



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης σε λεκάνη απορροής του Ν.
Λάρισας με χρήση εμπειρικού μοντέλου και Γεωγραφικών
Συστημάτων Πληροφοριών»**

Γεωργίου Παρασκευή
Γεωλόγος Π.Ε.

ΒΟΛΟΣ, 2021



**UNIVERSITY OF THESSALY
DEPARTMENT OF
ICHTHYOLOGY &
AQUATIC ENVIROMENT**



POSTGRADUATE MASTER'S THESIS

**«Soil erosion estimation in the catchment area of the Prefecture of
Larisa using empirical model and Geographic Information Systems»**

**Georgiou Paraskevi
Geologist P.E.**

VOLOS, 2021

**«Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης σε λεκάνη απορροής του Ν.
Λάρισας με χρήση εμπειρικού μοντέλου και Γεωγραφικών
Συστημάτων Πληροφοριών»**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Φαρσιώτου Ευαγγελία, Καθηγήτρια, Υδροδυναμικά και Αντιπλημμυρικά Έργα, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Επιβλέπουσα*,

2) Άρης Ψιλοβίκος, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Μέλος*,

3) Αθανάσιος Λουκάς, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ, *Μέλος*.

*Στον σύζυγο μου Θέμη
και στα παιδιά μου
Νάσο και Ανδριανή*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο πλαίσιο ολοκλήρωσης αυτής της πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην καθηγήτρια μου κ. Ευαγγελία Φαρσιρώτου, Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την αποδοχή της επίβλεψης της μεταπτυχιακής μου εργασίας και την ανάθεση του συγκεκριμένου αντικείμενου. Η συμβολή της στην εκπαιδευτική μου διαδικασία ήταν καθοριστική και ουσιώδης. Η συνεργασία μας ήταν άψογη και ήταν πάντα πρόθυμη να αφιερώσει χρόνο στην προσπάθεια μου και να δώσει διέξοδο στα ποικίλα επιστημονικά και πρακτικά προβλήματα που προέκυψαν σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Άρη Ψιλοβίκο, Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, και τον κ. Αθανάσιο Λουκά, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΑΠΘ, μέλη της Τριμελούς Επιτροπής για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας αλλά και τις χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικόλαο Ξαφούλη για την ανεκτίμητη και συνεχή υποστήριξη που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ όλους εκείνους και κυρίως την οικογένειά μου, που στήριξαν και ενίσχυσαν την προσπάθεια μου σε αυτό το τελικό στάδιο ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος αλλά και καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου με την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων την κατανόηση και ανοχή τους.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα του Δήμου Αγιάς του νομού Λάρισας με τη χρήση εμπειρικού μοντέλου και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική εξίσωση RUSLE και πραγματοποιήθηκε αναλυτική εκτίμηση όλων των παραμέτρων της με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS-PRO.

Αρχικά εκτιμήθηκε ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R , όπου τα αναγκαία στοιχεία των βροχοπτώσεων προέκυψαν από τα δεδομένα των πλησιέστερων βροχομετρικών σταθμών ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμες από τη βιβλιογραφία εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του. Ωστόσο για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής R που υπολογίστηκε με την εξίσωση των Renard and Freimund (1994) ως ο καταλληλότερος για τις συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι τιμές του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους, K αρχικά στηρίχθηκαν σε γεωλογικά και βιβλιογραφικά δεδομένα και αποδόθηκαν στους γεωλογικούς σχηματισμούς που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση γεωλογικού χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME) της περιοχής. . Εν συνεχεία και για λόγους αντιπαράθεσης υπολογίστηκε ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K που βασίστηκε σε εδαφολογικά δεδομένα τα οποία χορηγήθηκαν από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους (European Soil Data Centre (ESDAC)).

Ο συντελεστής μήκους και κλίσης LS αρχικά εκτιμήθηκε με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) σε συνδυασμό με τη διορθωμένη εξίσωση των Mitasova et al. (1996). Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής δημιουργήθηκε ένα μοντέλο, με τη βοήθεια εργαλείου γεωεπεξεργασίας, που αναπτύχθηκε στο Model Builder του ArcGIS PRO. Για λόγους συγκρίσεως χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) ένα με υψηλή ακρίβεια 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου και ένα χαμηλότερης ακρίβειας 27.4m από τη Γεωλογική Έρευνα των ΗΠΑ (USGS). Μετά την εφαρμογή του μοντέλου προέκυψαν σημαντικά σφάλματα και αυξημένες τιμές του συντελεστή μήκους L κυρίως κατά μήκος των ροών του ποταμού και των δρόμων. Οι τιμές αυτές οδήγησαν σε σημαντική υπερεκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στις θέσεις αυτές, γεγονός που δικαιολογείται

καθώς οι θέσεις αυτές σύμφωνα με την θεωρία της RUSLE ορίζονται ως θέσεις εναπόθεσης των υλικών διάβρωσης και όχι σαν σημεία διαβρώσεων. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία μία διαφορετική μεθοδολογία, η οποία περιλάμβανε διόρθωση του συντελεστή L ορίζοντας τις περιοχές εναποθέσεων στα επίπεδα των δρόμων και του υδρογραφικού δικτύου.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C προέκυψε από την ψηφιοποίηση των χρήσεων γης της περιοχής, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο τον Imagery Hybrid που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO και από την απόδοση των επιμέρους κατάλληλων τιμών C που στηρίχθηκαν σε βιβλιογραφικά δεδομένα. Ακολούθως, για λόγους αντιπαράθεσης εκτιμήθηκε εκ νέου συντελεστής C με τη βοήθεια της ψηφιοποίησης των χρήσεων γης από τους χάρτες του προγράμματος CORINE Land Cover 2018. Για την εξακρίβωση, τη σύγκριση και την εγκυρότητα των δεδομένων των χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες των οποίων η λήψη προήλθε επί τόπου, σε τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, από μη επανδρωμένο αεροσκάφος, τετρακόπτερο Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) σε επιλεγμένες θέσεις. Εν συνεχεία, αποδόθηκε η τιμή του συντελεστή ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P ανάλογα με την ύπαρξη υποστηρικτικών πρακτικών για τη διατήρηση του εδάφους.

Τέλος οι συντελεστές που εκτιμήθηκαν εισήχθησαν στην εμπειρική εξίσωση RUSLE και προέκυψε ο χάρτης τρωτότητας στην εδαφική διάβρωση της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα. Η διάβρωση στην περιοχή είναι σημαντική, με τα κυριότερα προβλήματα της λεκάνης να εμφανίζονται στα κατάντη τμήματά της, ενώ σε όλη την υπόλοιπη περιοχή φαίνεται πως το δάσος πλατύφυλλων προσφέρει ικανοποιητική προστασία έναντι στην διάβρωση.

Μετά την αποτύπωση της εδαφικής διάβρωσης, την ανάλυση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων φαίνεται πως η ακρίβεια των στοιχείων και η επιλογή κατάλληλων εξισώσεων και μεθοδολογίας παίζει καθοριστικό ρόλο καταλήγοντας σε συμπεράσματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Ταυτόχρονα το πρόγραμμα ArcGIS-PRO είναι ένα χρήσιμο εργαλείο επεξεργασίας, ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων ώστε να παραχθούν νέα χωρικά δεδομένα με ακρίβεια και αξιοπιστία ανάλογα με τις μεθόδους που εφαρμόζονται και τις ειδικότερες συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: Εδαφική Διάβρωση, RUSLE, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Abstract

The subject of this diploma thesis is the estimation of soil erosion in the catchment area of the Bourboulithra watercourse of the Municipality of Agia in the prefecture of Larissa using empirical model and Geographic Information Systems. The empirical model RUSLE was used and a detailed estimation of all its parameters was performed with the ArcGIS-PRO program.

The Rainfall Erosivity (R- factor) was first estimated and the necessary rainfall data were derived from the data of the nearest weather stations and then empirical equations were used to calculate it. However, for the calculation of soil erosion, the R factor was used which was calculated by the equation of Renard and Freimund (1994) as the most suitable for the specific conditions.

Values of Soil Erodibility (K-factor) were initially based on geological and bibliographic data and attributed to the geological formations resulted from the digitization of the geological map of the Institute of Geological and Mineral Research (IGME) of the area. Subsequently and for reasons of controversy, the soil erodibility coefficient, K was calculated with soil data provided by the European Soil Data Center (ESDAC).

The topographic factor LS, slope length factor (L) and the slope steepness factor (S), was initially estimated using the methodology of Moore and Burch (1986 a, b) in conjunction with the corrected equation of Mitasova et al., (1996). To implement this methodology, with the help of a geo-processing tool, a model was developed in the Model Builder of ArcGIS PRO. For comparison purposes two digital elevation models (DEM) were used, one with a high accuracy of 5m of the Hellenic Land Registry and the other with a lower accuracy of 27.4m by the US Geological Survey (USGS). After the application of the model, significant errors and increased values of the length factor L were estimated along the river and the roads. These values have led to a significant overestimation of soil erosion because RUSLE model defines those areas as deposition sites. For this reason, a different methodology was used including a correction of the L-factor by determining more precisely the deposition areas.

The Land Cover Management C- factor was estimated from the digitization of land uses in the studied area, using as a background the Imagery Hybrid map, included in the basic maps of the ArcGIS-PRO program, and from the rendering C values which are based on bibliographic data. After this, C-factor was re-estimated from the

digitization of land uses using as a background the CORINE Land Cover 2018 maps. Moreover photographs taken from the unmanned quadcopter Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) in selected locations were used to verify and compare land use data.

The value of soil conservation practice P-factor was estimated by support practices within the study area.

Finally, the estimated factors were composed with RUSLE empirical model which was used to evaluate soil erosion potentials in Bourboulithra catchment area and to detect the sensitive zones presenting a priority of protection. Erosion in the area is significant with main problems appearing in downstream parts of the basin, which are dominated by crops, while in the rest of the area it seems that the broadleaf forest offers protection against erosion.

After estimation of soil erosion, analysis of the data and the results, it seems that data accuracy and selection of appropriate empirical equations and methodology have an important role, reaching conclusions of particular interest. At the same time, the ArcGIS-PRO program is a useful tool for processing, analyzing and managing data in order to produce new spatial data with accuracy and reliability depending on the applied methods and the specific conditions of the study area.

Keywords: Soil Erosion, RUSLE, Geographic Information Systems

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Διαδικασίες διάβρωσης.....	1
1.2 Χωρική μεταβλητότητα διάβρωσης	3
1.3 Χρονική μεταβλητότητα διάβρωσης	5
1.4 Μοντελοποίηση διάβρωσης με βάση τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS).....	6
2. Θεωρητική περιγραφή του μοντέλου	12
2.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R	12
2.2. Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους, K	15
2.3 Συντελεστής μήκους και κλίσης LS	17
2.4. Συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C	24
2.5 Συντελεστής ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P	27
3. Περιοχή μελέτης.....	28
3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	28
3.2. Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	32
3.3. Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής	36
3.4 Υδρομετεωρολογικά- κλιματικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	41
3.5 Χρήσεις γης.....	45
3.6. Οικολογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	47
3.6.1 Χαρακτηριστικά βλάστησης.....	48
3.6.2 Χαρακτηριστικά πανίδας.....	49
4. Μεθοδολογία.....	51
4.1. Υπολογισμός συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R	51
4.2. Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K	58
4.3. Υπολογισμός του συντελεστή μήκους και κλίσης LS	65
4.4 Υπολογισμός συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C.....	82
4.5 Υπολογισμός συντελεστή ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P	89
5. Υπολογισμός της Εδαφικής Διάβρωσης και δημιουργία χάρτη τρωτότητας	91
6. Συμπεράσματα	95
Βιβλιογραφία	101
Ξενογλώσση Βιβλιογραφία.....	101
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	107

1. Εισαγωγή

Η επιφάνεια του εδάφους είναι συχνά εκτεθειμένη σε εξωτερικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα να εξελίσσεται και να μεταβάλλεται συνεχώς χωρικά και χρονικά. Η μεταβολή αυτή του εδάφους προκαλείται από τη διάβρωση που είναι η απόσπαση και μεταφορά σωματιδίων εδάφους από ένα μέρος σε κάποιο άλλο εξαιτίας της βροχόπτωσης, του ανέμου και της ροής του νερού που είναι οι κύριοι παράγοντες διαμόρφωσης του φαινομένου.

Οι διαδικασίες διάβρωσης που μεταβάλλουν την επιφάνεια του εδάφους είναι εξαιρετικά περίπλοκες, ελάχιστα κατανοητές και δύσκολο να προβλεφθούν ποσοτικά σε μεγάλες επιφάνειες (Finlayson and Montgomery, 2003). Η τηλεπισκόπηση παρέχει σημαντικά δεδομένα που μας επιτρέπουν να αποκτήσουμε πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φυσικών διεργασιών και περιβαλλοντικών συνθηκών που ελέγχουν τη διάβρωση και την εξέλιξη της μορφής της επιφάνειας.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες χαρτογράφησης, όπως η ανίχνευση φωτός και η εμβέλεια (LiDAR), η υπερφασματική απεικόνιση και τα ραντάρ που διεισδύουν στο έδαφος έχουν αυξήσει εντυπωσιακά τη χωρική και χρονική ανάλυση της επιφάνειας της Γης. Τα νέα, πιο λεπτομερή δεδομένα δείχνουν ότι μπορεί να χρειαστούν θεμελιώδεις αλλαγές στις θεωρίες της διάβρωσης ώστε να ευθυγραμμιστούν με τις νέες παρατηρήσεις.

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση με βάση τη γεωγραφική χωρική επιστήμη πληροφοριών (GIS) παίζει σημαντικό ρόλο στην ενσωμάτωση παρατηρήσεων και μοντέλων και βελτιώνει τις ικανότητες κατανόησης και πρόβλεψης που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων της διάβρωσης και της καθίζησης (Ψιλοβόκος, 2020).

1.1 Διαδικασίες διάβρωσης

Η διάβρωση περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών που οδηγούν στην αποκόλληση του εδάφους και στη μεταφορά λόγω δυνάμεων που δρουν στην επιφάνεια. Η τηλεανίχνευση και η γεωχωρική τεχνολογία πεδίου παρέχει αποτελεσματικά εργαλεία για την εύρεση και χαρτογράφηση συγκεκριμένων μορφών εδάφους που δημιουργούνται από διαφορετικές κινητήριες δυνάμεις, όπως (Εικόνα 1.1):

- διάβρωση του εδάφους που προκαλείται από τη ροή των επιφανειακών υδάτων: επιφανειακή ή φυλλοειδής διάβρωση (Sheet erosion), χαραδρωτική (Gully erosion) και αυλακωτή ή αυλακοειδής διάβρωση (Rill erosion),
- διάβρωση από τη δράση του ποταμού στις όχθες του (Channel erosion),
- διάβρωση εξαιτίας της βαρύτητας με κατολισθήσεις που δημιουργούν ροή εδαφικού υλικού,
- διάβρωση εξαιτίας του ανέμου,
- παράκτια διάβρωση εξαιτίας της δράσης των κυμάτων, και
- παγετώδης διάβρωση.



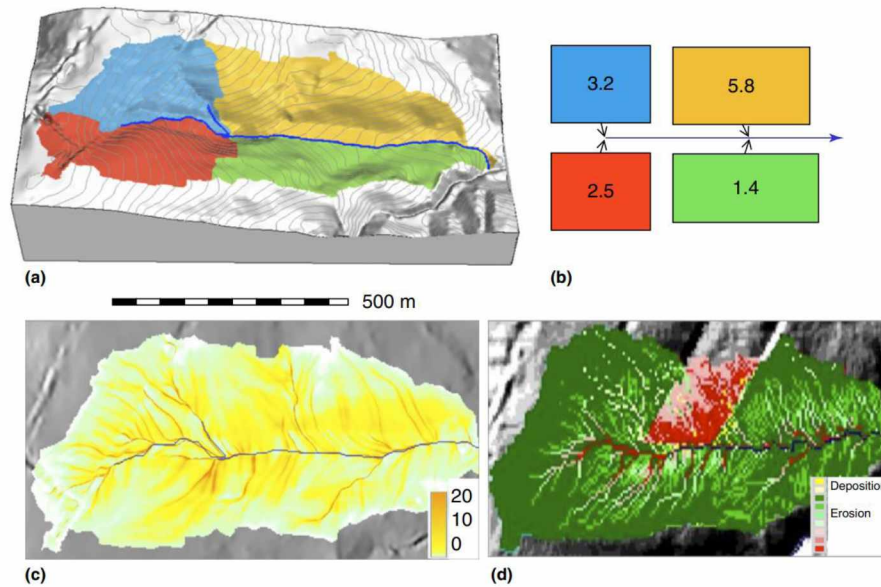
Εικόνα 1.1: Διάβρωση που προκαλείται από τη ροή των επιφανειακών υδάτων: (a) αυλακοειδής, (b) χαραδρωτική, (c) διάβρωση της όχθης του ποταμού (Mitasova et al., 2013).

