναβάθμιση του δικτύου μεταφοράς και διανομής, εγκαθίστανται όλο και περισσότερες νέες μονάδες Φυσικού Αερίου παγκόσμια, αντικαθιστώντας παράλληλα παλαιότερες ρυπογόνες μονάδες άλλης μορφής τεχνολογιών. (Υ.ΠΕ.Ν., 2013)

2.2 Φυσικό Αέριο και διακίνηση αέριων καυσίμων

Εξαιτίας των εντεινόμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και κατά συνέπεια της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης μορφών ενέργειας πιο φιλικών προς το περιβάλλον, απαιτούνται σήμερα όλο και περισσότερα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα φυσικού αερίου. Η ζήτηση αυτή καλύπτεται τόσο με νέες ανακαλύψεις κοιτασμάτων αλλά και με τη βελτίωση των μεθόδων εκμετάλλευσης, οι οποίες καθιστούν πλέον την εξόρυξη πιο οικονομική σε παλαιότερα μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα. (Καραπάνος, 2008)

Ως εκ τούτου, με την ζήτηση κατά περιοχές και χώρες να παρουσιάζεται αυξανόμενη, δημιουργείται μια τάση εντατικοποίησης της διακίνησης του φυσικού αερίου και πιο συγκεκριμένα του συνολικού μεταφερόμενου όγκου από τις

χώρες υψηλής παραγωγής προς τις υπόλοιπες καταναλώτριες χώρες. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταφοράς να αυξάνονται αδιάκοπα κατά παρόμοιο τρόπο με την υπερπόντια μεταφορά πετρελαίου, αφού συνήθως τα κοιτάσματα φυσικού αερίου βρίσκονται μακριά από τα κύρια κέντρα καταναλώσεως. (Καραπάνος, 2008) Συνεπώς, η διαδικασία της μεταφοράς και διακίνησης του φυσικού αερίου αποτελεί το μόνο ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία χρήση του.

Η μεταφορά και η διακίνηση του φυσικού αερίου εξαρτάται από την κατάστασή του. Για να καταστεί δυνατή η υπερπόντια μεταφορά του, μετά από συμπίεση σε υψηλές πιέσεις και ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, μετατρέπεται από αέριο σε υγρό σε ειδικές κρυογονικές εγκαταστάσεις. Αποτέλεσμα της υγροποίησης είναι η συρρίκνωση του όγκου του από την αέρια στην υγρή κατάσταση καταλαμβάνοντας όγκο 600 φορές μικρότερο. Στη συνέχεια με τη χρήση κρυογονικών δεξαμενόπλοιων και της παγκόσμιας ναυσιπλοΐας διακινείται σε όλο τον κόσμο, για να καταλήξει σε κρυογονικές δεξαμενές και να επαναεροποιηθεί προς προώθηση στο δίκτυο φυσικού αερίου. Τέλος, για την διακρατική διακίνηση μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου πάνω από χερσαίες εκτάσεις σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων, πραγματοποιείται μεταφορά σε αέρια κατάσταση με τη χρήση διασυνδεδεμένων δικτύων αγωγών μεταφοράς σε υψηλές πιέσεις. (Καραπάνος, 2008)

2.3 Διακίνηση Φυσικού Αερίου και αγωγοί μεταφοράς

Οι αγωγοί διακίνησης φυσικού αερίου είναι κατασκευές μεγάλου μήκους, μέσω των οποίων μεταφέρονται υγρά ή αέρια αποθέματα. Παρότι υπάρχουν πολλοί τρόποι μεταφοράς των διάφορων ενεργειακών αποθεμάτων (φορτηγά,

τρένα, πλοία), οι αγωγοί χαρακτηρίζονται ως τα πιο ασφαλή και αποτελεσματικά μέσα μεταφοράς καυσίμων από τις πηγές παραγωγής στις μονάδες επεξεργασίας, και στη συνέχεια στους καταναλωτές. (Καραπάνος, 2008)

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει και στη διάκριση μεταξύ των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου και των αγωγών διανομής. Οι αγωγοί μεταφοράς χρησιμοποιούνται κυρίως για την διακρατική διακίνηση του φυσικού αερίου διαμέσου γειτονικών κρατών αλλά και εντός της επικράτειας ενός κράτους για την δυνατότητα παροχής φυσικού αερίου σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, τις βιομηχανικές μονάδες ή ακόμα και σαν πύλες εισόδου για τους οικιακούς καταναλωτές.

Κατά γενικό κανόνα, οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου τοποθετούνται υπόγεια και οδεύουν σε μη αστικές περιοχές, διασχίζοντας πεδινές ή ορεινές περιοχές. Παρόλα αυτά, εκτός από υπόγειους αγωγούς μεταφοράς, κατασκευάζονται ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και προϋποθέσεις, και υπέργειοι αγωγοί, με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στα φυσικά φαινόμενα. (Hopkins, 2006)

Αν και οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου είναι εφικτό να κατασκευαστούν και κάτω από τη θάλασσα, η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα απαιτητική τεχνικά και χρηματικά, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος των θαλάσσιων μεταφορών να πραγματοποιείται με ειδικά δεξαμενόπλοια κρυογονικού τύπου. (Hopkins, 2006)

Αντίθετα με τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, τα δίκτυα διανομής έχουν σαν σκοπό την παροχή φυσικού αερίου στους τελικούς καταναλωτές όπως οι οικιακοί πελάτες και οι βιομηχανίες. Τοποθετούνται στην συντριπτική πλειοψηφία τους εντός διαμορφωμένων οδών, όπως όλα τα δίκτυα κοινής ωφέλειας.

Τα δύο είδη δικτύων, με την παραπάνω διάκριση που έχουν ως προς τον σκοπό που εξυπηρετούν, παρουσιάζουν και αντίστοιχες διαφοροποιήσεις ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά τους (διάμετρος, υλικό, πίεση λειτουργίας κ.λπ.)

2.4 Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, το φυσικό αέριο ήρθε για πρώτη φορά μόλις το 1996, οπότε και ολοκληρώθηκε η κατασκευή των πρώτων δικτύων αγωγών φυσικού αερίου και ξεκίνησε η λειτουργία τους. Από τότε έως σήμερα, τόσο η ανάπτυξη των δικτύων φυσικού αερίου όσο και οι αριθμοί καταναλωτών ή καταναλώσεων είναι σταθερά αυξανόμενοι. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, οι προοπτικές να αναδειχθεί η Ελλάδα σε παραγωγό χώρα αλλά και οι συγκυρίες της διέλευσης διεθνών αγωγών φυσικού αερίου από την ελληνική επικράτεια δημιουργεί ακόμα περισσότερο ενδιαφέρον για τη σημασία του φυσικού αερίου και επιπλέον, αρκετό πεδίο έρευνας για την σίγουρη και ασφαλή λειτουργία τους.

Στην Ελληνική επικράτεια, οι πρώτοι αγωγοί μεταφοράς κατασκευάστηκαν το 1996 υπό την τότε αρμοδιότητα της Δημόσια Επιχείρησης Αερίου (ΔΕΠΑ Α.Ε.). Έκτοτε η ανάπτυξη υπήρξε σταδιακή και οι συγκυρίες επηρέασαν θετικά την ανάπτυξη των αγωγών, καθώς η απελευθέρωση της αγοράς του φυσικού αερίου και της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, οδήγησαν στην σταδιακή ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου (ΕΣΜΦΑ).

Στην Ελλάδα όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για κατανάλωση εισάγονται από τρίτες χώρες είτε σε μορφή αερίου, είτε σε μορφή υγροποιημένου μέσω ειδικών δεξαμενόπλοιων. Στις μέρες μας, το ΕΣΜΦΑ έχει πλέον πανελλαδικά συνολικό μήκος 1.460 km περίπου και αρμόδια εταιρεία για την ανάπτυξη και λειτουργία είναι ο Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.).

Ωστόσο, πέραν των αγωγών μεταφοράς που ανήκουν στον ΔΕΣΦΑ, η ελληνική νομοθεσία δίνει την δυνατότητα κατασκευής και Ανεξάρτητων Συστημάτων Φυσικού Αερίου (ΑΣΦΑ) από ιδιωτικές εταιρείες/επενδυτές. Μία τέτοια περίπτωση αποτελεί και ο αγωγός TAP, συνολικού μήκους 550 km περίπου, ο οποίος εισέρχεται στην Ελλάδα από τα ελληνοτουρκικά σύνορα στην περιοχή του Έβρου και οδεύει δυτικά μέχρι τα ελληνοαλβανικά σύνορα στην Περιφερειακή Ενότητα Καστοριάς.

Οι προοπτικές ανάπτυξης για τον ελλαδικό χώρο είναι γενικά αισιόδοξες, αφού υπάρχουν πολλά σχέδια για την ανάπτυξη περισσότερων - διεθνών κυρίως - αγωγών μεταφοράς, οι οποίοι είτε θα ξεκινούν, είτε θα διέρχονται από διάφορες περιοχές της χώρας μας. Ενδεικτικά αναφέρονται, ο αγωγός προς Βόρεια Μακεδονία (IGNM), ο αγωγός προς Βουλγαρία (IGB), ο αγωγός για την μεταφορά φυσικού αερίου των κοιτασμάτων της Κύπρου και Ισραήλ (East Med) καθώς και πολλοί άλλοι.

Κατά την κατασκευή τους, οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου τοποθετούνται υπογείως στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, επιλέγονται ως επί το πλείστον οδεύσεις μακριά από πόλεις ή οικισμούς, σε αγροτικές ή και δασικές περιοχές. Ανάλογα με την όδευση που έχει επιλεγεί, οι αγωγοί διέρχονται συχνά μέσα από ιδιωτικές ιδιοκτησίες, που αφορούν κυρίως καλλιεργήσιμες εκτάσεις γης. Η μορφολογία της περιοχής ωστόσο, αναγκάζει την όδευση των αγωγών να ακολουθεί την κλίση του εδάφους, η οποία δε σε πολλές περιπτώσεις είναι έντονη ενώ το ίδιο συμβαίνει και με το υψόμετρο των ορεινών σχηματισμών που διασχίζονται.

Οι επιλογές δυσκολότερων διαδρομών για τους αγωγούς φυσικού αερίου έχει το πλεονέκτημα της αποφυγής εκτεταμένης όχλησης ιδιωτικών ιδιοκτησιών, αυξάνει όμως το ρίσκο των κινδύνων που προέρχονται από τους άλλους φυσικούς παράγοντες. Γενικότερα ωστόσο, η όδευση των αγωγών σε μη αστικές

περιοχές, αυξάνει τις πιθανότητες για την έκθεση τους σε εκδήλωση φαινομένων γεωκινδύνων.

2.5 Φυσικοί Κίνδυνοι και διακίνηση αέριων καυσίμων

Παρόλο που η βιομηχανία φυσικού αερίου εξελίσσεται σε μεγάλο βαθμό στις μέρες μας, κατά καιρούς εμφανίζονται έντονα φαινόμενα φυσικών καταστροφών, από την δράση των οποίων πλήττονται τα δίκτυα κοινής ωφελείας με σημαντικές οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις τόσο σε τοπικό, όσο και σε εθνικό ή και διακρατικό επίπεδο.

Οι φυσικοί κίνδυνοι ή αλλιώς γεωκίνδυνοι (geohazards), είναι το σύνολο των διεργασιών του φυσικού περιβάλλοντος, που είναι δυνατόν να πάρουν ακραία μορφή προκαλώντας απειλητικά και επιβλαβή φαινόμενα για το ανθρώπινο στοιχείο (Λέκκας, 2000). Μαζί με την ανθρώπινη δραστηριότητα, οι γεωκίνδυνοι αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς και κρίσιμους παράγοντες για την εκδήλωση αστοχιών στα συστήματα μεταφοράς φυσικού αερίου, τα οποία αποτελούν υποσύνολο των δικτύων κοινής ωφέλειας.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η άμεση επαφή ενός αγωγού φυσικού αερίου με τη γήινη επιφάνεια, τον καθιστά ευάλωτο απέναντι σε κάθε μορφής γεωκίνδυνο ή εδαφικές αστοχίες, όπως για παράδειγμα μια πιθανή ενεργοποίηση κατολισθήσεων σε περιοχές κατά μήκος του αγωγού (τόσο υπό στατικές συνθήκες όσο και κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος), ή ακόμα και η πρόκληση ενός πλημμυρικού συμβάντος. (Γαλλούση, 2017)

Δεδομένης της αύξησης των ακραίων καιρικών φαινομένων λόγω της κλιματικής αλλαγής που καταγράφονται σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και της ιδιαίτερα υψηλής κρισιμότητας από την οποία χαρακτηρίζονται οι υποδομές φυσι-

κού αερίου, κρίνεται αναγκαία η συστηματική αξιολόγηση των φυσικών κινδύνων που εν δυνάμει επηρεάζουν την ακεραιότητα των αγωγών φυσικού αερίου. Η αξιολόγηση αυτή αφενός χρησιμεύει στην επιλογή της βέλτιστης διαδρομής κατά την φάση του σχεδιασμού της αρχικής χάραξης και αφετέρου στην πρόληψη και αρτιότερη οργάνωση των οικονομικών και ανθρώπινων πόρων στη φάση λειτουργίας (Γαλλούση, 2017).

2.6 Γεωκίνδυνοι στους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου

Εστιάζοντας στους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, λόγω της φύσης τους και του γεγονότος ότι οι περισσότεροι από τους αγωγούς είναι υπόγεια θαμμένοι και πολύ σπανιότερα δε υπέργειοι, οι κίνδυνοι που ενέχουν είναι πολύ διαφορετικοί σε σχέση με εκείνους που απειλούν τις κατοικημένες περιοχές, τις ιδιοκτησίες και γενικά άλλου τύπου υποδομές. Ταυτόχρονα, η επίδραση των μετεωρολογικών κινδύνων (π.χ. κεραυνόπτωση, κυκλώνες κα.) είναι εξαιρετικά μικρότερη και πολύ πιο σπάνια σε σύγκριση με αυτή των γεωκινδύνων. Έτσι στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το αντικείμενο μελέτης επικεντρώνεται στην εξέταση των γεωκινδύνων.

Οποιοσδήποτε από τους γεωκινδύνους που μπορεί να προκαλέσει ζημία κατά μήκος ενός αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου, αξιολογείται στο πλαίσιο της απειλής και κατά συνέπεια η σημασία που δίνεται είναι διαφορετική από εκείνη που συνήθως αναμένεται από έναν κίνδυνο. Για παράδειγμα, οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για μια αστική περιοχή, η επίδραση όμως της ηφαιστειακής τέφρας ή της ροής λάβας προς έναν αγωγό που είναι θαμμένος κατ’ ελάχιστον 1m κάτω από το έδαφος είναι αμελητέα (Dastgir, 2013).

2.7 Ταξινόμηση γεωκινδύνων

Σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα, οι γεωκίνδυνοι αποτελούν ένα υποσύνολο των φυσικών κινδύνων και συνδέονται με διεργασίες γεωτεχνικές, υδροτεχνικές, τεκτονικές και επιπροσθέτως με διεργασίες που σχετίζονται με το χιόνι ή τον πάγο, γεωχημικές ή ακόμα διεργασίες που μπορούν να επηρεάσουν την ακεραιότητα των αγωγών, το εργαζόμενο προσωπικό, τα χρονοδιαγράμματα κατασκευής, το κόστος αλλά και το ίδιο το περιβάλλον. Οι γεωκίνδυνοι ως επί το πλείστον, είναι φυσικές διεργασίες και προκαλούνται από φαινόμενα όπως οι βροχοπτώσεις ή σεισμική δραστηριότητα. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, οι ανθρώπινες δραστηριότητες δρουν καταλυτικά συμμετέχοντας είτε στην ενεργοποίηση ενός κινδύνου ή ακόμα και στην επιδείνωση ενός φαινομένου (Porter, et al., 2014).

Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί, εμφανίζεται ένας κατάλογος πιθανών γεωκινδύνων, ο οποίος είναι εξειδικευμένος επάνω στην ανάπτυξη ή την διαχείριση της ακεραιότητας χερσαίων αγωγών μεταφοράς καυσίμων (Porter, et al., 2014).

Hazard Class	Type, Name
Geotechnical Hazards	Frost Heave Thaw Settlement Solifluction Rock Fall Rock Slide/Creep Earth Slide/Creep Earth Flow Debris Slide
Hydrotechnical Hazards	Debris Flow Scour

	Channel Degradation Bank Erosion Encroachment Avulsion Shoreline Wave Erosion
Seismic Hazards	Liquefaction Lateral Spreading Surface Fault Rupture Strong Ground Motion Volcanic Eruption
Snow and Ice Hazards	Snow Avalanche Ice Fall and Ice Avalanche
Other Ground Movement Hazards	Surface Water Erosion Groundwater Erosion Ground Subsidence (Karst/Mines)
Geochemical Hazards	Acid Rock Drainage and Metal Leaching

Πίνακας 1.Γεωκίνδυνοι σε αγωγούς μεταφοράς καυσίμων
Πηγή: (Porter, et al., 2014)

Ο παραπάνω πίνακας παρουσιάζει τις βασικές κατηγορίες των γεωκινδύνων (αριστερή στήλη) και για κάθε μία από αυτές παρέχει τις ονομασίες των φαινομένων που μπορεί να εκδηλωθούν (δεξιά στήλη).

Με βάση τα χαρακτηριστικά της κάθε γεωγραφικής περιοχής και το είδος των αγωγών που διατρέχουν κατά μήκος αυτής, είναι ευνόητο ότι ο παραπάνω πίνακας των γεωκινδύνων προσαρμόζεται κατάλληλα. Για παράδειγμα, συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές όπως η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή σεισμική δραστηριότητα οδηγώντας έτσι σε διάφορα φαινόμενα που έχουν σαν αιτία ενεργοποίησης τον σεισμό. Τέτοια

φαινόμενα είναι αυτά της ρευστοποίησης του εδάφους, της διάρρηξης ενεργών σεισμικών ρηγμάτων στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και τα φαινόμενα κατολισθήσεων με αιτία των σεισμό (Psarropoulos, et al., 2020).

Αντίθετα με τα παραπάνω, τα φαινόμενα που τείνουν να επικρατούν σε μία περιοχή, είναι πιθανόν να εκλείπουν σε κάποια άλλη και συνεπώς να αποτελούν αμελητέο παράγοντα προς έρευνα. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα εξεταστούν γεωκίνδυνοι οι οποίοι έχουν σαν αιτία φυσικά φαινόμενα τα οποία δεν συναντώνται στην ελληνική επικράτεια, όπως για παράδειγμα, η επίδραση του χιονιού / πάγου ή η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Πέραν των ανωτέρω θα πρέπει να σημειωθεί ότι, από τα φαινόμενα των μετεωρολογικών κινδύνων (δεν συμπεριλαμβάνονται στους γεωκινδύνους), άξιο έρευνας εκτιμάται ότι αποτελεί το φαινόμενο των κεραυνοπτώσεων καθώς έχει σημαντική συχνότητα στην ελληνική επικράτεια και αξιολογείται ως ένα φαινόμενο το οποίο ενδεχομένως μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση.

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα επομένως, ο πίνακας των γεωκινδύνων προσαρμοσμένος στις ιδιαιτερότητες της ελληνικής επικράτειας για τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, διαμορφώνεται ως ακολούθως:

Κατηγορία Γεωκινδύνων	Υποκατηγορίες
Γεωτεχνικοί	Κατάπτωση βράχων Ολίσθηση / ερπυσμός βράχων Ολίσθηση / ερπυσμός εδάφους Ολίσθηση εδάφους Κατολίσθηση κορημάτων
Υδροτεχνικοί	Ροή κορημάτων Διάβρωση κοίτης Διάβρωση πρανών

	Καταβιβασμός κοίτης Εκτροπή κοίτης Επιφανειακή διάβρωση Διάβρωση ακρογραμμής
Τεκτονικοί	Ρευστοποίηση Πλευρική εξάπλωση Επιφανειακή διάρρηξη ρήγματος Μεγάλη μετακίνηση εδάφους

Πίνακας 2.Γεωκίνδυνοι σε ανωνούς μεταφοράς φυσικού αερίου στην Ελλάδα.
Πηγή: (Porter, et al., 2014)

Συνεπώς οι γεωκίνδυνοι που επηρεάζουν τους χερσαίους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου μπορούν να διακριθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: Γεωτεχνικοί, Υδροτεχνικοί και Τεκτονικοί.

α) Γεωτεχνικοί

Οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως οι κατολισθήσεις, οι ροές των κορημάτων, η εδαφική υποχώρηση (καθίζηση) του εδάφους και η ανύψωση του εδάφους (άλμα). Οι πιο συχνοί λόγοι ενεργοποίησης των φαινομένων σχετίζονται με υψηλής έντασης ή μεγάλης διάρκειας γεγονότων βροχόπτωσης, με μεταβολές στην κατάσταση ροής των υπόγειων υδάτων, με διάβρωση, λόγω των απότομων κλίσεων των πρανών ή με σεισμούς.

Αν και κατά κανόνα, κατά τον σχεδιασμό της όδευσης ενός έργου αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου αποφεύγονται διαδρομές με υψηλό ρίσκο στην εκδήλωση πιθανών φαινομένων, εντούτοις η εκδήλωση ενός συμβάντος ακόμα και σε φαινομενικά αρκετά μεγάλη απόσταση από την θέση του αγωγού, μπορεί να μην τον επηρεάσει άμεσα μεν αλλά να καταστήσει την πρόσβαση σε

αυτόν αδύνατη. Στις περιπτώσεις αυτές, η ενεργοποίηση μιας εδαφικής αστοχίας κατά μήκος ενός αγωγού συνήθως επιφέρει εκτενείς ζημιές, με την αποκατάσταση να απαιτεί χρόνο και κόστος, ενώ επιπλέον ενδέχεται να είναι και τεχνικά πολύπλοκη (Savigny, et al., 2005).

Εικόνα 1. Κατολίσθηση

Πηγή: www.landslides.usgs.gov

β) Υδροτεχνικοί

Οι υδροτεχνικοί κίνδυνοι σχετίζονται με διεργασίες που υπάρχουν στα υδατορέματα και περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως η διάβρωση της κοίτης, η υψομετρική υποβάθμιση του καναλιού, η διάβρωση των πρανών εκατέρωθεν της κοίτης, η εκτροπή του ρου και η μεταφορά υψηλού φορτίου με φερτά υλικά (Savigny, et al., 2005).

Οι υδροτεχνικοί κίνδυνοι που αποτελούν την συχνότερη αιτία εμφάνισης ζημιών σε αγωγούς, παρουσιάζονται συνήθως κατά τη διάρκεια συμβάντων

πλημμύρας και στην περίπτωση των μικρότερων ρεμάτων, προκαλούνται συχνά από τοπικές έντονες βροχοπτώσεις (Savigny, et al., 2005).

Ο κυριότερος κίνδυνος που προκύπτει από τους υδροτεχνικούς γεωκινδύνους είναι η έντονη διάβρωση της κοίτης, όπου το έδαφος πάνω και γύρω από τον υπόγειο αγωγό απομακρύνεται. Στη συνέχεια, η πρόσκρουση φερτών υλικών ενδέχεται να τραυματίσει τον αγωγό, ενώ η εκτεταμένη απώλεια στήριξης, είναι πιθανόν να οδηγήσει σε λύγισμα ή σπάσιμο του αγωγού με καταστροφικές συνέπειες. Τα φαινόμενα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι είναι πιο έντονα σε υδατορέματα όπου η ταχύτητα και ο όγκος της ροής του νερού είναι υψηλή και το έδαφος είναι μαλακό (Savigny, et al., 2005).

Εικόνα 2. Διάβρωση κοίτης – ρέμα Μαύρης Ώρας Ασπρόπυργος Αττικής

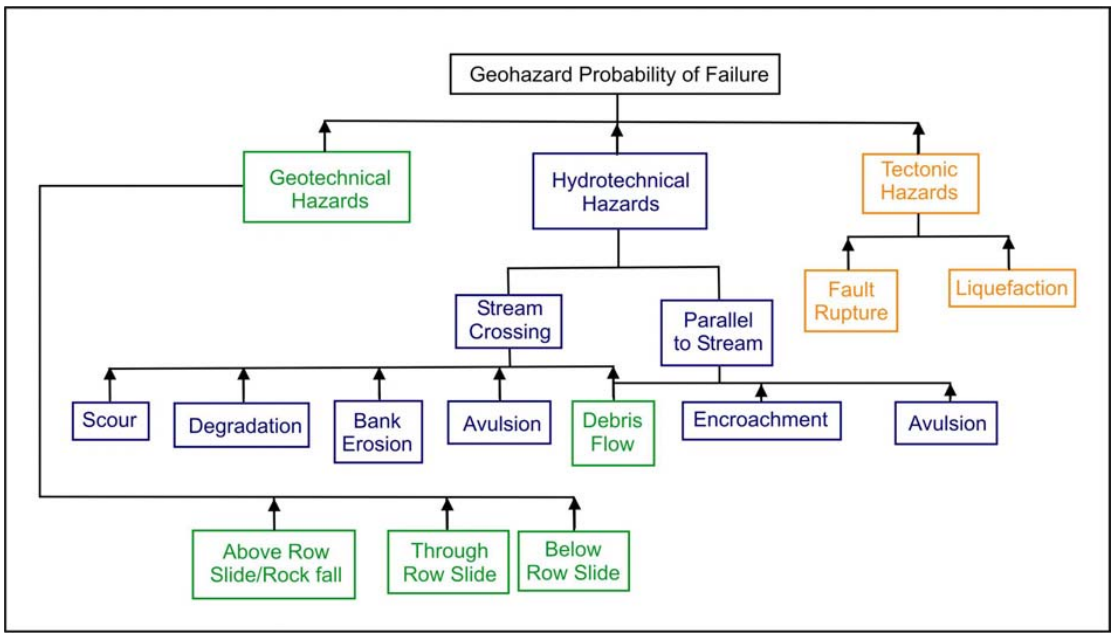
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Οι διαταραχές των υδατορεμάτων, σε συνδυασμό με την επιβάρυνση της κοίτης με φερτά υλικά κατολισθήσεων, τις αλλαγές των χρήσεων γης και της βλάστησης (καμένες ή αποψιλωμένες περιοχές) ή ακόμα και την παρουσία ελλιπούς

σχεδιασμού μέτρων προστασίας ή διευθέτησης, μπορούν επίσης δυνητικά να αυξήσουν τον κίνδυνο (Savigny, et al., 2005).

γ) Τεκτονικοί

Οι τεκτονικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν φαινόμενα εδαφικής μετακίνησης και επιφανειακής διάρρηξης, την ρευστοποίηση του εδάφους και την πλευρική εξάπλωση. Αν και σημαντικά γεγονότα σεισμών δεν λαμβάνουν χώρα συχνά, μπορούν ωστόσο να επηρεάσουν μεγάλες περιοχές προκαλώντας ζημιές σε πολλαπλούς αγωγούς ή και σε πολλαπλά τμήματα ενός και μόνο αγωγού, τόσο άμεσα όσο και έμμεσα, με την εμφάνιση δευτερευόντων γεωτεχνικών και υδροτεχνικών κινδύνων. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης, η συμβολή των τεκτονικών κινδύνων στο συνολικό ρίσκο που υπολογίζεται για τους αγωγούς, μπορεί να είναι σημαντική. Σε κάθε περίπτωση οι αγωγοί σχεδιάζονται για να μπορούν να αντέξουν τις μετακινήσεις ενός σεισμού μεγάλου μεγέθους. Εντούτοις, στα σημεία διασταύρωσης με σεισμικά ρήγματα απαιτείται ειδικότερη διαχείριση και σχεδιασμός (Savigny, et al., 2005). Σχηματικά οι γεωκίνδυνοι και η μεταξύ τους συσχέτιση παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα συσχέτισης γεωκινδύνων

Πηγή: (Esford, et al., 2004)

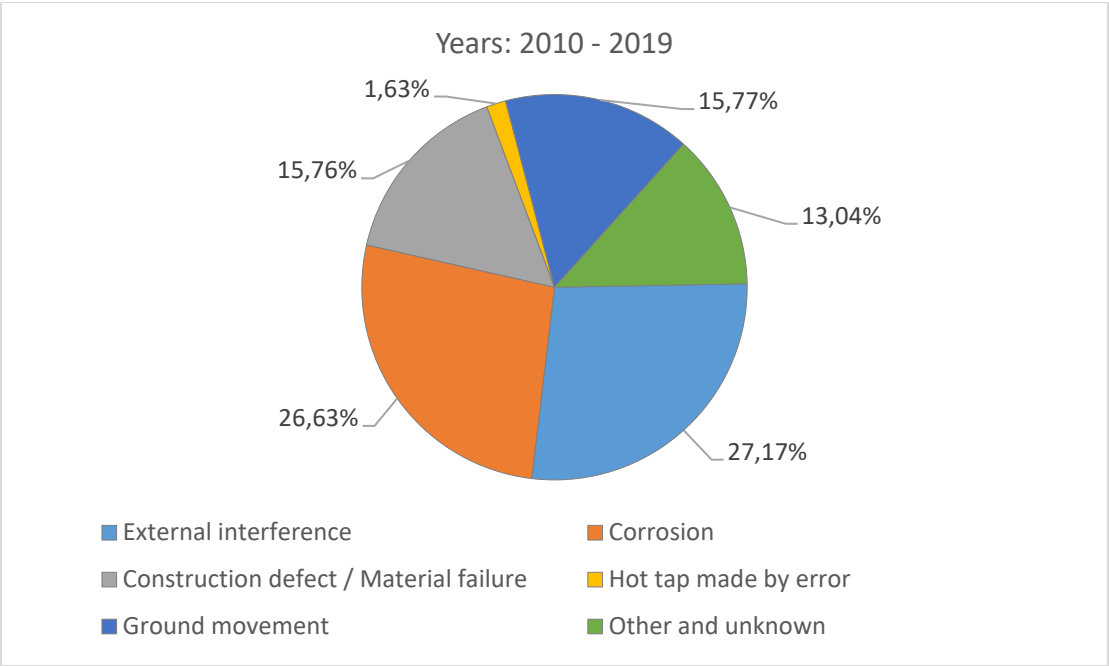
2.8 Επίδραση των φυσικών καταστροφών στα συστήματα μεταφοράς φυσικού αερίου

Στο γενικότερο πλαίσιο των αγωγών ενέργειας οποιασδήποτε μορφής αλλά και ειδικότερα των αγωγών του φυσικού αερίου, οι γεωκίνδυνοι μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την ακεραιότητα τους και κατά συνέπεια την ασφαλή λειτουργία τους, με τις επιπτώσεις δε, να είναι πολύ σοβαρές.

Σε επίπεδο κατασκευής η επίδραση αφορά στο προσωπικό, στον εξοπλισμό και στα χρονοδιαγράμματα κατασκευής, όπου σε κάθε περίπτωση μεταφράζεται σε οικονομικό αντίκτυπο. Στη φάση λειτουργίας των αγωγών, η πιθανή αστοχία ενός συστήματος, πέραν των οικονομικών επιπτώσεων, ενδέχεται να σημάνει άμεση απειλή για τις ανθρώπινες ζωές και για το περιβάλλον.

Τα έργα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου είναι μεγάλα κατασκευαστικά έργα υποδομής και περιλαμβάνουν διεπιστημονικές δραστηριότητες που είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας πολλών ομάδων και αρμόδιων φορέων. Λόγω των υψηλών προϋπολογισμών που έχουν, για κάθε μία μέρα καθυστέρησης στην κατασκευή ή την αναστολή της λειτουργίας τους, κοστίζει στους διαχειριστές μεγάλα ποσά εσόδων ενώ συγχρόνως η αποκατάσταση των ζημιών ενδέχεται να είναι το ίδιο δαπανηρή και χρονοβόρα.