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ποσοτική μοντελοποίηση της διάβρωσης χρησιμοποιώντας εργαλεία τηλεπισκόπησης και εργαλεία γεωγραφικής πληροφορίας (GIS) και εστιάζει στη διάβρωση του εδάφους που προκαλείται από τη ροή των επιφανειακών υδάτων με αρνητικές επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγικότητα, στην ποιότητα του νερού και στη βιώσιμη διαχείριση της γης.

Η μοντελοποίηση της διάβρωσης του εδάφους με βάση τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών διερευνά χωρικά μοτίβα αποκόλλησης, μεταφοράς και εναπόθεσης του εδάφους, και τον αντίκτυπό τους στην εξέλιξη της μορφολογίας. Αρκετές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης της διαδικασίας της διάβρωσης. Τα «εμπειρικά ή στατιστικά μοντέλα» αντλούν τις κυρίαρχες εξισώσεις από την παρακολούθηση δεδομένων ή πειραμάτων πεδίου χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους όπως η παλινδρόμηση. Τα «εννοιολογικά μοντέλα» κατασκευάζονται από γενικές παρατηρήσεις και σχετίζουν έναν συνδυασμό εισόδων με το παρατηρούμενο αποτέλεσμα και εφαρμόζονται ως λογικές λειτουργίες χρησιμοποιώντας βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων. Τα «μοντέλα φυσικής βάσης» χρησιμοποιούν εξισώσεις που προέρχονται από φυσικούς νόμους, όπως η συνέχεια της μάζας και η εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένες υλοποιήσεις μοντέλων συνδυάζουν συνήθως προσεγγίσεις με βάση τη φυσική και τη μεταφορά ιζημάτων με εμπειρικά παραγόμενες παραμέτρους.

1.2 Χωρική μεταβλητότητα διάβρωσης

Η χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών της διάβρωσης του εδάφους απαιτεί διακριτοποίηση της αναπαράστασης του αναγλύφου σε μοντέλα με βάση το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Οι υδρολογικές μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα μοντέλα μπορεί να είναι ολόκληρη η υδρολογική λεκάνη (ενιαία ή συγκεντρωτικά), υπολεκάνες και πλαγιές λόφων (ημικατανεμημένα), ή μικρότερα τμήματα όπως κελιά (κατανεμημένα) στα οποία διαχωρίζεται η υδρολογική λεκάνη (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Αναπαράσταση της χωρικής μεταβλητότητας: (a) χωρική μέση αναπαράσταση: η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υδρολογικές μονάδες, (b) η σύνθετη τοπογραφία εντός υδρολογικών μονάδων αντικαθίσταται από απλή γεωμετρία κεκλιμένου επιπέδου με ομοιόμορφη κλίση και η διάβρωση του εδάφους εκτιμάται ως ομοιόμορφη τιμή σε κάθε μονάδα, (c) η χωρικά κατανεμημένη αναπαράσταση εκτιμά τον τοπογραφικό δείκτη διάβρωσης για κάθε κυψέλη πλέγματος χρησιμοποιώντας δρομολόγηση ροής με βάση raster. (d) χωρικά κατανεμημένα ποσοστά διάβρωσης και απόθεσης που εκτιμάται από το GeoWEPP, η κόκκινη περιοχή παρουσιάζει υψηλά ποσοστά διάβρωσης λόγω της απομάκρυνσης της βλάστησης (Moore et al., 2007).

Στα ενιαία ή συγκεντρωτικά μοντέλα οι διεργασίες της διάβρωσης περιγράφονται με κανόνες μεταφοράς από τη μία υδρολογική μονάδα στην άλλη ή με συνηθισμένες διαφορικές εξισώσεις για μεταφορά μέσω σταθερού σημείου. Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ αποτελεσματική για συστήματα που περιλαμβάνουν ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά, ωστόσο η επιλογή κατάλληλων χωρικών μονάδων, η τοπολογία του δικτύου των χωρικών μονάδων και οι ιεραρχίες τους απαιτούν σημαντική εμπειρία και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα (Arabi et al., 2006). Αυτό ισχύει ειδικά για περίπλοκα, φυσικά περιβάλλοντα που δεν μπορούν να περιγραφούν εύκολα από απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και όπου τα χωρικά κατανεμημένα μοντέλα έχουν περιορισμένες δυνατότητες για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των πηγών ιζημάτων, καθώς και της δρομολόγησης τους. Μειώνοντας το μέγεθος των διακριτών μονάδων, ειδικά σε τοποθεσίες με πολύπλοκη τοπογραφία, το χωρικό μοτίβο της διάβρωσης μπορεί να αποδώσει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το αποτέλεσμα από ότι τα χωρικά κατανεμημένα μοντέλα.

Τα χωρικά κατανεμημένα μοντέλα αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές εισόδου και τις διαμορφωμένες τιμές ως συνεχή πεδία, συνήθως διακριτά ως κανονικά

πλέγματα ή ακανόνιστα πλέγματα. Σε αντίθεση, με τα ενιαία ή συγκεντρωτικά μοντέλα που προβλέπουν ρυθμούς διάβρωσης για μια περιοχή μιας διακριτής χωρικής μονάδας, τα κατανεμημένα μοντέλα προβλέπουν τις διαμορφωμένες τιμές για οποιοδήποτε σημείο του χώρου και παρέχουν λεπτομερή χωρικά σχήματα πηγής ιζημάτων. Από την άλλη πλευρά, αυτά τα μοντέλα είναι περίπλοκα όσον αφορά τις εισόδους δεδομένων, τη βαθμονόμηση και τις ποσοτικές συνοπτικές προβλέψεις (π.χ., συνολικά φορτία ιζημάτων σε μια έξοδο λεκάνης απορροής). Επίσης, δεν είναι απαραίτητα πιο ακριβή από τις προβλέψεις των ενιαίων συγκεντρωτικών μοντέλων.

Η μεταφορά διαβρωμένου υλικού και ιζημάτων είναι μια διαδικασία πολλαπλών κλιμάκων και διαφορετικών διαδικασιών και απαιτούν μοντελοποίηση σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις. Κατά τη μοντελοποίηση σε κλίμακα ενός κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται συνήθως η επιφανειακή και αυλακοειδής διάβρωση και η ακριβής χωρική τους μοντελοποίηση απαιτεί ανάλυση της μορφολογίας (π.χ. κλίση, μήκος κλίσης κ.α.). Όταν χρησιμοποιείται η κλίμακα λεκάνης απορροής υπολογίζεται ο μέσος όρος αντιπροσώπευσης της επιφανειακής και αυλακοειδής διάβρωσης ενώ παράλληλα υπολογίζονται και οι μεγάλες μορφές χαραδρών και καναλιών. Ανάλογα με το μέγεθος της μοντελοποιημένης λεκάνης απορροής και το μέγεθος των χαραδρών, απαιτείται ανάλυση από 1 έως 10 m. Κατά τη μοντελοποίηση περιφερειακής κλίμακας μεγάλων λεκανών απορροής (χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα), υπολογίζονται οι μέσοι όροι επιφανειακής, αυλακωτής και χαραδρωτικής διάβρωσης, ενώ χρησιμοποιούνται απλοποιημένες αναπαραστάσεις των διαδικασιών της διάβρωσης. Οι αναλύσεις των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων κυμαίνονται από 30 μέτρα έως εκατοντάδες μέτρα.

Τα πλέγματα και οι υδρολογικές μονάδες παρέχουν εκείνο το μέσο που απαιτείται για την προσαρμογή του επιπέδου λεπτομέρειας στην πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών του τοπίου και υποστηρίζουν την χωρική μεταβλητότητα.

1.3 Χρονική μεταβλητότητα διάβρωσης

Τα απλά εμπειρικά μοντέλα διάβρωσης υποθέτουν σχετικά σταθερή διάβρωση με την πάροδο του χρόνου και εκτιμούν τους μακροπρόθεσμους, μέσους ετήσιους ρυθμούς διάβρωσης με βάση εμπειρικούς παράγοντες που προέρχονται από μακροχρόνιες παρατηρήσεις. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί διάβρωσης αλλάζουν γρήγορα λόγω της εξαιρετικά δυναμικής φύσης των κινητήριων δυνάμεων, δηλαδή της

βροχόπτωσης και της ροής του νερού, σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Η πλήρης δυναμική των διαδικασιών διάβρωσης είναι δύσκολο να συλληφθεί λόγω των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων και της περιορισμένης χρονικής ανάλυσης των δεδομένων εισόδου. Επομένως, η μοντελοποίηση πραγματοποιείται συνήθως για την περίπτωση σταθερής κατάστασης που σχετίζεται με αιχμές ροής κατά τη διάρκεια μεμονωμένων γεγονότων διάβρωσης. Τα εξελιγμένα συστήματα μοντελοποίησης στη συνέχεια εκτελούν συνεχείς προσομοιώσεις πολλών διαδραστικών διαδικασιών που ενσωματώνουν τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων σε σταθερή κατάσταση για αρκετά χρόνια.

Ένα τέτοιο μοντέλο συνεχούς χρόνου είναι το μοντέλο WEPP, που βασίζεται στο έργο του Foster (1982) και αναπτύχθηκε από τους Flanagan and Nearing, (1995) και Flanagan et al (2007) και προσομοιώνει τις καθημερινές αλλαγές στο έδαφος και τη βλάστηση (καλλιέργειες) καθώς και κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης, ενώ τα χαρακτηριστικά του φυτού και του εδάφους χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί εάν θα υπάρξει επιφανειακή απορροή ή όχι. Εάν προβλεφθεί απορροή, υπολογίζεται η απόσπαση και η εναπόθεση των ιζημάτων επιφανειακής ή αυλακωτής διάβρωσης. Το μοντέλο προσομοιώνει έτσι τις επιπτώσεις του κλίματος (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία), την υδρολογία (διήθηση, καταθλιπτική αποθήκευση και απορροή), την ισορροπία του νερού (εξατμισοδιαπνοή, διήθηση και αποστράγγιση), την ανάπτυξη της βλάστησης (καλλιεργήσιμες εκτάσεις, βοσκοτόπια και δάση), τη διάβρωση και την εναπόθεση. Στην εμπειρική μέθοδο RUSLE υπάρχει δυνατότητα χρονικής κατανομής της διάβρωσης συνήθως εποχική, που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κατάλληλες εξισώσεις για τη διαβρωτικότητα της βροχής όπως η εξίσωση των Van der Knijff et al. (2000) για την κάθε εποχή ξεχωριστά ενώ εποχική κατανομή εμφανίζει και ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C.

1.4 Μοντελοποίηση διάβρωσης με βάση τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS)

Η εφαρμογή των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στα μοντέλα διάβρωσης υποστηρίζει την αποτελεσματική διαχείριση γεωαναφερμένων δεδομένων, τον υπολογισμό των παραμέτρων εισόδου για διαφορετικά σενάρια, χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και αποτελεσματική απεικόνιση. Το GIS

ενσωματώνει επίσης εργαλεία για στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση διαδικασιών διάβρωσης που συλλέγονται από δεδομένα σε απόσταση.

Το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης των εφαρμογών μοντελοποίησης της γεωχωρικής διάβρωσης έχει κυρίως επικεντρωθεί στη γεωργία, στη διατήρηση του εδάφους, στον έλεγχο της ρύπανσης των ιζημάτων, στη βιώσιμη διαχείριση εκτάσεων (Harmon and Doe, 2001) και στη δασοκομία (κυρίως σχετικά με τις επιπτώσεις των πυρκαγιών).

Μεταξύ των πρώτων υλοποιήσεων της μοντελοποίησης της διάβρωσης κάποιας επιφάνειας στο GIS ήταν ο υπολογισμός της καθολικής εξίσωσης απώλειας εδάφους (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978) και η εξαγωγή των τοπογραφικών παραμέτρων της από ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM). Οι Moore and Burch (1986 a, b) και αργότερα οι Moore και Wilson (1992) άνοιξαν το δρόμο για τις εφαρμογές της εμπειρικής εξίσωσης USLE και σε επιφάνειες πολύπλοκης τοπογραφίας. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου USLE με την υποστήριξη του GIS σε σύνθετες τοπογραφικές συνθήκες (Mitasova et al., 1996, Desmet and Govers, 1996). Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές των GIS στην ανάπτυξη της μεθόδου USLE καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων λεκανών απορροής με χρήσεις γης που έχουν χαρτογραφηθεί από εφαρμογές τηλεπισκόπησης. Η εμπειρική μέθοδος USLE και η ενημερωμένη, βελτιωμένη έκδοση της, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απόσπασης του εδάφους σε μοντέλα κλίμακας λεκάνης απορροής που εστιάζουν σε γεωργικές, περιβαλλοντικές και μηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων γνωστών μοντέλων όπως ANSWERS, AGNPS και SWAT (Rewerts and Engel, 1991, Mitchell et al., 1993, Lim et al., 2005, Kim et al., 2009).

Αυτά τα μοντέλα έχουν συζευχθεί με ιδιόκτητα και ανοιχτού κώδικα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών GIS για την επεξεργασία και διαχείριση δεδομένων μοντελοποίησης και την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Πίνακας 1.1). Αρκετά συστήματα μοντελοποίησης της διάβρωσης εφαρμόστηκαν ως on-line εργαλεία (Park et al., 2009). Αν και η μέθοδος USLE αναπτύχθηκε ως ένα απλό εργαλείο ώστε να ενθαρρύνουν τους αγρότες για τη διατήρηση του εδάφους, ως εκ τούτου, η εκπροσώπηση των διαδικασιών διάβρωσης έχει απλουστευθεί σε μεγάλο βαθμό και οι ανάγκες για μοντελοποίηση σε επίπεδο έρευνας υποκίνησαν την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων μοντέλων και τη σύνδεσή τους με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS).

Πίνακας 1.1: Επιλεγμένα μοντέλα διάβρωσης του εδάφους και η σύνδεσή τους με GIS. s, r – επιφανειακή και αυλακωτή διάβρωση, ch – διάβρωση καναλιών, dz -αλλαγή υψομέτρου (Mitasova et al., 2013).

Μοντέλα	Είδη διάβρωσης	Χωρική κλίμακα και αναπαράσταση	Χρονική κλίμακα	Εκτέλεση στο GIS	Αναφορές
USLE	s,r	κεκλιμένη επιφάνεια- profil	Ετήσιο	map algebra	USDA ARS
RUSLE	s,r	κεκλιμένη επιφάνεια - profil	Ετήσιο-γεγονός	map algebra	USDA ARS USDA
GeoWEPP	s,r,ch	μικρή λεκάνη απορροής (raster)	Συνεχής χρόνος-γεγονός	extension, Web	ARS, NSERL USDA
AnnAGNPS	s,r,ch	λεκάνη απορροής – custom grid	Συνεχής χρόνος-γεγονός	custom GIS	ARS
ArcSWAT	s,r,ch	λεκάνη απορροής – hydrologic unit	Συνεχής χρόνος-γεγονός	extension	USDA ARS, TAMU
MapWin SWAT	s,r,ch	λεκάνη απορροής – hydrologic unit	Συνεχής χρόνος-γεγονός	custom Web GIS	USDA ARS, TAMU
openLisem	s,r,ch	λεκάνη απορροής raster	Γεγονός	PCRaster	De Roo et al. (1996)
SIBERIA	s,r,ch,dz	Επιφάνεια - raster	Συνεχής χρόνος	data input	CSMDS (2011)
CHILD	s,r ch,dz	Επιφάνεια - mesh	Συνεχής χρόνος	data input	CSMDS (2011)
USPED	s,r	μικρή λεκάνη απορροής- raster	Ετήσιο-γεγονός	map algebra	Neteler and Mitasova (2008)
SIMWE	s,r	μικρή λεκάνη απορροής- raster	Γεγονός	GIS module	Neteler and Mitasova (2008)
r.landscape. evol	s,r,ch,dz	Επιφάνεια- raster	Συνεχής χρόνος	GIS module	Barton et al. (2010)

Στην Ευρώπη έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα μοντελοποίησης της διάβρωσης με ισχυρά γεωχωρικά συστήματα. Το Ευρωπαϊκό μοντέλο διάβρωσης του εδάφους (EUROSEM) (Morgan et al., 1998) εισήγαγε μια δυναμική προσέγγιση για την πρόβλεψη της μεταφοράς ιζημάτων από μικρές λεκάνες απορροής. Το Limburg Soil Erosion Model (LISEM) (De Roo et al., 1996, Sheikh et al., 2010) είναι ένα φυσικώς βασισμένο μοντέλο απορροής και διάβρωσης για σκοπούς έρευνας, σχεδιασμού και διατήρησης. Προσομοιώνει τις χωρικές επιπτώσεις των γεγονότων βροχοπτώσεων σε μικρές λεκάνες απορροής και χρησιμοποιεί το δωρεάν περιβαλλοντικό λογισμικό GIS PCRaster (Karssenberget al., 2001). Ως ένα από τα πιο

ολοκληρωμένα εργαλεία μοντελοποίησης γεωχωρικής διάβρωσης, το LISEM, ενσωματώνει βροχοπτώσεις, διήθηση, κατακόρυφη κίνηση του νερού στο έδαφος, χερσαία ροή, ροή καναλιών σε τεχνητές τάφρους, αποκόλληση από τη βροχοπτώση και μεταφορά, χωρητικότητα και απόσπαση από τη χερσαία ροή. Το μοντέλο προσομοίωσης της διάβρωσης του νερού SIMWE (Mitas and Mitasova, 1998, Mitasova et al., 2005) αναπτύχθηκε ως μια διαφοροποιημένη γενίκευση του μοντέλου διάβρωσης ενός κεκλιμένου επιπέδου που χρησιμοποιείται από το WEPP για την αποτύπωση του χωρικού μοτίβου διάβρωσης, μεταφοράς ιζημάτων και απόθεσης σε χωρικά διαφορετικές συνθήκες

Αρκετές υλοποιήσεις μοντέλων διάβρωσης με βάση το GIS προβλέπουν θέσεις υψηλής διάβρωσης λόγω της συγκεντρωμένης ροής του νερού ενώ αναπτύχθηκαν επίσης συγκεκριμένα μοντέλα που εστιάζουν στην εφήμερη διάβρωση των ρεμάτων (DeRose et al., 1998, Woodward, 1999). Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και τροποποιημένες εξισώσεις μεταφοράς ιζημάτων για να βελτιώσουν τις ποσοτικές εκτιμήσεις του ιζήματος που διαβρώνεται από τον σχηματισμό εφήμερου ρέματος. Χρονολογικές σειρές αεροφωτογραφιών σε συνδυασμό με πολυετή ψηφιακά μοντέλα εδάφους, DEM, χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τη χαρτογράφηση της θέσης, της εξέλιξης και των ποσοστών διάβρωσης των χαραδρών (Martinez-Casasnovas et al., 2004).

Εκτός από τα μοντέλα που εστιάζονται στη βραχυπρόθεσμη διάβρωση (μεμονωμένα γεγονότα έως πολλά έτη), έχουν αναπτυχθεί μοντέλα εξέλιξης του αναγλύφου για να αποτυπώσουν τις επιπτώσεις της διάβρωσης στις μορφές της γης για εκατοντάδες ή χιλιάδες έτη. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν συνήθως δεδομένα στοιχεία από GIS, αλλά έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον εκτός του GIS. Στα γνωστά μοντέλα περιλαμβάνονται το SIBERIA (Willgoose et al., 1991, Hancock et al., 2002, Willgoose, 2004), CHILD (Tucker et al., 2001a, b) ή μοντέλα κυψελοειδών αυτοματοποιημένων μοντέλων για την προσομοίωση των γεωμορφών (Luo, 2001), της εξέλιξης των ποταμών (Murray and Paola, 1994) και των αμμόλοφων (Pelletier et al., 2009). Το μοντέλο εξέλιξης της WILSIM landform (Luo et al., 2004) υλοποιήθηκε ως εργαλείο προσομοίωσης μέσω διαδικτύου. Πρόσφατα, η ανάπτυξη μοντέλων εξέλιξης της διάβρωσης συντονίστηκε από το πρόγραμμα Community Surface Dynamics Modeling System (CSMDS, 2011). Οι στατιστικές προσεγγίσεις έχουν συνήθως συνδυαστεί με τεχνικές τηλεπισκόπησης για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της χαρτογράφησης της διάβρωσης. Για παράδειγμα,

αναπτύχθηκε ένας δείκτης διάβρωσης βάσει λογιστικής παλινδρόμησης για να χαρτογραφηθεί η πιθανότητα διάβρωσης που προκύπτει από τη συμπυκνωμένη ροή νερού σε ένα DEM υψηλής ανάλυσης (Pike et al., 2009). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό των τοπογραφικών παραμέτρων που εξηγούν τη μεταβλητότητα των μετρήσεων του πεδίου (Kheir et al., 2007).

Τα πιο πρόσφατα μοντέλα που βασίζονται στο GIS μελετούν το ρυθμό διάβρωσης και απόθεσης σε πολύ υψηλές αναλύσεις χρησιμοποιώντας επαναλαμβανόμενες σαρώσεις τοπίου από επίγεια στοιχεία LiDAR και διαφοροποιώντας τα προκύπτοντα DEM. Αρκετές εργασίες δείχνουν ότι «υπάρχουν σημαντικές αδυναμίες στην τρέχουσα κατανόηση και στα δεδομένα που υποστηρίζουν τα υπάρχοντα μοντέλα» (Govers et al., 2007, Wainwright et al., 2008, Polyakov et al., 2004, Finlayson and Montgomery, 2003). Για παράδειγμα, οι Van Oost et al. (2005) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση της διάβρωσης και των υδρολογικών μοντέλων με βάση τη διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε εκτιμήσεις παραμέτρων και ότι οι προβλέψεις δεν είναι γενικά ακριβείς. Οι δυσκολίες που συνδέονται με την ακρίβεια των χωρικών μοντέλων διάβρωσης του εδάφους οφείλονται συνήθως στη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των διαδικασιών διάβρωσης και της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις παραμέτρους του μοντέλου. Οι Jetten et al., (2003) υποστηρίζουν ότι η απόδοση του μοντέλου μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πληρέστερων χωρικών πληροφοριών για βαθμονόμηση και επικύρωση μοντέλου αντί να βελτιωθεί με δεδομένα που περιορίζονται στις μετρήσεις σε σημεία των λεκανών απορροής. Οι χωρικές και χρονικά κατανεμημένες παρατηρήσεις μπορεί να παρέχουν τα δεδομένα για να διευκρινίσουν τις λάθος αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ρυθμού εναπόθεσης ιζήματος και αποκόλλησης, και να παρέχουν πληροφορίες για την κλιμάκωση των διαφόρων διαβρωτικών διαδικασιών και μηχανισμών. Επομένως, στο μέλλον μπορεί να αναμένονται προσαρμογές στα θεωρητικά θεμέλια της μοντελοποίησης της διάβρωσης, καθώς νέες τεχνολογίες παρακολούθησης και ανίχνευσης θα παρέχουν πιο ολοκληρωμένα πειραματικά δεδομένα και παρατηρήσεις πεδίου.

Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το εμπειρικό μοντέλο RUSLE που εάν και δεν μπορεί να εξάγει συμπεράσματα για όλους τους τύπους επιφανειακής διάβρωσης, δεν μπορεί να εξάγει δηλαδή συμπεράσματα για τη χαραδρωτική διάβρωση και για τη διάβρωση των καναλιών ωστόσο η απλότητα της εξίσωσης και η διαθεσιμότητα των τιμών των παραμέτρων της την κάνει αρκετά εύχρηστη

μεθοδολογία. Ένα επίσης πλεονέκτημα του μοντέλου της RUSLE είναι ότι μπορεί να ενσωματώσει τα αποτελέσματα διαφορετικών σεναρίων με βάση τις αλλαγές στις χρήσεις γης και στις πρακτικές υποστήριξης.

2. Θεωρητική περιγραφή του μοντέλου

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο διάβρωσης είναι η Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978) και η αναθεωρημένη έκδοσή της RUSLE (Renard et al., 1997), η οποία εκτιμά τη μακροπρόθεσμη μέση ετήσια απώλεια εδάφους επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης. Παρά τα μειονεκτήματά του, το μοντέλο RUSLE εξακολουθεί να είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο σε μεγάλες κλίμακες καθώς μπορεί να επεξεργαστεί την εισαγωγή δεδομένων για μεγάλες περιοχές και παρέχει τη βάση για τη διεξαγωγή ανάλυσης σεναρίων και τη λήψη μέτρων κατά της διάβρωσης. Επιπλέον, μια πρόσφατη συλλογή δεδομένων για την απώλεια εδάφους στην Ευρώπη από το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Πληροφοριών και Παρατηρήσεων Περιβάλλοντος διαπίστωσε ότι όλες οι συμμετέχουσες χώρες χρησιμοποίησαν το μοντέλο USLE / RUSLE (Panagos et al., 2014) για τη μοντελοποίηση της απώλειας εδάφους.

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο RUSLE, το οποίο υπολογίζει τους μέσους ετήσιους ρυθμούς απώλειας εδάφους της διάβρωσης σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$SE = R * K * LS * C * P \quad (2.1)$$

Όπου:

SE: η μέση ετήσια απώλεια εδάφους ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),

R: ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),

K: ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ($t \text{ hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),

C: ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους (αδιάστατος),

LS: το μήκος κλίσης και ο παράγοντας απότομης κλίσης (αδιάστατος) και

P: ο συντελεστής πρακτικής υποστήριξης (αδιάστατος).

2.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R

Μεταξύ των παραγόντων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο RUSLE, η βροχόπτωση εκφράζεται μέσω του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-factor) και συνδυάζει τη διάρκεια, το μέγεθος και την ένταση της βροχόπτωσης. Ο συντελεστής R είναι ένας πολυετής μέσος δείκτης που υπολογίζεται με βάση την κινητική ενέργεια και την ένταση της βροχόπτωσης για να περιγράψει την επίδραση της βροχόπτωσης στη διάβρωση (Wischmeier and Smith, 1978).

Από όλους τους παράγοντες διάβρωσης, η διαβρωτικότητα των βροχοπτώσεων και ο παράγοντας κάλυψης και χρήσης γης θεωρούνται οι πιο δυναμικοί. Καταγράφοντας τη μεταβλητότητα αυτών των δύο παραγόντων, είναι δυνατόν να έχουμε μια πιο ρεαλιστική και ακριβή εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους.

Ο υπολογισμός του R προκύπτει από τις εξισώσεις του Renard and Freimund (1994) που σύμφωνα με αυτές ο μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$) ισοδυναμεί με:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j \quad (2.2)$$

n: έτη μετρήσεων

j: δείκτης αριθμού ετών μετρήσεων

m: επεισόδια βροχής

k: δείκτης αριθμού επεισοδίων βροχής

E: συνολική κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης (MJ ha^{-1})

I_{30} : η μέγιστη, σε χρονικό διάστημα 30 min, ένταση της καταγίδας (mm h^{-1})

Η κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης ανά μονάδα ύψους βροχής και ανά μονάδα επιφάνειας E (MJ/ha*mm) κάθε επεισοδίου βροχής υπολογίζεται με τη σχέση:

$$E = \sum_{r=1}^m e_r \Delta V_r \quad (2.3)$$

m: επιμέρους διάστημα επεισοδίου βροχής με σταθερή βροχόπτωση

r: δείκτης επιμέρους διαστήματος

e_r : ειδική κινητική ενέργεια επιμέρους διαστήματος επεισοδίου βροχής ($\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$)

ΔV_r : ύψος βροχής επιμέρους διαστήματος (mm)

Η ειδική κινητική ενέργεια της βροχής κάθε επιμέρους διαστήματος σταθερής έντασης προκύπτει από τη σχέση:

$$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)] \quad (2.4)$$

i_r : ένταση βροχής επιμέρους διαστήματος (mm h^{-1})

Ωστόσο η έλλειψη επαρκών και αξιόπιστων δεδομένων βροχόπτωσης οδήγησε στη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού του δείκτη διαβρωτικότητας R . Κάποιες από τις σχέσεις αυτές βασίζονται στη σχέση του R με τον τροποποιημένο δείκτη Fournier. Ο Arnoldus (1977), αν και αρχικά κατέληξε σε φτωχή συσχέτιση $r^2 \sim 0.55$ μεταξύ του R και του δείκτη Fournier (1960) μετά από μελέτη στις Η.Π.Α, το Μαρόκο και τη Δυτική Αφρική, τροποποίησε τον δείκτη Fournier και αύξησε σημαντικά τη συσχέτιση αυτή βελτιώνοντας σε $r^2 \sim 0.83$. Ο τροποποιημένος δείκτης Fournier υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{(\bar{p}_i)^2}{\bar{P}} \quad (2.5)$$

Όπου:

\bar{p}_i (mm): μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης του μήνα i

\bar{P} (mm): μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης

Με τον τρόπο αυτό ο Arnoldus (1977) εκτίμησε για το Μαρόκο τον δείκτη διαβρωτικότητας σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = 0.264 MFI^{1.50} \quad (2.6)$$

Αντίστοιχα με βάση τα δεδομένα από σταθμούς των ΗΠΑ οι Renard and Freimund (1994) κατέληξαν στις παρακάτω σχέσεις μεταξύ R και MFI με συντελεστές συσχέτισης $r^2 \sim 0.81$ για την πρώτη και $r^2 \sim 0.75$ για τη δεύτερη σχέση, αντίστοιχα:

$$R = 0.07397 MFI^{1.847} \quad MFI \leq 55 \text{ (mm)} \quad (2.7)$$

$$R = 95.77 - 6.081 MFI + 0.477 MFI^2 \quad MFI > 55 \text{ (mm)} \quad (2.8)$$

Όπου R υπολογίζεται σε $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$

Κάποιες από τις εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του δείκτη διαβρωτικότητας R βασίζονται στη σχέση του R με τη μέση ετήσια βροχόπτωση. Οι Van der Knijff et al. (2000) κατέληξαν στη σχέση:

$$R = a P_j \quad (2.9)$$

Όπου:

P_j : μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

α : συντελεστής με εύρος τιμών 1.1~1.5 και συνήθη τιμή 1.3

Για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας ο συντελεστής α της εξίσωσης 2.9 υπολογίστηκε από τον Φλαμπούρη (2008) χρησιμοποιώντας στοιχεία βροχογράφων από όλη την Ελλάδα.

Μία σχέση επίσης των Renard and Freimund (1994) που βασίζεται στη μέση ετήσια βροχόπτωση είναι:

$$R = 0.04830 P^{1.610}, \text{ για } P < 850 \text{ mm} \quad (2.10)$$

$$R = 587.8 - 1.219P + 0.004105 P^2, \text{ για } P \geq 850 \text{ mm} \quad (2.11)$$

2.2. Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους, K

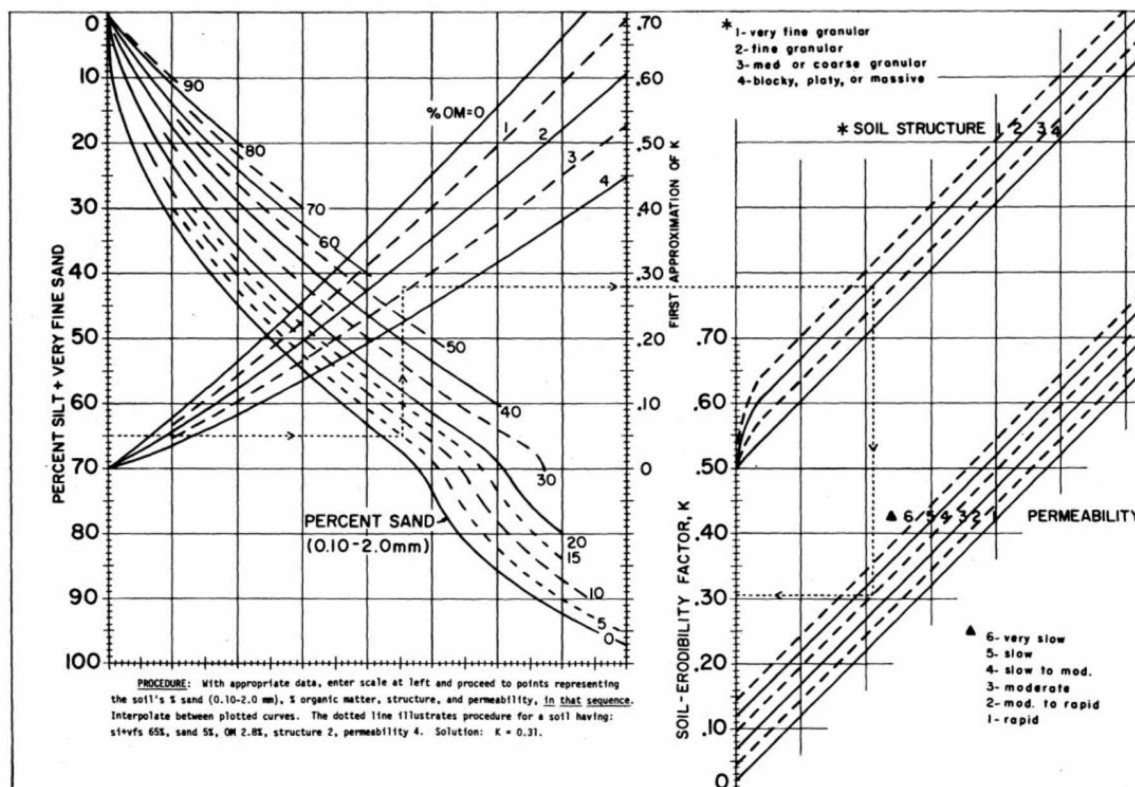
Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους, K, είναι μια ποσοτική τιμή που μετριέται σε (ton*hr)/(MJ*mm) και η οποία προσδιορίζεται πειραματικά. Για ένα συγκεκριμένο τύπο εδάφους, είναι ο ρυθμός απώλειας εδάφους (A) ανά μονάδα δείκτη διαβρωσιμότητας (EI) όπως μετριέται σε μοναδιαίο τμήμα επιφάνειας, το οποίο έχει οριστεί αυθαίρετα ως εξής (Wischmeier and Smith, 1978): επιφάνεια με μήκος 22.1m και πλάτος 1.83m, με ομοιόμορφη κλίση 9% η οποία βρίσκεται σε συνεχή αγρανάπαυση. Σκοπός είναι το τμήμα αυτό του εδάφους να διατηρείται χωρίς βλάστηση και για τον λόγο αυτό οργώνεται συνεχώς για διάστημα τουλάχιστον 2 ετών παράλληλα με την κλίση ώστε να αποφευχθεί η φυτική ανάπτυξη και η ρωγμάτωση της επιφάνειας. Όταν πληρούνται όλες αυτές οι προϋποθέσεις, οι συντελεστές L, S, C και P παίρνουν την τιμή 1.0 και ο K ισούται με A / EI.