Σύμφωνα με την 11η Έκθεση του EGIG (11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group) για την περίοδο 2010 - 2019, ο παράγοντας των γεωκινδύνων καταγράφεται ως ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες εκδήλωσης αστοχίας στους αγωγούς φυσικού αερίου με ποσοστό 15% περίπου. Μάλιστα στην ίδια έκθεση αναφέρεται ότι τα συμβάντα που προκαλούνται από παρεμβάσεις τρίτων και τους γεωκινδύνους χαρακτηρίζονται από δυνητικά σοβαρές (Porter, et al., 2014).



Διάγραμμα 2. 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 2010 – 2019)
((* οι γεωκίνδυνοι αναφέρονται με τον όρο Ground Movement) ηt)*
Πηγή: (EGIG, 2020)

2.9 Περιπτώσεις επίδρασης των γεωκινδύνων σε αγωγούς φυσικού αερίου

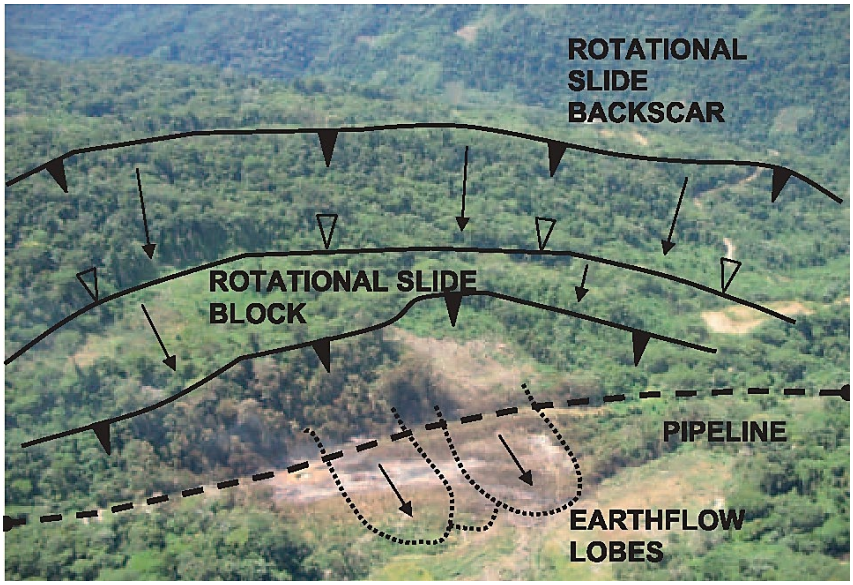
Στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί πολλές και σημαντικές περιπτώσεις, όπου η επίδραση των γεωκινδύνων έχει προκαλέσει σημαντικές ζημιές σε υφιστάμενα δίκτυα ενέργειας και δη, αγωγών φυσικού αερίου. Στην συνέχεια, αναφέρονται μερικά από αυτά.

α) Η περίπτωση της Camisea στο Περού της Νότιας Αμερικής

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του συστήματος των αγωγών της Camisea στο Περού της Νότιας Αμερικής, το οποίο αποτελείται από δύο υπόγειους αγωγούς που οδεύουν παράλληλα στην ίδια ζώνη. Πρόκειται για έναν αγωγό φυσικού αερίου μήκους 714km και για έναν αγωγό υγροποιημένου φυσικού αερίου μήκους 540km. Οι αγωγοί αυτοί ξεκινούν από το πεδίο

εξόρυξης στην Camisea που βρίσκεται στην περιοχή του δάσους του Αμαζονίου και διασχίζουν τις Άνδεις μέχρι τις ακτές του Ειρηνικού ωκεανού.

Στους πρώτους 30 μήνες λειτουργίας τους, ο αγωγός υγροποιημένου φυσικού αερίου υπέστη διάρρηξη έξι φορές, εκ των οποίων οι τέσσερις εξ αυτών οφείλονταν σε εδαφικές μετακινήσεις. Αντίστοιχα και ο αγωγός φυσικού αερίου υπέστη ζημιά στις ίδιες θέσεις από τη δράση των ίδιων φαινομένων, χωρίς όμως να υπάρξει διάρρηξή του. Για όλες τις περιπτώσεις, η έρευνα έδειξε ότι οι εδαφικές μετακινήσεις προήλθαν από ισχυρές βροχοπτώσεις που έλαβαν χώρα στην περιοχή διέλευσης των αγωγών, αν και η έλλειψη έγκυρων βροχομετρικών δεδομένων δεν επιβεβαιώνει την παραπάνω εκτίμηση. Επιπλέον, από την εκ των υστέρων διερεύνηση των γεγονότων που έγινε, διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η επικινδυνότητα των περιοχών από γεωλογικής άποψης, δεν είχε αποτυπωθεί ή αξιολογηθεί καταλλήλως στο αρχικό στάδιο των μελετών.



Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση της κατολίσθησης σε μια από τις περιοχές αστοχίας στο Περού.
Πηγή: (Lee, et al., 2009)

β) Η περίπτωση της κατολίσθησης στην περιοχή της Αντινίτσας Φθιώτιδας

Στην ελληνική επικράτεια κατά παρόμοιο τρόπο η εκδήλωση φυσικών φαινομένων προκαλεί συχνά σημαντικές μεταβολές στην επιφάνεια του εδάφους και εν δυνάμει κινδύνους και φθορές στους αγωγούς φυσικού αερίου.

Στην περιοχή Αντινίτσα (13km βορειοδυτικά της Λαμίας), ο Κύριος αγωγός Φυσικού Αερίου Υψηλής Πίεσης διέρχεται από μεγάλης κλίσης πρανές, το οποίο παρουσίασε πολύ σημαντικά προβλήματα κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, στην εν λόγω θέση ο αγωγός μεταφοράς έχει τοποθετηθεί κατά μήκος απότομου φυσικού πρανούς με κλίση αναγλύφου 25 έως 35 μοίρες και υψομετρική διαφορά 160m.

Την άνοιξη του 1998 εκδηλώθηκαν εδαφικές μετακινήσεις που προήλθαν από θραύση του πρανούς, και εκτείνονταν σε ένα μήκος 45-50 μέτρων του αγωγού. Μετά από αυτό το γεγονός, εφαρμόστηκαν μέτρα για την σταθεροποίηση του πρανούς με την εγκατάσταση ειδικού γεωτεχνικού εξοπλισμού για συνεχή έλεγχο της κατάστασης.

Ωστόσο, στις αρχές του 1999 λόγω βροχοπτώσεων εμφανίστηκαν νέες μετατοπίσεις του πρανούς με καταστροφή κάποιων κλισιομέτρων και πιεζομέτρων. Οι μελέτες έδειξαν δυνητικό πρόβλημα ασφάλειας του αγωγού, με πιθανότητα καταστροφικής απώλειας της ευστάθειας του πρανούς είτε από υπερκορεσμό είτε από σεισμό.

Το καλοκαίρι του 1999 για την άμεση προστασία της δομικής ακεραιότητας του αγωγού στην περιοχή των ενεργών εδαφικών μετακινήσεων, κατασκευάστηκε επιπλέον σύστημα αποστραγγιστικών καναλιών και τοποθετήθηκε αδιαπέρατη μεμβράνη για την αποφυγή της διήθησης του νερού, σε συνδυασμό πάντοτε, με νέα συστήματα παρακολούθησης των εδαφικών μετακινήσεων.

Εικόνα 4. Ανατολική όψη της περιοχής Αντινίτσας.
Πηγή: Google Earth

γ) Η περίπτωση της πλημμύρας στην περιοχή της Μάνδρας Αττικής

Ένα χαρακτηριστικό σημαντικό παράδειγμα επίδρασης των υδροτεχνικών κινδύνων σε αγωγούς φυσικού αερίου, αποτελεί το γεγονός της αιφνίδιας πλημμύρας (flash flood) στη Μάνδρα Αττικής. Η σφοδρή και έντονη βροχόπτωση της 15ης Νοέμβριου του 2017, είχε σαν αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να περάσουν από τα υδάτινα ρέματα της περιοχής στα οποία διασταύρωνε σε κάποιες θέσεις ο Κύριος Αγωγός Μεταφοράς Φυσικού Αερίου, προκαλώντας ακαριαία διάβρωση στις κοίτες και τα πρανή των υδατορεμάτων.

Συγχρόνως, οι τεράστιες ποσότητες νερού που έπεσαν στις πλαγιές των γειτονικών ορεινών όγκων, λόγω κορεσμού του υπόγειου υδροφορέα και μείωσης της δυνατότητας απορρόφησης του νερού, προκάλεσαν την απογύμνωση του εδάφους και κατά συνέπεια τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων φερτών υλικών σε περιοχές όπου υπήρχαν εγκατεστημένοι αγωγοί φυσικού αερίου. Αποτέλεσμα της πολύ σημαντικής διάβρωσης του εδάφους που ακολούθησε, ήταν η αποκάλυψη πολλών τμημάτων του αγωγού φυσικού αερίου.

Εικόνα 5. Διάβρωση ποταμού και αποκάλυψη αγωγού φυσικού αερίου, ρέμα Σούρες Μάνδρα Αττικής.
Πηγή: Προσωπικό αρχείο

δ) Η περίπτωση της τήξης των πάγων σε περιοχή του Καναδά

Τέλος, σε ακόμα μία περίπτωση φαινομένου που συνέβη στον Καναδά (δεν συναντάται αυτός ο τύπος στον ελληνικό χώρο), με αφορμή την τήξη μεγάλης ποσότητας πάγου που βρισκόταν σε υψηλότερο σημείο μία βραχώδους μάζας, αγωγός φυσικού αερίου που όδευε σε ορεινή περιοχή, επλήγη από κατολίσθηση (landslide), η οποία εξελίχθηκε με ταχύτητα 360 km/hr.

Η πλαγιά την οποία διέσχιζε ο αγωγός κατέστη τόσο ασταθής ώστε να υπάρχει σοβαρό ενδεχόμενο, η αρχική θέση διέλευσης του αγωγού να εμφανίσει πιθανή απώλεια ευστάθειας μακροπρόθεσμα. Οι διαχειριστές του αγωγού υποχρεώθηκαν να μελετήσουν την οικονομικότερη εναλλακτική και να επαναχαράξουν την όδευση του αγωγού. Μάλιστα, ενώ το φαινόμενο αυτό ήταν σε εξέλιξη, τοποθετήθηκε επιπλέον και μία προσωρινή γραμμή μεταφοράς, σε περίπτωση που η κατάσταση επιδεινωνόταν ραγδαία πριν την κατασκευή της νέας όδευσης (Radevsky & Scott, 2004).

2.10 Η σημαντικότητα της εκτίμησης του κινδύνου στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών.

Αν και τις τελευταίες δεκαετίες οι επιστημονικές γνώσεις και η τεχνολογική εξέλιξη έχουν βελτιωθεί σημαντικά στον τομέα της Διαχείρισης των Φυσικών Καταστροφών, ωστόσο εξαιτίας των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, οι φυσικές καταστροφές που εκδηλώνονται καθημερινά αυξάνονται με ρυθμούς που η ανθρωπότητα πλέον, δεν μπορεί να προφτάσει (Λέκκας, 2000).

Για το λόγο αυτό είναι πρώτιστης σημασίας η διαχείριση μιας φυσικής καταστροφής, είτε μέσω προσπάθειας περιορισμού των συνεπειών ενός φαινομένου, είτε με τη βελτίωση του τεχνολογικού εξοπλισμού και την εκτίμηση εκδήλωσης ενός κινδύνου, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης μιας καταστροφής και των συνεπειών της (Λέκκας, 2000).

Η εκτίμηση εκδήλωσης ενός κινδύνου, είναι η διαδικασία παρατήρησης, αναγνώρισης και παρακολούθησης του κινδύνου να εμφανιστεί, ώστε να καθοριστούν η δυναμική, η προέλευση, τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά του. Στόχος της εκτίμησης κινδύνου είναι να αναγνωριστεί η πιθανότητα εκδήλωσης ενός φαινομένου ή γεγονότος, σε μελλοντικό χρόνο, η έντασή του και η περιοχή που θα επηρεάσει (Φαλάρας, 2011).

Ειδικότερα για τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, η εκτίμηση της επικινδυνότητας καθίσταται σημαντική και η συνεισφορά της είναι θεμελιώδης στο σχεδιασμό και τη χάραξη ενός έργου μεταφοράς ενεργειακών αποθεμάτων. Βελτιώνοντας έτσι την αντίληψη για έναν κίνδυνο και κατανοώντας σε μεγαλύτερο βαθμό τη φύση ενός κινδύνου, τίθενται όλοι οι εμπλεκόμενοι σε μια περισσότερο ευνοϊκή θέση αναφορικά με την υιοθέτηση προληπτικών μέτρων και την αποφυγή των πιο σοβαρών επιπτώσεων είτε φυσικών, είτε ανθρωπογενών καταστροφών.

2.11 Η συμβολή της χαρτογράφησης κινδύνων στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών.

Οι φυσικές καταστροφές είναι αδύνατον να αποφευχθούν, λόγω του ότι ανήκουν στις φυσικές διεργασίες του πλανήτη. Είναι όμως βέβαιο ότι μπορούν να μετριαστούν ως προς τις επιπτώσεις τους, ούτως ώστε να μην ξεπεράσουν το όριο της αρχικής τους διάστασης από το οποίο προήλθαν. Δηλαδή, αυτό των φυσικών διεργασιών.

Το παραπάνω απαιτεί τη χρήση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης και δη, αυτής των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ή ΣΓΠ ή GIS). Μέσω των ΣΓΠ, είναι δυνατή η δημιουργία και η χρήση χαρτών επικινδυνότητας, τόσο για λήψη μέτρων πρόληψης αλλά και για εκπόνηση σχεδίων αντιμετώπισης καταστροφών σε κάθε περιοχή. Παραδείγματος χάριν, ο σχεδιασμός και η αντιμετώπιση του γεωκινδύνου μιας κατολίσθησης μπορεί να στηριχθεί στην δημιουργία θεματικών χαρτών επιδεκτικότητας, ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που σχετίζονται με το φαινόμενο, και την εφαρμογή κατάλληλων μεθοδολογιών σε ένα σύστημα GIS.

Πιο συγκεκριμένα, η χαρτογράφηση ενός κινδύνου, αποτελεί εργαλείο εκτίμησης αλλά και ευρύτερης στρατηγικής διαχείρισης ενός κινδύνου, συμβάλλοντας έτσι, στην θέσπιση προτεραιοτήτων για τη μείωση των επιπτώσεων. Ωστόσο, η διαδικασία εκπόνησης ενός τέτοιου είδους χάρτη δεν είναι εύκολη διαδικασία. Χρησιμοποιεί αρκετά σύνθετη μεθοδολογία κατά την οποία, μεγάλος όγκος δεδομένων υπόκειται σε πολλαπλές επεξεργασίες. Το αποτέλεσμα που προσφέρει όμως, είναι αδιαμφισβήτητο και δίνει τη δυνατότητα στους εμπλεκόμενους να έχουν σωστή εικόνα και αντίληψη του χώρου. Για τον λόγο ότι αφενός η εκτίμηση καθιστά τον κίνδυνο αντικείμενο διαχείρισης ώστε ακόμα και αν δεν εξαλείφεται να μειώνονται στο ελάχιστο οι ενδεχόμενες συνέπειες και, αφετέρου, διότι η χαρτογράφηση των κινδύνων υποστηρίζει τη δράση της εκτίμησης και καθίσταται ως το μέσο προβολής πληροφοριών σε ένα ευρύτερο πλαίσιο.

3. Γεωπληροφορική και χαρτογράφηση γεωκινδύνων

3.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ)

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) είναι αναγνωρισμένα παγκοσμίως ως GIS (Geographic Information Systems). Η χρήση των ΣΓΠ στις μέρες μας έχει πλέον εξασφαλίσει την αποδοχή από την επιστημονική κοινότητα διότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι δραστηριότητες των ανθρώπων και οι αποφάσεις που λαμβάνουν είναι αφενός μεν περισσότερο πολύπλοκες και αφετέρου, περιλαμβάνουν και τη γεωγραφική συνιστώσα.

Τα ΣΓΠ είναι συστήματα ικανά να παρέχουν λύση στα προβλήματα που τους έχει θέσει ο άνθρωπος (Longley, et al., 2005). Έχουν πολλές δυνατότητες, όμως ο λόγος για τον οποίο ξεχώρισαν ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων, είναι ότι καταγράφουν και θέτουν σε εφαρμογή γενικές γνώσεις, αλλά και αποθηκεύουν την ειδική πληροφορία σε βάσεις δεδομένων (Longley, et al., 2005).

Αναλυτικότερα, τα ΣΓΠ είναι πληροφοριακά συστήματα που παρέχουν στο χρήστη τις δυνατότητες συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης των χωρικών δεδομένων μέσα σε ένα ψηφιακό περιβάλλον (Fabbri, et al., 2003). Οι τέσσερις κύριες λειτουργίες των ΣΓΠ είναι η χαρτογράφηση και η απεικόνιση της χωρικής και της περιγραφικής πληροφορίας, η διαχείριση των γεωγραφικών δεδομένων και η γεωγραφική ανάλυση (Marathon Data Systems, 2011).

3.2 Πλεονεκτήματα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών

Τα πλεονεκτήματα των ΣΓΠ σχετίζονται με τα δεδομένα που επεξεργάζονται αυτά τα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, τα ΣΓΠ έχουν τη δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας διαφορετικού τύπου δεδομένων, τόσο με χωρική όσο και με

μη χωρική συσχέτιση μεταξύ τους, ακόμα και εάν η πρωτογενή τους μορφή διαφέρει. Η μετακίνηση μεταξύ των βάσεων χωρικών και περιγραφικών δεδομένων δίνει τη δυνατότητα όχι μόνον της εύρεσης κάποιου στοιχείου ή κάποιας πληροφορίας, αλλά και της χρησιμοποίησης πολλαπλών δεδομένων αποθηκευμένων σε μεγάλο αριθμό αρχείων. Τα εργαλεία αναζήτησης και η διαδικασία χωρικής ανάλυσης επιτρέπουν πολλαπλές αναζητήσεις, εύρεση στοιχείων που πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις ή ακόμα που διαθέτουν προκαθορισμένα από το χρήστη ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά βρίσκονται σε ψηφιακή μορφή, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν μικρό χώρο και να είναι εύχρηστα (Σιούπη, 2015).

Τα ΣΓΠ εμφανίζουν πλεονεκτήματα και ως προς τις μεθόδους ανάλυσης που υποστηρίζουν. Αρχικά, επιτρέπουν αναλύσεις που είναι όχι μόνο φθηνότερες, αλλά και αποτελεσματικότερες σε σχέση με τις κλασικές με το χέρι προσεγγίσεις. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται με αντικειμενικό τρόπο και η διαδικασία παραγωγής τους είναι αυτοματοποιημένη. Επιπλέον, παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων που ορίζουν τις σχέσεις μεταξύ χωρικών παραγόντων. Επίσης, δίνουν δυνατότητα πρόβλεψης φαινομένων με βάση τα μοντέλα συσχετίσεων που περιέχονται στη βάση πληροφοριών ή δημιουργίας υποθετικών καταστάσεων για τον έλεγχο και την αύξηση της ετοιμότητας κυρίως των κρατικών μηχανισμών (Σιούπη, 2015).

Τέλος, τα ΣΓΠ επιτρέπουν ποικίλες επεξεργασίες διαφόρων μορφών, όπως για παράδειγμα μετρήσεις, μετατροπές, χαρτογραφικές επικαλύψεις και άλλα. Επιπροσθέτως, τα ΣΓΠ μπορούν να εισάγουν και τη διάσταση του χρόνου καθώς υποστηρίζουν και δεδομένα που μεταβάλλονται δυναμικά, επιτρέποντας έτσι και αναλύσεις διαχρονικών αλλαγών (Αστάρας, et al., 2011).

Οι δυνατότητες συνδυασμένης χρησιμοποίησης των χωρικών και των περιγραφικών πληροφοριών καθιστούν τα ΣΓΠ ισχυρότατα εργαλεία για το σχεδιασμό

ενεργειών και τη λήψη αποφάσεων που αφορούν ένα πρόσωπο, μια μικρή επιχείρηση μέχρι και την άσκηση πολιτικής από ένα κυβερνητικό σχήμα σε ένα τόπο (Αστάρας, et al., 2011).

Συνολικά επίσης αναφέρεται σαν σημαντικό πλεονέκτημα ο γρήγορος έλεγχος των εναλλακτικών λύσεων. Αυτό συμβαίνει διότι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει νέες τεχνικές και ιδέες, αφού απαλλάσσεται από χρονοβόρες διαδικασίες, οι οποίες εκτελούνται από τα ΣΓΠ (Marathon Data Systems, 2011).

3.3 Μειονεκτήματα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών

Τα ΣΓΠ ωστόσο, έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Ένα μειονέκτημα των ΣΓΠ είναι ότι για να μπορέσει κάποιος να τα χειριστεί θα πρέπει να έχει καταρτιστεί, κάτι που απαιτεί αρκετό χρόνο και πολλές φορές και κόστος. Επίσης, το κόστος των δεδομένων είναι ακόμα ένα μειονέκτημα των ΣΓΠ. Κάποια δεδομένα διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο, ωστόσο τα περισσότερα έχουν υψηλό κόστος αγοράς (Dangermond, 1992). Βέβαια τα τελευταία χρόνια τα ελεύθερα δεδομένα ολοένα και πληθαίνουν και στο μέλλον ίσως να είναι διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία ελεύθερων δεδομένων (Αστάρας, et al., 2011). Ακόμη, τα δεδομένα θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλη μορφή για να εισαχθούν στο σύστημα, οπότε μπορεί να υπάρχουν και κάποια προβλήματα μετατροπής των δεδομένων αυτών. Τέλος, το κόστος απόκτησης του συστήματος και της τεχνικής υποστήριξης αποτελεί ακόμα ένα μειονέκτημα.

Παρόλα αυτά σε κάθε περίπτωση, η χρήση των ΣΓΠ αποτελεί ένα εξαιρετικά δυνατό επιστημονικό εργαλείο, με ευρεία χρήση και πολλαπλές δυνατότητες που υιοθετείται από πλήθος επαγγελματιών διαφόρων ειδικοτήτων.

3.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων διαχείρισης δικτύων με ΣΓΠ

Η χρήση της τεχνολογίας των ΣΓΠ παρέχει την δυνατότητα για περαιτέρω εφαρμογές σε φορείς ή εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην διαχείριση δικτύων. Μία υποκατηγορία εξ αυτών είναι και τα δίκτυα ενέργειας.

Οι διαχειριστές των δικτύων βρίσκονται συχνά αντιμέτωποι με προκλήσεις όπως η πολυπλοκότητα των δικτύων, η συνεχής μεταβολή των γεωμετρικών και τεχνικών χαρακτηριστικών τους, η διαχείριση εκτάκτων αναγκών, η διαχείριση και οργάνωση των ανθρώπινων και οικονομικών πόρων.

Σήμερα, πολλές εταιρείες ή φορείς διαχείρισης δικτύων αναζητούν έναν αποδεδειγμένα αποτελεσματικότερο τρόπο για να επιτύχει η επιχείρησή τους στόχους, σε μια εποχή συνεχών αλλαγών. Αυτό τους οδηγεί στο να αναζητούν νέες μεθοδολογίες διαχείρισης και να προσπαθούν να εκσυγχρονίσουν τα βασικά συστήματα τεχνολογίας που επιτρέπουν να το κάνουν.

Μεταξύ των βασικών παραγόντων της αλλαγής είναι τα ΣΓΠ τα οποία βοήθησαν να ξεκλειδώσουν στο μέγιστο το δυναμικό των δεδομένων για την βελτίωση των επιχειρησιακών και επιχειρηματικών αποτελεσμάτων. Η εξειδικευμένη χρήση των ΣΓΠ παρέχει προηγμένες λύσεις για ψηφιακό μετασχηματισμό, αναλυτικά στοιχεία τοποθεσίας, δημιουργία δεδομένων και χαρτών που καλύπτουν όλες τις υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών των υπηρεσιών των δικτύων κοινής ωφέλειας της ενέργειας.

Είναι σημαντικό για τη διαχείριση δεδομένων δικτύου αγωγών να είναι σε θέση να δημιουργηθεί και να συντηρηθεί μια ψηφιακή αναπαράσταση του δικτύου αγωγών σε πραγματικό χρόνο, ώστε να μπορούν να δοθούν σύνθετες απαντήσεις σε σύνθετα ερωτήματα στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Αυτό είναι κρίσιμο λαμβάνοντας υπόψιν την κρισιμότητα μίας υποδομής που οφείλει να διατηρεί υψηλά επίπεδα ασφάλειας. Η προηγμένη λειτουργικότητα ενός λογισμικού ΣΓΠ

έχει πρόσβαση σε αυτήν την αναπαράσταση για την αντιμετώπιση όλων των εσωτερικών και εξωτερικών προκλήσεων.

Η μεγάλη ωφελιμότητα της χρήσης ενός ΣΓΠ, προκύπτει από την ευρεία γκάμα εφαρμογών στις δραστηριότητες μίας εταιρείας ή ενός φορέα διαχείρισης δικτύων. Σε πρώτο βαθμό, όλες οι πληροφορίες που συνδέονται με το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων, μπορούν να εισάγονται σε περιβάλλον ΣΓΠ για καλύτερη διαχείριση, βελτιστοποιώντας την ποιότητα της κατασκευής, αποφεύγοντας συγχρόνως πιθανά προβλήματα, τα οποία δεν θα ήταν εύκολα διακριτά. Ταυτόχρονα, δημιουργείται και μία βάση δεδομένων όπου αρχειοθετούνται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου.

Η βάση δεδομένων που δημιουργείται αποτελεί και την βασική πληροφορία για την μετέπειτα διαχείριση όλων των θεμάτων στην φάση λειτουργίας ενός δικτύου. Πληροφορίες που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύου μπορούν πολύ εύκολα να καταγράφουν τις αλλαγές που συχνά ή μη υλοποιούνται σε ένα σύστημα, διατηρώντας έτσι τα δεδομένα ενός ΣΓΠ πλήρως ενημερωμένα. Επιπλέον δε, δίνεται η δυνατότητα της εφαρμογής και παρακολούθησης ενός προγράμματος επιθεώρησης και συντήρησης ενός δικτύου, ελέγχοντας τόσο την υλοποίησή του όσο και τις καταγραφές που προκύπτουν από αυτό. Στις περιπτώσεις δε έκτακτων καταστάσεων, η αμεσότητα των πληροφοριών που μπορεί να δώσει ένα σύστημα πληροφοριών είναι χρήσιμες για την ταχύτητα απόκρισης του προσωπικού άμεσης επέμβασης. Συγχρόνως, η δυνατότητα που παρέχουν τα ΣΓΠ για την μοντελοποίηση φαινομένων, προσφέρει στους χρήστες την επιλογή της προληπτικής δράσης και κατά συνέπεια την καλύτερη διαχείριση ανθρώπινων και οικονομικών πόρων.

Οι δυνατότητες εφαρμογών ενός ΣΓΠ σε δίκτυα επεκτείνονται και σε άλλους τομείς όπως η διαχείριση υλικών, πάγιων ή αναλώσιμων, τα οποία σχετίζονται με την συντήρηση του δικτύου, αλλά ακόμα και τη διαχείριση του στόλου των αυτοκινήτων.

Άλλοι τομείς δραστηριότητας, όπως η υγιεινή, η ασφάλεια και τα περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με ένα δίκτυο ενέργειας επίσης μπορούν να βρουν διαχειριστική εφαρμογή μέσω ενός ΣΓΠ.

Τέλος, σε περίπτωση που ένα δίκτυο ενέργειας έχει τελικούς καταναλωτές, τότε η διαχείριση του πελατολογίου όπως επιπλέον και θέματα πωλήσεων, συμμόρφωση με κανονισμούς, είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω των λειτουργιών ενός ΣΓΠ.

Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής των ΓΣΠ στην διαχείριση δικτύων.
Πηγή: www.esri.com

3.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση μεθόδων διαχείρισης φυσικών καταστροφών σε αγωγούς φυσικού αερίου με ΣΓΠ

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της αξιολόγησης κινδύνου, ως μέσο συλλογής, οργάνωσης, ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων (Γαλλούση, 2017).

Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της διαχείρισης κρίσιμων ζητημάτων που αφορούν τις επιπτώσεις των φυσικών φαινομένων στους αγωγούς φυσικού αερίου. Ειδικά για τα δίκτυα φυσικού αερίου, όπου η εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας

τόσο για τις ανθρώπινες ζωές όσο και για το περιβάλλον, απαιτείται πολλές φορές η επίλυση πολυπαραγοντικών προβλημάτων με ακρίβεια και ταχύτητα. Οι δυνατότητες ενός ΣΓΠ προσφέρει στους χρήστες την ευελιξία της οργάνωσης όλων των κρίσιμων παραμέτρων για κάθε γεωκίνδυνο και την εξαγωγή άμεσων αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα, αποτελεί ευρέως διαδεδομένη πρακτική η χρήση των ΣΓΠ στον τομέα της διαχείρισης των φυσικών καταστροφών, τόσο σε επίπεδο αρχικού σχεδιασμού, πρόληψης κατά την λειτουργία όσο και ανάλυσης μετά από ένα συμβάν. Επομένως, είναι προφανές ότι ο εντοπισμός των γεωκινδύνων κατά τα πρώιμα στάδια σχεδιασμού των αγωγών και η επακόλουθη αποφυγή προβληματικών περιοχών είναι η βέλτιστη λύση. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι αγωγοί είναι συνήθως γραμμικά έργα, δεν μπορούν να αποφευχθούν όλες οι «γεωεπικίνδυνες» περιοχές.

Στην σύγχρονη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές όπου η χρήση ενός ΣΓΠ μπορεί να συμβάλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην εύρεση της βέλτιστης αρχικής χάραξης ενός αγωγού. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους (Psaropoulos, et al., 2020) έχει περιγράφει ένα έξυπνο εργαλείο που βασίζεται στα ΣΓΠ, το οποίο έχει αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη τους πιθανούς γεωκινδύνους, με ιδιαίτερη έμφαση στους σεισμικούς κινδύνους (π.χ. ρήξεις ενεργών ρηγμάτων, φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους).

Το εργαλείο αυτό, μπορεί να επιτύχει δυνητικά τη βέλτιστη δρομολόγηση των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια εκτός από τους γεωκινδύνους, όπως η ελαχιστοποίηση των αποστάσεων, η αποφυγή κρίσιμων περιοχών, οι χρήσεις γης, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί κ.λπ. Επιπλέον, το εργαλείο αυτό επαληθεύτηκε μέσω τριών περιπτώσεων στη νοτιοανατολική Ευρώπη, που σχετίζονται με δύο χερσαίους αγωγούς και έναν υπεράκτιο αγωγό. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την ικανότητα των ΣΓΠ να χειρίζονται, να αναλύουν και να

διαχειρίζονται όλα τα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με γεωκινδύνους (δηλαδή τοπογραφικά, γεωλογικά, γεωτεχνικά και σεισμολογικά δεδομένα) και να υποστηρίζουν τους γεωεπιστήμονες και τους μηχανικούς αγωγών για την αποφυγή όλων των προβληματικών περιοχών.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το αναπτυγμένο εργαλείο βασίζεται σε αναλυτικές εξισώσεις που εκτιμούν μεν ποσοτικά, αλλά εμπειρικά, παράγοντες ασφάλειας για διάφορους γεωλογικούς κινδύνους (και, συνεπώς, για τον εντοπισμό προβληματικών περιοχών), δίνει την δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης με αυτοματοποιημένη εξωτερική επικοινωνία με διάφορους γεωτεχνικούς κώδικες/προγράμματα που μπορούν να αξιολογήσουν ρεαλιστικότερα τους διάφορους γεωλογικούς κινδύνους (π.χ. αστάθεια της κλίσης).

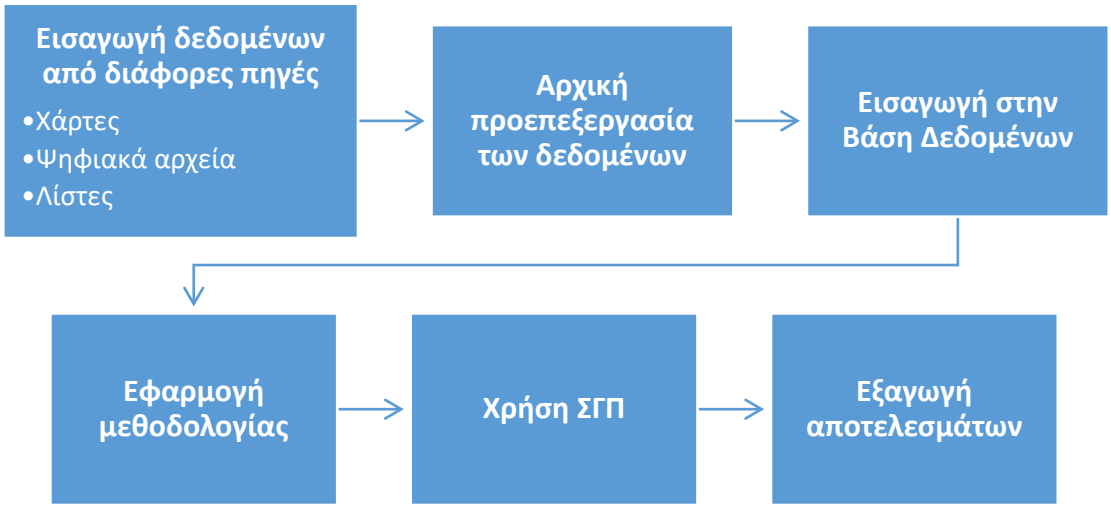
Επίσης, σε επίπεδο διαχείρισης ενός συμβάντος που έχει λάβει χώρα και απαιτείται η αντιμετώπισή του, χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα ενός τμήματος αγωγού φυσικού αερίου που υπέστη ζημιά λόγω κατολίσθησης κοντά στο Hendek της Τουρκίας. Για το εν λόγω τμήμα δρομολογήθηκε η αλλαγή της υφιστάμενης χάραξης του αγωγού. Απαραίτητο δεδομένο για το σκοπό αυτό ήταν η προετοιμασία ενός χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Σε αυτή την μελέτη, ο στατιστικός δείκτης (Wi) και ο συντελεστής στάθμισης (Wf) χρησιμοποιήθηκαν μέσω ενός ΣΓΠ για την προετοιμασία του χάρτη επιδεκτικότητας του προβληματικού τμήματος του αγωγού. Για την δημιουργία του χρησιμοποιήθηκαν θεματικά επίπεδα που περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως καταγραφή κατολισθήσεων, λιθολογία, κλίση, προσανατολισμός, υψόμετρο, χρήση γης / κάλυψη γης, απόσταση από υδατορέματα. Στην συγκεκριμένη περιοχή, η λιθολογία θεωρήθηκε ότι είναι η πιο σημαντική παράμετρος στην μελέτη. Με βάση τα αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη, βγήκε το συμπέρασμα ότι συγκεκριμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί θα πρέπει να αποφεύγονται στο νέο υπό χάραξη τμήμα του αγωγού και ότι οι γεωργικές δραστηριότητες δεν πρέπει να επιτρέπονται πολύ κοντά στον αγωγό (Çevik & Topal, 2003).

4. Μεθοδολογία και τρόπος οργάνωσης της Βάσης Δεδομένων

4.1 Εισαγωγή

Ο απώτερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της ευαισθησίας των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου έναντι της δράσης των γεωκινδύνων, όπως αυτοί έχουν αναλυθεί πρωτύτερα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, γίνεται χρήση όλων των δυνατοτήτων που παρέχονται από τα σύγχρονα λογισμικά των ΣΓΠ. Ωστόσο, η λειτουργία ενός ΣΓΠ βασίζεται στην σωστή οργάνωση της βάσης δεδομένων του, η οποία μέσω της μεθοδολογίας και των κατάλληλων λειτουργιών, δηλαδή, της επεξεργασίας των δεδομένων της Βάσης Δεδομένων, θα μας δώσει το τελικό αποτέλεσμα. Σημαντικό στάδιο συνεπώς, αποτελεί η καταγραφή όλων των βημάτων επεξεργασίας που απαιτούνται για την καλύτερη προετοιμασία των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν τελικά για την παραγωγή του τελικού προϊόντος.

Η μεθοδολογία και ο τρόπος οργάνωσης της Βάσης Δεδομένων είναι σε άμεση συσχέτιση τόσο με την φύση του αντικειμένου, δηλαδή των παραγόντων που επηρεάζουν τον κάθε γεωκίνδυνο αλλά σε κάθε περίπτωση και με την διαθεσιμότητα των δεδομένων. Σημαντικό ρόλο βέβαια σε όλο αυτό, διαδραματίζει και η ποιότητα των δεδομένων η οποία σε κάποιες περιπτώσεις θέτει περιορισμούς στο τελικό αποτέλεσμα.



Διάγραμμα 3. Σχηματική αναπαράσταση σταδίων εργασίας.

4.2 Σχεδιασμός και δημιουργία Χωρικής Βάσης Δεδομένων

Η ανάγκη για την ψηφιακή καταγραφή και επεξεργασία των στοιχείων του χώρου, συνδέεται με την οργάνωσή τους σε βάσεις δεδομένων σχεδιασμένες κατάλληλα για να αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά των χωρικών φαινομένων. Κατά τον σχεδιασμό της Χωρικής Βάσης επιλέγονται τα θεματικά επίπεδα που θα εισαχθούν στη βάση, προσδιορίζεται η γεωμετρία που θα χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή των στοιχείων κάθε θεματικού επιπέδου, προσδιορίζονται τα περιγραφικά χαρακτηριστικά κάθε θεματικού επιπέδου και τέλος, προσδιορίζεται η μορφοποίηση κάθε περιγραφικού χαρακτηριστικού. Πέραν αυτών, πολύ σημαντικός είναι και ο καθορισμός του συστήματος αναφοράς που θα χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή της γεωμετρίας.

Ύστερα από αυτά, επιλέγεται ένα πρότυπο οργάνωσης βάσης δεδομένων το οποίο υποστηρίζεται από το Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων που έχει επιλεγεί για χρήση. Μετά τον προσδιορισμό των απαραίτητων θεματικών επιπέδων που θα εισαχθούν στη βάση, ακολουθεί η συλλογή των στοιχείων. Η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων και της εισαγωγής τους στη βάση είναι μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες.

Αρχικά, συλλέγονται τα πρωτογενή δεδομένα που αφορούν σε άμεσες μετρήσεις ή δευτερογενή δεδομένα που έχουν ήδη παραχθεί για άλλους σκοπούς και χρειάζονται μετατροπή. Τα δεδομένα γενικά, είναι απαραίτητο να υποβληθούν στην επεξεργασία εκείνη που τα καθιστά κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Αυτό μπορεί να αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, τη διόρθωση σφαλμάτων, και την μετάβαση από μια δομή σε μια άλλη.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δεν εξετάζονται για λόγους απλοποίησης όλες οι υποκατηγορίες των γεωκινδύνων αλλά γενικευμένα οι τρεις γενικές κατηγορίες όπως περιγράφονται στον πίνακα 2 παραπάνω. Θεωρείται ωστόσο ότι

οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την συμβολή τους σε κάθε γεωκίνδυνο παρακάτω εν πολλοίς καλύπτουν όλες τις υποκατηγορίες τους.

4.3 Επιλογή επηρεαζόμενης ζώνης

Η μελέτη των γεωκινδύνων περιορίζεται εντός μίας ζώνης πιθανής επίδρασης στους αγωγούς. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, η εμπειρία έχει αποδείξει ότι η περιοχή μελέτης ενδέχεται να εκτείνεται και πέραν της ζώνης διέλευσης ενός αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, ενδέχεται να εκτείνεται πολλά χιλιόμετρα πέραν μίας θέσης διασταύρωσης με υδατόρεμα εντός μίας λεκάνης απορροής, εάν για παράδειγμα υπάρχουν ενδείξεις ότι εξελίσσεται το φαινόμενο της λασπορροής ή της δημιουργίας υλικών από κατολίσθηση. Έτσι, η επιλογή της ζώνης επίδρασης τυπικά δεν θα πρέπει να παράγει μόνο πληροφορίες για την ύπαρξη ενός γεωκινδύνου αλλά να παράγει και πληροφορίες για πιθανούς γεωκινδύνους σε ευρύτερη περιοχή. Στο πλαίσιο ωστόσο της παρούσας εργασίας, η ζώνη επίδρασης θα περιοριστεί σε απόσταση 500m από τον άξονα των αγωγών φυσικού αερίου, η οποία θεωρείται αρκετά ικανοποιητική για τον εντοπισμό και την καταγραφή του μεγαλύτερου μέρους των πιθανών γεωκινδύνων (Savigny, et al., 2005).

Τονίζεται ωστόσο ότι σε λεπτομερέστερα στάδια ανάλυσης, η επιλογή της επηρεαζόμενης ζώνης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και άλλα στοιχεία όπως:

- ✓ Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της φύσης του κάθε γεωκινδύνου
- ✓ Τη μορφή και την ποιότητα των διαθεσίμων δεδομένων
- ✓ Τα τοπικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής

4.4 Διαδικασία ροής και ομογενοποίησης δεδομένων

Η πιο σημαντική προϋπόθεση λειτουργίας μια βάσης δεδομένων, είναι η πρόσβαση αλλά και η παροχή δεδομένων τόσο μεταξύ των εκάστοτε θεσμικών οργάνων, όσο και μεταξύ των ειδικών εμπειρογνωμόνων (Van Den Eeckhaut, et al., 2012). Οι σύνθετες εργασίες και αναλύσεις αξιώνουν μια πολύ ευέλικτη διαχείριση για την αρχειοθέτηση και τη διανομή δεδομένων. Ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την κάλυψη αυτών των πολυσύνθετων απαιτήσεων της ανάλυσης δεδομένων, είναι ένα κεντρικό σύστημα βάσης δεδομένων που συνδέεται με καθορισμένους χρήστες του δικτύου (Härder, et al., 1988) (Foster, et al., 2011).

Ωστόσο, η πρόσβαση σε δεδομένα τέτοιου τύπου είναι μονάχα η μία πλευρά της ροής δεδομένων διπλής κατεύθυνσης. Από τη στιγμή που ένας χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε καταχωρημένα στοιχεία κατολίσθησης, θα πρέπει να μπορεί και να εισάγει δεδομένα στο αρχείο καταγραφής, αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να είναι διαθέσιμο ένα είδος εισόδου, στο οποίο οι τύποι των δεδομένων και οι λεπτομέρειες κατά τη διαδικασία της εγγραφής θα πρέπει να προσαρμοστούν σε προκαθορισμένα πρότυπα ως προς τη αντιπαραβολή και την λειτουργικότητά τους (Parsons, 2011).

4.5 Περιεχόμενα βάσης δεδομένων

Η βασική σκέψη δημιουργίας μίας γεωχωρικής βάσης δεδομένων για την διαχείριση των γεωκινδύνων, στηρίζεται στην γενική κατεύθυνση της συλλογής κάθε εν δυνάμει διαθέσιμης πληροφορίας η οποία ενδέχεται να είναι απαραίτητη σε μελλοντική χρήση. Για τον λόγο αυτό, ενσωματώνονται διαθέσιμα δεδομένα, τα οποία ενδεχομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς επεξεργασία οποιαδήποτε στιγμή μελλοντικά, ακόμα και εάν δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμα. Ο στόχος είναι η βάση δεδομένων που θα δημιουργηθεί να περιέχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων, έτοιμα προς αξιοποίηση, τα οποία

θα δίνουν την δυνατότητα στους χρήστες να αντλούν κάθε φορά τις πληροφορίες που χρειάζονται ανάλογα με το είδος της εργασίας ή ανάλυσης γεωκινδύνου που απαιτείται.

Εφόσον το αντικείμενο στο οποίο εξετάζονται οι επιπτώσεις των γεωκινδύνων είναι οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου, ένα μέρος της βάσης δεδομένων αποτελούν και τα γεωχωρικά στοιχεία τους. Βασική πληροφορία αποτελούν τα στοιχεία που περιγράφουν την θέσης τους, ενώ το ίδιο σημαντικά θεωρούνται και τα στοιχεία περιγραφής των τεχνικών χαρακτηριστικών τους, τα οποία ενδέχεται να χρησιμεύσουν σε δευτερογενή λεπτομερέστερη ανάλυση.

Τα παρακάτω δεδομένα θεωρούνται ιδιαιτέρως χρήσιμα για την εξέταση οποιουδήποτε γεωκινδύνου και συνεπώς, θα πρέπει κατ' ελάχιστον να υπάρχουν στην Βάση Δεδομένων:

- ✓ Γραμμή όδευσης αγωγού
- ✓ Θέση και κωδικοί κολλήσεων των επιμέρους τμημάτων
- ✓ Χιλιομέτρηση αγωγού
- ✓ Διάμετρος
- ✓ Πάχος
- ✓ Υλικό
- ✓ Τύπος καμπύλου τμήματος
- ✓ Μέγιστη - Μέση πίεση λειτουργίας
- ✓ Θέσεις επίγειων εγκαταστάσεων (σταθμών)

Όλα τα παραπάνω στοιχεία οφείλουν να βρίσκονται σε ψηφιακή μορφή, ενταγμένα σε ένα λογισμικό ΣΓΠ και γεωαναφερμένα στο ίδιο σύστημα αναφοράς που θα έχει επιλεγεί για την περαιτέρω χρήση τους. Σημαντική δε παράμετρος αποτελεί τα ανωτέρω στοιχεία να είναι επικαιροποιημένα, ούτως ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική κατάσταση ενός δικτύου.

Λόγω της διαφορετικής φύσης των φαινομένων των γεωκινδύνων, όπως αυτοί έχουν παρουσιαστεί ανωτέρω, απαιτείται η ενσωμάτωση δεδομένων τα οποία κατά κύριο λόγο σχετίζονται με τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τα φαινόμενα αυτά. Τα εν λόγω επίπεδα πληροφορίας παρουσιάζονται στη συνέχεια, ωστόσο, οι αναφορές δεν είναι περιοριστικές, καθώς ανάλογα με την μεθοδολογία που θα επιλεγεί για ανάλυση, επιλέγεται μέρος αυτών ή ακόμα και εναλλακτικές μορφές δεδομένων.

Οι πηγές των δεδομένων, μπορεί να είναι:

- Ελεύθερες πηγές δεδομένων οι οποίες υπάρχουν διαθέσιμες (π.χ. διαθέσιμο DEM)
- Δεδομένα που παρέχονται σε συνεργασία με φορείς ή ιδρύματα που έχουν την αρμοδιότητα ή την τεχνογνωσία παραγωγής τους (π.χ. σεισμικά γεγονότα)
- Δεδομένα τα οποία παράγονται κατά παραγγελία από εξωτερικούς συνεργάτες (π.χ. τοπογραφικές αποτυπώσεις)

Τα δεδομένα αυτά επιλέγονται από τις παραπάνω πηγές με κριτήρια την αξιοπιστία, την πληρότητα, το κόστος αλλά και τη φύση του αντικειμένου.

Επιπρόσθετα δε, θα πρέπει να γίνει αναφορά και σε μία ακόμα ομάδα δεδομένων γενικής φύσεως όπως το π.χ. το οδικό δίκτυο ή η χαρτογράφηση κτισμάτων, η οποία είναι σημαντική για πολλές από τις αναλύσεις.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι εταιρείες διαχείρισης των δικτύων μεταφοράς αγωγών φυσικού αερίου, μέσα από εσωτερικές διαδικασίες που προβλέπονται στο πλαίσιο της επιτήρησης και επιθεώρησης των αγωγών, παράγουν μία σειρά πληροφορίων (π.χ. αυτοψίες, reports, ILI) οι οποίες σχετίζονται με την διαχείριση των γεωκινδύνων. Οι πληροφορίες αυτές είναι πολύ σημαντικό να ενσωματώνονται και αυτές στη Βάση Δεδομένων καθώς χρησιμεύουν στην συνεκτίμηση και στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων άλλων αναλύσεων.

4.6 Γεωτεχνικοί Γεωκίνδυνοι

4.6.1 Παράγοντες επίδρασης

Όπως ειπώθηκε πρωτύτερα, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι σε συνάρτηση με τους παράγοντες που επηρεάζουν και επιδεινώνουν κάθε γεωκίνδυνο. Για όλους τους γεωτεχνικούς γεωκινδύνους, υπάρχουν κάποιοι βασικοί παράγοντες που εκτιμάται ότι επηρεάζουν την εμφάνιση αλλά και την ένταση ενός τέτοιου φαινομένου. Ωστόσο ενδέχεται να καταγράφονται αρκετές διαφοροποιήσεις στην επιλογή των παραγόντων ανάμεσα σε διαφορετικές μελέτες, καθώς οι ειδικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής ή η διαθεσιμότητα των δεδομένων τείνουν να μεταβάλουν τον αριθμό και το είδος τους.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Ψωμιάδης, 2010), οι παράγοντες που θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη περιγράφονται ως εξής:

- ✓ Κάλυψη (χρήσεις) γης
- ✓ Βροχόπτωση
- ✓ Λιθολογία
- ✓ Βάθος εδάφους
- ✓ Υψόμετρο
- ✓ Σχετικό υψόμετρο
- ✓ Κλίση εδάφους
- ✓ Προσανατολισμός
- ✓ Οδικό Δίκτυο (απόσταση από δρόμους)
- ✓ Υδρογραφικό δίκτυο (απόσταση από υδατορέματα)
- ✓ Ακτογραμμή (απόσταση από ακτογραμμή)
- ✓ Σεισμικά ρήγματα (απόσταση από σεισμικά ρήγματα)
- ✓ Σεισμική ένταση

4.6.2 Μεθοδολογία

Τα τελευταία χρόνια, η χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολισθήσεων με χρήση ΣΓΠ αποτελεί μια από τις πιο συνήθεις μεθόδους μελέτης του φαινομένου. Ως επιδεκτικότητα για την εκδήλωση κατολισθήσεων, ορίζεται η τάση του εδάφους να δημιουργήσει κατολισθήσεις (Guzzetti, et al., 1999). Ουσιαστικά, σε έναν χάρτη επιδεκτικότητας για την εκδήλωση κατολισθήσεων απεικονίζονται οι περιοχές εκείνες, που πιθανολογικά μπορούν να εμφανίσουν κατολισθήσεις στο μέλλον. Επιπλέον, ένας χάρτης επιδεκτικότητας μπορεί να οδηγήσει στον καθορισμό ζωνών επικινδυνότητας στα πλαίσια ενός πολεοδομικού και χωροταξικού σχεδιασμού.

Οι μεθοδολογίες "ζωνοποίησης", ουσιαστικά στηρίζονται στο συσχετισμό των παραγόντων που συνέβαλαν κατά το παρελθόν στην εκδήλωση κατολισθήσεων, αποτυπώνοντας έτσι την επικινδυνότητα του φαινομένου σε παράγωγους χάρτες. Για την ελληνική επικράτεια μέχρι σήμερα, έχουν εφαρμοστεί αρκετές μεθοδολογίες σε διάφορες κλίμακες με σημαντικά και αξιόπιστα συμπεράσματα ανά περιοχές (Koukis & Ziourkas, 1991) (Koukis, et al., 1994) (Ferentinou, 2004) (Koukis, et al., 2005) (Γκουρνέλλος, et al., 2006) (Bathrellos, et al., 2009) (Βασιλειάδης, 2010) (Rozos, et al., 2010) (Ferentinou & Chalkias, 2013) (Sabatakakis, et al., 2013) (Πολυκρέτης, 2013)

Το πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων εξαρτάται από δευτερογενείς παράγοντες που σχετίζονται με την ποιότητα των διαθέσιμων γεωγραφικών δεδομένων. Κυρίως επηρεάζονται από την κλίμακα, την ευκρίνεια αλλά και την αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου. Επιπλέον, οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν και η ανάλυση των παραγόμενων θεματικών επιπέδων που προκύπτουν από αυτούς, συνδυαστικά με τα δεδομένα συσχετισμού ελέγχουν σημαντικά τα εξαγόμενα συμπεράσματα. Σε κάθε περίπτωση, οι μέθοδοι

με χρήση των ΣΓΠ για τη μελέτη τέτοιων φαινομένων παγκοσμίως, έχουν καθολική αναγνώριση και εφαρμόζονται ευρέως (Guzzetti, 2002) (Catani, et al., 2005) (Yiping & Beighley, 2006)

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

4.6.3 Ποιοτικές μέθοδοι

Οι ποιοτικές μέθοδοι στηρίζονται στη γνώμη των ειδικών, και πιο συγκεκριμένα γεωεπιστημόνων που έχουν επαρκή εμπειρία πεδίου σχετικά με τα κατολισθητικά φαινόμενα. Ο ειδικός κατά κανόνα, αμέσως μετά το συμβάν καταγράφει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην επηρεαζόμενη περιοχή από την κατολίσθηση αποτελώντας έτσι, την πλέον αξιόπιστη πηγή πληροφόρησης. Το γεγονός αυτό, προσδίδει πολύ υψηλό βαθμό αξιοπιστίας στις ποιοτικές μεθόδους. Εντούτοις, η περίπτωση αυτή προϋποθέτει πολύ λεπτομερείς εργασίες πεδίου και εκτεταμένη γεωλογική χαρτογράφηση, γεγονός που τις καθιστά αρκετά χρονοβόρες, επίπονες και ιδιαιτέρως δαπανηρές. Επιπροσθέτως, ένα βασικό μειονέκτημα των ποιοτικών μεθόδων είναι η υποκειμενική κρίση του ειδικού, που επηρεάζει την απόδοση των συντελεστών βαρύτητας κάθε παράγοντα, και επομένως, την τελική εκτίμηση της επικινδυνότητας. Είναι προφανές, ότι η εμπειρία ενός ειδικού γεωεπιστήμονα επιδέχεται χωρικούς περιορισμούς. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση που η περιοχή μελέτης ξεπερνά την τοπική κλίμακα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η γνώμη αρκετών ειδικών (Γαλλούση, 2017).

Στις ποιοτικές μεθόδους, περιλαμβάνονται οι εξής τρεις επιμέρους μέθοδοι:

Α. Γεωμορφολογική ανάλυση: είναι μια μέθοδος πεδίου, με τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας να πραγματοποιείται άμεσα στο πεδίο από τον ειδικό γεωεπιστήμονα και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές περιφερειακής ή εθνικής κλίμακας.

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

α) **Συνδυασμός ή υπέρθεση χαρτών-δεικτών:** Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται απλή υπέρθεση χαρτών αφού πρώτα έχουν αποδοθεί συντελεστές συμφώνως με την κρίση του ειδικού. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ένας χάρτης αποτελεί και έναν παράγοντα που θεωρητικά είναι γνώριμο ότι μπορεί να αποτελέσει αιτία για την πυροδότηση μιας κατολίσθησης (Γαλλούση, 2017).

β) **Λογικά αναλυτικά μοντέλα:** Η δεύτερη μέθοδος είναι ημι-ποσοτική και στοχεύει στη μοντελοποίηση τις επικινδυνότητας των κατολισθήσεων, με απώτερο σκοπό την πρόβλεψή τους. Η απόδοση συντελεστών βαρύτητας δεν γίνεται απευθείας από τον ειδικό, άλλα προηγείται η σύγκριση μεταξύ των δεδομένων που συλλέχτηκαν στο πεδίο, προκειμένου να αναδειχθούν οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραγόντων.

Μια από τις αποτελεσματικότερες προσεγγίσεις για την μελέτη της σπουδαιότητας και της σημασίας των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο των κατολισθήσεων αλλά και γενικώς τους φυσικούς κινδύνους, είναι η Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης γνωστή και ως AHP (Analytic Hierarchy Process). Η μέθοδος αυτή, με βάσει τα χαρακτηριστικά της γραμμικής άλγεβρας, ιεραρχεί και ποσοτικοποιεί τη διαδικασία σκέψης του ειδικού, αποδίδοντας συντελεστές βαρύτητας σε κάθε έναν παράγοντα. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία αυτή ιεραρχεί τους παράγοντες που θεωρητικά μπορούν να επηρεάσουν τις κατολισθήσεις, μέσω της σύγκρισης ανά ζεύγη. Από τη σύγκριση που συντελείται ανά δύο παράγοντες

για κάθε πιθανό ζευγάρι, αποδίδεται ένα σχετικό βάρος σε κάθε ένα απ' αυτά (Γαλλούση, 2017).

4.6.4 Ποσοτικές μέθοδοι

Στις ποσοτικές μεθόδους συμπεριλαμβάνονται τρεις επιμέρους μέθοδοι:

Α. Στατιστική ανάλυση: Σε αυτήν την ανάλυση, οι συνδυασμοί των παραγόντων εκδήλωσης κατολίσθησης προσδιορίζονται στατιστικά ώστε να επιτευχθεί η παραγωγή ποσοτικών προβλέψεων σε μία ευρύτερη περιοχή με παραπλήσια χαρακτηριστικά. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την κατανόηση των σχέσεων που επικρατούν μεταξύ των κατολισθήσεων και των παραγόντων που τις εγκυμονούν ή τις πυροδοτούν, με φανερά όμως περιορισμένη υποκειμενικότητα σε σχέση με τις ποιοτικές ή ημι-ποιοτικές μεθόδους (Γαλλούση, 2017).

α) **Διμεταβλητή ανάλυση:** οι παράγοντες σε αυτού του τύπου την ανάλυση, χωρίζονται σε κατηγορίες και συσχετίζονται με έναν χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων. Ανάλογα με την πυκνότητα των κατολισθήσεων ανά κατηγορία στην υπό μελέτη περιοχή, υπολογίζεται ένας συντελεστής βαρύτητας για όλες τις κατηγορίες κάθε παράγοντα.

   Στην κατηγορία αυτή ανήκει κι ένας από τους πιο ευρέως διαδεδομένους δείκτες στατιστικής ανάλυσης, ο «Δείκτης Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων» γνωστός και ως LSI (Landslide Susceptibility Index) ο οποίος θα εφαρμοστεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία και θα παρουσιαστεί πιο αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

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

Β. Γεωτεχνικές προσεγγίσεις: Αυτή η περίπτωση περιλαμβάνει την ντετερμινιστική ανάλυση που εκτιμά τον συντελεστή ασφαλείας μέσα από εργαστηριακές μετρήσεις και την πιθανολογική ανάλυση του συντελεστή ασφάλειας με χρήση της θεωρίας των πιθανοτήτων ώστε να εξαλειφθούν τα όποια σφάλματα λόγω χωροχρονικών μεταβολών.

α) **Ντετερμινιστική ανάλυση:** η ντετερμινιστική ανάλυση χρησιμοποιείται άμεσα στο σχεδιασμό των τεχνικών έργων, διότι προσφέρει τις βέλτιστες ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με τον κίνδυνο κατολισθήσεων, επειδή βασίζεται στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που χαρτογραφούνται σε μια περιοχή. Στην πραγματικότητα, μέσα από τη χρήση ειδικών μοντέλων ευστάθειας των πρανών, προσδιορίζονται η διατμητική τάση και η αντοχή των εδαφών (λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες όπως η πίεση του νερού), με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας αποτελεί τον λόγο μεταξύ των δυνάμεων που προκαλούν την αστοχία των πρανών και εκείνων που την αποτρέπουν. Η μέθοδος αυτή, εφαρμόζεται μόνο σε περιοχές περιορισμένης έκτασης καθότι προϋποθέτει μεγάλη ποσότητα εργαστηριακών δοκιμών και έρευνα πεδίου, παρέχοντας ωστόσο χάρτες μεγάλης κλίμακας (Γαλλούση, 2017).

β) **Πιθανολογική προσέγγιση:** Αυτού του τύπου η μέθοδος, χρησιμοποιεί τη θεωρία των πιθανοτήτων για να υπολογίσει τον δείκτη αξιοπιστίας και την πιθανότητα αστοχίας, θεωρώντας ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι μια τυχαία μεταβλητή που παρουσιάζει μέση τιμή και τυπική απόκλιση. Η μέθοδος ωστόσο, αντιμετωπίζει τα προβλήματα αβεβαιότητας της ντετερμινιστικής μεθόδου, που προκύπτουν από τις τιμές των μετρούμενων παραμέτρων λόγω των χωροχρονικών μεταβολών των γεωλογικών σχη-

ματισμών και την διακύμανση των πιέσεων που δέχονται οι υπόγειοι υδροφορείς, οι οποίες εξαρτώνται σχεδόν στο σύνολό τους από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν (Γαλλούση, 2017).

Γ. Ανάλυση νευρωνικών δικτύων: Αντίθετα με όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης των κατολισθήσεων βάσει πολύπλοκων, άγνωστων και μη-γραμμικών σχέσεων με τους γενεσιουργούς παράγοντες που τις επηρεάζουν. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για ένα μαθηματικό ή υπολογιστικό μοντέλο επεξεργασίας πληροφοριών το οποίο βασίζεται στις γνωστικές διαδικασίες και την οργανωτική δομή των νευροβιολογικών δικτύων, δίνοντας αρκετά ικανοποιητικές προβλέψεις ακόμη κι αν τα δεδομένα είναι αμφίβολα. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου, στην ουσία δεν διαφέρει από τις προαναφερθείσες, αφού η εφαρμογή των ΤΝΔ στοχεύει στον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των παραγόντων και εν τέλει, στη δημιουργία ενός επαναταξινομημένου χάρτη ζωνοποίησης της επιδεκτικότητας των κατολισθήσεων.

Εκτός των ανωτέρω, θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιείται η ανάλυση στηριζόμενη στην Ασαφή Λογική, στα Neuro-fuzzy Model και τα Δένδρα Απόφασης. Η Ασαφής Λογική χρησιμοποιείται όταν δεν καθίσταται πλέον δυνατή η χρήση συμβατικών στατιστικών μεθόδων εξαιτίας της αβεβαιότητας που προκύπτει είτε λόγω περιορισμένων δεδομένων, είτε ένεκα της ασαφούς οριοθέτησης των παραγόντων. Τα Neuro-fuzzy Model συνδυάζουν τη μέθοδο των ΤΝΔ και της ασαφούς λογικής. Εν πρώτοις, πραγματοποιείται τυχαία επιλογή γνωστών κατολισθήσεων για των υπολογισμό βαρών και ύστερα δημιουργείται ένας χάρτης επιδεκτικότητας που επαληθεύεται από τις υπόλοιπες καταγραφές (Γαλλούση, 2017).

4.7 Υδροτεχνικοί Γεωκίνδυνοι

4.7.1 Μεθοδολογία

Για τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας μιας περιοχής έναντι ενός υδροτεχνικού γεωκινδύνου, προτείνεται ως καταλληλότερη μεθοδολογία αυτή της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων ή MultiCriteria Decision Analysis ή MCDA σε περιβάλλον ΣΓΠ. Με την μέθοδο αυτή γίνεται υπέρθεση των επιπέδων που έχει επιλέξει ανάμεσα σε πληθώρα κριτηρίων ο λήπτης αποφάσεων, κριτήρια τα οποία περιγράφουν τους παράγοντες επιρροής για τον γεωκίνδυνο. Με την εφαρμογή της μεθόδου και μέσω της ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων, προκύπτει ο τελικός χάρτης επιδεκτικότητας.