Ωστόσο, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή για ένα δεδομένο τύπο εδάφους και η άμεση μέτρηση του παράγοντα απαιτεί μετρήσεις απώλειας εδάφους για αντιπροσωπευτικά εύρη μεγεθών καταιγίδας καθώς και για προηγούμενες εδαφικές συνθήκες και αντιπροσωπεύει την απόσπαση εδαφικού υλικού από το μητρικό πέτρωμα καθώς και την απορροή του υλικού που αποσπάστηκε.

Η άμεση μέτρηση του συντελεστή διαβρωσιμότητας είναι δαπανηρή και χρονοβόρα και είναι εφικτή μόνο για κάποιους τύπους εδαφών. Για τον λόγο αυτό οι Wischmeier και Smith, (1978) προσδιόρισαν με ικανοποιητική προσέγγιση από την κοκκομετρική ανάλυση την τιμή του συντελεστή K η οποία προκύπτει από την εφαρμογή του νομογραφήματος της εικόνας 2.1 και ισχύει για τιμές $P_s > 70$, όπου P_s

2. Θεωρητική περιγραφή του μοντέλου

(%) είναι το ποσοστό ιλύος $P_{(silt)}$, $0.002 \leq d \leq 0.05$, και $P_{(vfs)}$ (%) είναι το ποσοστό της πολύ λεπτής άμμου, $0.05 \leq d \leq 0.1$.



Εικόνα 2.1: Νομογράφημα υπολογισμού του K (σε αγγλικές και SI μονάδες) των Wischmeier και Smith, (1978).

Αντίστοιχα για τιμές $P_s < 70\%$ ισχύει η εξίσωση:

$$K = \frac{2.1 M^{1.14} (10^{-4}) (12 - OM) + 3.25 (St - 2) + 2.5 (Pr - 3)}{100} \quad (2.12)$$

σε (ton*ha)/(MJ*mm)

Όπου:

OM: Ποσοστό οργανικής ύλης (Organic Matter)

St: Δομή του εδάφους (Soil structure-συντελεστής εδαφικής δομής)

Pr: βαθμός διαπερατότητας εδάφους (Soil Permiability)

M: είναι συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων και η τιμή της προκύπτει από τη σχέση:

$$M = (\%SI + \%VFS) * (100 - \%CL) \quad (2.13)$$

CL: ποσοστό αργίλου ($D < 0.002\text{mm}$)

SI: Ποσοστό ιλύος (silt : 0.002 -0.05 mm)

VFS: Ποσοστό άμμου: της πολύ λεπτής άμμου (Very Fine Sand 0.05-0.1mm) της άμμου (Sa:(Sand) 0.1-2mm).

Ο συντελεστής της εδαφικής διατομής ορίζεται από τον πίνακα 2.1 ενώ ο βαθμός διαπερατότητας από τον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.1: Συντελεστές εδαφικής διατομής (Wischmeier and Smith, 1978).

Μέγεθος κόκκων	Συντελεστής εδαφικής διατομής
Πολλοί λεπτοί κόκκοι	1
Λεπτοί κόκκοι	2
Χονδρόκοκοι	3
Ογκώδεις κόκκοι	4

Πίνακας 2.2: Τιμές διαπερατότητας (Wischmeier and Smith, 1978).

	Διαπερατότητα
Πολύ μικρή	6
Μικρή	5
Μικρή-Μέτρια	4
Μέτρια	3
Μέτρια- Μεγάλη	2
Μεγάλη	1

2.3 Συντελεστής μήκους και κλίσης LS

Η επίδραση της τοπογραφίας στη διάβρωση στη μέθοδο RUSLE υπολογίζεται από τον αδιάστατο παράγοντα LS. Ο συντελεστής LS εκφράζεται ως ο λόγος της απώλειας εδάφους εξαιτίας της διάβρωσης της κεκλιμένης περιοχής προς την απώλεια εδάφους επιφάνειας μήκους 22.12m και κλίσης 9% υπό ίδιες συνθήκες με την περιοχή. Ο συντελεστής μήκους κλίσης L (L factor -slope length) εκφράζεται από τη σχέση:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^m \quad (2.14)$$

Όπου:

λ : είναι το μήκος που ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση μεταξύ της θέσης έναρξης της επιφανειακής απορροής και της θέσης όπου: α) η κλίση του εδάφους μειώνεται αρκετά με συνέπεια την εναπόθεση φερτών υλικών ή β) παρατηρείται συγκέντρωση των απορροών π.χ. σε υδατόρρευμα. Η παράμετρος λ είναι η προβολή κεκλιμένου μήκους σε οριζόντιο επίπεδο και όχι η μετρούμενη απόσταση κατά μήκος του κεκλιμένου επιπέδου του εδάφους.

Ο εκθέτης m υπολογίζεται συναρτήσει της παραμέτρου β_0 από την ακόλουθη σχέση (McCool et al., 1989, 1993):

$$m = \frac{\beta_{\theta}}{1 + \beta_{\theta}} \quad (2.15)$$

Όπου η παράμετρος β_{θ} εξαρτάται από την ευαισθησία του εδάφους στη διάβρωση. Για εδάφη μέτριας ευαισθησίας προτείνεται ο υπολογισμός από τη σχέση:

$$\beta_{\theta} = \frac{\sin\theta}{3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (2.16)$$

όπου θ είναι η γωνία κλίσης του εδάφους. Οι τιμές της β_{θ} για χαμηλής ή υψηλής διαβρωσιμότητας εδάφη είναι αντίστοιχα το ήμισυ ή διπλάσιες των τιμών που προκύπτουν από την εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης.

Ο συντελεστής κλίσεως του εδάφους S (S factor - slope steepness) είναι ο λόγος απώλειας εδάφους της κεκλιμένης περιοχής προς εκείνη την απώλεια εδάφους της περιοχής με κλίσης 9% υπό πανομοιότυπες συνθήκες (Wischmeier and Smith, 1978).

Για $\lambda > 4.6\text{m}$ ο παράγων S ορίζεται από τη σχέση (McCool et al. 1989, 1993):

$$S = 10.8 \sin\theta + 0.03 \quad \sin\theta < 0.09 \quad (2.17)$$

$$S = 16.8 \sin\theta - 0.50 \quad \sin\theta \geq 0.09 \quad (2.18)$$

όπου θ είναι η γωνία κλίσης του εδάφους.

Για $\lambda \leq 4.60\text{ m}$ ισχύει:

$$S = 1(\sin\theta)^{0.8} + 0.56 \quad (2.19)$$

Σε συνθήκες τήξης χιονιού και για εδάφη που καλλιεργήθηκαν πρόσφατα, ο S υπολογίζεται:

$$S = 4.25 \sin\theta \text{ για } \sin\theta \geq 0.09 \quad 0.8 + 0.56 \quad (2.20)$$

$$S = 10.8 \sin\theta + 0.03 \text{ για } \sin\theta < 0.09 \quad (2.21)$$

Οι όροι L και S της εξίσωσης συχνά συνενώνονται ως "LS" και αναφέρονται ως τοπογραφικός παράγοντας. Παραδοσιακά, οι καλύτερες εκτιμήσεις για το μήκος της κλίσης λαμβάνονται από μετρήσεις πεδίου, αλλά κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό ή πρακτικό, ειδικά σε μεγάλες λεκάνες απορροής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν

αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες που επιτρέπουν τη χρήση τεχνολογίας των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) για τη δημιουργία αλγορίθμων με βάση τη μεθοδολογία RUSLE και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του συντελεστή LS.

Οι Moore and Burch (1986 a, b) αναγνώρισαν ότι υψηλότερα ποσοστά διάβρωσης ή εναπόθεσης είναι στα σημεία σύγκλισης της λεκάνης απορροής, όπως επίσης διατυπώνεται στο μοντέλο RUSLE. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι υπάρχει χαμηλότερη ικανότητα μεταφοράς ιζημάτων στα σημεία εκείνα που δεν παρατηρείται σύγκλιση ενώ στα σημεία της τοπογραφική σύγκλισης η ικανότητα μεταφοράς ιζήματος αυξάνεται σημαντικά. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι για μια τρισδιάστατη πλαγιά λόφου όπου υπάρχει σύγκλιση ροής ή απόκλιση, η απώλεια εδάφους δεν εξαρτάται πραγματικά από την απόσταση μέχρι το σημείο έναρξης της διάβρωσης και επομένως το μήκος της κλίσης θα πρέπει να αντικατασταθεί από την περιοχή που συνεισφέρει στη διάβρωση αυτή (Desmet and Govers, 1996, Moore and Burch, 1986 a, b). Έτσι, ο παράγοντας LS χρησιμοποιώντας το GIS δεν είναι πλέον μονοδιάστατος κατά την εφαρμογή RUSLE.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις και αλγόριθμοι για τον ποσοτικό προσδιορισμό του παράγοντα LS. Οι Moore και Wilson (1992) παρουσίασαν μια απλοποιημένη εξίσωση χρησιμοποιώντας τη μονάδα συνεισφοράς της περιοχής (UCA-unit contributing area) δηλαδή τη συμβολή στη διάβρωση της ανάντη περιοχής για τον υπολογισμό του παράγοντα LS σε τρισδιάστατο έδαφος. Η μονάδα συνεισφοράς της περιοχής ορίζεται ως η περιοχή που αποστραγγίζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Υπολογίστηκε πολλαπλασιάζοντας το πλέγμα συσσώρευσης ροής με το μέγεθος του κελιού. Η εξίσωση αυτή υπολογίζει έναν συνδυασμένο συντελεστή LS βάσει της μονάδας συνεισφοράς στη διάβρωση και της κλίσης:

$$LS = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.0869} \right)^n \quad (2.22)$$

A_s = μονάδα συνεισφοράς της περιοχής στη διάβρωση (m)

θ = κλίση σε ακτίνια

m (0.4-0.56) και n (1.2-1.3) είναι εκθέτες.

Οι Desmet και Govers (1996) χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο κατεύθυνσης πολλαπλής ροής για τον υπολογισμό των συνεισφερόμενων περιοχών και στη συνέχεια

για τον υπολογισμό του συντελεστή LS σε τμήματα (Foster and Wischmeier, 1974). Συγκρίναν το μήκος κλίσης, την κλίση και τον παράγοντα LS της μεθόδου τους με τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου και διαπίστωσαν ότι η μέθοδός τους ήταν πολύ κοντά στις μετρήσεις αυτές. Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό του μήκους κλίσης είναι:

$$L_{ij} = \frac{A_{S_{ij-out}}^{m+1} - A_{S_{ij-in}}^{m+1}}{(A_{S_{ij-out}} - A_{S_{ij-in}})(22.13)^m} \quad (2.23)$$

Όπου:

$L_{i,j}$: είναι ο παράγοντας μήκους κλίσης στο κελί πλέγματος με συντεταγμένες (i, j)

$A_{S_{ij-out}}$: η περιοχή που συνεισφέρει στην έξοδο του κελιού με συντεταγμένες (i, j) (m^2/M)

$A_{S_{ij-in}}$: η περιοχή που συνεισφέρει στην είσοδο του κελιού με συντεταγμένες (i, j) (m^2/M)

Στο σημείο έναρξης του μήκους κλίσης:

$$\begin{aligned} A_{S_{ij-in}} &= 0, \text{ τότε} \\ L_{ij} &= \left(\frac{A_{S_{ij-out}}}{22.13} \right)^m \end{aligned} \quad (2.24)$$

Επίσης:

$$A_{S_{ij-out}} = \frac{A_{ij-out}}{D_{ij}} \quad (2.25)$$

Αφού τα δεδομένα πλέγματος έχουν το ίδιο μέγεθος κελιού, τότε $\lambda_{ij} \times D_{i,j} = A_{i,j-out}$.

Άρα:

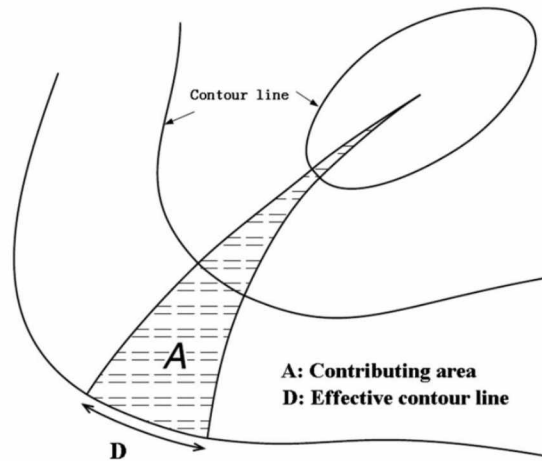
$$\lambda_{ij} = \frac{A_{ij-out}}{D_{ij}} \quad (2.26)$$

Όπου:

A_{ij-out} είναι η περιοχή συνεισφοράς στην έξοδο του κελιού με συντεταγμένες (i, j) (m^2)

D_{ij} είναι το πραγματικό μήκος ισοϋψούς (m).

λ_{ij} είναι το μήκος κλίσης (m) (Εικόνα 2.2),



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση συγκεκριμένης λεκάνης απορροής (Gallant and Hutchinson, 2011).

Για τον υπολογισμό της περιοχής συνεισφοράς, η περιοχή συνεισφοράς ενός κελιού διαιρείται με το πραγματικό μήκος της ισοϋψούς. Το μήκος της ισοϋψούς εντός της κυψέλης πλέγματος ισούται με το μήκος της γραμμής διαμέσου του κέντρου της κυψελίδας πλέγματος και κάθετα προς τον προσανατολισμό του αναγλύφου, και υπολογίζεται ως (Desmet and Govers, 1996):

$$D_{ij} = \text{Cellsize} (\sin\theta + \cos\theta_{ij}) \quad (2.27)$$

θ_{ij} = προσανατολισμός του κελιού πλέγματος με συντεταγμένες (i, j). Η συνεισφέρουσα περιοχή κάθε κελιού μπορεί να αναπαρασταθεί ως το άθροισμα των οκτώ γύρω κελιών που ρέουν σε αυτό. Επομένως:

$$\lambda_{ij} = \sum_{x=0, y=0}^{x=i, y=j} \sum_{k=1}^m \lambda_{x,y} \quad (2.28)$$

Όπου:

k είναι ο κωδικός των οκτώ κελιών των συντεταγμένων (x, y)

$\lambda_{x,y}$ μπορεί να θεωρηθεί ως το μήκος κλίσης κυψελίδας (CSL) κάθε πλέγματος.

Εάν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο D8 των O'Callaghan και Mark (1984), ένας αλγόριθμος εκχωρεί τη ροή από ένα εστιακό κελί σε ένα και μόνο ένα από τα 8 γειτονικά του κελιά. Το επιλεγμένο κελί είναι αυτό στο οποίο έχει πρόσβαση μέσω της πιο απότομης κλίσης. Όταν δεν υπάρχει τέτοιο κελί, δεν εκχωρείται κατεύθυνση ροής. Όταν δύο ή περισσότερα κελιά έχουν την ίδια κλίση, το επιλεγμένο κελί είναι το πρώτο που εξετάζεται από τον αλγόριθμο (Εικόνα 2.3).