Κάτι που θα πρέπει να αναφερθεί περαιτέρω για την Χωρική Πολυκριτηριακή Ανάλυση είναι, ότι πρόκειται για μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδο σε εφαρμογές των ΣΓΠ, και μάλιστα χρησιμοποιείται σε πάρα πολλά επιστημονικά πεδία. Αυτό αποδίδεται στα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν τα ΣΓΠ σε σχέση με αυτή, όπως ο συνδυασμός πολυάριθμων θεματικών επιπέδων πληροφορίας, η χρήση διάφορων δεδομένων, η ανάλυση του χώρου μέσα από την δημιουργία μοντέλων και τέλος η οπτικοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων, αλλά και η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων (Χαλκιάς, 2015).

Στη Χωρική Πολυκριτηριακή Ανάλυση με την υπέρθεση των πολλαπλών θεματικών επιπέδων, επιτυγχάνεται το να αποκαλυφθούν οι βέλτιστες τοποθεσίες, σύμφωνα με τα κριτήρια της πολυκριτηριακής ανάλυσης που προηγήθηκε. Στην πραγματικότητα όμως η έρευνα βέλτιστης λύσης, δηλαδή, μιας λύσης που να βελτιστοποιεί συγχρόνως όλα τα κριτήρια που συμμετέχουν σε αυτή, είναι άσκοπη, καθώς τα κριτήρια έχουν από τη φύση τους ανταγωνιστικό ρόλο με αποτέλεσμα το βέλτιστο ως προς ένα κριτήριο να μην είναι απαραίτητα και βέλτιστο ως προς τα άλλα. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι που εφαρμόζονται έχουν ως

στόχο την εξεύρεση μιας ενδιάμεσης λύσης που να ικανοποιεί του ερευνητές (Παπαχαρισίου, 2008).

4.7.2 Παράγοντες επίδρασης - Διαθέσιμα δεδομένα

Όπως ειπώθηκε και ανωτέρω, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι σε συνάρτηση με τους παράγοντες που επηρεάζουν κάθε γεωκίνδυνο. Για τον υδροτεχνικούς γεωκινδύνους της κατολίσθησης λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω μεταβλητές:

- ✓ Τύπος κάλυψης γης (χρήσεις γης)
- ✓ Βλάστηση
- ✓ Μέσο ετήσιο ποσό βροχόπτωσης
- ✓ Λιθολογία
- ✓ Κλίση
- ✓ Υδρογραφικό δίκτυο (απόσταση)
- ✓ Ακτογραμμή (απόσταση)
- ✓ Θέσεις διασταυρώσεων αγωγών - ρεμάτων

4.8 Τεκτονικοί Γεωκίνδυνοι

4.8.1 Μεθοδολογία

Για την ανάδειξη της επιδεκτικότητας των περιοχών έναντι ενός τεκτονικού γεωκινδύνου επιλέγεται και πάλι η μέθοδος της Χωρικής Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε περιβάλλον ΣΓΠ προφανώς. Με την εφαρμογή αυτής τη μεθόδου, γίνεται υπέρθεση των επιπέδων εκείνων που αναπαριστούν τους παράγοντες επιρροής για τον γεωκίνδυνο και μέσω της ανάλυσης και επεξεργασίας των εκάστοτε δεδομένων, προκύπτει ο τελικός επαναταξινομημένος χάρτης επιδεκτικότητας έναντι του κινδύνου.

4.8.2 Παράγοντες επίδρασης

Όπως αναφέρθηκε ήδη σε πρωτύτερο σημείο, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι πάντοτε συναρτήσει των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν τον κάθε γεωκίνδυνο. Για έναν τεκτονικού τύπου γεωκίνδυνο, λαμβάνονται υπόψιν οι παρακάτω μεταβλητές:

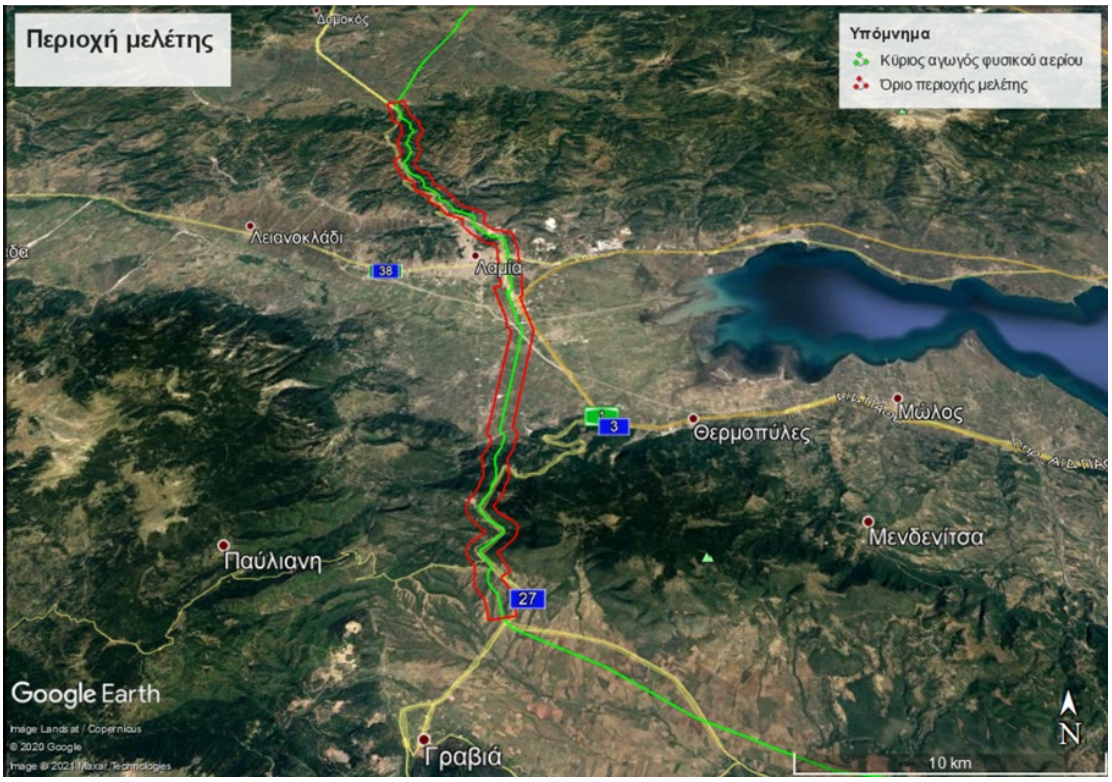
- ✓ Λιθολογία
- ✓ Βάθος γεωλογικού σχηματισμού (βάθος βράχου)
- ✓ Σεισμικά ρήγματα (απόσταση)
- ✓ Θέσεις διασταυρώσεων με σεισμικά ρήγματα

5. Πιλοτική εφαρμογή στην αξιολόγηση επιδεκτικότητας στον κατολισθητικό κίνδυνο αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου

5.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε για την πιλοτική εφαρμογή εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε κατολισθητικό κίνδυνο, εντοπίζεται στην περιοχή της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας, και πιο συγκεκριμένα στην Περιφερειακή Ενότητα της Φθιώτιδας. Από την εν λόγω περιοχή διέρχεται ο Κύριος αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου του οποίου η διεύθυνση της όδευσης είναι από Βορρά προς Νότο. Το μήκος του αγωγού της περιοχής που εξετάζεται είναι περίπου 40 km, και ξεκινά από την περιοχή του χωριού Σκαμνός Φθιώτιδας, φτάνοντας ως το χωριό Νέος Παλαμάς Φθιώτιδας. Η απόσταση των περιοχών οριζοντιογραφικά είναι 35 km περίπου. Τα όρια της περιοχής μελέτης εκτείνονται σε απόσταση 500 m εκατέρωθεν του άξονα του αγωγού φυσικού αερίου, διαμορφώνοντας έτσι μια συνολική επιφάνεια μελέτης με εμβαδό 41,22 km^2 περίπου.

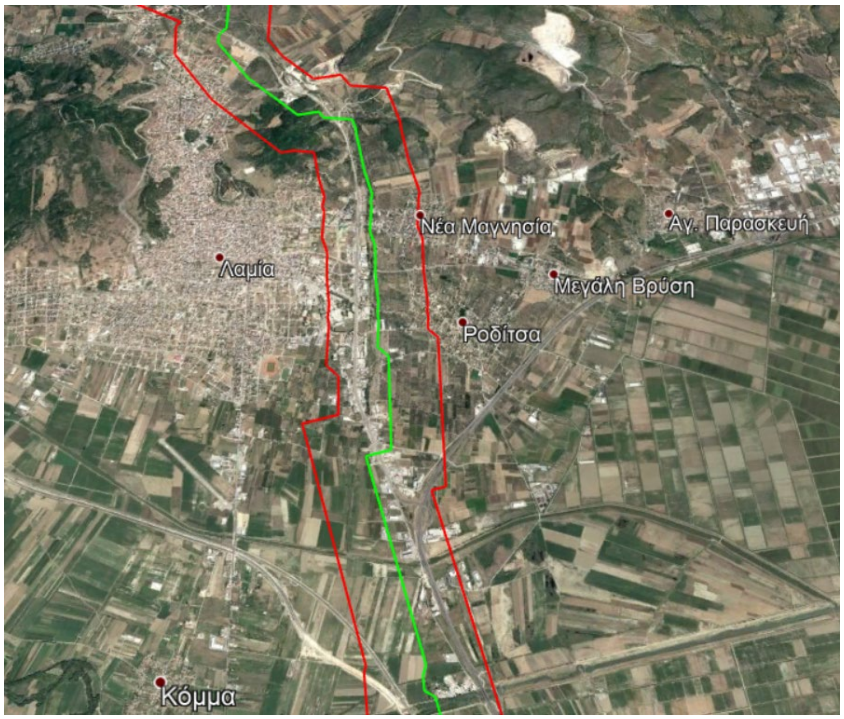


Εικόνα 7. Περιοχή μελέτης.

Πηγή: Google Earth

Η περιοχή γεωμορφολογικά χωρίζεται γενικά, σε τρία τμήματα. Στα Νότια βρίσκεται ο ορεινός όγκος της Οίτης από την περιοχή του Μπράλου έως και την Άνω Δαμάστα. Ύστερα, ακολουθεί το μεσαίο τμήμα που είναι καθαρά πεδινό λόγω της ύπαρξης της κοιλάδας του Σπερχειού ποταμού, ενώ στο βορειότερο τμήμα υπάρχει ο ορεινός όγκος της Δίβρης (Εικόνα 7).

Όσον αφορά τις χρήσεις γης, στα ορεινά τμήματα (νότια και βόρεια) ο χαρακτήρας είναι κατά κύριο λόγο δασικός με την παρουσία μόνο δύο οικισμών (Σκαμνός και Μπράλος). Στο κεντρικό τμήμα που χαρακτηρίζεται ως πεδινό, κυριαρχούν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Ωστόσο σε αυτό το τμήμα, πέραν του γεωργικού χαρακτήρα που κυριαρχεί, η περιοχή μελέτης διέρχεται και από αστικό και ημιαστικό περιβάλλον, καθώς ο αγωγός οδεύει πλησίον (ανατολικά) του αστικού πυρήνα της Λαμίας (Εικόνα 7).



Εικόνα 8. Περιοχή μελέτης πλησίον της πόλης της Λαμίας.
Πηγή: Google Earth

5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγού φυσικού αερίου

Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του αγωγού έγινε εισαγωγή των δεδομένων τα οποία περιγράφουν μία σειρά από τεχνικά χαρακτηριστικά. Τα συγκεκριμένα δεδομένα δίνουν την δυνατότητα συσχέτισης των περιοχών που έχουν μεγαλύτερο βαθμό επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση, ώστε να μπορέσουν να εξεταστούν με περισσότερη λεπτομέρεια ως προς τις πιθανές επιπτώσεις στην ακεραιότητα των αγωγών. Στο παρακάτω πίνακα που ακολουθεί, περιγράφονται οι κατηγορίες των δεδομένων, η περιγραφή τους και το είδος του αρχείου που έγινε εισαγωγή.

Κατηγορία δεδομένων	Περιγραφή	Είδος αρχείου
Όδευση αγωγού	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Θέση και κωδικοί κολλήσεων των επιμέρους τμημάτων	Σημειακό δεδομένο	Vector
Χιλιομέτρηση αγωγού	Σημειακό δεδομένο	Vector
Διάμετρος	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Πάχος	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Υλικό	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Τύπος καμπύλου τμήματος	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Μέγιστη – Μέση πίεση λειτουργίας	Γραμμικό δεδομένο	Vector
Θέσεις επίγειων εγκαταστάσεων (σταθμών)	Σημειακό δεδομένο	Vector

Πίνακας 3. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

5.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση με χρήση του Δείκτη Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων ή Landslide Susceptibility Index (LSI).

5.2.1 Εισαγωγή

Για το προσδιορισμό της επιδεκτικότητας περιοχών στον γεωκίνδυνο της κατολίσθησης, επιλέγεται η χρήση του Δείκτη Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων ή Landslide Susceptibility Index (LSI). Ο δείκτης LSI είναι ένας από τους πιο ευρέως διαδεδομένους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην στατιστική ανάλυση των κατολισθήσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης αυτός αναλύει τη χωρική σχέση ανάμεσα στην έκταση των παραγόντων που προκαλούν ή επιδρούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων και στην έκταση που έχει υποστεί κατολίσθηση, με σκοπό να υπολογισθεί η σημαντικότητα των εκάστοτε παραγόντων.

Όπως θα επεξηγηθεί και κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, ο δείκτης LSI είναι ίσος με τον λογάριθμο (LN) του λόγου της πυκνότητας κατολισθήσεων της κατηγορίας ενός παράγοντα προς την ολική πυκνότητα κατολισθήσεων του παράγοντα.

$$LSI = \frac{\textit{Πυκνότητα κατολισθήσεων ανά κατηγορία}}{\textit{Πυκνότητα κατολισθήσεων συνόλου του χάρτη}}$$

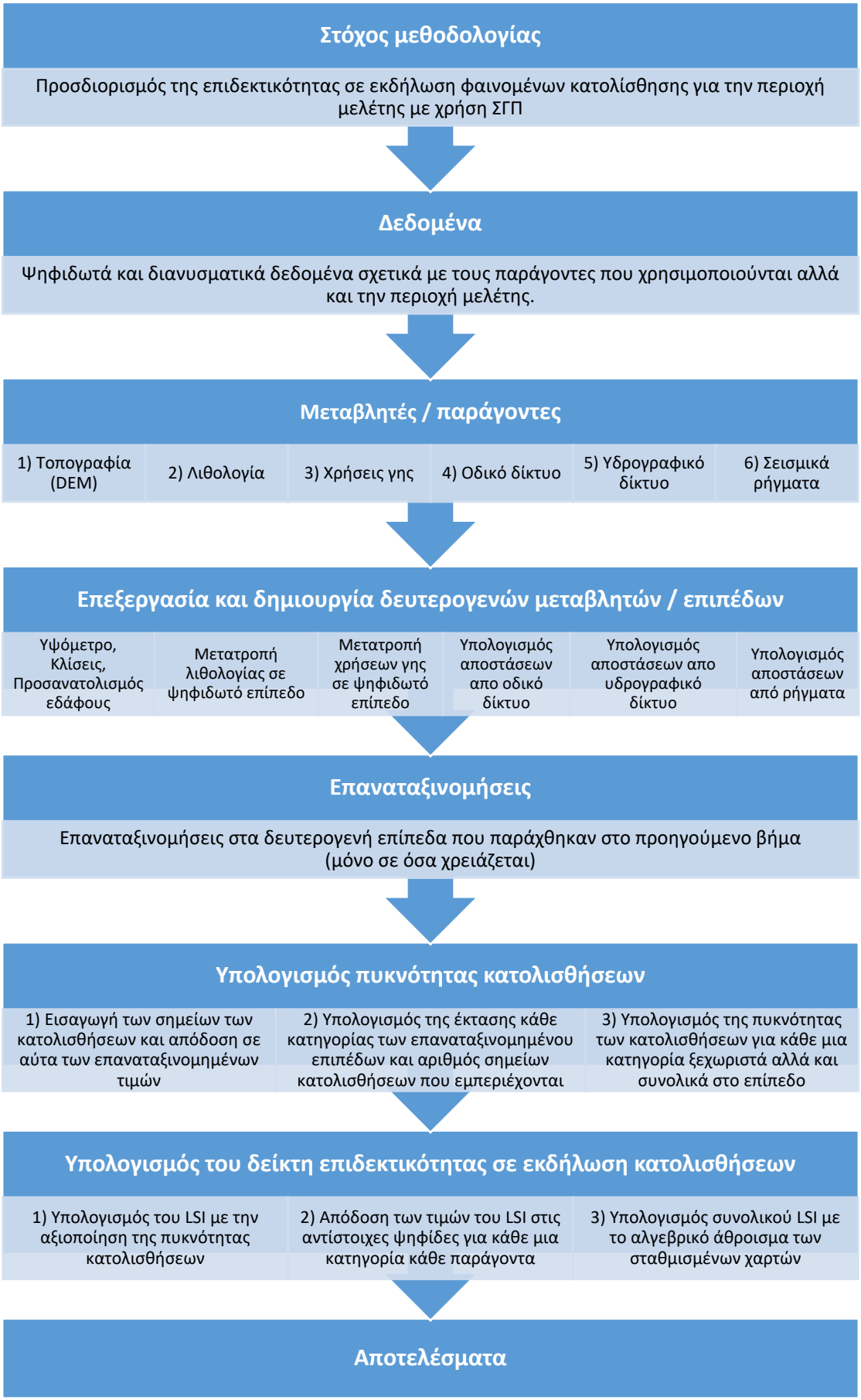
Η πυκνότητα κατολισθήσεων ανά κατηγορία είναι ίση με το λόγο των συμβάντων κατολίσθησης προς την επιφάνεια της ίδιας της κατηγορίας. Επιπλέον, η πυκνότητα του συνόλου του χάρτη είναι ίση με το σύνολο των συμβάντων κατολίσθησης προς την συνολική επιφάνεια του χάρτη.

Το τελικό προϊόν της μεθόδου είναι το συνολικό LSI, και προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των επιπέδων που έχουν προκύψει προηγουμένως δημιουργώντας έτσι ένα νέο επίπεδο επιδεκτικότητας, το οποίο ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία παρουσιάζεται ως ένας ταξινομημένος χάρτης με κλάσεις επιδεκτικότητας ως προς τα φαινόμενα των κατολισθήσεων.

Όταν ο δείκτης LSI έχει υψηλές θετικές τιμές, τότε το γεγονός αυτό ισοδυναμεί με υψηλή συσχέτιση αυτής της κατηγορίας με την εκδήλωση κατολισθήσεων, οπότε και η πιθανότητα κατολίσθησης είναι μεγαλύτερη. Αντιστρόφως, όταν ο δείκτης παίρνει υψηλές αρνητικές τιμές, τότε η συσχέτιση είναι χαμηλή οπότε και η πιθανότητα κατολίσθησης είναι σαφώς μικρότερη.

5.2.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθήθηκε ένα καθορισμένο μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο βασίστηκε σε παρόμοιες μελέτες (Γαλλούση, 2017) (Πολυκρέτης, 2013), προσαρμοσμένο όμως στις ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Η πορεία της μεθοδολογίας παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Διάγραμμα 4. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

5.2.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Οι παράγοντες - μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για εκτίμηση του δείκτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (LSI) είναι οκτώ και σύμφωνα με την βιβλιογραφία συμβάλουν ο καθένας με τον δικό του τρόπο στην εκδήλωση κατολισθήσεων μέσα σε ένα γενικότερο πλαίσιο αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Οι παράγοντες αυτοί βασίζονται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση των (Γαλλούση, 2017) (Πολυκρέτης, 2013) και (Γιάνναρης, 2016), και οι περισσότεροι εξ αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα μελετών.

Η τοπογραφία σαν μεταβλητή αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα και περιλαμβάνει σαν προέκτασή της κάποιες επιμέρους μεταβλητές που σχετίζονται με το υψόμετρο, τις κλίσεις του εδάφους και τον προσανατολισμό του εδάφους. Το υψόμετρο ως Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) έχει σημαίνουσα θέση μέσα στην μεθοδολογία γιατί συμβάλει στον προσδιορισμό και των άλλων δύο μεταβλητών στα πλαίσια των ΣΓΠ, την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους. Η κλίση του εδάφους πάλι, έχει σπουδαίο ρόλο μέσα σε αυτήν την μεθοδολογία, για το λόγο ότι όσο πιο μεγάλη είναι τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα κατολίσθησης. Επιπλέον, ο προσανατολισμός του εδάφους είναι άμεσα σχετιζόμενος με την ευστάθεια των πρανών και εν γένει των γεωλογικών σχηματισμών ως προς τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή όπως παραδείγματος χάριν οι βροχοπτώσεις και ο άνεμος.

Ο παράγοντας της γεωλογίας μιας περιοχής ενδιαφέροντος, αποτελεί μεταβλητή πολύ μεγάλης βαρύτητας σχετικά με την επιδεκτικότητα των κατολισθήσεων και για τον λόγο αυτό εξετάζονται οι λιθολογικοί σχηματισμοί στην περίπτωσή μας, ως προς τα χαρακτηριστικά της αντοχής τους.

Μια εξίσου σημαντική μεταβλητή είναι εκείνη των χρήσεων γης. Οι χρήσεις ή αλλιώς κάλυψη γης, είτε αυτή αποτελείται από φυσική βλάστηση, είτε από γεωργικές καλλιέργειες, είτε από αστική δόμηση κ.α. επηρεάζει σημαντικά την εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου. Για παράδειγμα στην περίπτωση των δασικών περιοχών, το ριζικό σύστημα των μεγάλων δέντρων ενδέχεται να λειτουργήσει προστατευτικά (Greenway, 1987).

Το οδικό δίκτυο είναι μία μεταβλητή η οποία συνδέεται στενά με τον αντίστοιχο παράγοντα των καλύψεων και χρήσεων γης. Ο λόγος που μελετάται σχετίζεται με την απόλυτη απόσταση προς αυτό, λόγω του ότι υποβαθμίζει μία περιοχή επηρεάζοντας τις βάσεις των πρανών. Η υποσκαφή στην βάση του πρανούς από την κατασκευή ενός δρόμου, θεωρείται συνήθης παράγοντας εκδήλωσης κατολίσθησης (Γαλλούση, 2017).

Το υδρογραφικό δίκτυο μίας περιοχής αποτελεί εξίσου δυναμικό παράγοντα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Ο τρόπος με τον οποίο συμβάλει στην εμφάνιση ενός τέτοιου φαινομένου αφορά στο ότι καταστρέφει τις βάσεις των πρανών και επιπλέον οδηγεί σε κορεσμό του υλικού τους.

Τέλος, η τελευταία μεταβλητή αφορά μια γεωλογική παράμετρο ως προς τον τεκτονισμό. Η μεταβλητή αυτή είναι αυτή των ρηγμάτων, τα οποία μελετήθηκαν ως προς την απόλυτη απόστασή τους, λόγω του γεγονότος ότι η απομάκρυνση από αυτά συνεπάγεται με μείωση της έντασης και της σεισμικής επιτάχυνσης.

5.2.4 Δεδομένα

Η παρούσα εργασία χρειάστηκε μία σειρά δεδομένων ώστε να επιτευχθεί η εκπόνησή της. Τα δεδομένα αυτά αναλύονται στην ενότητα αυτή και παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4.

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) είναι ψηφιδωτό δεδομένο με ανάλυση 5 m. Είναι προϊόν του Εθνικού Κτηματολογίου και επιπλέον αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο για την εκπόνηση της εργασίας.

Η περιοχή μελέτης έχει διατεθεί από τον ΔΕΣΦΑ σε διανυσματική μορφή και είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος.

Τα δεδομένα του γεωλογικού και τεκτονικού υποβάθρου της περιοχής μελέτης, δηλαδή η γεωλογία και τα ρήγματα της είναι δύο διανυσματικά δεδομένα. Η μεν γεωλογία είναι πολυγωνικού τύπου, ενώ τα ρήγματα είναι γραμμικού και αποτελούν αποτελέσματα της ψηφιοποίησης χαρτών του Ινστιτούτου Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ).

Τα δεδομένα σχετικά με την κάλυψη και τις χρήσεις γης για την περιοχή μελέτης προέρχονται από το ΟΠΕΚΕΠΕ για το έτος 2016.

Όσον αφορά το οδικό δίκτυο, τα δεδομένα αυτά προέρχονται από το Open Street Map και η λήψη τους πραγματοποιήθηκε από το Geofabrik (URL: https://download.geofabrik.de/).

Ως προς το υδρογραφικό δίκτυο, τα δεδομένα αυτά είναι διανυσματικά γραμμικά και προέρχονται από την ψηφιοποίηση των χαρτών γενικής χρήσης της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) σε κλίμακα 1:50.000.

Τέλος, σχετικά με τα δεδομένα των κατολισθήσεων, αποτελούν συμβάντα που έχουν καταγραφεί από εργασίες πεδίου δύο φορέων (ΙΓΜΕ και ΓΥΣ).

Όνομα	Τύπος	Πηγή
Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)	Raster (5m)	Εθνικό Κτηματολόγιο
Περιοχή μελέτης	Vector	ΔΕΣΦΑ
Γεωλογία	Vector	ΙΓΜΕ
Ρήγματα	Vector	ΙΓΜΕ
Οδικό δίκτυο	Vector	Open Street Map
Υδρογραφικό δίκτυο	Vector	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ)
Χρήσεις γης	Vector	ΟΠΕΚΕΠΕ
Κατολισθήσεις	Vector	ΙΓΜΕ και ΓΥΣ

Πίνακας 4. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

5.3 Δεδομένα

Πριν την ανάλυση των επιμέρους τμημάτων των επεξεργασιών, κρίνεται σκόπιμο να γίνουν μερικές διευκρινήσεις όσον αφορά τις επεξεργασίες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το λογισμικό Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) της εταιρίας ESRI ArcGIS 10.4, με την ανάλυση της εργασίας να είναι στα 5m. Επιπλέον, το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται στα δεδομένα κατά τις διάφορες επεξεργασίες ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα συμβατότητας είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ ‘87), και αποτελεί το πλέον κατάλληλο για τον ελληνικό χώρο. Εν κατακλείδι, οι όλοι υπολογισμοί που απαιτούνται για τα τελικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα και πιο συγκεκριμένα με το λογισμικό Microsoft Office Excel 2013.

5.3.1 Δημιουργία δευτερογενών μεταβλητών

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, σε πρώτο χρόνο δημιουργήθηκε η χωρική βάση δεδομένων αποτελούμενη από θεματικά επίπεδα (layers). Στη συνέχεια, έγινε η εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων (DEM, λιθολογία, χρήσεις γης, ρήγματα, οδικό και υδρογραφικό δίκτυο) στο υποπρόγραμμα ArcMap του ArcGIS. Ύστερα, επιλέχθηκε το προβολικό σύστημα των layers (ΕΓΣΑ ’87), και ακολούθησαν οι αρχικές επεξεργασίες των πρωτογενών δεδομένων για να παραχθούν οι δευτερογενείς μεταβλητές.

Πιο συγκεκριμένα, το διανυσματικό επίπεδο του γεωλογικού υποβάθρου και αυτό των χρήσεων γης, μετατράπηκαν σε ψηφιδωτά επίπεδα ανάλυσης 5m, ώστε να μπορέσουν να αξιοποιηθούν ως δευτερογενείς μεταβλητές.

Επιπλέον, μέσα από την επεξεργασία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) προέκυψαν τρεις καινούριες μεταβλητές σε ψηφιδωτή μορφή (raster), αυτή των υψομετρικών ζωνών, των κλίσεων σε μοίρες και του προσανατολισμού των πρανών.

Μετά από τα παραπάνω, σειρά είχαν διάφορες προηγμένες τεχνικές ΣΓΠ, όπως είναι η Ευκλείδεια απόσταση. Το οδικό δίκτυο, το υδρογραφικό δίκτυο και τα ρήγματα, είναι παράγοντες που θα εξεταστούν ως προς την απόσταση προς αυτά. Κατ' ακολουθίαν, υπολογίσθηκε η Ευκλείδεια απόσταση στο λογισμικό ΣΓΠ για το κάθε επίπεδο και προέκυψαν κατά τον τρόπο αυτό τα επίπεδα των αποστάσεων.

5.3.2 Επαναταξινόμηση δεδομένων

Για να καταστούν δυνατοί οι υπολογισμοί στη συνέχεια της μεθοδολογίας, είναι απαραίτητο τα δεδομένα να επαναταξινομηθούν. Με την λειτουργία της

επαναταξινόμησης, επιτυγχάνεται η δημιουργία ζωνών από τις κλάσεις που εμείς ορίζουμε, οι οποίες είναι σε κοινή πλέον, τακτική κλίμακα ταξινόμησης, με τιμές ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το 5.

Το στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον διαχωρισμό των επιπέδων των παραγόντων υποβάθρου σε πέντε ζώνες με βάση την επιλογή επαναταξινόμησης "Natural Breaks (Jenks)". Εντούτοις, για μερικά από αυτά τα επίπεδα (κάλυψη γης, γεωλογία και έκθεση του αναγλύφου) κρίθηκε αναγκαίος και συνάμα ουσιαστικός ο διαχωρισμός τους σε λιγότερες ή και περισσότερες ζώνες, είτε χειροκίνητα είτε αυτοματοποιημένα.

Πιο αναλυτικά, για κάθε θεματικό επίπεδο/παράγοντα ισχύουν τα εξής:

- **Υψόμετρο:** Η μόνη απαραίτητη ενέργεια ήταν η επαναταξινόμηση του επιπέδου σε πέντε ζώνες με βάσει την επιλογή επαναταξινόμησης "Natural Breaks (Jenks)".

- **Κλίση εδάφους:** Η επαναταξινόμηση που εφαρμόστηκε στο επίπεδο ήταν σε πέντε ζώνες, όχι όμως με βάσει την επιλογή επαναταξινόμησης "Natural Breaks (Jenks)", αλλά με βάση έναν χειροκίνητο τρόπο διαμόρφωσης των ζωνών.

- **Έκθεση:** Η επαναταξινόμηση σε ζώνες αυτού του επιπέδου, διαφέρει από τις άλλες, καθώς ο συγκεκριμένος παράγοντας χωρίστηκε σε δέκα χειροκίνητα διαμορφωμένες ζώνες.

- **Γεωλογία:** Υλοποιήθηκε η επαναταξινόμηση του επιπέδου, ύστερα από ομαδοποίηση των αρχικών κατηγοριών γεωλογίας σε 5 ζώνες

- **Χρήσεις γης:** Πραγματοποιήθηκε η επαναταξινόμηση του επιπέδου αυτού, ύστερα από την ομαδοποίηση των αρχικών διαφορετικών κατηγοριών καλύψεων γης σε τέσσερεις ζώνες.

- **Οδικό δίκτυο:** Εφαρμόστηκε επαναταξινόμηση στο επίπεδο σε πέντε ζώνες με βάσει την επιλογή επαναταξινόμησης "Natural Breaks (Jenks)".

- **Υδρογραφικό δίκτυο:** Εφαρμόστηκαν οι ίδιες ενέργειες με αυτές του επιπέδου για το οδικό δίκτυο.

- **Ρήγματα:** Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόστηκαν οι ίδιες ενέργειες με αυτές των δυο προηγούμενων επιπέδων.

5.3.3 Υπολογισμός της πυκνότητας κατολισθήσεων

Σε αυτό το στάδιο, υπολογίστηκε η πυκνότητα των κατολισθήσεων για κάθε μια κατηγορία των παραγόντων. Αυτή η ενέργεια, εξυπηρετεί τον μετέπειτα υπολογισμό του LSI, και για να επιτευχθεί αυτό, συνέβησαν τα εξής.