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$\lambda_{x,y} = \text{cell size}$ όταν ο προσανατολισμός του αναγλύφου είναι A, N, Δ, Β (ανατολικά, νότια, δυτικά και βόρεια) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, και

$\lambda_{x,y} = \text{cell size} \cdot \sqrt{2}$ όταν ο προσανατολισμός του αναγλύφου είναι ΝΑ, ΝΔ, ΒΔ, ΒΑ (νοτιοανατολικά, νοτιοδυτικά, βορειοδυτικά, βορειοανατολικά).

NW 32	N 64	NE 128	} Cellsize
W 16	C	E 1	
SW 8	S 4	SE 2	

Εικόνα 2.3: Ο κωδικός κελιού για ένα παράθυρο 3×3 που χρησιμοποιείται, C: τρέχον υπολογισμένο κελί, E: Ανατολικά, ΝΑ: Νοτιοανατολικά, Ν: Νότια, ΝΔ: Νοτιοδυτικά, Δ: Δυτικά, ΒΔ: Βορειοδυτικά, Β: Βόρεια (Hongming et al., 2013).

Τα χωρικά δεδομένα κατανομής υψομέτρων μπορούν να αναλυθούν για να παράγουν τιμές μήκους κλίσης (L) και κλίσης (S) για οποιοδήποτε δεδομένο σημείο σε μια λεκάνη απορροής. Οι Winchell et al. (2008) βελτίωσαν αυτή τη μέθοδο και συνέκριναν αρκετές παραλλαγές ώστε να βρεθεί μια καλύτερη μέθοδος. Ο μεγαλύτερος περιορισμός όλων αυτών των μεθόδων είναι η απουσία αλγορίθμου για την πρόβλεψη τοπογραφικά μεταβαλλόμενων ζωνών απόθεσης εδάφους (Winchell et al., 2008).

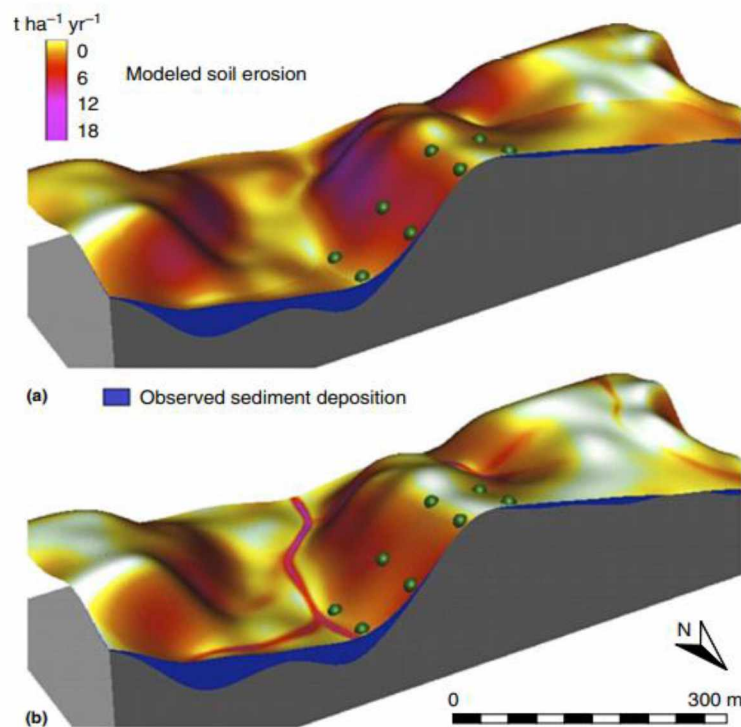
Μια απλούστερη, συνεχής μορφή εξίσωσης για τον υπολογισμό του παράγοντα LS σε ένα σημείο $r = (x, y)$ σε μια πλαγιά λόφου, (Mitasova et al. 1996) είναι:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.09} \right)^n \quad (2.29)$$

Οι εκθέτες m , n εξαρτώνται από τον τύπο διάβρωσης που επικρατεί (επιφανειακή, αυλακωτή) και οι τυπικές τιμές είναι $m=0.4-0.6$ και $n=1.0-1.3$. (Οι εκθέτες m και n ελέγχουν τη σχετική επίδραση του νερού και της κλίσης και

αντανακλούν τους διαφορετικούς τύπους ροής). Η αντικατάσταση του μήκους της κλίσης, που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική διαμόρφωση της μεθόδου RUSLE, από τις ανάντη περιοχές προβλέπει αυξημένη διάβρωση λόγω της συγκεντρωμένης ροής χωρίς να απαιτείται εκ των προτέρων καθορισμός και είσοδος αυτών των θέσεων για το μοντέλο. Για καταστάσεις όπου κυριαρχεί η αυλακωτή διάβρωση αυτές οι παράμετροι ορίζονται συνήθως σε $m = 0.6$ και $n = 1.3$ και όπου επικρατεί επιφανειακή διάβρωση, ορίζονται σε $m = 0.4$ και $n = 1.0$ (Moore and Wilson, 1992).

Η εξίσωση των Mitasova et al. (1996) (Εικόνα 2.4) εξηγεί πληρέστερα την τοπογραφική πολυπλοκότητα λαμβάνοντας υπόψη τόσο την καμπυλότητα του προφίλ (στην κατηφορική κατεύθυνση) όσο και την εφαπτομενική καμπυλότητα (κάθετη προς την κατηφορική κατεύθυνση) (Warren et al., 2000). Η καθαρή διάβρωση ή εναπόθεση εντός ενός στοιχείου πλέγματος υπολογίζεται ως η απόκλιση της ροής ιζημάτων (μεταβολή στην ικανότητα μεταφοράς ιζήματος) προς την κατεύθυνση της ροής.



Εικόνα 2.4: Χωρικό μοτίβο τοπογραφικού παράγοντα διάβρωσης με βάση: (α) flowpath length ($D = RKLSLSCP$), το οποίο δεν εμφανίζει αυξημένη διάβρωση λόγω της συγκλίνουσας ροής του νερού, (β) flow accumulation ($LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.09} \right)^n$) η οποία ενσωματώνει τον αντίκτυπο της σύγκλισης ροής νερού. Η διατομή δείχνει παρατηρούμενο αποτιθέμενο υλικό, υποδεικνύοντας τοποθεσίες όπου αυτοί οι τοπογραφικοί παράγοντες διάβρωσης δεν εφαρμόζονται για μοντελοποίηση μακροπρόθεσμου καθαρού μοτίβου διάβρωσης / εναπόθεσης. Εικόνες βασισμένες σε δεδομένα που παρέχονται από τον καθηγητή Κ. Auerswald, Πανεπιστήμιο Technische Muenchen. (Mitasova et al., 2013).

2.4. Συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της κάλυψης της γης με καλλιέργειες ή με βλάστηση που παρεμποδίζει τη διάβρωση και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Εάν δεν υπάρχει χρήση γης που να λειτουργεί ως προφύλαξη έναντι της διάβρωσης, τότε ο παράγοντας C είναι 1 ενώ για τις υπόλοιπες συνθήκες, είναι χαμηλότερη από 1 και φτάνει στο 0 εάν η διάβρωση αποφευχθεί εντελώς λόγω των χρήσεων γης.

Μεταξύ των παραγόντων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της εδαφικής απώλειας με τη μεθοδολογία RUSLE, ο συντελεστής C ορίζεται ως ένας από τους πιο σημαντικούς. Οι Toy et al. (1999) προέβαλαν δύο λόγους για να εξηγήσουν τη σημασία του συντελεστή:

1. Αντιπροσωπεύει επιφανειακές συνθήκες οι οποίες συχνά είναι εύκολα διαχειρίσιμες και στις οποίες θα μπορούσε να υπάρξει παρέμβαση για τον έλεγχο της διάβρωσης και
2. Οι τιμές κυμαίνονται από σχεδόν 0 έως 1, επηρεάζοντας έντονα το ποσοστό απώλειας εδάφους.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο προτείνεται η επιλογή του παράγοντα C με μεγάλη προσοχή, καθώς μια ακατάλληλη επιλογή τιμής του C μπορεί να προκαλέσει μεγάλα σφάλματα στους υπολογισμούς της διάβρωσης (Karpilo and Toy, 2004). Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές κοινά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό του παράγοντα C.

Η πρώτη προσέγγιση είναι ο υπολογισμός του παράγοντα C με βάση τις επιτόπιες εργασίες και τα πειράματα (Lafren et al., 1985, Weltz et al., 1987, Renard et al., 1997). Αυτή είναι η αρχική μέθοδος του RUSLE και σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, ένας παράγοντας που ονομάζεται λόγος απώλειας εδάφους (SLR) για δεδομένες συνθήκες υπολογίζεται χρησιμοποιώντας 5 διαφορετικούς επιμέρους παράγοντες:

$$SLR=PLU*CC*SC*SR*SM \quad (2.30)$$

Όπου:

C~ SLR (Soil Loss Ratio) είναι ο παράγοντας της εδαφικής απώλειας από την φυτοκάλυψη,

PLU (Prior Land Use) είναι ο παράγοντας της προηγούμενης χρήσης γης,

CC (Canopy Cover) είναι ο παράγοντας της φυτοκάλυψης,
 SC (Surface Cover) είναι ο παράγοντας της επιφανειακής κάλυψης,
 SR (Surface Roughness) είναι ο παράγοντας της εδαφικής τραχύτητας και
 SM (Soil Moisture) είναι ο συντελεστής της υγρασίας του εδάφους.

Όλοι οι παράγοντες έχουν εύρος τιμών από 0 έως 1 και είναι άμεσα ανάλογοι με τον συντελεστή C. Ως αποτέλεσμα, η τιμή SLR υπολογίζεται για διαφορετικές χρονικές περιόδους, όπου οι περισσότεροι παράμετροι θεωρούνται σταθεροί (Renard et al., 1997). Στη συνέχεια, ένας σταθμισμένος μέσος όρος υπολογίζεται για την αντίστοιχη χρονική περίοδο ενώ ο μέσος ετήσιος συντελεστής C καθορίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση που προτείνουν οι Renard et al. (1997):

$$C = \frac{SLR_1 EI_1 + SLR_2 EI_2 + \dots + SLR_n EI_n}{EI_t} \quad (2.31)$$

όπου EI_n n είναι η συνολική ενέργεια καταιγίδας επί τη μέγιστη ένταση 30 λεπτών και EI_t είναι η συνολική ποσότητα EI.

Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί για αυτήν την προσέγγιση καθώς η μέθοδος αυτή βασίζεται σε έναν αριθμό δοκιμών που πραγματοποιούνται σε συλλεγμένα δείγματα και οι συνθήκες που αντιπροσωπεύονται από τα δείγματα θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφες σε όλη τη μονάδα δειγματοληψίας. Επομένως, η περιοχή μελέτης πρέπει να χωριστεί σε διακριτές τάξεις που αντιπροσωπεύονται από πολύγωνα και το αποτέλεσμα της διεξαγόμενης παρατήρησης πρέπει να αποδοθεί στο αντίστοιχο πολύγωνο της μονάδας. Με άλλα λόγια, ανάλογα με την πυκνότητα της δειγματοληψίας, ο συντελεστής C μπορεί να έχει τόσο ανομοιόμορφο αποτέλεσμα και μπορεί να μην αντικατοπτρίζει τη σταδιακή αλλαγή μεταξύ διαφορετικών πολυγώνων, επομένως, διαφορετικών τύπων χρήσης γης. Εκτός αυτού, σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η επίτευξη των απαιτούμενων δεδομένων για την εκτέλεση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο συντελεστής C μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις τεχνικές τηλεπισκόπησης ή μπορεί να ληφθεί από προηγούμενες μελέτες που υποστηρίζονται από την επί τόπου παρατήρηση.

Μία δεύτερη προσέγγιση είναι η χρήση του δείκτη βλάστησης ομαλοποιημένης διαφοράς (NDVI) και είναι η πιο κοινή μέθοδος για την εκτίμηση του συντελεστή C. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μέθοδοι (Gutman and Ignatov, 1998, Van der Knijff et al., 2000) που παρέχουν μια εικόνα για την εμπειρική σχέση μεταξύ του συντελεστή C και

του NDVI. Η κατανόηση αυτής της σχέσης είναι εφαρμόσιμη δεδομένου ότι παράγει το αποτέλεσμα της σύγκρισης των εκτιμώμενων τιμών C σύμφωνα με τους Renard et al. (1997) και των τιμών NDVI για τα ίδια σημεία δειγματοληψίας. Ωστόσο, είναι αμφίβολο πώς το ίδιο το NDVI καλύπτει πλήρως τους επιμέρους παράγοντες του C. Οι τιμές NDVI λαμβάνονται με την αναφορά της περιεκτικότητας της βλάστησης σε χλωροφύλλη. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι αν και αντικατοπτρίζει τον επιμέρους παράγοντα SC της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού C, είναι μια αναμφίβολη τιμή έναντι των υπολοίπων παραγόντων (PLU, CC, SR και SM). Για παράδειγμα, ένα λιβάδι θα δώσει υψηλότερες τιμές NDVI από ένα δάσος. Σε μια τέτοια περίπτωση, εάν αυτές οι τιμές NDVI μετατραπούν σε συντελεστή C, το αποτέλεσμα θα επισημαίνει ότι μια δασική περιοχή είναι πιο επιρρεπής σε διάβρωση από μια περιοχή λιβαδιών κάτι που δεν ισχύει. Αυτός ο εννοιολογικός περιορισμός είναι ο λόγος που οδηγεί τη μέθοδο NDVI -C σε λανθασμένα αποτελέσματα.

Όταν οι τιμές C δεν μπορούν να προσδιοριστούν από καμία από τις παραπάνω μεθόδους, μπορούν να ληφθούν από τη βιβλιογραφία ως τρίτη προσέγγιση. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν αντικατοπτρίζει τη σταδιακή αλλαγή μέσα σε μια τάξη, και επιπλέον, οι προτεινόμενες τιμές βιβλιογραφίας για τις παρόμοιες συνθήκες δείχνουν υψηλή ποικιλία. Σχεδόν κανένας υπολογισμός του συντελεστή C που βασίζεται σε μετρήσεις πεδίου δεν έχει πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα. Αυτή η έλλειψη πληροφοριών οδήγησε στη χρήση των παραγόντων C που ελήφθησαν από δημοσιευμένες βιβλιογραφίες άλλων χωρών και από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Επομένως, η αναζήτηση αυτή του συντελεστή C από τιμές συντελεστών που ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές, περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες, ακόμη και αν οι καθορισμένες κατηγορίες χρήσης γης είναι ίδιες, μπορεί να καταλήξουν σε κάποια επιπλέον αβεβαιότητα σχετικά με τα αποτελέσματα.

Η τέταρτη προσέγγιση βασίζεται σε μετρηθείσες τιμές απόδοσης ιζημάτων ή διάβρωσης εδάφους σε κλίμακα οικοπέδου ή λεκάνης απορροής (Cinnirella et al., 1998). Επομένως, εάν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις δεδομένων εισόδου σχετικά με τους άλλους παράγοντες του μοντέλου RUSLE, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο συντελεστής κάλυψης της γης για κάθε συμβάν ακολουθώντας αυτή την αναδρομική προσέγγιση.

2.5 Συντελεστής ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P

Ο συντελεστής P εκφράζει τον λόγο της εδαφικής απώλειας μιας περιοχής όπου χρησιμοποιείται κάποια πρακτική ενίσχυσης έναντι της εδαφικής απώλειας προς την εδαφική απώλεια της περιοχής χωρίς την πρακτική ενίσχυσης.

Ο συντελεστής αυτός επιδεικνύει τις υποστηρικτικές πρακτικές διατήρησης του εδάφους Soil and Water Conservation (SWC). Τα μέτρα SWC στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη συνδεσιμότητα νερού και ιζήματος και συνεπώς στη διαδικασία διάβρωσης. Δυνητικά επιβραδύνουν την παραγωγή απορροής, μειώνουν την αποκόλληση σωματιδίων εδάφους και τη μεταφορά ιζημάτων και στη συνέχεια, ενισχύουν την υγρασία του εδάφους και τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών. Για τον μετριασμό της διάβρωσης και της υποβάθμισης της γης, πολλές αναπτυσσόμενες χώρες έχουν αναπτύξει εθνικά προγράμματα SWC και επέφεραν σχετική βελτίωση στη διάβρωση.

Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από 0 έως 1 και είναι ένας αδιάστατος αριθμός. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πρακτικές διατήρησης του εδάφους η τιμή του συντελεστή ισούται με 1, σε παράλληλες με τις ισοϋψείς καλλιέργειες οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.6~0.9, για λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών από 0.3~0.45, ενώ για αναβαθμίδες κάθετες στην κλίση του εδάφους και σειρές αναχωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.12~0.18. Η τιμή 0 είναι καθαρά θεωρητική γιατί πρακτικά το φαινόμενο της εδαφικής διάβρωσης μπορεί να μειωθεί αλλά όχι να αποτραπεί πλήρως (Παναγούλια, 2008).

3. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει στη Θεσσαλία, στο ανατολικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας της Λάρισας. Πιο συγκεκριμένα η λεκάνη απορροής του ρέματος Μπουρμπουλήθρα βρίσκεται στη Δημοτική Ενότητα της Μελιβοίας στον Δήμο Αγίας της τοπικής κοινότητας της Σκήτης. Η έκταση της λεκάνης καλύπτει 28.2 km², έχει επίμηκες σχήμα και ξεκινάει από τις κορυφές του Μαυροβουνίου και καταλήγει στα παράλια του παραθαλάσσιου χωριού Αγιοκάμπος.

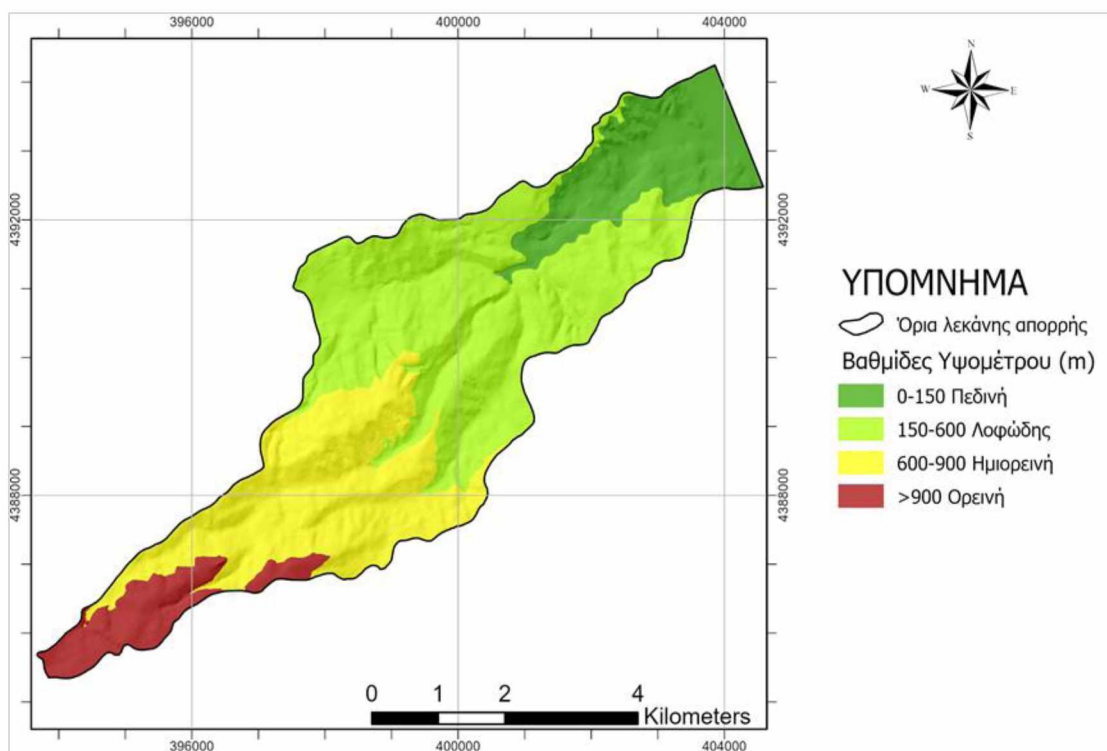
Με βάση την τελευταία απογραφή του 2011 ο πληθυσμός της περιοχής για το χωριό του Αγιοκάμπου ανέρχεται σε 345 κατοίκους που όμως είναι πολλαπλάσιος τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της σημαντικής τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής, για το χωριό Σκήτη σε 171 κατοίκους ενώ για το χωριό Πολυδένδρι σε 36 κατοίκους.

Η οικονομική δραστηριότητα των κατοίκων της περιοχής προέρχεται κυρίως από αγροκτηνοτροφικές και τουριστικές δραστηριότητες. Στην ημιορεινή ζώνη υπάρχουν καλλιέργειες καστανιάς, μηλιάς και κερασιάς. Η παραλιακή ζώνη αποτελείται από μικρό πλάτος καλλιεργήσιμης εδαφικής λωρίδας. Εδώ υπάρχουν μικροϊδιοκτησίες, οι οποίες καλλιεργούνται κυρίως με ελιές, μηλιές, αχλαδιές και σε μικρότερη έκταση με κερασιές, καρυδιές, ροδακινιές κλπ. Μία επίσης δραστηριότητα των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής είναι και η αλιεία. Ο αριθμός των σκαφών της ευρύτερης περιοχής ανέρχεται σε 51 και είναι μεγέθους 4 ως 6 μέτρα. Οι αλιευμένες ποσότητες ψαριών είναι 83.530 κιλά ετησίως.

3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Η λεκάνη απορροής του υδατορρέματος Μπουρμπουλήθρα αναπτύσσεται στα βορειοανατολικά πρανή του Μαυροβουνίου. Το χαμηλότερο σημείο της λεκάνης απορροής είναι το ύψος της θάλασσας στην περιοχή της παραλίας του Αγιοκάμπου ενώ το υψηλότερο σημείο βρίσκεται στην κορυφή Σκούτλη Μαυροβουνίου με υψόμετρο 1052.3 m. Για την ταξινόμηση του αναγλύφου της λεκάνης απορροής του υδατορρέματος Μπουρμπουλήθρα χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM) υψηλής ανάλυσης 5m της περιοχής που προέκυψε από τη δημιουργία μωσαϊκού επιμέρους φύλλων κλίμακας 1:5.000 που χορηγήθηκαν από το Ελληνικό

Κτηματολόγιο. Με βάση την ταξινόμηση Dikau (1989) προέκυψε ο χάρτης της εικόνας 3.1. Για τη δημιουργία του μορφολογικού αναγλύφου της περιοχής σημαντικό ρόλο, εκτός από τις γεωλογικές και τις τεκτονικές συνθήκες, διαδραμάτισε η διαβρωτική δράση του επιφανειακού νερού από το παρελθόν έως και σήμερα. Επιβεβαίωση της διαβρωτικής αυτής δράσης του νερού κατά το παρελθόν αποτελεί η ύπαρξη των κώνων κορημάτων που αποτέθηκαν στα χαμηλά σημεία της περιοχής αμέσως μετά από το όριο πεδινής και ημιορεινής περιοχής. Το υλικό αυτό προέκυψε από την αποσάθρωση υγιών πετρωμάτων το οποίο μεταφέρθηκε με τη δράση ρεμάτων στα σημεία αυτά που αποτελούσαν τμήματα περιθωρίων της ζώνης απόθεσης. Με τον ίδιο τρόπο προέκυψαν και οι χερσαίοι-λιμναίοι σχηματισμοί σε χαμηλότερα σημεία της πεδινής περιοχής που κατά το παρελθόν αποτελούσε την κύρια ζώνη απόθεσης.



Εικόνα 3.1: Χάρτης βαθμίδων υψομέτρου της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

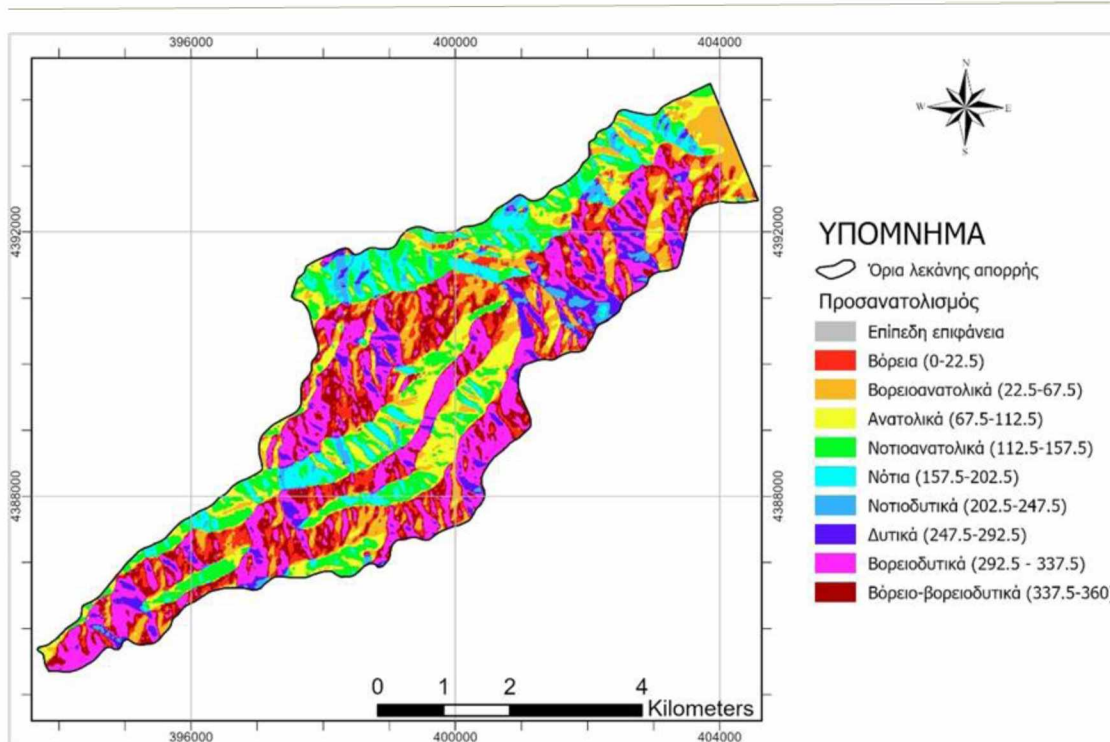
Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως λοφώδης- ημιορεινή όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 που εμφανίζει τις βαθμίδες του υψομέτρου της υδρολογικής λεκάνης σε km² και σε ποσοστά επί τοις εκατό. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής προέκυψε ίσο με 471.7m.

Πίνακας 3.1: Κατανομή σε km² και σε ποσοστά επί τοις εκατό των βαθμίδων του υψομέτρου της υδρολογικής λεκάνης.

Βαθμίδες υψομέτρου (m)	Χαρακτήρας ανάγλυφου	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
0-150	Πεδινή	4.42	16.08
150-600	Λοφώδης	13.03	46.23
600-900	Ημιορεινή	8.35	29.63
>900	Ορεινή	2.27	8.06

Το μορφολογικό ανάγλυφο είναι σύνθετο με την ενεργή τεκτονική να παίζει καθοριστικό ρόλο. Οι συνθήκες αυτές έχουν διαμορφώσει τις διευθύνσεις κλίσεων των πρανών που απεικονίζονται στον χάρτη της εικόνας 3.2, ο οποίος προέκυψε με κατάλληλη επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS PRO. Όπως φαίνεται από τον χάρτη η επικρατέστερη διεύθυνση είναι η βορειοδυτική (292.5- 337.5) ενώ τη μικρότερη συμμετοχή έχουν οι νότιο και νοτιοδυτικές διευθύνσεις.

Ο προσανατολισμός των κλίσεων φαίνεται να παίζει έμμεσο ρόλο στη διαδικασία της διάβρωσης αφού καθορίζει τη θέση της ομβροπλευράς που δέχεται και τα μεγαλύτερα ύψη βροχής και ομβροσκιάς καθώς και την έκθεση στις επικρατούσες συνθήκες ηλιοφάνειας και ανέμου δηλαδή τη διάρκεια έκθεσης στον ήλιο, τη διατήρηση της υγρασίας και την ένταση των κατακρημνισμάτων. Καθοριστικό ρόλο επίσης έχει ο προσανατολισμός κλίσεων στο είδος της βλάστησης που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή εξαιτίας των καιρικών αυτών συνθηκών. Στον πίνακα 3.2 εμφανίζεται ο προσανατολισμός του αναγλύφου με τις αντίστοιχες επιφάνειες και ποσοστά επιφάνειας της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

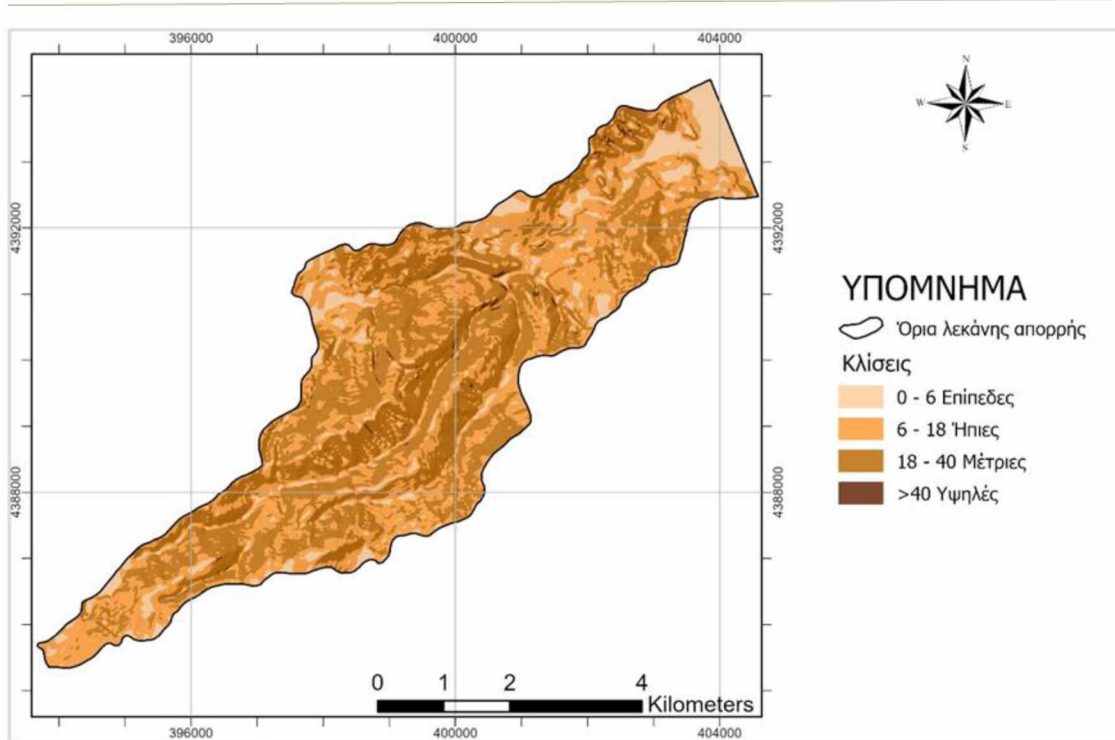


Εικόνα 3.2: Χάρτης προσανατολισμού αναγλύφου στην υδρολογική λεκάνη του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Πίνακας 3.2: Προσανατολισμός του αναγλύφου με τις αντίστοιχες επιφάνειες και ποσοστά επιφάνειας της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Διεύθυνση Επιφανειών (μοίρες)	Χαρακτηρισμός επιφανειών	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
0	Επίπεδη	0.001	0.001
0-22.5	Βόρεια	2.83	10.09
22.5-67.5	Βορειοανατολική	3.59	13.13
67.5-112.5	Ανατολική	3.42	12.27
112.5-157.5	Νοτιοανατολική	3.78	13.53
157.5-202.5	Νότια	2.19	7.77
202.5-247.5	Νοτιοδυτικά	0.84	3
247.5-292.5	Δυτικά	1.73	6.13
292.5-337.5	βορειοδυτικά	5.88	20.95
337.5-360	Βόρειο-βορειοδυτικά	3.66	13.01

Στο πλαίσιο της γεωμορφολογικής περιγραφής αναλύονται επίσης οι μορφολογικές κλίσεις καθώς είναι μείζονος σημασίας στην εξέλιξη της διάβρωσης. Όπως φαίνεται στον χάρτη της εικόνας 3.3 και στον πίνακα 3.3 το μεγαλύτερο ποσοστό δηλαδή το 47.4% των κλίσεων είναι μέτριες κλίσεις καθώς και ήπιες κλίσεις με ποσοστό 40.5%.