Αρχικά, για κάθε κατηγορία παράγοντα υπολογίστηκε η έκτασή της. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της πυκνότητας των κατολισθήσεων ανά κατηγορία παράγοντα, χρησιμοποιήθηκε το διανυσματικό σημειακό επίπεδο των κατολισθήσεων από καταγραφές του ΙΓΜΕ. Σε κάθε σημείο (θέση κατολίσθησης) έγινε απογραφή για κάθε κατηγορία παράγοντα και ακολούθησε η διαδικασία της καταμέτρησης ανά κατηγορία. Σκοπός του συγκεκριμένου βήματος είναι η κατάδειξη του πλήθους των ψηφίδων κατολίσθησης (δηλαδή των ψηφίδων που καλύπτονται από τα πολύγωνα των κατολισθήσεων) που αναλογούν σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες, όπως αυτές δημιουργήθηκαν, ύστερα από τις επαναταξινομήσεις του προηγούμενου βήματος.

Το τελικό βήμα, είναι ο υπολογισμός των πυκνοτήτων του κάθε επιπέδου. Η συνολική πυκνότητα ($P_{\text{ολική}}$) του κάθε επιπέδου είναι ίση με τον αριθμό των σημείων κατολισθήσεων προς την συνολική έκταση του επιπέδου. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα (P_i) της κάθε κατηγορίας ενός επιπέδου ισούται με τον

λόγο του αριθμού των σημείων των κατολισθήσεων με το εμβαδόν της κατηγορίας αυτής.

$$\mathrm{P}_i = \frac{Αριθμός\ σημείων\ κατολισθήσεων\ ανά\ κατηγορία}{Εμβαδόν\ κατηγορίας}$$

$$\mathrm{P}_{ολικό} = \frac{Αριθμός\ σημείων\ κατολισθήσεων\ του\ επιπέδου}{Εμβαδόν\ επιπέδου}$$

5.4 Αποτελέσματα

5.4.1 Δείκτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (LSI)

Προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης επιδεκτικότητας για κάθε μία κατηγορία των παραπάνω επαναταξινομημένων ψηφιδωτών επιπέδων ξεχωριστά, ακολουθήθηκε για όλα η εξής μεθοδολογία. Μετά τον υπολογισμό των πυκνοτήτων, υπολογίσθηκε ο λόγος μεταξύ της πυκνότητας κάθε επιμέρους κατηγορίας με την συνολική πυκνότητα του επιπέδου της μεταβλητής. Με αυτόν τον τρόπο, ο λόγος που προκύπτει ως αποτέλεσμα χρησιμεύει ώστε να υπολογισθεί ο δείκτης επιδεκτικότητας (LSI). Το LSI είναι ίσο με τον φυσικό λογάριθμο (LN) του αριθμού που προέκυψε από τον προηγούμενο λόγο.

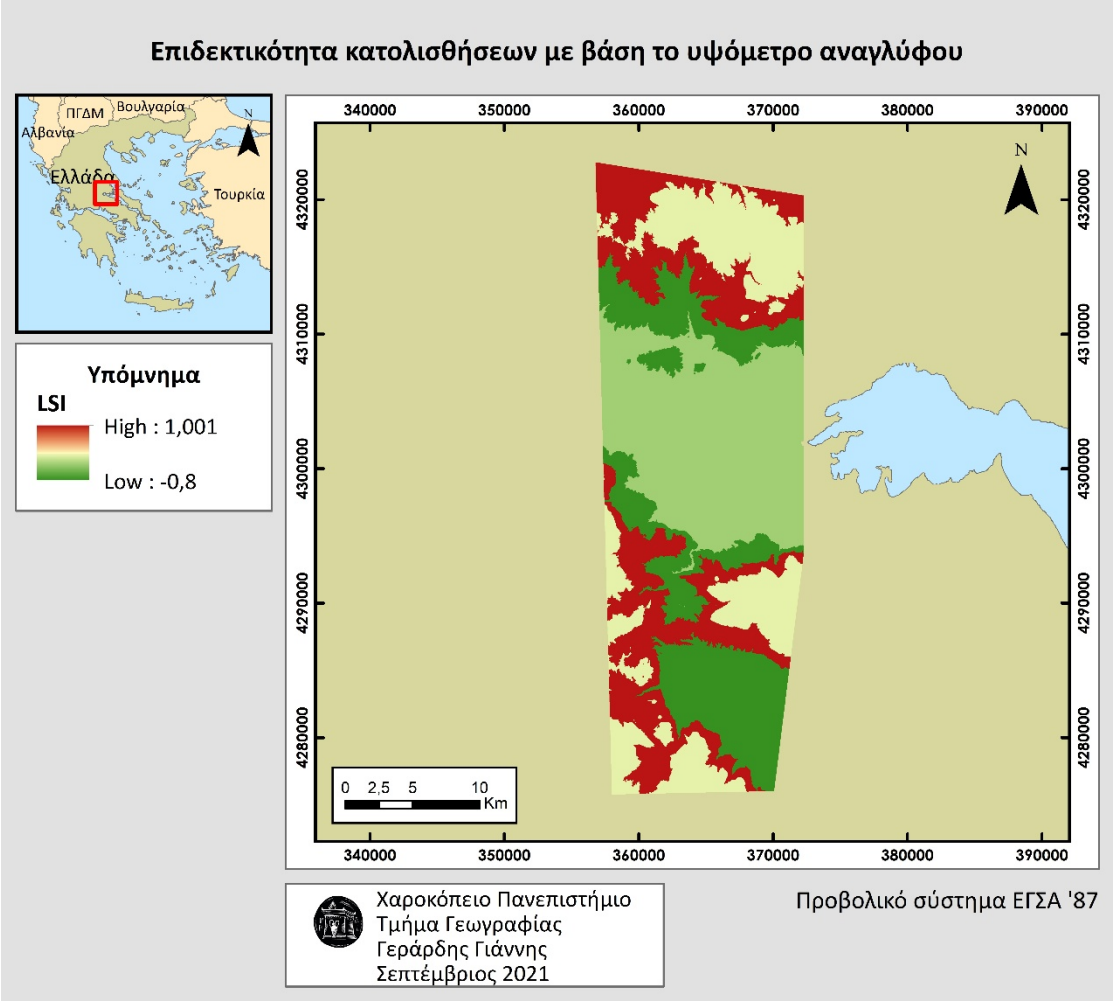
$$LSI_i = \ln \frac{P_i}{P_{ολικό}}$$

Οι τιμές του LSI που προέκυψαν ανά μεταβλητή και ανά κατηγορία κάθε μεταβλητής, αποδίδονται σε ένα νέο επίπεδο, εισάγοντας τις τιμές του δείκτη στις αντίστοιχες ζώνες μέσω της εκ νέου επαναταξινόμησης των παραγόμενων από το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας ψηφιδωτών επιπέδων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια:

α) Υψόμετρο

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολί-σθησης	Πλήθος συνό-λου ψηφίδων	LSI
< 193 m	2	8.586.467	-0,28547487
193 - 490 m	1	7.185.160	-0,800452479
491 - 771 m	7	8.297.569	1,001512877
772 - 1.115 m	0	6.535.467	0
1.115 m <	0	1.665.737	0

Πίνακας 5. LSI βάσει υψομέτρου.

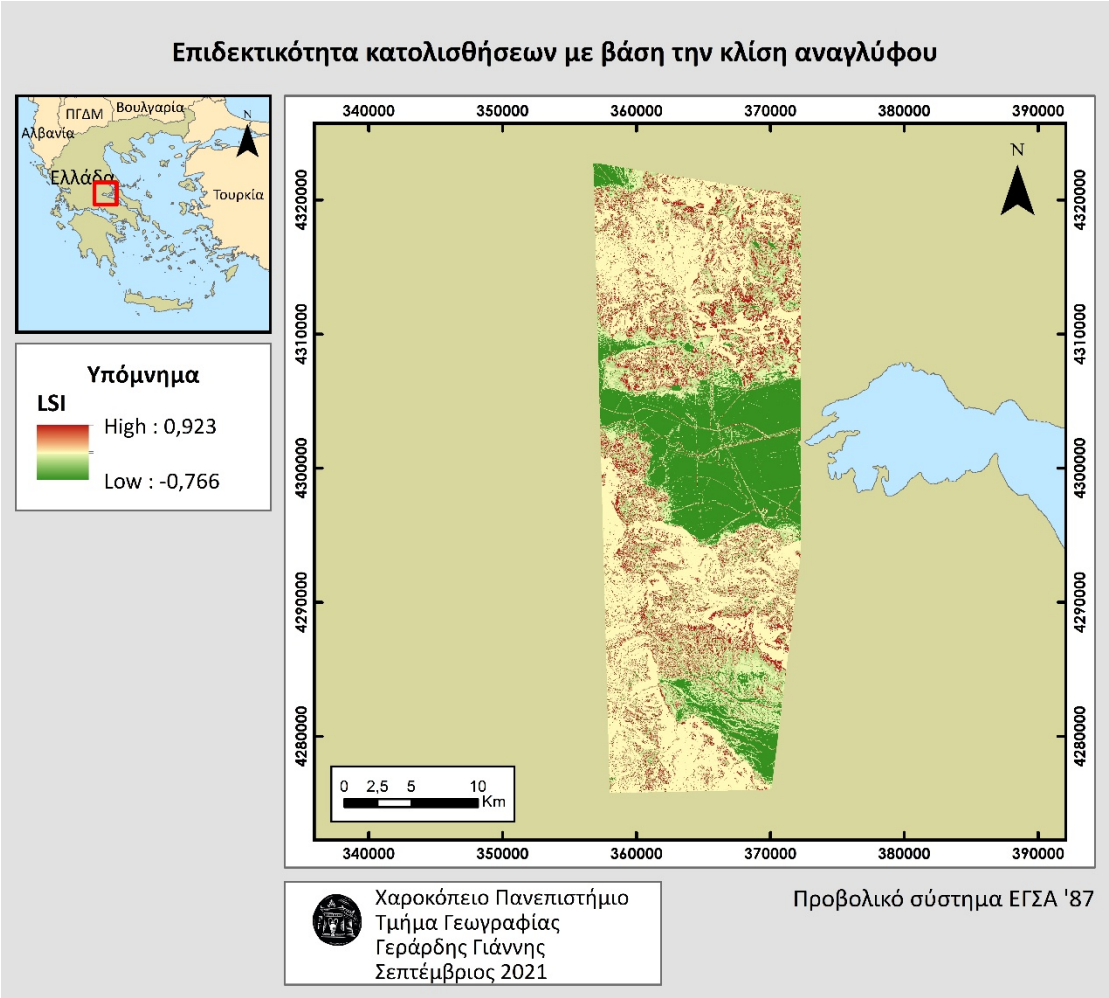


Χάρτης 1. Επιδεκτικότητα βάσει υψομέτρου.

β) Κλίσεις

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολί-σθησης	Πλήθος συνό-λου ψηφίδων	LSI
< 2°	1	6.944.127	-0,766330958
2° - 5°	0	3.084.137	0
6° - 10°	1	3.810.398	-0,166168337
11° - 15°	3	3.845.759	0,923206614
15° <	5	14.585.979	0,100942496

Πίνακας 6. LSI βάσει μορφολογικών κλίσεων.

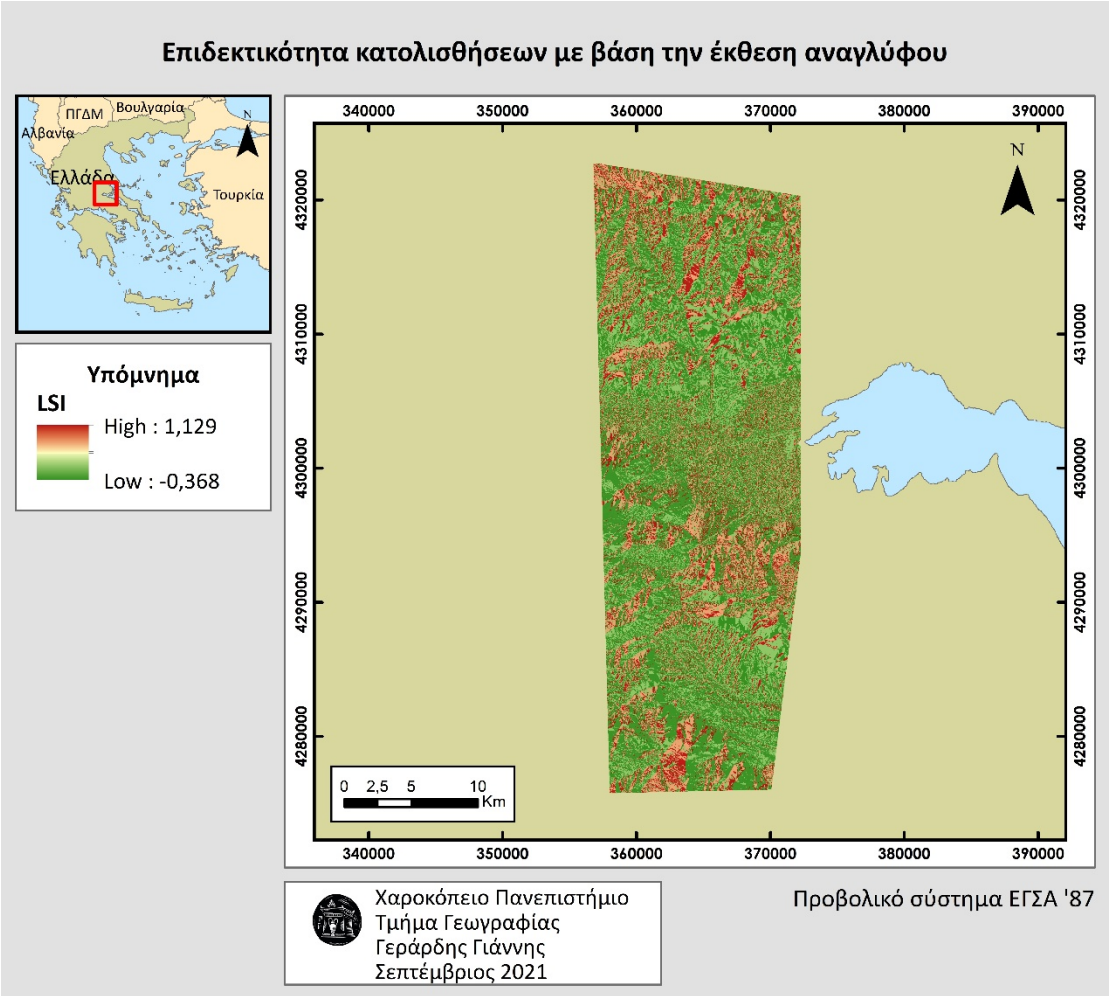


Χάρτης 2. Επιδεκτικότητα βάσει μορφολογικών κλίσεων.

γ) Έκθεση αναγλύφου

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφίδων κατο-λίσθησης	Πλήθος συνόλου ψη-φίδων	LSI
Επίπεδη (-1°)	0	66.733	0
Βόρεια (0° - 22,5°)	2	2.085.018	1,129935001
Βορειοανατολική (22,5° - 67,5°)	1	4.456.979	-0,32290587
Ανατολική (67,5° - 112,5°)	1	4.533.415	-0,33991021
Νοτιοανατολική (112,5° - 157,5°)	0	4.244.817	0
Νότια (157,5° - 202,5°)	1	4.666.310	-0,3688033
Νοτιοδυτική (202,5° - 247,5°)	0	3.770.783	0
Δυτική (247,5° - 292,5°)	3	3.203.077	1,106065687
Βορειοδυτική (292,5° - 337,5°)	2	3.307.470	0,668528942
Βόρεια (337,5° – 360°)	0	1.935.798	0

Πίνακας 7. LSI βάσει έκθεσης αναγλύφου.

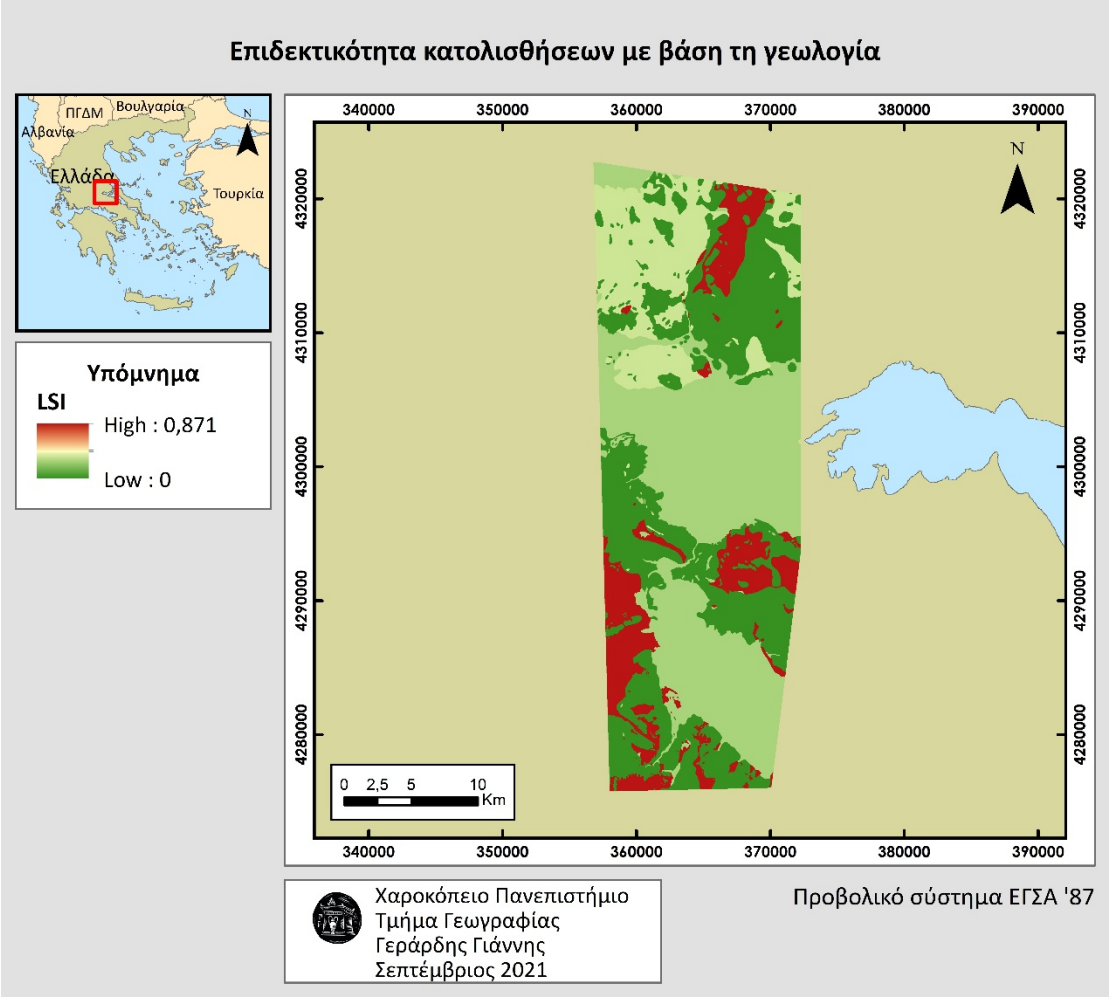


Χάρτης 3. Επιδεκτικότητα βάσει έκθεσης αναγλύφου.

δ) Γεωλογία

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολίσθη-σης	Πλήθος συνόλου ψηφίδων	LSI
Πυριτικοί ιζηματογενείς σχηματισμοί	0	41.712	0
Αλλουβιακοί σχηματισμοί	5	10.093.531	0,267585054
Ασβεστολιθικοί σχηματισμοί	0	9.152.179	0
Μεταμορφωμένοι σχηματισμοί	3	3.310.692	0,871496923
Ηφαιστειακοί σχηματισμοί	2	3.782.435	0,332821064

Πίνακας 8. LSI βάσει γεωλογίας.

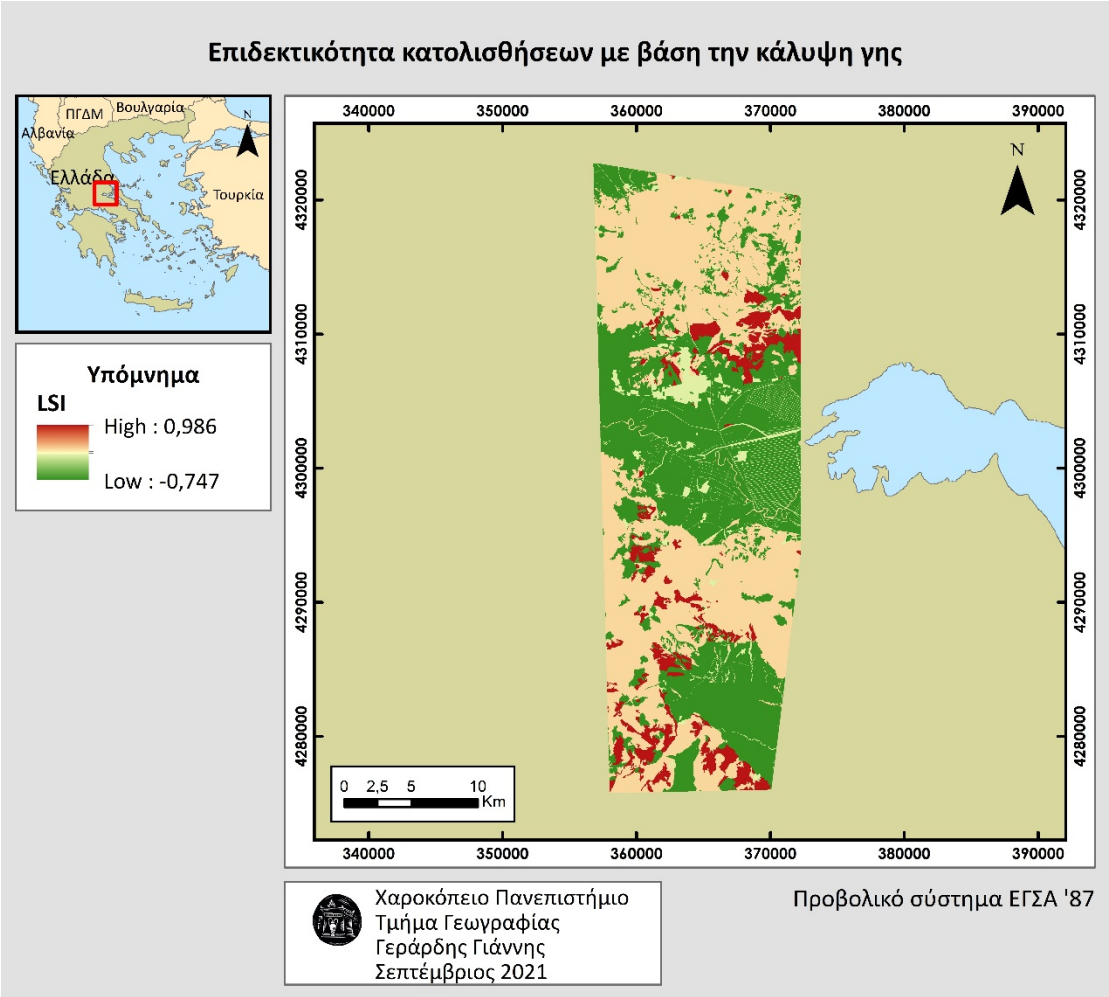


Χάρτης 4. Επιδεκτικότητα βάσει γεωλογίας.

ε) Χρήσεις γης

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολίσθη-σης	Πλήθος συνόλου ψηφίδων	LSI
Μη παραγωγικές εκτάσεις	2	1.966.786	0,986877991
Δομημένο περιβάλλον	0	1.088.612	0
Δασώδεις περιοχές	6	12.189.274	0,261334633
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	2	11.138.243	-0,74710577

Πίνακας 9. LSI βάσει χρήσεων γης.

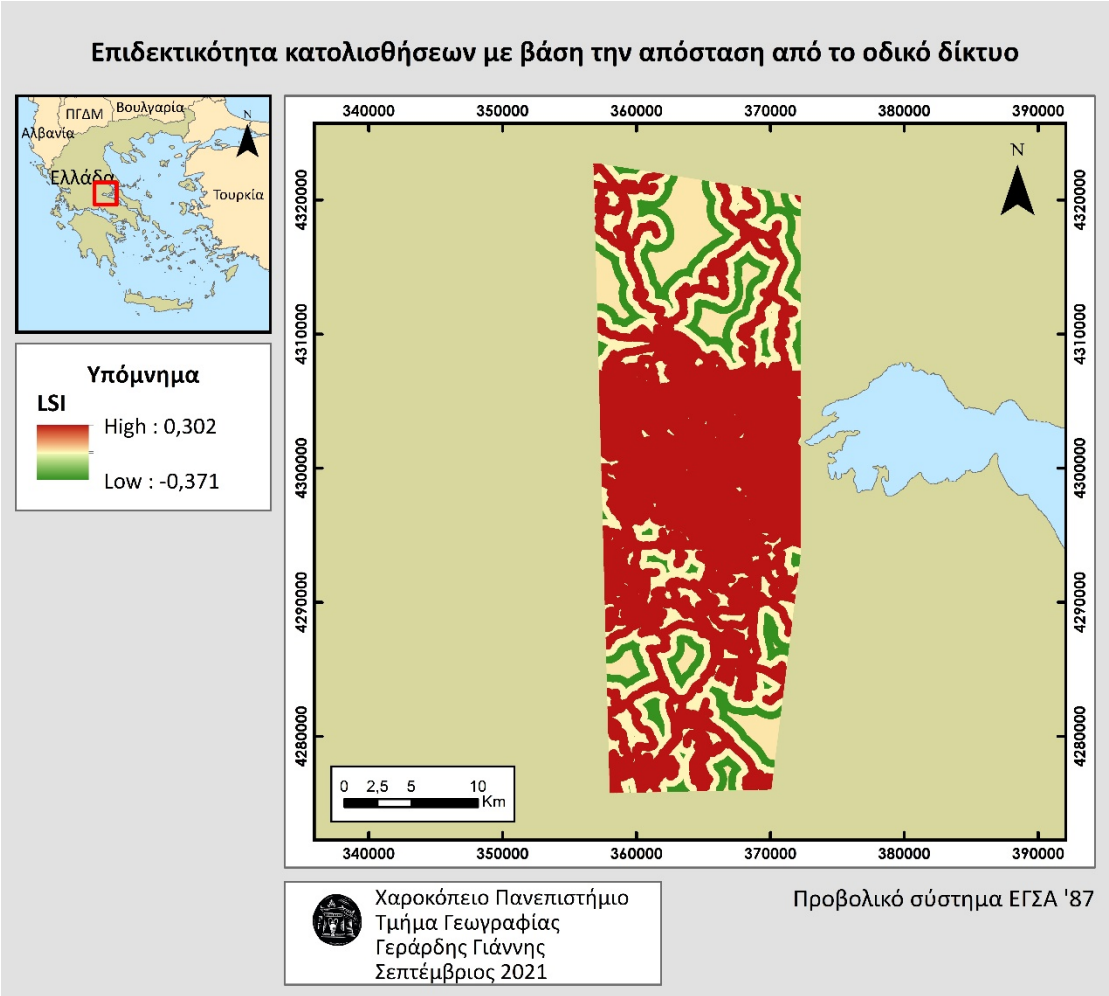


Χάρτης 5. Επιδεκτικότητα βάσει χρήσεων γης.

στ) Απόσταση από το οδικό δίκτυο

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολίσθη-σης	Πλήθος συνόλου ψηφίδων	LSI
< 300 m	7	16.701.052	0,302003746
301 - 774 m	2	6.587.612	-0,02047843
775 - 1.333 m	1	4.679.865	-0,37170395
1.334 - 2.007 m	0	3.016.972	0
2.007 m <	0	1.284.899	0

Πίνακας 10. LSI βάσει της απόστασης από το οδικό δίκτυο.

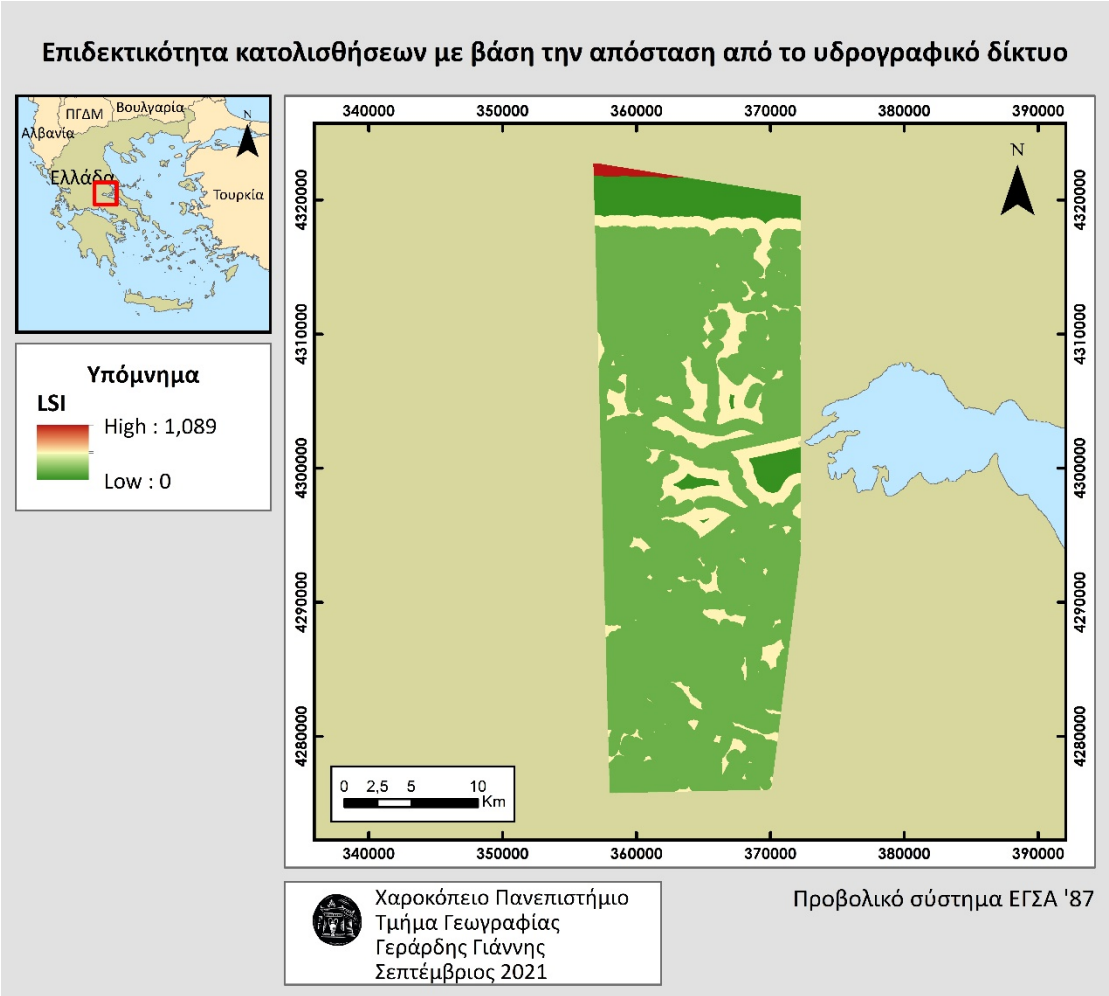


Χάρτης 6. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από το οδικό δίκτυο.