Εικόνα 3.3: Χάρτης κλίσεων στην υδρολογική λεκάνη του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

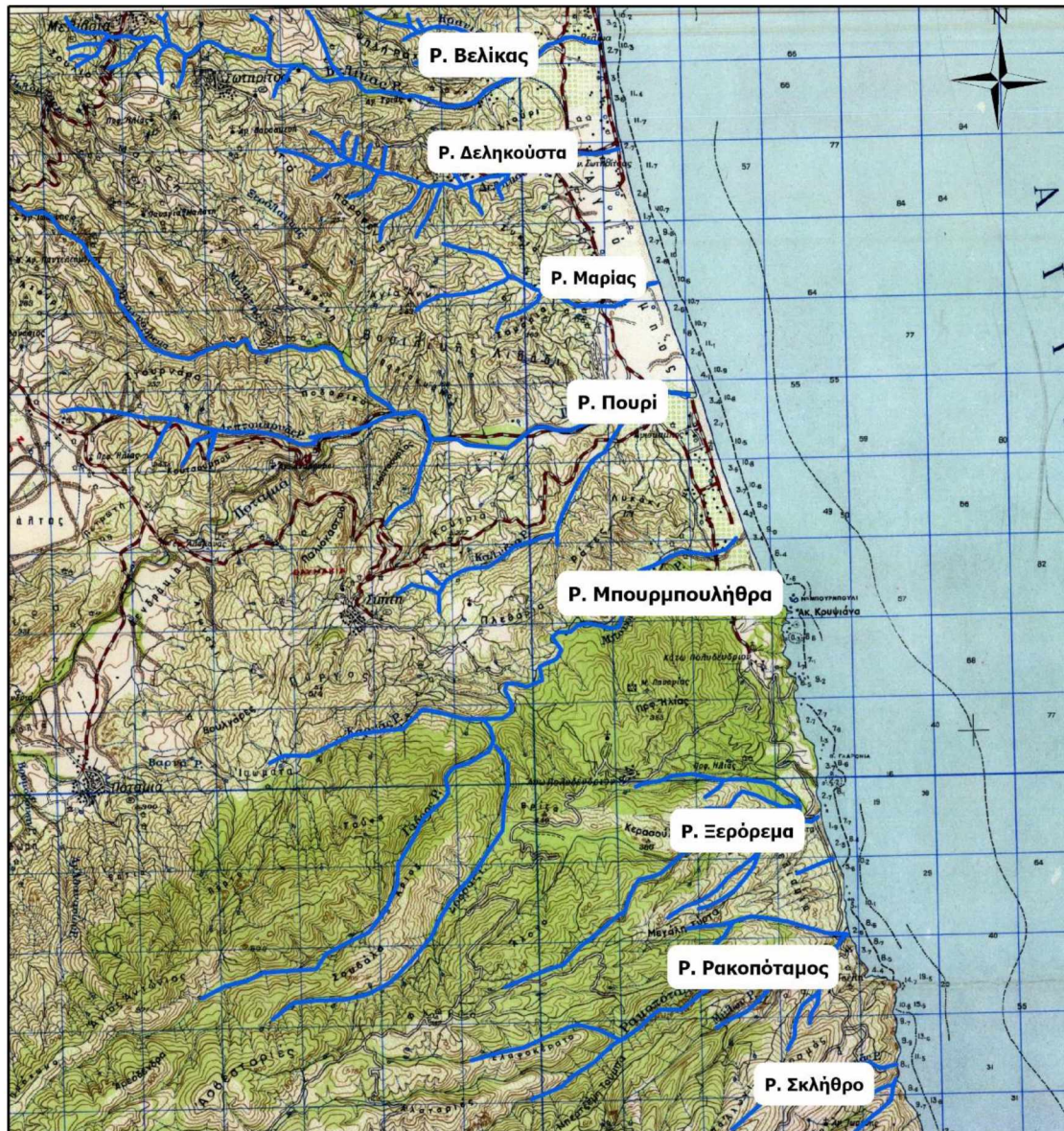
Πίνακας 3.3: Χαρακτηρισμός των κλίσεων με τις αντίστοιχες επιφάνειες και ποσοστά επιφάνειας της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Χαρακτηρισμός κλίσεων	Κλίσεις (μοίρες)	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
Επίπεδες	0-6	3.12	11.6
Ήπιες	6-18	11.37	40.5
Μέτριες	18-40	13.32	47.4
Υψηλές	>40	0.12	0.45

3.2. Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό υδατορρευμάτων, τα οποία εκβάλουν στο θαλάσσιο μέτωπο του Αιγαίου πελάγους που χαρακτηρίζεται από την εκτεταμένη και πλατιά αμμώδη παραλία της πεδινής ζώνης με ποικιλία στο ανάπτυγμα των ακτών που δημιουργούν ενδιάμεσους μικρούς όρμους. Στα πιο σημαντικά υδατορρέυματα της περιοχής ανήκουν το ρέμα Πουρί με μεγάλη υδρολογική σημασία που εκβάλει μεταξύ Αγιοκάμπου και Σωτηρίτσας, το ρέμα Βελίκας που διασχίζει το χωριό Μελιβοία και καταλήγει στο χωριό Βελίκα, το ρέμα

Δεληκούστα που διέρχεται από την περιοχή της Σωτηρίτσας, το ρέμα Μπουρμπουλήθρα που διέρχεται από το νότιο τμήμα της περιοχής του Αγιοκάμπου και το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία, τα ρέματα Ξερόρεμα και Ρακοπόταμος στο ενδιάμεσο των περιοχών του κάτω Πολυδενδρίου και Σκλήθρου καθώς και το ρέμα Σκλήθρο προς τον νότο (Εικόνα 3.4). Στον πίνακα 3.4 αναφέρονται τα κύρια ρέματα της περιοχής.

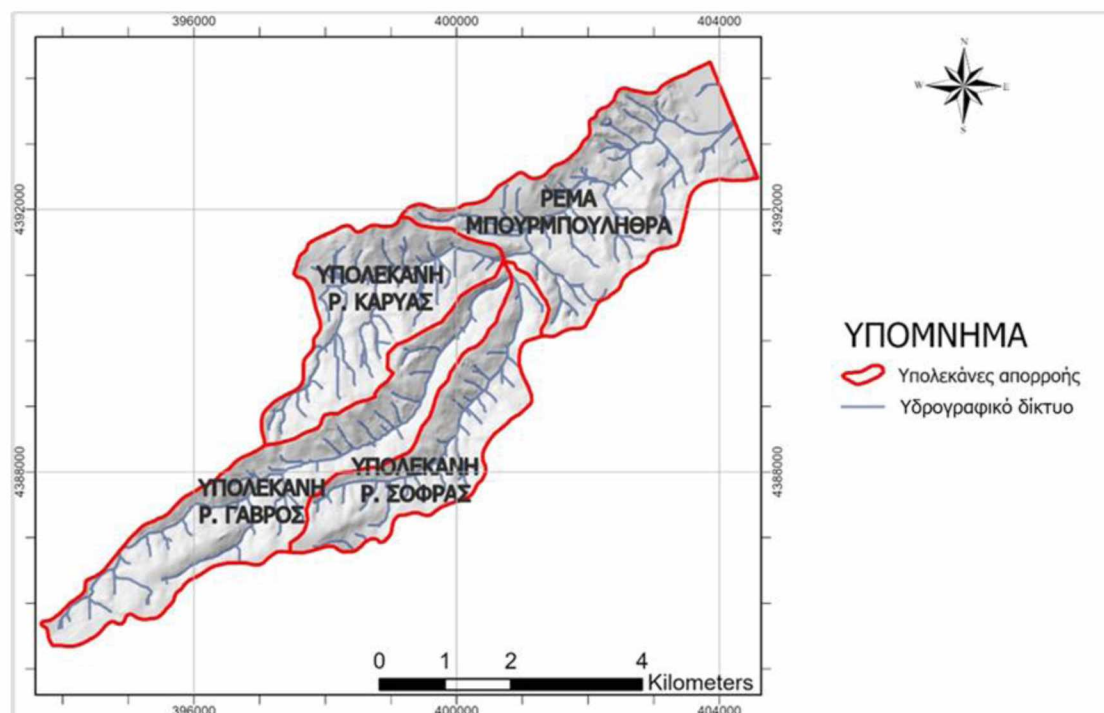


Εικόνα 3.4: Χάρτης με τα πιο σημαντικά υδατορρέυματα της παράκτιας περιοχής του δήμου Αγίας του νομού Λάρισας.

Πίνακας 3.4: Κύρια ρέματα, λεκάνες απορροής και σχέση με τους οικισμούς στην περιοχή.

Όνομασία ρέματος	Λεκάνη km ²	Οικισμός κοντά στην κοίτη
Ρ. Καλυψώ	12.03	Κόκκινο Νερό
Ρ. Κακόσκαλα	9.40	Κουτσουπιά
Ρ. Μέγα Ρέμα	24.65	Παλιουριά
Ρ. Μαυρόλακκος	10.00	Βελίκα
Ρ. Βελίκας	11.85	Βελίκα
Ρ. Δεληκούστα	3.52	Βελίκα- Κάτω Σωτηρίτσα
Ρ. Μαρίας	2.98	Κάτω Σωτηρίτσα
Ρ. Πουρί	120.00	Κάτω Σωτηρίτσα- Αγιόκαμπος
Ρ. Μπουρμπουλήθρα	28.2	Αγιόκαμπος
Ρ. Ξερόρεμα	5.75	Πολυδενδρίου
Ρ. Ρακοπόταμος	34.16	Ρακοπόταμος
Ρ. Σκλήθρου	34.16	Σκλήθρο

Η έκταση της λεκάνης απορροής μετρήθηκε ίση με 28.2 km² ενώ το μήκος του κυρίως υδατορρέυματος είναι 5.21 km. Στο κύριο υδατόρρευμα καταλήγουν τρία μικρότερα υδατορρέυματα, το ρέμα Καρυάς δημιουργώντας μία υπολεκάνη ίση με 5.88 km², το ρέμα Γάβρος με υπολεκάνη 8.39 km² και το ρέμα Σοφράς με υπολεκάνη 5.20 km² (Εικόνα 3.5).

**Εικόνα 3.5:** Χάρτης λεκανών και υπολεκανών του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα με την αντίστοιχη έκτασή τους.

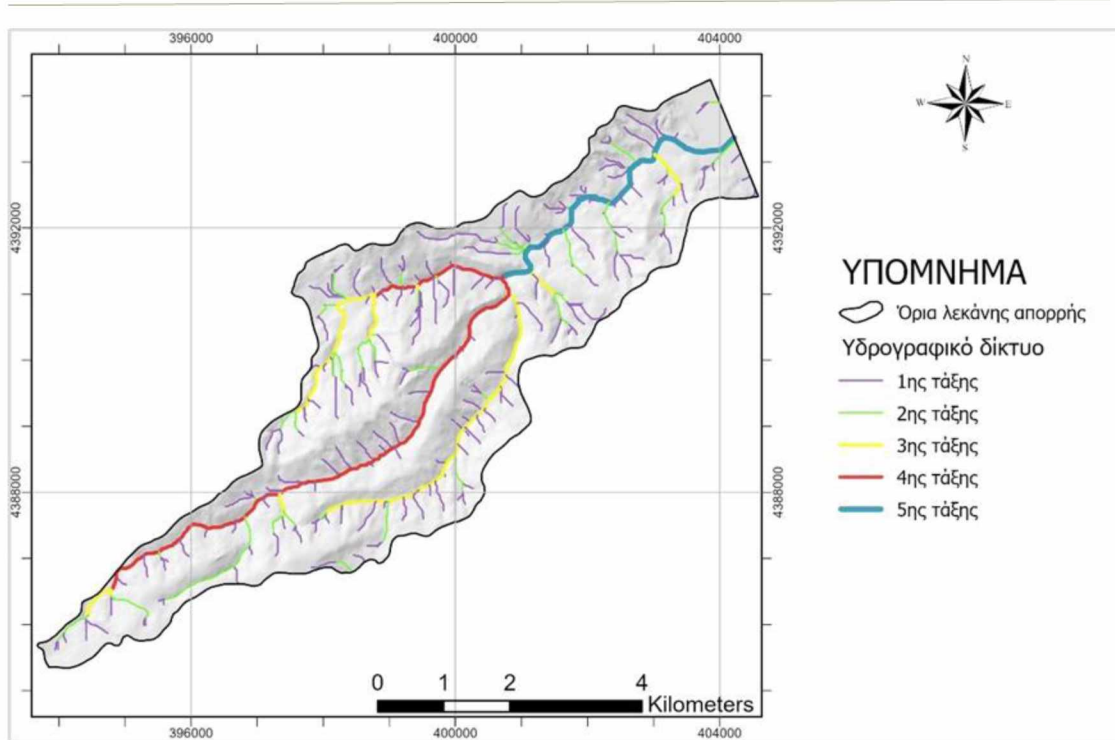
Το υδατόρρευμα Μπουρμπουλήθρα αποτελεί ένα εξωρροϊκό υδατόρρευμα (καταλήγει στη θάλασσα) με ρηξιγενή κλιμακωτή μορφή στα ανώτερα τμήματα της λεκάνης μέσα στους γνευσιοσχιστόλιθους και στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους της περιοχής ακολουθώντας τις επιφάνειες των ρηγμάτων ενώ προς τα κατάντη τμήματά του αλλάζει βαθμιαία σε δενδριτική μορφή και μέχρι την εκβολή του (Εικόνα 3.5). Τα ρέματα, απορρέουν από τα υψώματα που περιβάλλουν τη λεκάνη απορροής και δεν παρουσιάζουν μόνιμη ροή ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο παρατηρείται έντονη χειμαρρώδης ροή με έντονα μεταβαλλόμενη ροή δημιουργώντας εκτεταμένες κοίτες πλημμυρών εξαιτίας της μεγιστοποίησης της παροχής τους.

Με την κατάλληλη επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS PRO αναλύθηκε το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής και προέκυψε ο πίνακας 3.5.

Πίνακας 3.5: Κατανομή υδρογραφικού δικτύου στην υδρολογική λεκάνη υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα κατά Strahler.

Τάξεις υδρογραφικού δικτύου	Αριθμός κλάδων	Μήκος κλάδων (km)
1ης	222	54.59
2ης	43	15.90
3ης	12	14.81
4ης	2	8.65
5ης	1	5.12

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.5 και τον χάρτη της εικόνας 3.6 το υδρογραφικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα πλούσιο και φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία της διάβρωσης. Είναι ατελές καθώς παρουσιάζει μεγάλο αριθμό ρεμάτων 1^{ης} τάξης σε σχέση με τα 2^{ης} τάξης και 3^{ης} σε σχέση με τα 4^{ης} και 5^{ης} γεγονός που προέκυψε μετά από την εφαρμογή του 1^{ου} και 2^{ου} νόμου του Horton (Horton, 1945) σχετικά με τον λόγο διακλαδώσεων και του λόγου του μήκους των κλάδων, όπου ο ιδανικός αριθμός των 1^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} τάξης των κλάδων και του μήκους τους, διαφέρει από τον πραγματικό αριθμό εξαιτίας κυρίως της ρηξιγενούς τεκτονικής. Το κύριο χαρακτηριστικό των ρεμάτων είναι η εντατική και σε βάθος διάβρωση που επηρεάζει την κοίτη των ρεμάτων και τα πρηνή δημιουργώντας μεγάλες ιζηματοπαροχές (Charizopoulos et al., 2019, Dalaris et al., 2013).



Εικόνα 3.6: Χάρτης του υδρογραφικού δικτύου και ταξινόμηση κατά Strahler του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα με τον αντίστοιχο πλήθος και μήκος κλάδων.

3.3. Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι ιδιαίτερης σημασίας στην παρούσα εργασία καθώς σε αυτά στηρίχτηκε κυρίως η εκτίμηση του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K .

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της μελετούμενης περιοχής αποτελούν τμήμα της Πελαγονικής ζώνης. Με βάση τις σύγχρονες θεωρίες γεωλογικής εξέλιξης η Πελαγονική είναι ένα ηπειρωτικό τέμαχος της Κιμμερικής ηπείρου που αποσπάστηκε από την Gondwana, εκατέρωθεν του οποίου αναπτύχθηκαν δύο ωκεάνιες περιοχές, η Παλαιο-Τηθύς (ζώνη Αξιού) και η Νέο-Τηθύς (Υποπελαγονική-Πίνδου). Η Πελαγονική έχει την έννοια του υβώματος που χώριζε την αύλακα της Αλμωπίας στα ανατολικά και την αύλακα της Πίνδου στα δυτικά. Η υποθαλάσσια αυτή ράχη διακοπτόταν από δύο διαύλους (βυθίσματα) στις περιοχές της Κοζάνης και Κεντρικής Εύβοιας δια μέσω του οποίου επικοινωνούσαν οι δύο αύλακες. Στις δύο περιοχές αυτές διατηρούνται οι μάζες των οφιολίθων και των συνοδών ιζημάτων που προήλθαν με επώθηση από τους δύο ωκεάνιους χώρους (Μουντράκης, 1985).

Η ζώνη της Πελαγονικής με διεύθυνση ΒΒΔ- ΝΝΑ εκτείνεται από τη Γιουγκοσλαβία προς τους Ελληνικούς ορεινούς όγκους του Βόρα, του Βερμίου, των

Περιών, του Ολύμπου, του Πηλίου, και της βόρειας Εύβοιας, στη συνέχεια κάμπτεται προς τις Σποράδες και τα νησιά Σκιάθος, Σκόπελος και Σκύρος. Πιθανή προέκταση της Πελαγονικής στο Αιγαίο είναι τα νησιά Οινούσες από όπου η ζώνη περνάει στη Μικρά Ασία.