ζ) Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολίσθη-σης	Πλήθος συνόλου ψηφίδων	LSI
< 441 m	7	21.740.428	0,038301889
441 - 1.231 m	2	5.628.550	0,136860629
1.232 - 2.510 m	1	2.705.249	0
2.511 - 4.137 m	0	1.111.103	0
4.137 m <	0	1.085.070	1,089920807

Πίνακας 11. LSI βάσει της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

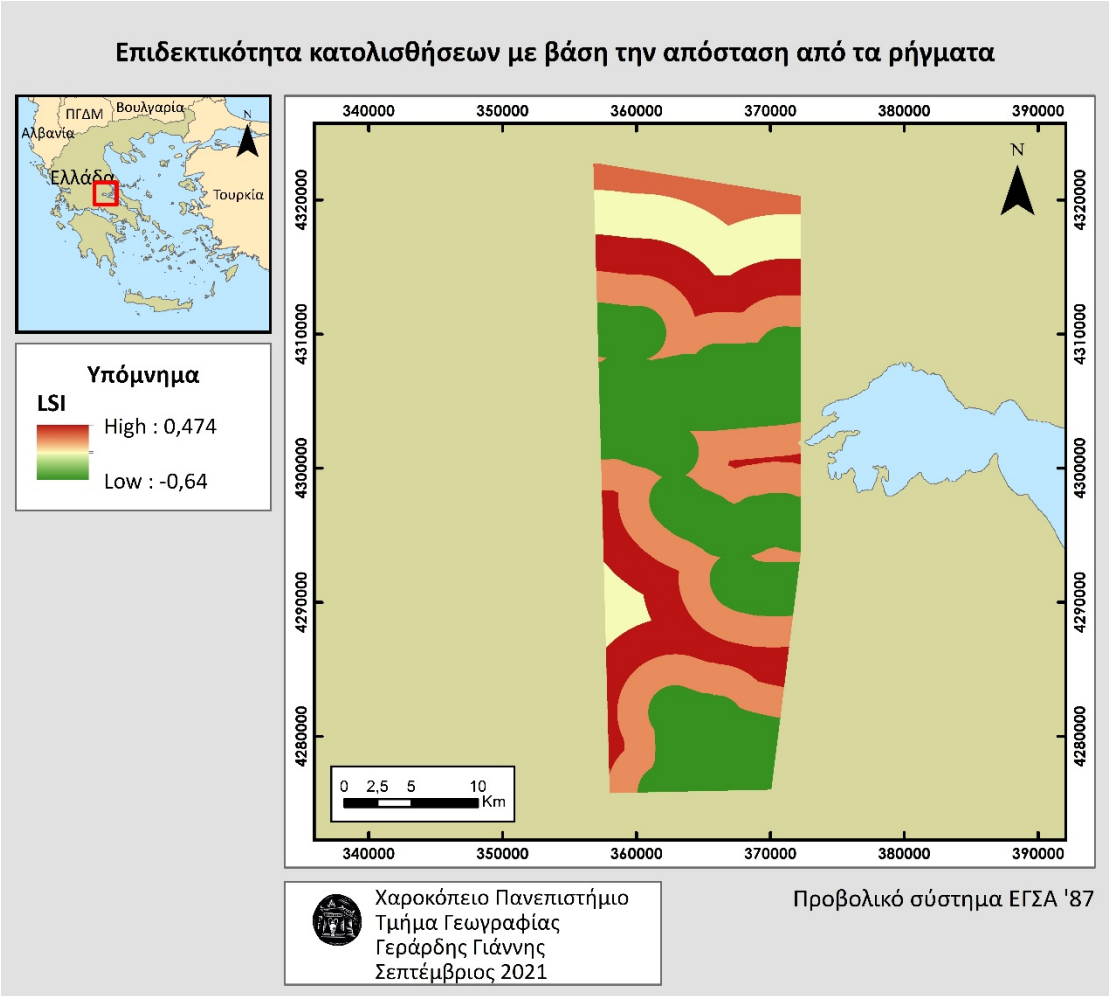


Χάρτης 7. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

η) Απόσταση από ρήγματα

Κατηγορίες	Πλήθος ψηφί-δων κατολίσθη-σης	Πλήθος συνόλου ψηφίδων	LSI
< 2.018 m	2	12.245.822	-0,64047233
2.018 - 4.333 m	3	7.974.895	0,193879115
4.334 - 7.063 m	3	6.022.979	0,47459561
7.064 - 10.387 m	1	3.591.725	-0,10706728
10.387 m <	1	2.434.979	0,281627176

Πίνακας 12. LSI βάσει της απόστασης από τα ρήγματα.



Χάρτης 8. Επιδεκτικότητα βάσει της απόστασης από τα ρήγματα.

5.4.2 Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση

Από τη στιγμή που υπολογίστηκε ο δείκτης επιδεκτικότητας (LSI) για κάθε ένα από τα επίπεδα χωριστά, ο υπολογισμός του Δείκτη Επιδεκτικότητας Κατολισθήσεων για το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος, αποτελεί μια σχετικά εύκολη διαδικασία. Άρα, το μόνο που απαιτείται για την εκτίμηση του συνολικού LSI και κατά συνέπεια τη δημιουργία ενός χάρτη επιδεκτικότητας, είναι το αλγεβρικό άθροισμα των LSI όλων των ψηφιδωτών επιπέδων επιδεκτικότητας κατολισθήσεων που κατασκευάστηκαν στο προηγούμενο βήμα της μεθοδολογίας. Για την εφαρμογή αυτή, θα χρησιμοποιηθεί το εργαλείο Raster Calculator.

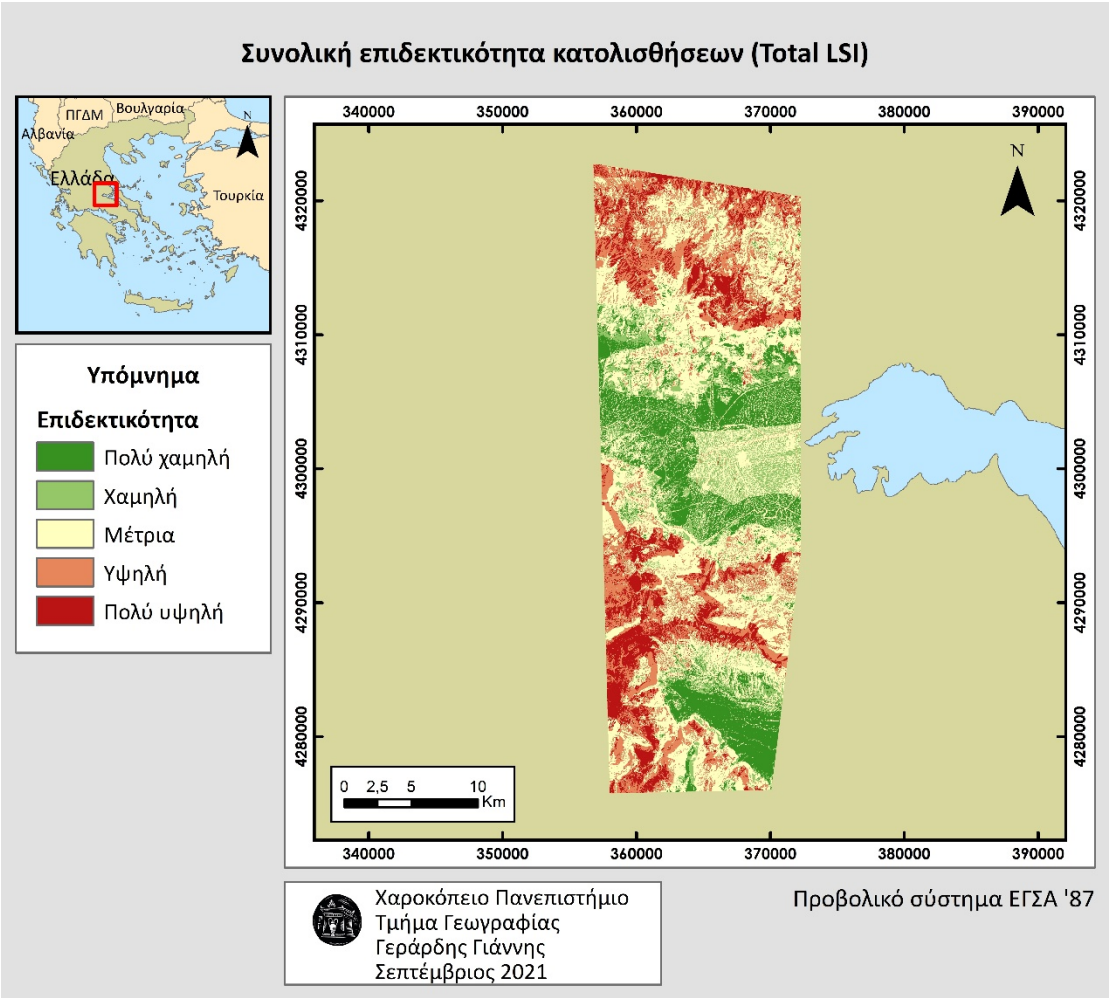
Πριν το τελικό αποτέλεσμα, θα πραγματοποιηθεί επαναταξινόμηση του επιπέδου σε τακτική κλίμακα, το οποίο αποδίδεται με τη μορφή θεματικού χάρτη πέντε κατηγοριών. Οι βαθμίδες που χρησιμοποιήθηκαν για την επιδεκτικότητα ήταν οι εξής.

Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή

Στο σημείο δημιουργήθηκε ο προβληματισμός, για το ποια μέθοδο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κατά την ταξινόμηση στις πέντε κατηγορίες που αναφέραμε. Ύστερα από έρευνα, η κατηγοριοποίηση αυτή διαμορφώθηκε ως εξής:

α) η μεσαία ζώνη ("Μέτρια" επιδεκτικότητα) πρέπει να αντιπροσωπεύεται από το διάστημα τιμών [-1, 1] έτσι ώστε η μεσαία κατηγορία να αντιστοιχεί σε τιμές γύρω από το μηδέν, και να έχει καλύτερη προσαρμογή στη μέση επιδεκτικότητα για κατολίσθηση,

β) επιλογή επαναταξινόμησης με τη μέθοδο Φυσικής Κατανομής (Natural Breaks ή Jenks), για τη διαμόρφωση των υπόλοιπων τεσσάρων ζωνών ("Πολύ χαμηλή", "Χαμηλή", "Υψηλή" και "Πολύ υψηλή" επιδεκτικότητα). Ο χάρτης που προέκυψε είναι ο ακόλουθος:



Χάρτης 9. Συνολική επιδεκτικότητα κατολισθήσεων.

Η συνολική επιδεκτικότητα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή μελέτης, απεικονίζεται στον παραπάνω χάρτη

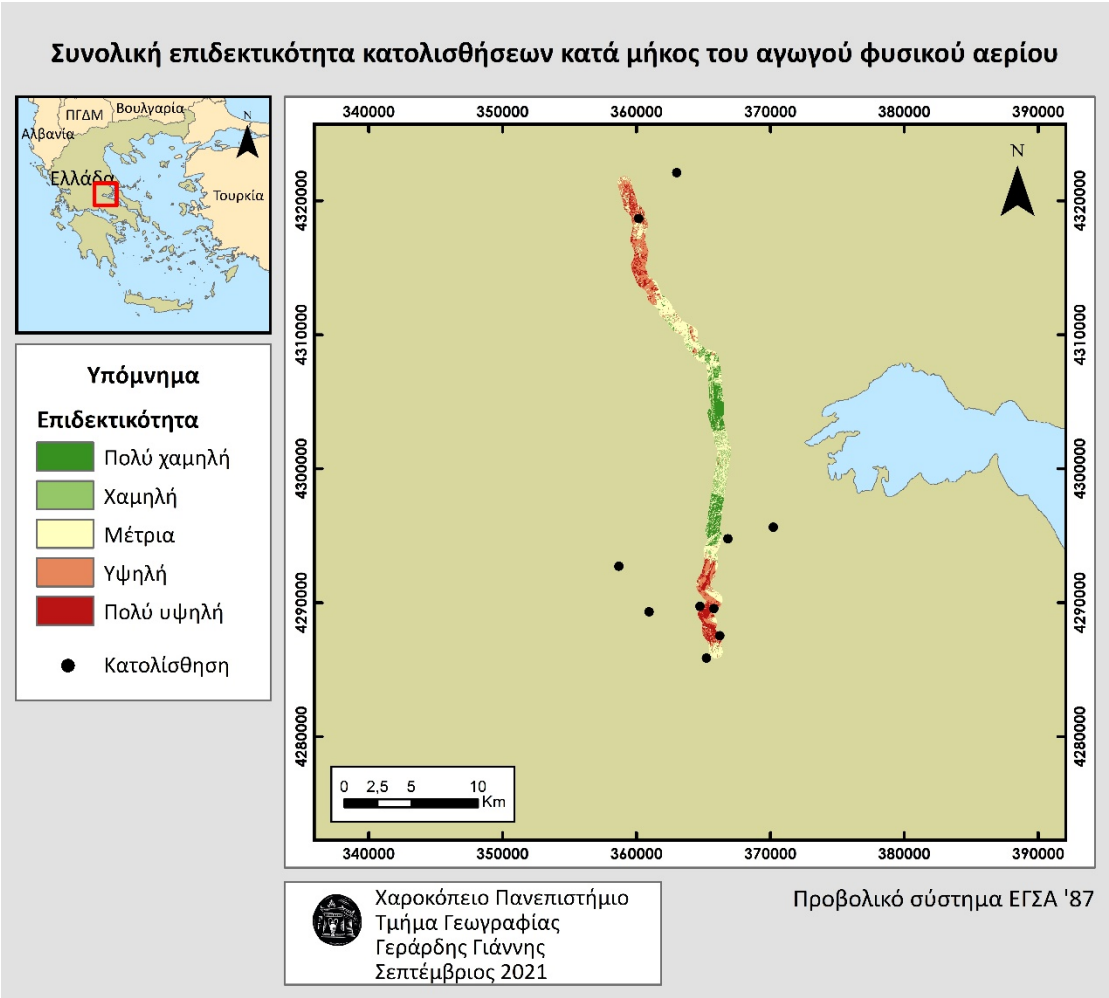
Επιδεκτικότητα	Έκταση km^2	Έκταση %
Πολύ χαμηλή	109,5 km^2	16,6%
Χαμηλή	65,6 km^2	9,9%
Μέτρια	257,5 km^2	39,0%
Υψηλή	148,6 km^2	22,5%
Πολύ υψηλή	78,4 km^2	11,9%

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή χαρακτηρίζεται ως επί το πλείστον από μέτρια επιδεκτικότητα (39%) με μεγάλες συγκεντρώσεις που είναι διάσπαρτες στο σύνολό της. Η δεύτερη σε ποσοστό έκτασης είναι η υψηλή επιδεκτικότητα (22,5%), και εμφανίζει μεγάλες συγκεντρώσεις τόσο στα βόρεια όσο και στα νότιο-δυτικά, και οφείλεται στην ορεινότητα της περιοχής και των κλίσεων που επικρατούν. Ακολουθούν στην συνέχεια η πολύ χαμηλή με 16,6%, η οποία εμφανίζεται έντονα στην κοιλάδα του Σπερχειού ποταμού στα βόρεια αλλά και σε ετέρα περιοχή στα νότιο-ανατολικά και η πολύ υψηλή με 11,9% η οποία εντοπίζεται κυρίως νότιο-δυτικά και στα βόρεια. Τέλος, η λιγότερο εμφανιζόμενη αλλά όχι αμελητέα, είναι η χαμηλή επιδεκτικότητα που έχει ποσοστό 9,9% και διακρίνεται στην κοιλάδα του Σπερχειού ποταμού.

5.4.3 Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση

Τα παραπάνω αποτελέσματα, αποτελούν σίγουρα μια σημαντική εικόνα για την επιδεκτικότητα της περιοχής. Για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση όμως, κρίνεται ωφέλιμο να γίνει μια προσπάθεια συσχέτισης της επιδεκτικότητας με δεδομένα που αφορούν τον κύριο αγωγό φυσικού αερίου που οδεύει μέσα στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί μια ζώνη 500m εκατέρωθεν του αγωγού, όπως αυτός διέρχεται από τα βόρεια προς τα νότια.

Με τα κατάλληλα δεδομένα και επεξεργασία, θα προκύψει ο επόμενος θεματικός χάρτης. Η όδευση του αγωγού, βασίστηκε σε δεδομένα του ΔΕΣΦΑ. Με περισσότερη ανάλυση προκύπτουν τα κάτωθι.



Χάρτης 10. Συνολική επιδεκτικότητα κατολισθήσεων κατά μήκος του αγωγού.

Επιδεκτικότητα	Έκταση km^2	Έκταση %
Πολύ χαμηλή	5,6 km^2	13,8%
Χαμηλή	4,6 km^2	11,3%
Μέτρια	14,8 km^2	36,4%
Υψηλή	10,1 km^2	24,8%
Πολύ υψηλή	5,6 km^2	13,7%

Από την ανάλυση των παραπάνω δεδομένων, προκύπτει ότι το 38,5% της έκτασης πλησίον του αγωγού, βρίσκεται σε περιοχή με υψηλή ή πολύ υψηλή επι-

δεκτικότητα. Συνυπολογίζοντας και τα σημεία των κατολισθήσεων που βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτήν την μακρόστενη λωρίδα γης που περιβάλλει τον αγωγό, καταλαβαίνουμε πολύ εύκολα το μέγεθος του κινδύνου που εγκυμονεί στην περιοχή. Εκτός αυτών, το 36,4% βρίσκεται σε περιοχή με μέτρια επιδεκτικότητα, ενώ μόνο το 25,1% βρίσκεται σε περιοχή χαμηλής ή πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας.

5.5 Μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση επιδεκτικότητας εδαφών σε κατολίσθηση με χρήση της τεχνικής της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MultiCriteria Decision Analysis)

5.5.1 Εισαγωγή

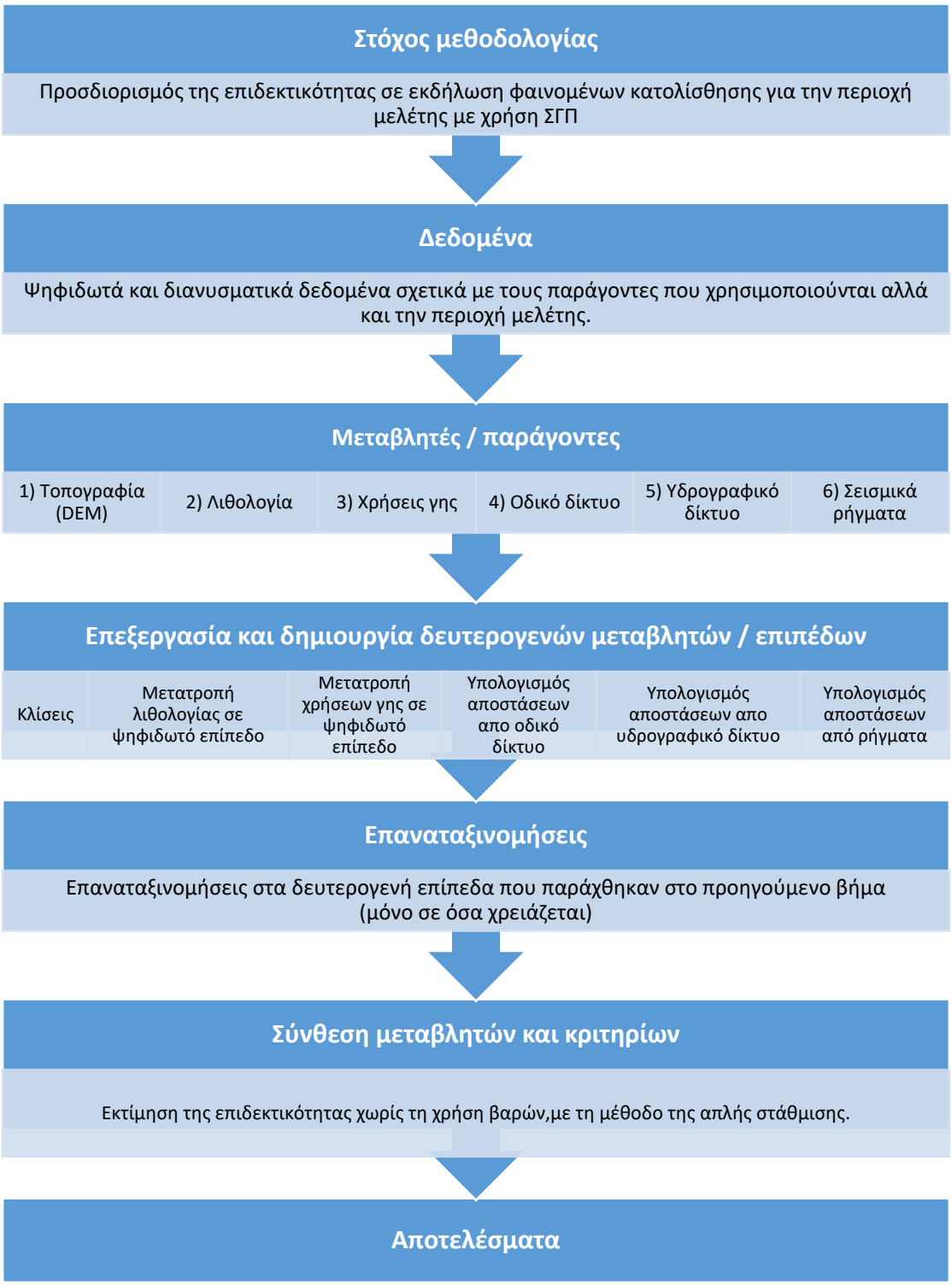
Για το προσδιορισμό της επιδεκτικότητας περιοχών στον γεωκίνδυνο της κατολίσθησης, επιλέγεται σαν δεύτερη μέθοδος η χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MultiCriteria Decision Analysis). Στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση ο λήπτης αποφάσεων έχει να επιλέξει ανάμεσα σε πληθώρα κριτηρίων, ώστε να δοθούν απαντήσεις στα ερωτήματα που μπορεί να τεθούν. Τα κριτήρια αυτά είναι σχετικά με το θέμα που εξετάζεται, και βάσει αυτών αξιολογούνται και συγκρίνονται εναλλακτικές λύσεις (Chakhar & Mousseau, 2008).

Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση σαν μέθοδος, είναι αρκετά διαδεδομένη σε εφαρμογές των ΣΓΠ σε πάρα πολλά επιστημονικά αντικείμενα. Ο συνδυασμός θεματικών επιπέδων πληροφορίας, η χρήση διάφορων δεδομένων, η ανάλυση του χώρου μέσα από την δημιουργία μοντέλων και τέλος η αναπαράσταση - οπτικοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων, αλλά και η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων, είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα που έχει (Χαλκιάς, 2015).

Στην παρούσα διπλωματική, εφαρμόζεται η Χωρική Πολυκριτηριακή Ανάλυση με χαρτογραφική υπέρθεση. Βασική επιδίωξη, είναι ο προσδιορισμός των περιοχών οι οποίες έχουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε κατολισθήσεις, δηλαδή, είναι περισσότερο τρωτές είτε λόγω της φύσης τους, είτε λόγω της θέσης τους στο χώρο και στο ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

5.5.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθήθηκε ένα καθορισμένο μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο βασίστηκε σε παρόμοιες μελέτες, προσαρμοσμένο όμως στις ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Η πορεία της μεθοδολογίας παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Διάγραμμα 5. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

5.5.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Οι παράγοντες - μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την αποτίμηση της επιδεκτικότητας σε κατολισθήσεις είναι έξι και είναι η μορφολογική κλίση, η γεωλογία, οι χρήσεις γης, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο και τέλος η γεωλογική παράμετρος του τεκτονισμού. Όλοι οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, συμβάλουν ο καθένας με τον δικό του τρόπο στην εκδήλωση κατολισθήσεων μέσα σε ένα γενικότερο πλαίσιο αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Οι παράγοντες αυτοί βασίζονται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση των (Κιτσάκη & Μπαρμπαγιάννη, 2014) και (Φερεντίνου & Χαλκιάς, 2012).

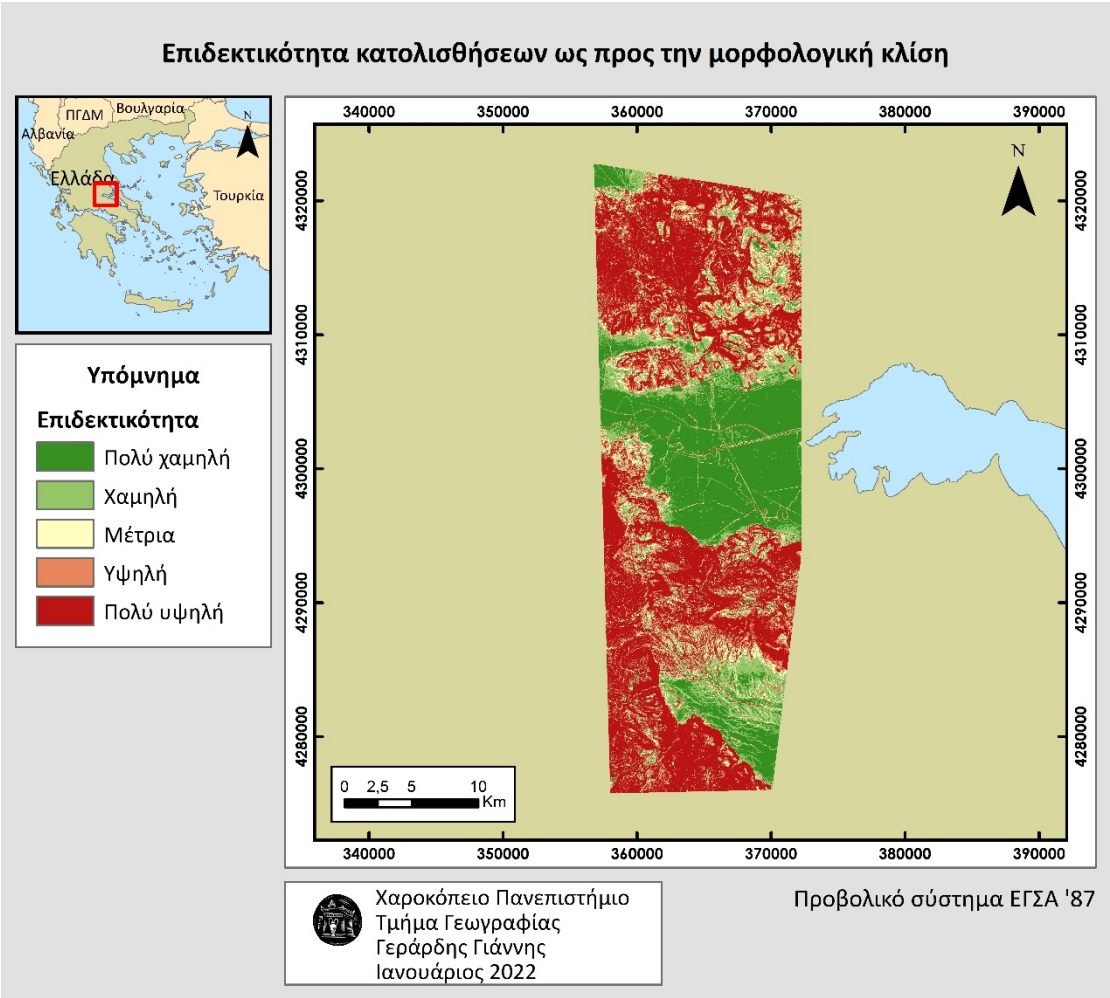
5.6 Αρχικές επεξεργασίες, δημιουργία δευτερογενών μεταβλητών και επαναταξινομήσεις σε ενιαία τακτική κλίμακα

α) Μορφολογικές κλίσεις

Μετά την εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων σε περιβάλλον ΣΓΠ, μέσω διάφορων επεξεργασιών προέκυψαν τα δευτερογενή δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους τύπου DEM, δημιουργήθηκε ένας χάρτης μορφολογικής κλίσης (slope) σε μοίρες. Βασιζόμενοι στη συνεκτίμηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που δομούν την περιοχή μελέτης, καθώς και σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές ανάλογων περιπτώσεων (Φερεντίνου & Χαλκιάς, 2012), οι τιμές των κλάσεων των μορφολογικών κλίσεων διαμορφώθηκαν ως εξής:

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξινόμηση
Μορφολογικές κλίσεις	< 2°	Πολύ χαμηλή	1
	2° - 6°	Χαμηλή	2
	6° - 10°	Μέτρια	3
	10° - 15°	Υψηλή	4
	> 15°	Πολύ υψηλή	5

Για να επιτευχθεί αργότερα η σύγκριση των θεματικών επιπέδων και η υπέρθεση τους, είναι αναγκαίο τα δεδομένα να ανήκουν στην ίδια κλίμακα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η λειτουργία της επαναταξινόμησης (reclassify). Με την λειτουργία αυτή, επιτυγχάνεται η δημιουργία ζωνών από τις κλάσεις που έχουν οριστεί, οι οποίες είναι σε κοινή τακτική κλίμακα ταξινόμησης, με τιμές ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το 5 (πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή), ανάλογα με την επιδεκτικότητα.



Χάρτης 11. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει μορφολογικών κλίσεων.

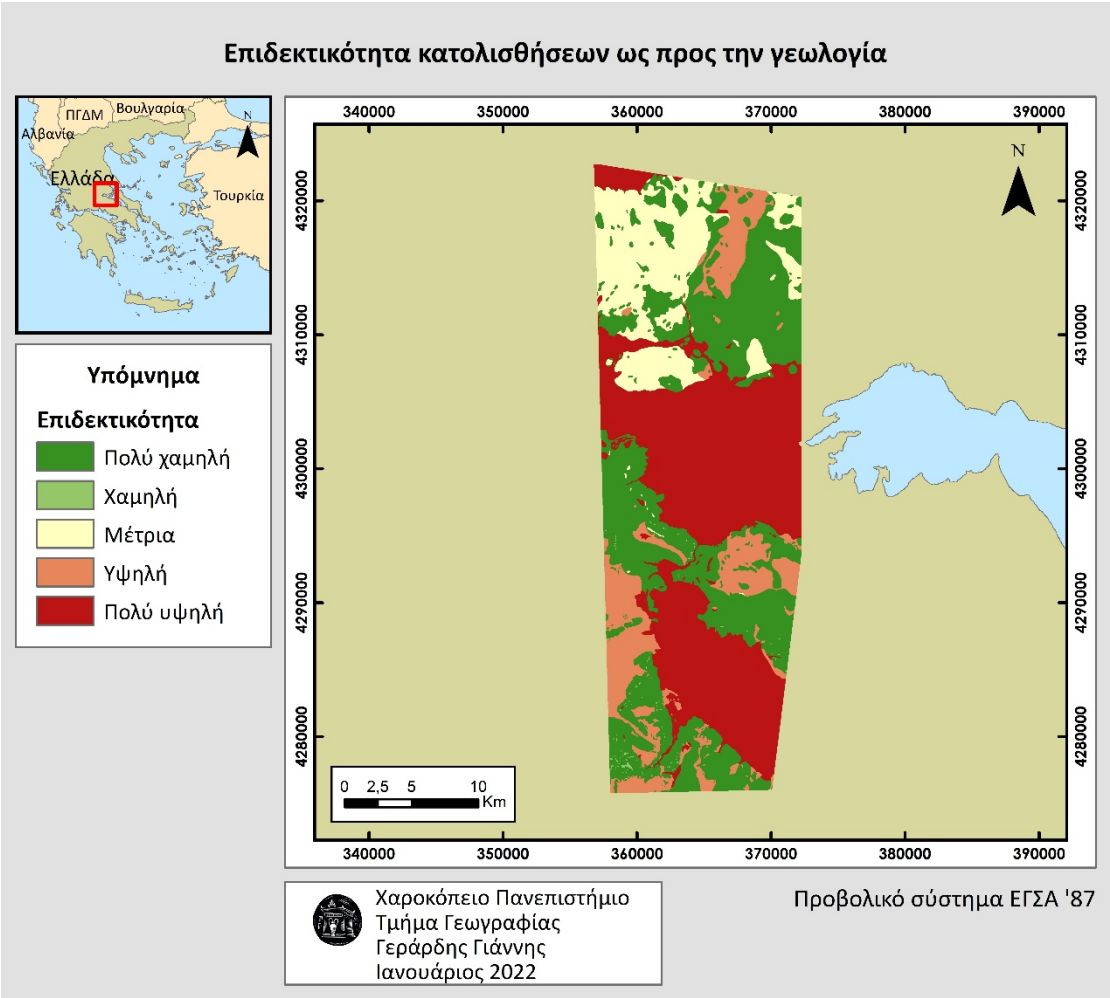
Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή μορφολογικής κλίσης, τόσο πιο απότομο είναι και το ανάγλυφο της περιοχής. Κατ’ επέκταση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα εκδήλωσης κατολίσθησης στις περιοχές αυτές.

β) Γεωλογία

Η λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών, αποτελεί σπουδαία παράμετρο στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι του κινδύνου των κατολισθήσεων. Συνεκτιμώντας τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή μελέτης, καθώς και τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας του δείκτη LSI που εφαρμόστηκε νωρίτερα, προέκυψε το εξής:

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξινόμηση
Γεωλογία	Ασβεστολιθικοί σχηματισμοί	Πολύ χαμηλή	1
	Πυριτικοί ιζηματογενείς σχηματισμοί	Χαμηλή	2
	Ηφαιστειακοί σχηματισμοί	Μέτρια	3
	Μεταμορφωμένοι σχηματισμοί	Υψηλή	4
	Αλλουβιακοί σχηματισμοί	Πολύ υψηλή	5

Επιπλέον, με την λειτουργία της επαναταξινόμησης προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 12. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει της γεωλογίας.

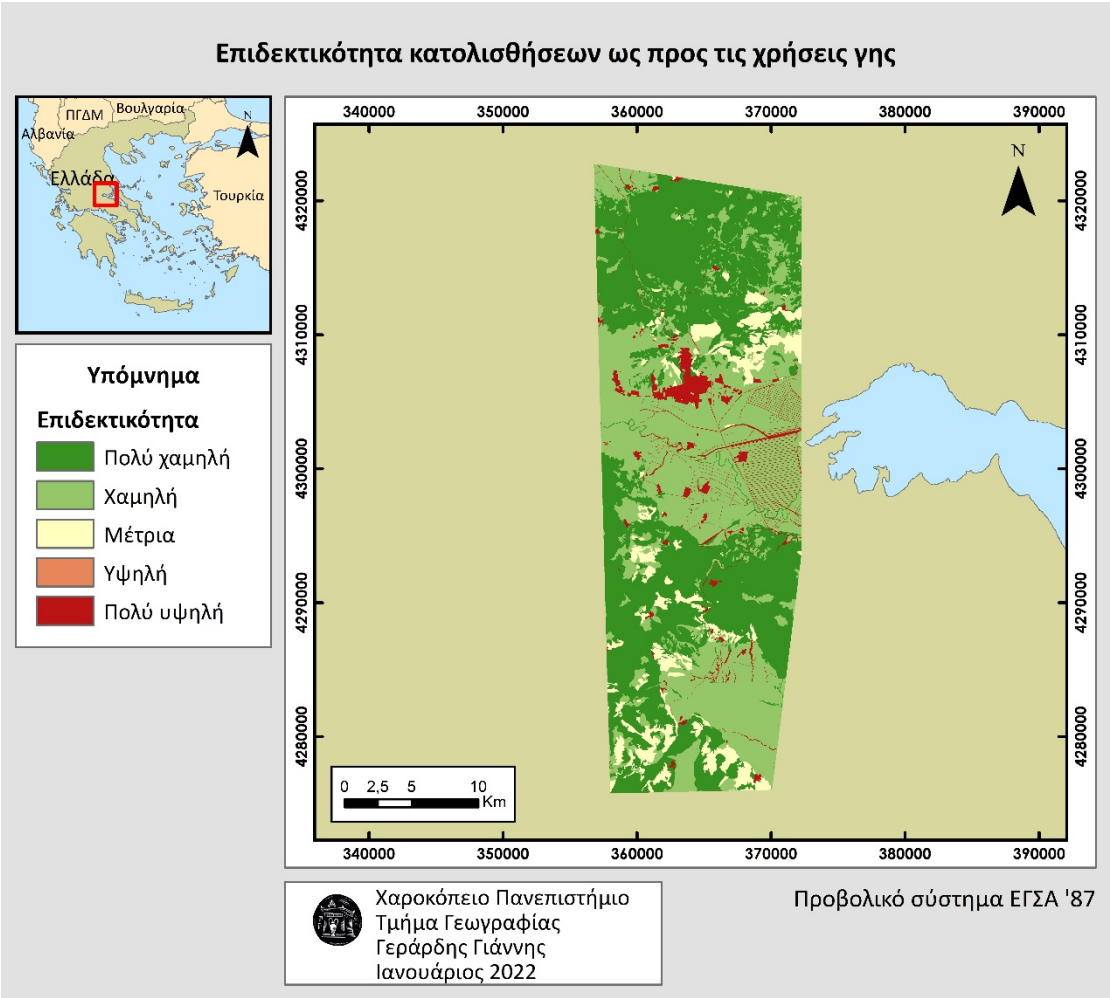
γ) Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης έχουν επίσης καθοριστικό ρόλο στην επιδεκτικότητα του φαινομένου των κατολισθήσεων. Για παράδειγμα σε πολλές περιπτώσεις, η παρουσία ή μη της βλάστησης, επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών συμβάλλοντας έτσι στην αποστράγγιση μέρους του νερού μέσω του ριζικού συστήματος των δέντρων και περιορίζοντας τη διαβρωτική δράση των επιφανειακών υδάτων.

Ως εκ τούτου, συνεκτιμώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που δομούν την περιοχή μελέτης, καθώς και τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας του δείκτη LSI που εφαρμόστηκε νωρίτερα, προέκυψε το εξής αποτέλεσμα ως προς την ταξινόμηση και την απόδοση τιμών επιδεκτικότητας:

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξινόμηση
Χρήσεις γης	Δασώδεις περιοχές	Πολύ χαμηλή	1
	Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Χαμηλή	2
	Μη παραγωγικές εκτάσεις	Μέτρια	3
	- - -	Υψηλή	4
	Δομημένο περιβάλλον	Πολύ υψηλή	5

Επιπλέον, με την λειτουργία της επαναταξινόμησης σε κοινή τακτική κλίμακα, προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 13. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει των χρήσεων γης.

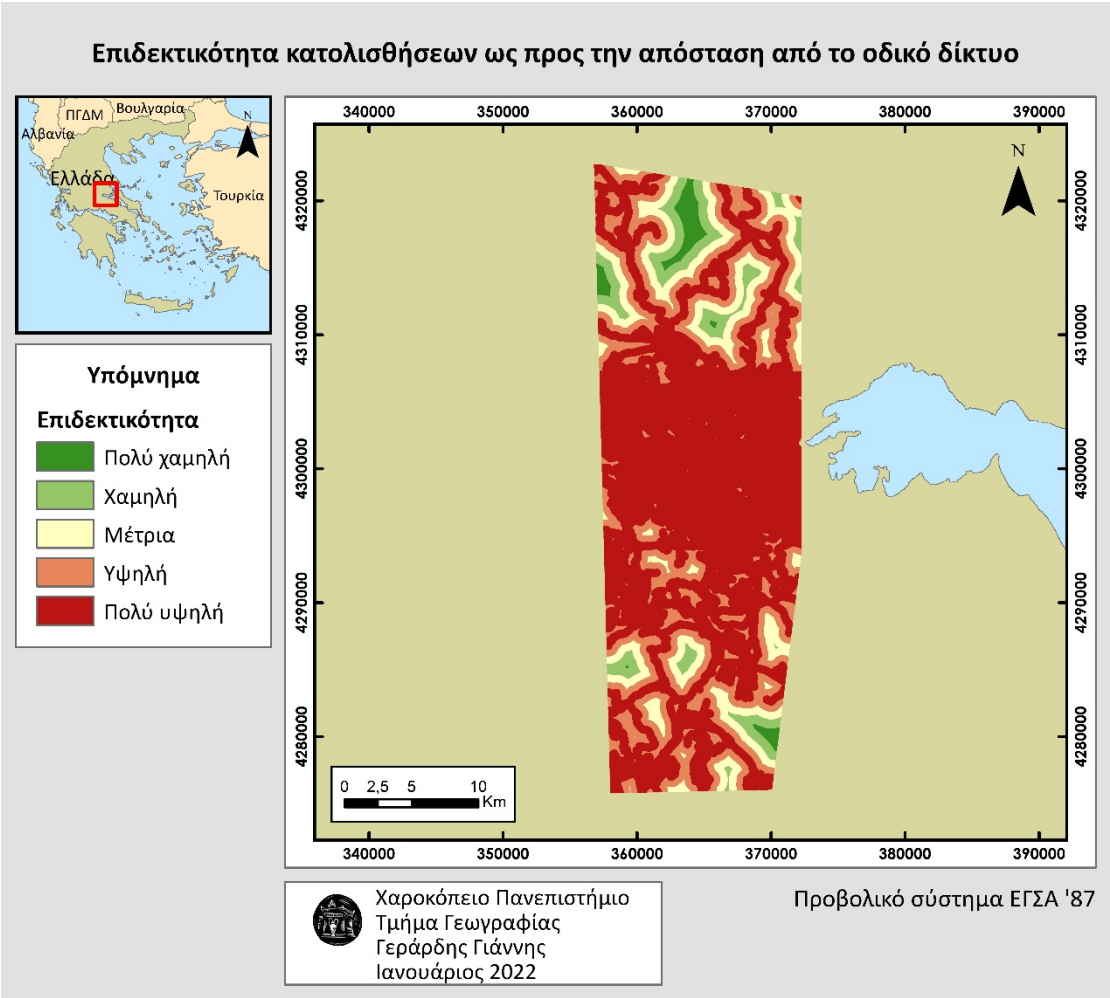
δ) Απόσταση από το οδικό δίκτυο

Το οδικό δίκτυο από μόνο του, αποτελεί μια ανθρώπινη παρέμβαση στην φυσικότητα του μορφολογικού αναγλύφου, τόσο με την δημιουργία οντοτήτων που διαταράσσουν τη συνοχή του εδάφους, όσο και με την δημιουργία περιοχών οι οποίες έχουν πολύ περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης των επιφανειακών υδάτων.

Σύμφωνα επομένως με τα διαθέσιμα δεδομένα από την εφαρμογή του LSI καθώς και την μελέτη διεθνούς βιβλιογραφίας, έγινε η ταξινόμηση της ευκλείδειας απόστασης από το οδικό δίκτυο, βασιζόμενη στη μέθοδο ταξινόμησης Jenks, καθότι η τελευταία προσαρμόζεται στην διακύμανση των δεδομένων, αποτυπώνοντας έτσι σε μεγαλύτερο βαθμό τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής.

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξινόμηση
Οδικό δίκτυο	2.007 m <	Πολύ χαμηλή	1
	1.333 m - 2.007 m	Χαμηλή	2
	774 m - 1.333 m	Μέτρια	3
	300 m - 774 m	Υψηλή	4
	< 300 m	Πολύ υψηλή	5

Επιπλέον, με την λειτουργία της επαναταξινόμησης σε κοινή τακτική κλίμακα, προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης:



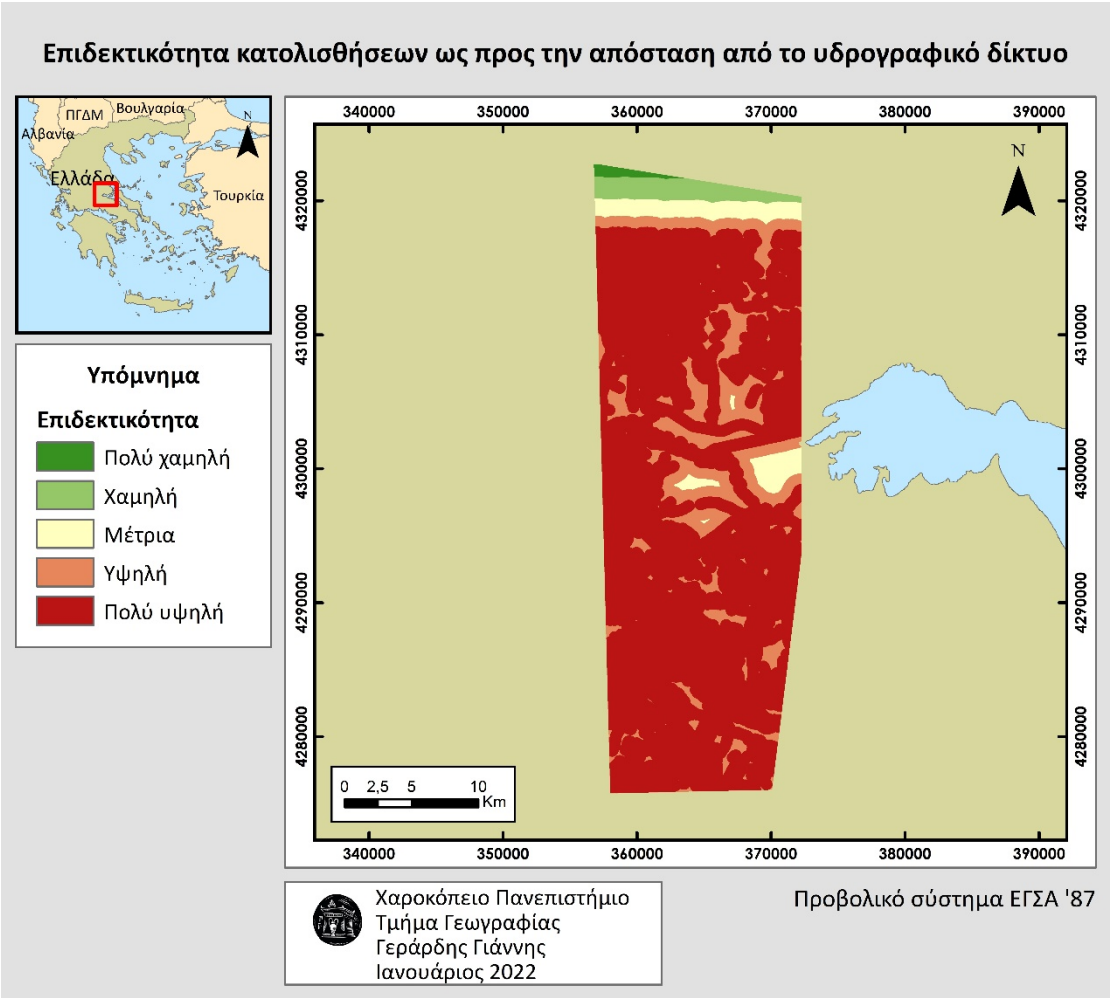
Χάρτης 14. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει εγγύτητας στο οδικό δίκτυο.

ε) Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο

Τα επιφανειακά ύδατα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση κατολισθήσεων με τον κορεσμό του υπεδάφους, τις διαβρωτικές και αποσαθρωτικές διεργασίες, τη χαλάρωση των πετρωμάτων κατά μήκος των επιφανειών κ.λπ. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ταξινόμηση με τη μέθοδο Jenks για την πληροφορία της ευκλείδειας απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο.

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξινόμηση
Υδρογραφικό δίκτυο	4.137 m <	Πολύ χαμηλή	1
	2.510 m - 4.137 m	Χαμηλή	2
	1.231 m - 2.510 m	Μέτρια	3
	441 m - 1.231 m	Υψηλή	4
	< 441 m	Πολύ υψηλή	5

Επιπλέον, με την λειτουργία της επαναταξινόμησης σε κοινή τακτική κλίμακα, προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 15. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει εγγύτητας στο υδρογραφικό δίκτυο.

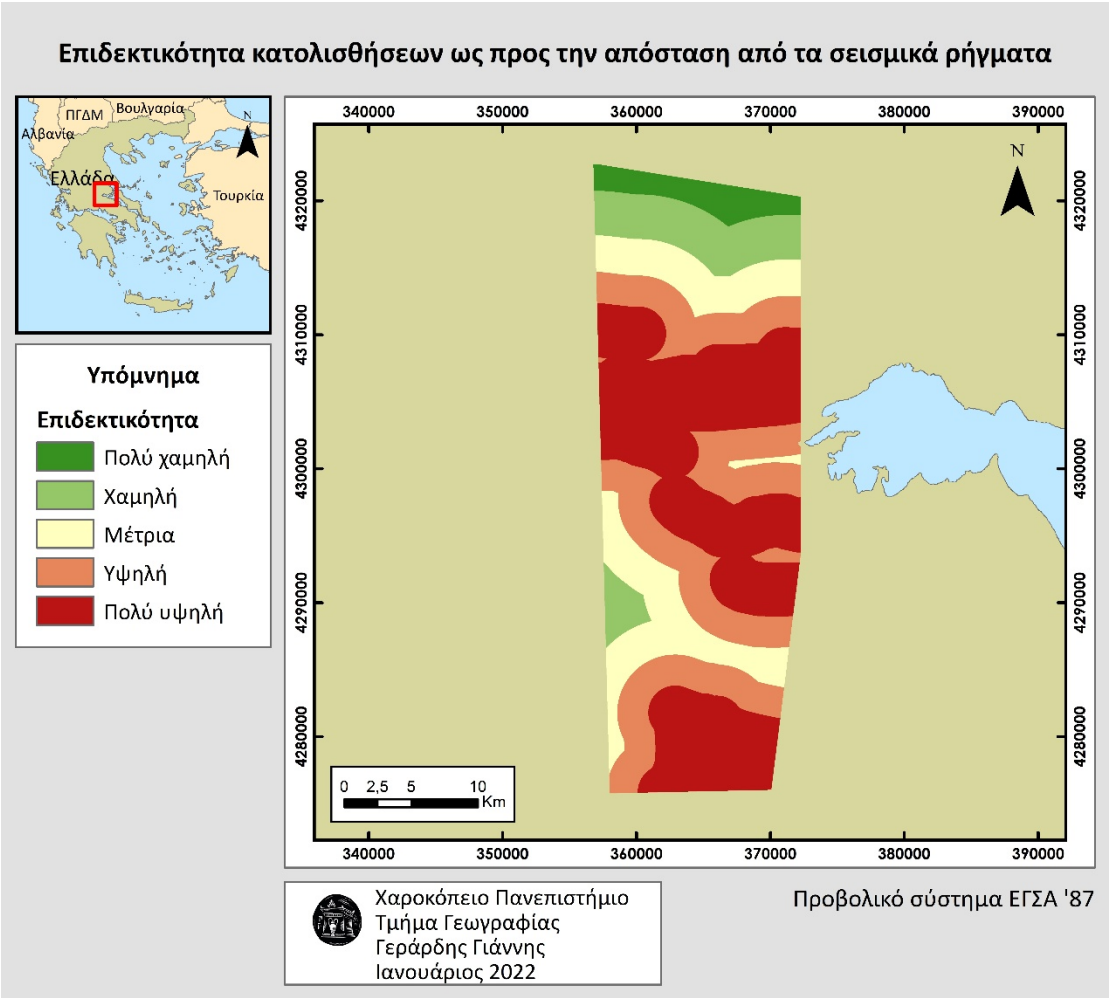
στ) Απόσταση από το σεισμικά ρήγματα

Τέλος, η τελευταία μεταβλητή αφορά μια γεωλογική παράμετρο ως προς τον τεκτονισμό. Η μεταβλητή αυτή είναι τα ρήγματα τα οποία μελετήθηκαν ως προς την απόλυτη απόστασή τους, λόγω του γεγονότος ότι η απομάκρυνση από αυτά συνεπάγεται με μείωση της έντασης και της σεισμικής επιτάχυνσης.

Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας με την ταξινόμηση κατά μέθοδο Jenks, του παραπάνω επιπέδου πληροφορίας.

Παράγοντας	Πεδίο επίδρασης	Επίπεδο επιδεκτικότητας	Επαναταξι-νόμηση
Σεισμικά ρήγματα	10.387 m <	Πολύ χαμηλή	1
	7.063 m - 10.387 m	Χαμηλή	2
	4.333 m - 7.063 m	Μέτρια	3
	2.018 m - 4.333 m	Υψηλή	4
	< 2.018 m	Πολύ υψηλή	5

Επιπλέον, με την λειτουργία της επαναταξινόμησης σε κοινή τακτική κλίμακα, προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης:

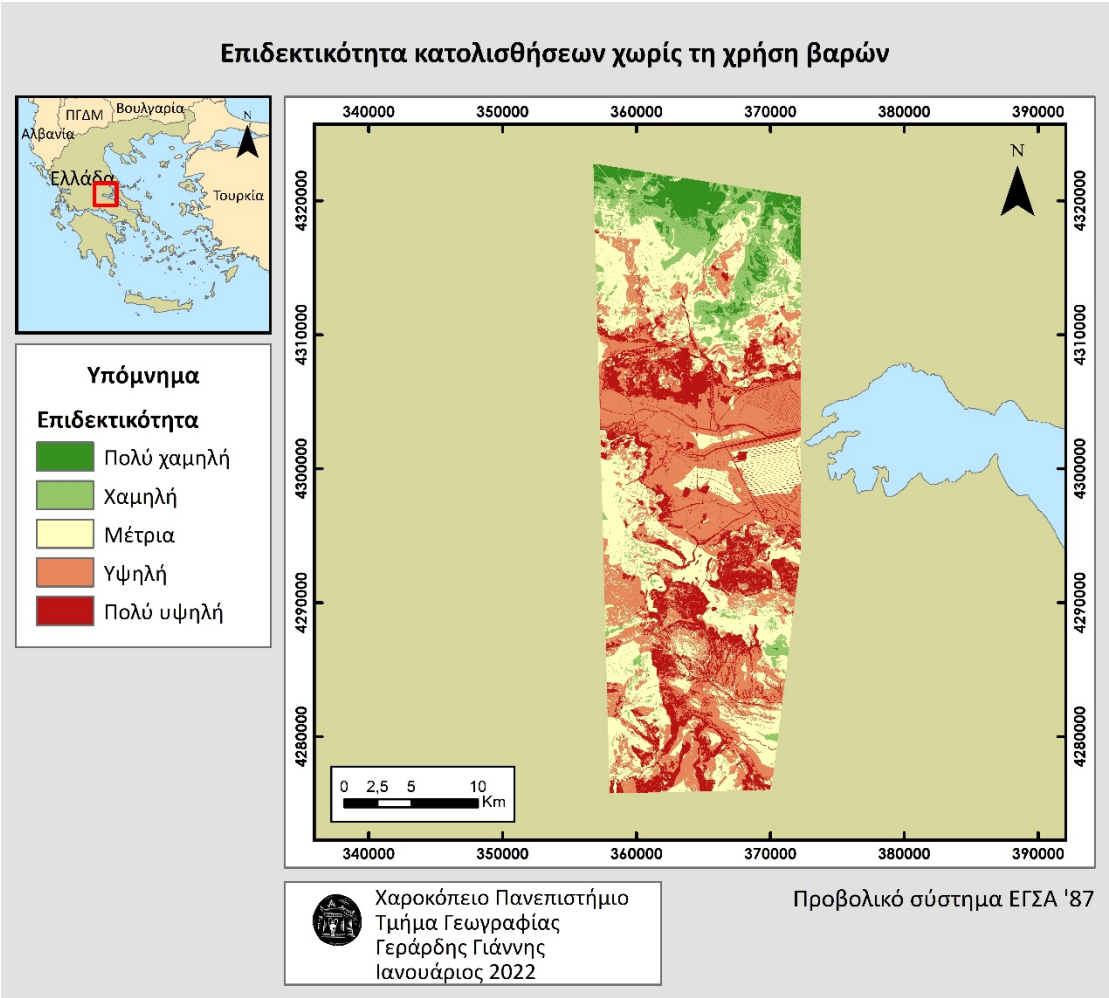


Χάρτης 16. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων βάσει απόστασης από τα σεισμικά ρήγματα.

5.7 Σύνθεση παραμέτρων και υπολογισμός του δείκτη επιδεκτικότητας

Μετά την επαναταξινόμηση των μεταβλητών σε ενιαία τακτική κλίμακα, πραγματοποιείται η σύνθεση των μεταβλητών με τη μέθοδο της απλής στάθμισης. Στην περίπτωση αυτή, δεν θα γίνει χρήση βαρών κατά την άθροιση των μεταβλητών. Ως εκ τούτου, όλες οι μεταβλητές αποτελούν το ίδιο εξίσου σημαντικές κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, ενώ το αποτέλεσμα είναι ένας θεματικός χάρτης που παρουσιάζει το επίπεδο της επιδεκτικότητας, ως προς την εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων.

Για την υλοποίηση αυτής της λειτουργίας, χρησιμοποιείται το εργαλείο “Raster Calculator” της επέκτασης “Spatial Analyst”, το οποίο επιτρέπει τις πράξεις μεταξύ των μεταβλητών. Πριν το τελικό αποτέλεσμα, θα γίνει επαναταξινόμηση του επιπέδου σε τακτική κλίμακα, ενώ για την απόδοση του θεματικού χάρτη, χρησιμοποιείται η μέθοδος ταξινόμησης Jenks. Βάσει των παραπάνω, ο χάρτης που προέκυψε είναι ο ακόλουθος:



Χάρτης 17. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων χωρίς τη χρήση βαρών.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν συμπληρωματικά τα εξής:

Επιδεκτικότητα	Έκταση km^2	Έκταση %
Πολύ χαμηλή	28,7 km^2	4,3%
Χαμηλή	68,7 km^2	10,4%
Μέτρια	217,5 km^2	32,9%
Υψηλή	231,9 km^2	35,3%
Πολύ υψηλή	112,7 km^2	17,1%

Από την παρατήρηση των παραπάνω αποτελεσμάτων, η περιοχή χαρακτηρίζεται ως επί το πλείστον από υψηλή επιδεκτικότητα (35,3%), ενώ οι περιοχές που έχουν τουλάχιστον υψηλή επιδεκτικότητα (υψηλή και πολύ υψηλή) αγγίζουν

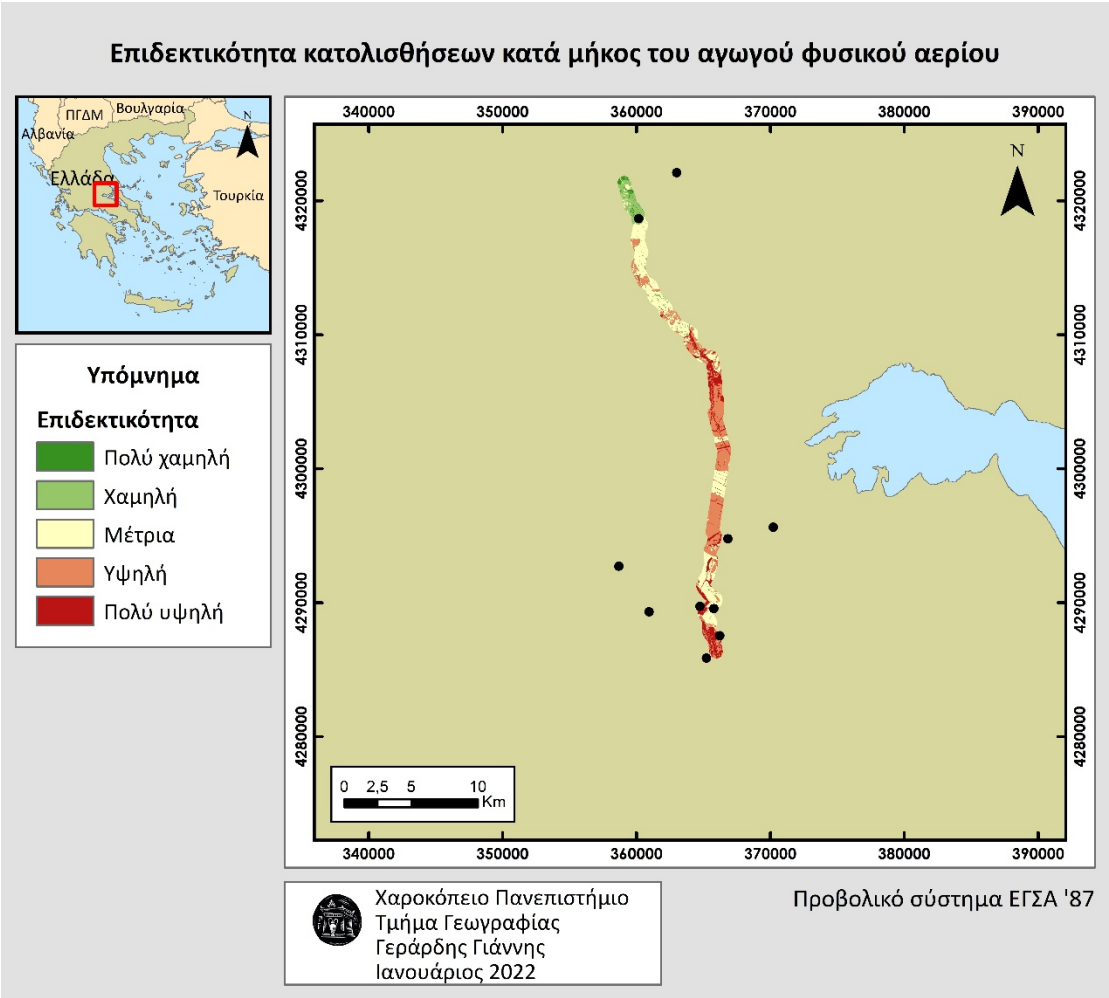
το 52,4%. Οι πυρήνες υψηλής επιδεκτικότητας εντοπίζονται κυρίως στα νότια όπου οι μορφολογικές κλίσεις είναι αρκετές έντονες και στην κοιλάδα του Σπερχειού λόγω της λιθολογίας που χαρακτηρίζει την περιοχή. Στη συνέχεια, ακολουθεί η μέτρια επιδεκτικότητα (32,9%), και εντοπίζεται πέριξ και ενδιάμεσα της υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας. Τέλος, η χαμηλή (10,4%) και πολύ χαμηλή επιδεκτικότητα (4,3%), εντοπίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στις βορειότερες περιοχές, και οφείλεται τόσο στην λιθολογία, όσο και στις χρήσεις γης που ανιχνεύονται εκεί.

Ωστόσο τα ως άνω αποτελέσματα, αν και αποτυπώνουν σχετικώς την πραγματικότητα, έχουν μικρό βαθμό αξιοπιστίας διότι δίνουν την ίδια βαρύτητα σε όλες τις παραμέτρους, γεγονός που οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα, μιας και κάθε παράγοντας επηρεάζει σε μεγαλύτερο ή μικρότερο ποσοστό την επιδεκτικότητα έναντι οποιουδήποτε ανεξαρτήτως φυσικού κινδύνου.

5.7.1 Επιδεκτικότητα κατολίσθησης κατά μήκος του αγωγού φυσικού αερίου

Τα παραπάνω αποτελέσματα, αποτελούν σίγουρα μια σημαντική εικόνα για την επιδεκτικότητα της περιοχής. Για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση όμως, κρίνεται ωφέλιμο να γίνει μια προσπάθεια συσχέτισης της επιδεκτικότητας με δεδομένα που αφορούν τον κύριο αγωγό φυσικού αερίου που οδεύει μέσα στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί μια ζώνη 500m εκατέρωθεν του αγωγού, όπως αυτός διέρχεται από τα βόρεια προς τα νότια.

Με τα κατάλληλα δεδομένα και επεξεργασία, θα προκύψει ο επόμενος θεματικός χάρτης. Η όδευση του αγωγού, βασίστηκε σε δεδομένα του ΔΕΣΦΑ. Με περισσότερη ανάλυση προκύπτουν τα κάτωθι.



Χάρτης 18. Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων χωρίς τη χρήση βαρών κατά μήκος του αγωγού.

Επιδεκτικότητα	Έκταση km^2	Έκταση %
Πολύ χαμηλή	1,3 km^2	3,2%
Χαμηλή	2,7 km^2	6,4%
Μέτρια	15,6 km^2	38,3%
Υψηλή	12,6 km^2	31,3%
Πολύ υψηλή	8,5 km^2	20,8%

Από την ανάλυση των παραπάνω δεδομένων, προκύπτει ότι το 52,1% της έκτασης εγγύς του αγωγού, βρίσκεται σε περιοχή με υψηλή ή πολύ υψηλή επιδεκτικότητα. Συνυπολογίζοντας και τα σημεία των κατολισθήσεων που βρίσκο-

νται πολύ κοντά σε αυτήν την μακρόστενη λωρίδα γης που περιβάλλει τον αγωγό, καταλαβαίνουμε πολύ εύκολα το μέγεθος του κινδύνου που εγκυμονεί στην περιοχή. Εκτός αυτών, το 38,3% βρίσκεται σε περιοχή με μέτρια επιδεκτικότητα, ενώ μόνο το 9,6% βρίσκεται σε περιοχή χαμηλής ή πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας.

5.8 Έλεγχος ακριβείας

Οδεύοντας στο τέλος της μεθοδολογίας και της πιλοτικής εφαρμογής αυτής της εργασίας, κρίθηκε σκόπιμο να ελεγχθούν τα αποτελέσματα που παρήχθησαν και εν κατακλείδι, να εκτιμηθεί η συνολική απόδοση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και για μελλοντικές εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκαν δυο μέθοδοι για τον έλεγχο ακρίβειας.

α) Συσχετισμός με τα σημεία εκδηλώσεων κατολισθήσεων

Στην περίπτωση αυτή, ο εκάστοτε δείκτης επιδεκτικότητας θα συσχετισθεί με τα σημεία που έχουν εκδηλωθεί κατολισθήσεις, ούτως ώστε να γίνει ένας απλός έλεγχος για την ακρίβεια των μοντέλων. Ο έλεγχος αυτός θα πραγματοποιηθεί συγκρίνοντας τον χάρτη συνολικής επιδεκτικότητας, με το πλήθος των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων ανά κατηγορία επιδεκτικότητας. Από την επεξεργασία των δεδομένων και την εφαρμογή του εργαλείου “extract values to points”, προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας:

Επιδεκτικότητα	Πλήθος σημείων στην μέθοδο LSI	Πλήθος σημείων στη μέθοδο πολυκριτηριακής υπέρθεσης
Πολύ χαμηλή	0	0
Χαμηλή	1	1
Μέτρια	0	0
Υψηλή	2	1
Πολύ υψηλή	7	8

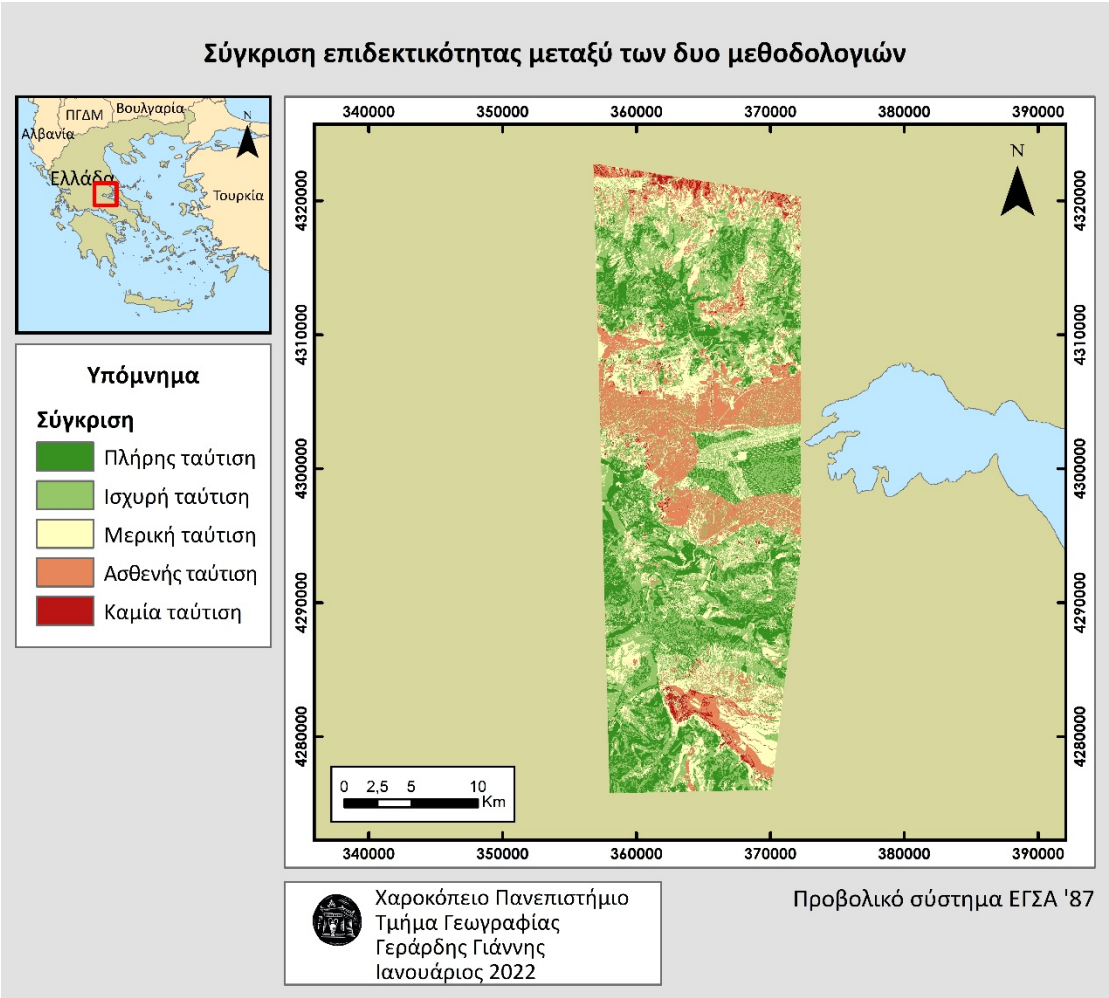
Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς, το 90% των κατολισθήσεων συμφωνούν και στα δύο μοντέλα. Μόνο μια κατολίσθηση έχει συμβεί σε περιοχή με διαφορετική επιδεκτικότητα. Απ’ αυτό μπορεί να διατυπωθεί με αρκετά μεγάλη βεβαιότητα, ότι οι τιμές του δεικτών επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση είναι σύμφωνες με την κατηγοριοποίηση επιδεκτικότητας που έχουν γίνει στην μεθοδολογία.

β) Σύγκριση των χαρτών επιδεκτικότητας

Μια άλλη μέθοδος η οποία μπορεί να μας δώσει το συσχετισμό μεταξύ των δυο μοντέλων επιδεκτικότητας, είναι η εξής. Και τα δύο επίπεδα επαναταξινομούνται σε κοινή τακτική κλίμακα από το 1 έως το 5. Με απλή αφαίρεση των δυο επιπέδων μεταξύ τους, θα αναδειχθούν τα σημεία στα οποία η επιδεκτικότητα έχει τις ίδιες τιμές και στα δυο, οπότε η διαφορά θα είναι μηδενική και θα υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων, θα αναδειχθούν τα σημεία στα οποία η διαφορά θα είναι μεγαλύτερη του μηδενός, οπότε θα υπάρχει μερική ταύτιση των αποτελεσμάτων, αλλά και σημεία όπου η διαφορά θα είναι στο μέγιστο που σημαίνει ότι θα υπάρχει πλήρης απόκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο μεθοδολογιών. Για να γίνει κατανοητό, παρατίθεται και ο ακόλουθος πίνακας:

Διαφορά μεταξύ των επιπέδων	Ταύτιση
0	Πλήρης ταύτιση
1 ή -1	Ισχυρή ταύτιση
2 ή -2	Μερική ταύτιση
3 ή -3	Ασθενής ταύτιση
4 ή -4	Απουσία ταύτισης

Στη συνέχεια προκύπτει ο ακόλουθος θεματικός χάρτης:



Χάρτης 19. Σύγκριση επιδεκτικότητας μεταξύ των 2 μεθοδολογιών.

Από την περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων, προκύπτουν τα εξής:

Διαφορά μεταξύ των ε-πιπέδων	Ταύτιση	Ποσοστό
0	Πλήρης ταύτιση	20,7%
1 ή -1	Ισχυρή ταύτιση	33,9%
2 ή -2	Μερική ταύτιση	26,1%
3 ή -3	Ασθενής ταύτιση	17,8%
4 ή -4	Απουσία ταύτισης	1,5%

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων των δυο μεθοδολογιών σε ποσοστό 20,7%, ενώ η κατ' ελάχιστον ισχυρή ταύτιση, αγγίζει το 54,6% (πλήρης και ισχυρή ταύτιση).

6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

6.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας που αναπτύχθηκε παραπάνω, έγινε αρχικά διερεύνηση μέσω της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για τις κατηγορίες των γεωκινδύνων που επηρεάζουν τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, και ειδικότερα, τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου. Από την έρευνα που έγινε, προέκυψαν τρεις γενικές κατηγορίες γεωκινδύνων, οι οποίοι συναντώνται στον ελληνικό χώρο και εμφανίζονται στο περιβάλλον με διάφορες επιμέρους μορφές φαινομένων.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση των γεωκινδύνων σε αγωγούς φυσικού αερίου είναι υπαρκτή σε διεθνές επίπεδο. Σε πολλές δε περιπτώσεις ενδέχεται να αποτελέσουν την αιτία για καταστροφικές ζημιές σε δίκτυα φυσικού αερίου με τραγικές συνέπειες στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.

Για τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς φυσικού αερίου, είναι αναγκαία η διαχείριση των ζητημάτων των γεωκινδύνων τόσο στο στάδιο του σχεδιασμού όσο και κατά την φάση λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, η καλύτερη επιλογή που προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι οποιασδήποτε άλλης μεθόδου για τον σκοπό αυτό είναι η εφαρμογή ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) ή GIS. Η χρήση ενός συστήματος GIS, όπως προκύπτει και από την βιβλιογραφία, δίνει την δυνατότητα της οργάνωσης όλων απαιτούμενων των πληροφοριών και παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για την ανάλυση των κινδύνων.

Κρίσιμο σημείο ωστόσο αποτελεί, η οργάνωση της γεωχωρικής βάσης δεδομένων, η οποία θα εμπεριέχει όλες εκείνες τις χρήσιμες πληροφορίες που ενδεχομένως να απαιτηθούν. Για την άρτια οργάνωση μίας τέτοιας βάσης λοιπόν, α-

παιτείται σχεδιασμός ο οποίος θα δίνει κατευθύνσεις για τα απαιτούμενα επίπεδα πληροφορίας, τις προδιαγραφές και την μορφή που θα πρέπει αυτά να έχουν προκειμένου να εισαχθούν και να είναι άμεσα αξιοποιήσιμα.

Ως προς το περιεχόμενό της, διαπιστώθηκε ότι αφενός μεν απαιτείται η συλλογή γενικών επιπέδων πληροφορίων που αφορούν τους αγωγούς, μαζί με γενικές πληροφορίες, αφετέρου δε απαιτείται η εισαγωγή επιπέδων πληροφορίας για κάθε γενική κατηγορία γεωκινδύνου. Για κάθε μία γενική κατηγορία γεωκινδύνου έγινε καταγραφή μέσω της βιβλιογραφίας των παραγόντων από τους οποίους αυτοί επηρεάζονται, οι οποίοι με τη σειρά τους προσδιορίζουν και τα απαιτούμενα επίπεδα πληροφορίας.

Η γενική αρχή που διέπει τον σχεδιασμό μίας τέτοιας βάσης δεδομένων είναι ότι θα πρέπει να είναι πολυσυλλεκτική και εμπλουτισμένη με όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες. Με αυτό τον τρόπο θα δίνεται η δυνατότητα της άμεσης διάθεσης δεδομένων στους ενδιαφερόμενους χρήστες.

Ωστόσο, κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, έγινε κατανοητό ότι η συλλογή πληροφοριών έχει συχνά αρκετές δυσκολίες. Η ύπαρξη ή μη των δεδομένων, το κόστος απόκτησης και η ποιότητα / ακρίβειά τους αποτελούν τα βασικότερα προβλήματα, τα οποία καλούνται οι χρήστες των ΣΓΠ αντιμετωπίσουν, προβλήματα τα οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι ανυπέρβλητα. Ακόμα και στο αισιόδοξο σενάριο ύπαρξης αξιόλογων δεδομένων, η αρχική τους μορφή απαιτεί μία σειρά επίπονων σταδίων επεξεργασίας προκειμένου να μπορούν να εισαχθούν στην βάση δεδομένων. Το γεγονός αυτό επιδρά σημαντικά στο κόστος και στον χρόνο διαχείρισης της βάσης δεδομένων από έναν χρήστη.

Τέλος, σαν πιλοτική εφαρμογή της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε μία περιοχή διέλευσης αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου, και διερευνήθηκε η επιδεκτικότητα της σε φαινόμενα κατολίσθησης.

6.2 Εκτίμηση επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης (LSI)

Στο ερευνητικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε μια ενδεικτική εφαρμογή αξιολόγησης κινδύνων κατολίσθησης, το οποίο ουσιαστικά εκτιμά την επιδεκτικότητα αξιοποιώντας τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και την Πολυκριτηριακή Ανάλυση.

Για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας καθορίστηκε ένας δείκτης ο οποίος αποτελείται από επιμέρους κριτήρια. Ο δείκτης αυτός είναι εύκολος ως προς την εφαρμογή του, δημιουργεί μοντέλα με καλή χαρτογραφική αναπαράσταση και απεικονίζει με ακρίβεια τις περισσότερο επιρρεπείς περιοχές στην εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων.

Οι παράγοντες οι οποίοι αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν ως προς την επιδεκτικότητα είναι: το υψόμετρο, οι κλίσεις των πρανών, ο προσανατολισμός των κλιτύων, η γεωλογία, οι χρήσεις γης, το οδικό και το υδρογραφικό δίκτυο καθώς και τα ρήγματα της περιοχής.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα του δείκτη επιδεκτικότητας στην υπό μελέτη περιοχή και την ανάλυση που έγινε, προέκυψαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Η επιδεκτικότητα ως προς το υψόμετρο, είναι έντονη στα ενδιάμεσα ύψη, ενώ στα μεγαλύτερα υψόμετρα και στην παράκτια ζώνη εμφανίζει χαμηλή επιδεκτικότητα. Οι κλίσεις των πρανών, παρουσιάζουν μεγάλη επιδεκτικότητα σε πιο απότομες πλαγιές ενώ οι περιοχές που συναντάμε παραλιακά και κατά μήκος του Σπερχειού ποταμού χαρακτηρίζονται από ήπιες κλίσεις και μειωμένη επιδεκτικότητα. Όσον αφορά τον προσανατολισμό των κλιτύων, εμφανίζονται μεγάλες τιμές επιδεκτικότητας σε περιοχές με βόρειο κυρίως προσανατολισμό.

Εξετάζοντας και τις υπόλοιπες μεταβλητές, οι χρήσεις γης σαν παράγοντας παίζουν αρκετά σημαντικό ρόλο. Ειδικότερα στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από μη παραγωγικές εκτάσεις, γυμνά εδάφη κλπ., η επιδεκτικότητα είναι πάρα

πολύ υψηλή. Αντίστοιχα σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε οδικό και υδρογραφικό δίκτυο, η επιδεκτικότητα είναι υψηλή. Τέλος, η απόσταση από τα ρήγματα φανερώνει μεγάλη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων και γι' αυτό θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν όλες οι περιοχές πλησίον αυτών.

Ως προς την συνολική επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολισθήσεων, στην περιοχή μελέτης επικρατεί η μέτρια και η υψηλή επιδεκτικότητα (61,5% μαζί) ενώ οι μεγαλύτερες τιμές της χαρακτηρίζουν μόνο το 11,9% της συνολικής έκτασής της. Η υψηλή επιδεκτικότητα γενικά, δικαιολογείται λόγω της έντονου αναγλύφου που έχει η περιοχή στα ορεινότερα της σημεία. Αντίθετα πάλι, κυριαρχούν πολύ χαμηλές τιμές επιδεκτικότητας σε όλη την κοιλάδα του Σπερχειού ποταμού.

Γενικά, η τεχνική που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία είναι αρκετά υποσχόμενη, αφού τα αποτελέσματα του δείκτη επιδεκτικότητας επιβεβαιώνονται από τις κατολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί στο παρελθόν. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι το 90% από αυτές έχουν εκδηλωθεί σε περιοχές μεγάλης επιδεκτικότητας. Αυτή η χωρική ταύτιση, αυξάνει την αξιοπιστία της μεθόδου που ακολουθήθηκε, και θα μπορούσε, με μια πιο ολοκληρωμένη και οργανωμένη μελέτη με περισσότερα δεδομένα, να παρέχει αποτελέσματα πιο αξιόλογα και πιο χρήσιμα σε μια διαδικασία λήψης αποφάσεων.

6.3 Πολυκριτηριακή ανάλυση επιδεκτικότητας κατολίσθησης

Το δεύτερο μέρος της πιλοτικής εφαρμογής, αποτελείται από μία μεθοδολογία αξιολόγησης κινδύνων κατολίσθησης, με χρήση της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται αποτίμηση της επιδεκτικότητας, δια μέσου της οποίας θα δοθούν κάποια αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της πρώτης μεθοδολογίας, χρησιμεύοντας έτσι και σαν εργαλείο ελέγχου των αποτελεσμάτων του δείκτη LSI.

Για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθορίστηκε ένας δείκτης αποτελούμενος από επιμέρους μεταβλητές/παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη είναι έξι, και είναι η μορφολογική κλίση, η γεωλογία, οι χρήσεις γης, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο και τέλος η γεωλογική παράμετρος του τεκτονισμού.

Συνεχίζοντας, οι μεταβλητές αυτές αναλύθηκαν με χρήση της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, και έγινε εκτίμηση της συνολικής επιδεκτικότητας χωρίς τη χρήση βαρών. Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι, οι περιοχές που παρουσιάζουν πολύ υψηλή επιδεκτικότητα σε κάποιο κριτήριο ξεχωριστά, δεν εμφανίζουν απαραίτητα το ίδιο υψηλή επιδεκτικότητα συνολικά, αποτέλεσμα που ουσιαστικά πηγάζει από το άθροισμα των τιμών ανά κριτήριο.

Σχετικά με τα αποτελέσματα, προέκυψαν κάποιες επιπλέον παρατηρήσεις. Περιοχές υψηλής επιδεκτικότητας εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό στις ορεινές περιοχές λόγω έντονων μορφολογικών κλίσεων, αλλά και στις περιοχές εκείνες στις οποίες η σύσταση του γεωλογικού υποβάθρου είναι τέτοιο το οποίο μπορεί να δώσει κατολισθητικά φαινόμενα.

Συγκριτικά με τα αποτελέσματα του LSI, τα αποτελέσματα της εκτίμησης επιδεκτικότητας της πολυκριτηριακής ανάλυσης, είναι σε πλήρη ταύτιση με αυτά της πρώτης μεθοδολογίας σε ποσοστό 20,7%, ενώ τα δύο μοντέλα μεταξύ τους έχουν επιπλέον ισχυρή ταύτιση σε ποσοστό 54,6%. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα των εργαλείων ενός ΣΓΠ, μέσω των οποίων εξήχθησαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αποτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας και τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας του φαινομένου.

6.4 Αξιολόγηση και μελλοντικές επεκτάσεις

Μέσω της ανάπτυξης στα παραπάνω κεφάλαια, κατέστη δυνατή η βιβλιογραφική καταγραφή του πλαισίου της επίδρασης των γεωκινδύνων για τους αγωγούς φυσικού αερίου και η χρησιμότητα που μπορεί να προσδώσει η οργάνωση μιας βάσης δεδομένων σε ΣΓΠ για την αξιολόγηση της επίδρασης τους.

Ως προς την οργάνωση της βάσης δεδομένων για τους γεωκινδύνους, συμπεραίνεται ότι πρόκειται για μία «θεμελιώδη εργασία» για όλες τις εταιρείες που διαχειρίζονται κρίσιμες υποδομές και δίκτυα ενέργειας, όπως είναι οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου.

Ενώ η χρήση ενός ΣΓΠ έχει αδιαμφισβήτητα φανερά και πολλαπλά πλεονεκτήματα, ωστόσο, όπως συμβαίνει άλλωστε σε κάθε ανάλυση δεδομένων, η ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται επηρεάζει άμεσα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το πρόβλημα αυτό ενδέχεται να βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου καθώς δεν θεωρείται απίθανο η εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων να προσδώσει καλύτερη ακρίβεια σε παρόμοια δεδομένα. Μέχρι τότε είναι σημαντικό ο χρήστης να γνωρίζει όλες τις διαθέσιμες πηγές που μπορεί να αντλήσει δεδομένα, είτε αυτά δίνονται με κόστος είτε χωρίς. Συνεπώς, σαν μελλοντική προοπτική της παρούσας εργασίας θα ήταν η αναλυτική καταγραφή όλων των πηγών δεδομένων που διατίθενται ελεύθερα (εστιάζοντας στον ελληνικό χώρο), αλλά και όλων των φορέων που μπορούν να διαθέσουν δεδομένα ακόμα και με κάποιο κόστος. Η καταγραφή αυτή θα διευκόλυνε ένα χρήστη να προστρέξει στην απόκτησή δεδομένων γνωρίζοντας εκ των προτέρων την ποιότητά τους.

Από την άλλη, σαν μελλοντική προοπτική, θα μπορούσε να δημιουργηθεί αναλυτικός πίνακας περιγραφής των δεδομένων, ο οποίος θα αποτελεί πρότυπο για την οργάνωση της βάσης δεδομένων. Έτσι οι διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς φυσικού αερίου θα μπορούσαν να βρίσκουν ή να δημιουργούν εξαρχής (σε επίπεδο μελέτης ή κατασκευής) τα δεδομένα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bathrellos, G., Kalivas, D. & Skilodimou, H., 2009. GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece. *Estud Geol*.

Catani, F. και συν., 2005. *Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin.* s.l.:s.n.

Çevik, E. & Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Earth Sciences*.

Chakhar, S. & Mousseau, V., 2008. *GIS-based multicriteria spatial modeling generic framework.* Paris: University of Paris Dauphine.

Chowdhury , R. & Aleotti, P., 1990. *Landslide hazard assessment summary review and new perspectives.* s.l.:s.n.

Dangermond, J., 1992. What is a Geographic Information System (GIS)?. *Geographic Information Systems (GIS) and Mapping - Practices and Standards*.

Dastgir, N., 2013. *Geohazard Modelling of Onshore Pipelines in Kenya.* London: University College London.

ECLAC, 2003. *Handbook for Estimating the Socio-economic and Environmental Effects of Disasters,* s.l.: United Nations, Economic Commission for Latin America and the Caribbean.

EGIG, 2020. *11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2019).* Groningen: s.n.

Esford, F., Porter, M. & Savigny, K. W., 2004. *A risk assessment model for pipelines exposed to geohazards.* s.l.:International Pipeline Conference.

Fabbri, A., Cendrero, A., Chung, C.-J. & Remondo, J., 2003. *Is Prediction of Future Landslides Possible with a GIS?.* s.l.:s.n.

Ferentinou, M., 2004. *Landslide hazard assessment using artificial neural networks in a Geographical Information System.* s.l.:s.n.

Ferentinou, M. & Chalkias, C., 2013. *Mapping mass movement susceptibility across Greece with GIS, ANN and statistical methods.* s.l.:s.n.

Foster, C., Pennington, C., Culshaw, M. & Lawrie, K., 2011. The national landslide database of Great Britain: development, evolution and applications. *Environ Earth Sci*.

Greenway, D., 1987. *Vegetation and slope stability.* New York: s.n.

Guzzetti, F., 2002. *Landslide hazard assessment and risk evaluation: Limits and prospectives.* Mallorca: s.n.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P., 1999. *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy.* s.l.:s.n.

Härder, T., Hübel, C., Meyer-Wegener, K. & Mitschang, B., 1988. *Processing and transaction concepts for cooperation of engineering workstations and a database server.* s.l.:s.n.

Hopkins, P., 2006. *Oil and Gas Pipelines: Yesterday and Today.* s.l.:American Society of Mechanical Engineers (ASME).

Koukis, G., Sabatakakis, N., Nikolaou, N. & Loupasakis, C., 2005. *Landslide hazard zonation in Greece.* s.l.:s.n.

Koukis, G., Tsiambaos, G. & Sabatakakis, N., 1994. *Slope movements in the Greek territory: A statistical approach.* Lisboa: s.n.

Koukis, G. & Ziourkas, C., 1991. *Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis.* s.l.:s.n.

Lee, E., Audibert, J., Hengesh, J. & Nyman, D., 2009. *Landslide-related ruptures of the Camisea pipeline system, Peru.* London: Geological Society of London.

Lindell, M., Prater, C. & Perry, W., 2006. *Introduction to Emergency Management.* s.l.:Wiley & Sons, Incorporated.

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D. & Rhind, D., 2005. *Geographic information systems and science.* s.l.:s.n.

Marathon Data Systems, 2011. *ArcGIS 1: Εισαγωγή στο ArcGIS.* s.l.:s.n.

Mechler, R., 2005. *Cost-benefit Analysis of Natural Disaster Risk Management in Developing Countries.* [Ηλεκτρονικό]
Available at:
http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.2075&rep=rep1&type=pdf
[Πρόσβαση 4 Δεκέμβριος 2018].

Nelson, S., 2013. *Natural Disasters & Assessing Hazards and Risk.* Tulane University, Dept. Earth & Environmental Sciences, USA: s.n.

Parsons, M., 2011. *Making data useful for modelers to understand complex earth systems.* s.l.:s.n.

Porter, M., Leir, M., Baumgard, A. & Ferris, G., 2014. *Integrating Terrain and Geohazard Knowledge into the Pipeline Lifecycle.* Kingston: 6th Canadian GeoHazards Conference.

Psaropoulos, P., Tsompanakis, Y. & Kapogianni, E., 2020. *Real-time remote monitoring and risk management of oil & gas facilities subjected to natural hazards.* Berlin: Pipeline Technology Conference 2020.

Psarropoulos, P., Tsompanakis, Y. & Kapogianni, E., 2020. *Real-time remote monitoring and risk management of oil & gas facilities subjected to natural hazards.* Berlin: Pipeline Technology Conference 2020.

Radevsky, R. & Scott, D., 2004. *Pipeline Insurance – Technical Aspects Of Underwriting And Claims.* London: Institution of Civil Engineers London.

Rozos, D. και συν., 2010. *Evaluation of soil erosion and susceptibility to landslide manifestation as a consequence of wildfire events affected the Zacharo municipality, Peloponnesus, Greece.* s.l.:s.n.

Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E. & Lainas, S., 2013. *Landslide susceptibility zonation in Greece.* s.l.:s.n.

Savigny, K. W., Porter, M. & Leir, M., 2005. *Geohazard Management Trends in the Onshore Pipeline Industry.* Lyon: s.n.

Van Den Eeckhaut, M. και συν., 2012. *Statistical modelling of europe-wide landslide susceptibility using limited.* s.l.:s.n.

WWF, 2011. *wwf.gr.* [Ηλεκτρονικό]
Available at: http://www.wwf.gr/news/372-2011-07-21-07-48-17
[Πρόσβαση 1 Δεκέμβρης 2020].

Yiping, H. & Beighley, E., 2006. *GIS-based landslide susceptibility mapping: a cases study in southern California.* s.l.:s.n.

Ανδρεαδάκης, Ε. & Φουντούλης, Ι., 2007. *Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας σε τεκτονικά ενεργές περιοχές.* Αθήνα: Συμπόσιο Τεκτονικής Γεωλογίας προς τιμήν του Ομότιμου Καθηγητή Ηλία Μαριολάκου.

Αστάρας, Θ., Οικονομίδης, Δ. & Μουρατίδης, Α., 2011. *Ψηφιακή χαρτογραφία και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΔΙΣΙΓΜΑ.

Βασιλειάδης, Ε., 2010. *Ζωνοποίηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων στον ελληνικό χώρο. Δημιουργία και εφαρμογή μοντέλων με ΣΓΠ..* Πάτρα: s.n.

Γαλλούση, Χ., 2017. *Η διακινδύνευση του ΕΣΜΗΕ στους φυσικούς κινδύνους.* Αθήνα: s.n.

Γιάνναρης, Ι., 2016. *Ζωνοποίηση επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στον Νομό Αρκαδίας.* Αθήνα: s.n.

Γκουρνέλλος, Θ., Χαλκιάς, Χ. & Τσαγκάς, Δ., 2006. *Επιδεκτικότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων για τον ελληνικό χώρο. Ανάλυση με τη χρήση κανόνων ασαφούς λογικής και ΣΓΠ.* s.l.:s.n.

ΔΕΣΦΑ Α.Ε., 2021. *ΔΕΣΦΑ ΑΕ.* [Ηλεκτρονικό]
Available at: www.desfa.gr

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010b. *Commission Staff Working Paper SEC (2010) 1626 of 21.12.2010 «Risk assessment and mapping guidelines for disaster management».* Βρυξέλλες: s.n.

Καγιούλης, Ι., 2018. *Επιχειρησιακός σχεδιασμός για την αντιμετώπιση φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών στον Δήμο Θηβαίων.* Αθήνα: s.n.

Καραπάνος, Χ., 2008. *Τεχνολογία φυσικού αερίου.* s.l.:Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

Κιτσάκη, Μ. & Μπαρμπαγιάννη, Δ., 2014. *Ζωνοποίηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας στο όρος Πήλιο με τη συμβολή δεδομένων συμβολομετρίας μόνιμων σκεδαστών.* Αθήνα: s.n.

Λέκκας, Ε., 2000. *Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές.* 2η Έκδοση επιμ. Αθήνα: s.n.

Μακρόπουλος, Κ., 2006. Φυσικές Καταστροφές: Σεισμοί και Μέτρα Προστασίας. Στο: *15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 25-27 Οκτωβρίου 2006.* Αλεξανδρούπολη: s.n.

Μήρτσιος, Π., 2018. *Αγωγοί Μεταφοράς Φυσικού Αερίου-Ατυχήματα.* Καστοριά: s.n.

Παπαχαρισίου, Σ., 2008. *Διαχείριση Φυσικών Κινδύνων: Εφαρμογή εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας.* Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πολυκρέτης, Χ., 2013. *Ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας για εκδήλωση κατολίσθησης με τη χρήση μεθόδων Γεωπληροφορικής και Τεχνητής Νοημοσύνης.* Αθήνα: s.n.

Σιούπη, Χ., 2015. *Τα ελεύθερα λογισμικά GIS και η άποψη των εκπαιδευτικών για την αξιοποίησή τους στην εκπαίδευση.* Θεσσαλονίκη: s.n.

Υ.ΠΕ.Ν., 2013. *Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.* [Ηλεκτρονικό]
Available at: www.ypen.gov.gr

Φαλάρας, Ε., 2011. *Βασικές έννοιες κινδύνου-καταστροφής.* Αθήνα: ΕΣΤΑ.

Φερεντίνου, Μ. & Χαλκιάς, Χ., 2012. Προκαταρκτική ανάλυση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθήσεων με βάση τη χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας. *Γεωγραφίες Ν° 19*, pp. 41-58.

Χαλκιάς, Χ., 2015. *Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής.* Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Ψωμιάδης, Ε., 2010. *Έρευνα γεωμορφολογικών και περιβαλλοντικών μεταβολών στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού με χρήση νέων τεχνολογιών.* Αθήνα: s.n.