Πιο συγκεκριμένα η περιοχή ανήκει στην ενότητα της Όσσας η οποία είναι επωθημένη στη σειρά του Ολύμπου ενώ πάνω τους βρίσκεται επωθημένη η Πελαγονική ζώνη. Στην ενότητα Όσσα ανήκει η σειρά Αμπελάκια με κύριο χαρακτηριστικό της τη μεταμόρφωση υψηλής πίεσης που εκφράζεται με την πλούσια παρουσία γλαυκοφανή στα πετρώματα της.

Όπως φαίνεται από τον χάρτη της εικόνας 3.7 με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της λεκάνης απορροής που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση του γεωλογικού χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) της περιοχής φ.χ. Αγιά- Αγιά Παναγιάς οι σχηματισμοί που εμφανίζονται από τα παλαιότερης ηλικίας προς τα νεότερης είναι οι εξής:

(Α) ΠΡΟ-ΤΡΙΑΔΙΚΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Κρυσταλλικό υπόβαθρο της Πελαγονικής

Γνεύσιοι και γνευσιοσχιστόλιθοι (Pz.gn.sch) (Παλαιοζωικό υπόβαθρο- Προ λιθανθρακοφόρο): Καταλαμβάνει το 25.7% της μελετώμενης λεκάνης απορροής. Αποτελείται από διμαρμαρυγιακούς ορθο- και παραγνεύσιους, μερικές φορές οφθαλμώδεις με οφθαλμούς από αστρίους και χαλαζία και γνευσιοσχιστόλιθους με παρεμβολές αμφιβολιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών.

(Β) ΑΛΠΙΚΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Σύστημα πολυφασικά μεταμορφωμένων πετρωμάτων

Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι (Pz_n-T_{i-m}-sch-mi) και μάρμαρα με σιπολίνες (Pz_n-im,mg,sp): Καταλαμβάνει το 30.7% της λεκάνης και είναι Νεοπαλαιοζωικού Κάτω-Μέσω Τριαδικού όρθο- και άρα- προέλευσης: εμφανίζονται στα ανάντη τμήματα της λεκάνης απορροής και το πάχος τους μπορεί να ξεπερνάει και τα 800 μέτρα. Υπέγκεινται επικλυσιογενώς του κρυσταλλικού υποβάθρου. Τα πετρώματα αυτά έχουν υποστεί μία μεταμόρφωση στην πρασινοσχιστολιθική φάση που έλαβε χώρα μεταξύ Ανωιουρασικού- Κάτω Κρητιδικού, μία μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων- χαμηλών

θερμοκρασιών γλαυκοφανιτικής φάσης Κρητιδικό- Ηώκαινο και μια επιζωνική μεταμόρφωση Μέσο- Ηώκαινο. Στους σχηματισμούς αυτούς επικρατούν οι μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι (P_{Zn}-T_{i-m}-sch-mi). Πολλές φορές στους σχηματισμούς αυτούς απαντούν ενστρώσεις αρδοκρυσταλλικών μαρμάρων και σιπολινών (P_{Zn-im,mg,sp}).

Προ-άνω Κρητιδικού Ηωελληνικό τεκτονικό κάλυμμα

Μεταμορφωμένα ιζηματογενούς προέλευσης πετρώματα: σχιστόλιθοι (sh): Καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό τμήμα της λεκάνης, περίπου το 3%, και είναι σχηματισμός που αποτελεί τη βάση του Προ-άνω Κρητιδικού Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος και αποτελείται από μεταμορφωμένα ιζηματογενούς προέλευσης πετρώματα ενώ κατά θέσεις υπερβαίνει τα 150m. Αντιπροσωπεύονται από πολλούς τύπους σχιστολιθικών πετρωμάτων κυρίως μαρμαρυγικούς- χλωριτικούς και χαλαζιακούς-χλωριτικούς-μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους.

Μεταμορφωμένα βασικά οφιολιθικά πετρώματα (Ab.pr): Καταλαμβάνει το 24% της λεκάνης απορροής και είναι μεταμορφωμένα βασικά οφιολιθικά πετρώματα του Προ-άνω Κρητιδικού Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος. Τα πετρώματα αυτά αντιπροσωπεύονται κυρίως από πράσινους-καστανοπράσινους αμφιβολίτες, και πρασινίτες που κατά θέσεις περιέχουν γλαυκοφάνη.

Σερπεντινίτες (σ): Καταλαμβάνει μόλις το 1.3% της λεκάνης και είναι σχηματισμός του Προ-άνω Κρητιδικού Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος που αποτελείται από σερπεντινίτες. Βρίσκεται στα ανώτερα μέλη του καλύμματος ενώ το πάχος του δεν υπερβαίνει τα 150m. Είναι πετρώματα βαθυπράσινου μέχρι καστανοπράσινου χρώματος σερπεντινίτη όπου μέσα τους βρίσκονται διάσπαρτοι κρύσταλλοι χρωμίτη και μαγνητίτη ενώ κατά θέσεις μπορεί να περιέχουν αμίαντο και τάλκη

Σχηματισμοί Πελαγονικής ζώνης

Μάρμαρα Αγιάς (Ks.mg): Αποτελεί σχηματισμό της Πελαγονικής ζώνης, και καταλαμβάνουν το 4.5% της λεκάνης. Εμφανίζονται υπερκείμενα επικλυσιογενώς των σχηματισμών του Προ-Ανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος. Είναι τεφρόλευκα κατά θέσεις λευκά μεσοπαχυστρωματώδη εξελισσόμενα προς τα πάνω σε άστρωτα,

έντονα καρστικοποιημένα με παρεμβολές κρυσταλλικών δολομιτών. Η ηλικία τους είναι Ανώτερου Κρητιδικού.

(Γ) ΜΕΤΑΛΠΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

Νεοτριτογενές

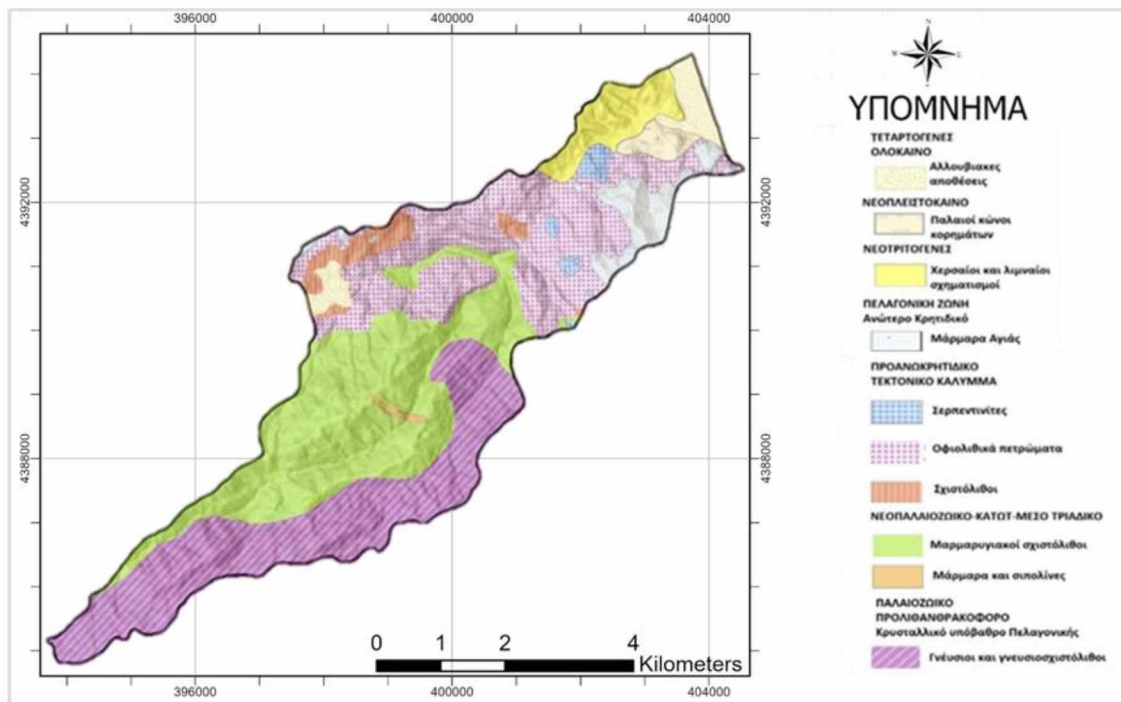
Χερσαίοι και λιμναίοι σχηματισμοί (Ten): Αυτοί οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν το 5% της λεκάνης και αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων μαργών, κροκαλολατυποπαγών (με στοιχεία μικρού έως μεσαίου μεγέθους, συγκολλημένα με συνδετικό κυρίως αργιλικό υλικό) και μαργαϊκών- τραβερινοειδών ασβεστολίθων. Το πάχος τους στην περιοχή υπερβαίνει τα 300m.

Τεταρτογενές

Παλαιοί κώνοι κορημάτων (Ptn-cs): Οι σχηματισμοί αυτοί καταλαμβάνουν το 1.6% της λεκάνης και αποτελούνται από αδρομερή υλικά μαζί με κροκαλολατύπες ποικίλου μεγέθους, συγκολλημένα κατά κανόνα με ανθρακική ύλη. Αποτελούν παλαιούς κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα και υλικά αναβαθμίδων με ύψος αναβαθμίδων περίπου 20m.

Αλλουβιακές αποθέσεις (Al):Καταλαμβάνουν το 3.5% της λεκάνης απορροής και είναι Τεταρτογενείς- Ολόκαινου αλλουβιακές αποθέσεις με ανοικτότεφρα έως καστανότεφρα ασύνδετα υλικά από αργίλους, άμμους και κροκαλολατύπες που αποτέθηκαν σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και σε κοιλάδες ανοικτές προς τη θάλασσα. Στις παρυφές των λεκανών αυτών τα υλικά είναι περισσότερο αδρομερή, ενώ προς το κέντρο γίνονται βαθμιαία λεπτομερέστερα.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.6 στη λεκάνη κυριαρχούν οι εμφανίσεις των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, των γενεύσιων-γενευσιοσχιστόλιθων καθώς και των οφιολίθων.



Εικόνα 3.7: Χάρτης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της λεκάνης απορροής που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση του γεωλογικού χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) της περιοχής φ.χ. Αγιά- Αγιά Παναγιάς.

Πίνακας 3.6: Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Γεωλογικοί σχηματισμοί	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
Αλλουβιακές αποθέσεις	1.01	3.58
Γνέυσοι-Γνευσιοσχιστόλιθοι	7.25	25.75
Κώνοι κορημάτων και υλικά αναβαθμίδων χειμάρρων	0.45	1.62
Μάρμαρα Αγιάς	1.28	4.54
Μάρμαρα και Σιπολίτες	0.11	0.37
Μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι	8.65	30.74
Οφιολιθικά πετρώματα	6.77	24.06
Σερπεντινίτες	0.37	1.32
Σχιστόλιθοι	0.83	2.95
Χερσαίοι- λιμναίοι σχηματισμοί (μάργες, κροκαλολατυποπαγή)	1.43	5.07

3.4 Υδρομετεωρολογικά- κλιματικά χαρακτηριστικά περιοχής

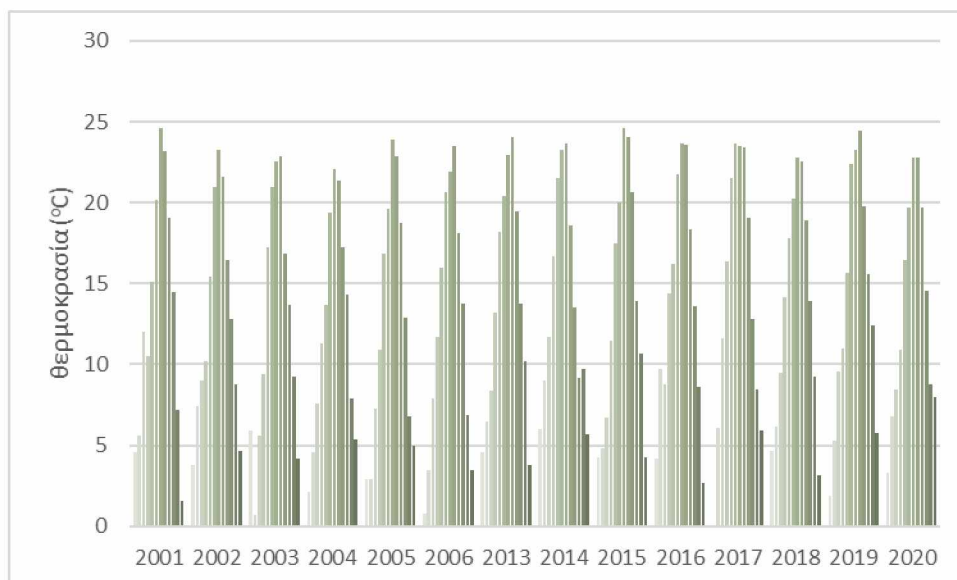
Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως τυπικό μεσογειακό, ενώ παρατηρείται μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ του πολύ ξηρού και θερμού καλοκαιριού και του ήπιου χειμώνα στην περιοχή. Η κατανομή της βροχής στην Ελλάδα εμφανίζει μεγάλες διαφορές εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης, των υψηλών οροσειρών που διατρέχουν τη χώρα μας κατά πολλές διευθύνσεις, καθώς και της εισχώρησής της εντός της θάλασσας, ενώ σε όλη τη χώρα επικρατεί το Μεσογειακό βροχομετρικό σύστημα. Οι μεγάλες οροσειρές της χώρας μας, που διασχίζουν την ελληνική χερσόνησο από ΒΒΔ προς ΝΝΑ, εκτείνονται σχεδόν κάθετα προς την ανατολική κίνηση των κυκλωνικών συστημάτων. Αυτές οι οροσειρές διαιρούν τη χώρα μας στα προσήνεμα και πολυόμβρα δυτικά διαμερίσματα και στα υπήνεμα και ομβροσκιερά ανατολικά. Ωστόσο, στην περιοχή μας και σε όλη την οροσειρά της Όσσας, του Ολύμπου, του Πηλίου και της Εύβοιας δημιουργείται μια δευτερεύουσα εικόνα ομβροσκιάς, η οποία στην περίπτωση αυτή εκδηλώνεται στα δυτικά των οροσειρών, ενώ η ομβροπλευρά αναπτύσσεται στα ανατολικά που βρίσκεται και η υπό μελέτη περιοχή (Μπαλαφούτης, 1988).

Η καταγραφή μετεωρολογικών στοιχείων, θα πρέπει να καλύπτει μια χρονική περίοδο τόσο όση θα είναι ικανή να μας δώσει επαρκείς πληροφορίες και περιγραφές για κάθε μετεωρολογικό στοιχείο και να μπορεί να καλύψει τις μεταβολές του στοιχείου αυτού μέσα στον χρόνο (Αρσένη-Παπαδημητρίου, 2002). Κοντά στη μελετούμενη περιοχή δεν υπάρχει εγκατεστημένος Μετεωρολογικός Σταθμός, για να μπορέσουμε με ασφάλεια να εξάγουμε κάποια ακριβή συμπεράσματα για τις τοπικές και κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Για την απεικόνιση των κλιματικών συνθηκών λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία του γειτονικού μετεωρολογικού σταθμού της Αγιάς ως τα πιο επαρκή. Στη συνέχεια, αναλύονται η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις και οι άνεμοι της υπό μελέτης περιοχής.

A. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία θεωρείται από τα βασικότερα κλιματικά στοιχεία, τα οποία συντελούν στη διαμόρφωση του κλίματος της περιοχής. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό ως προς τον ορίζοντα, τον κατακόρυφο διαμερισμό της, τη γειτνίαση με τη θάλασσα και άλλους δευτερεύοντες παράγοντες.

Έχοντας υπόψη τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Αγιάς και εφαρμόζοντας την καθ' ύψος αναλογική αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας προς τα χαμηλότερα υψόμετρα κατά $0.64\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ οι θερμοκρασίες στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής κατανέμονται στη διάρκεια του χρόνου όπως φαίνονται στην εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα με τις μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας για τα έτη 2000-2006 και 2013-2020 για την περιοχή της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού προκύπτει:

- Μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα: $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα του ψυχρότερου μήνα (Ιανουάριος 2004): $2.08\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα του θερμότερου μήνα (Ιούλιος 2015) $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Παρατηρούμε ότι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι ψυχρότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα ενώ ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία $23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ο Αύγουστος με $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι οι θερμότεροι μήνες.

B. Βροχοπτώσεις

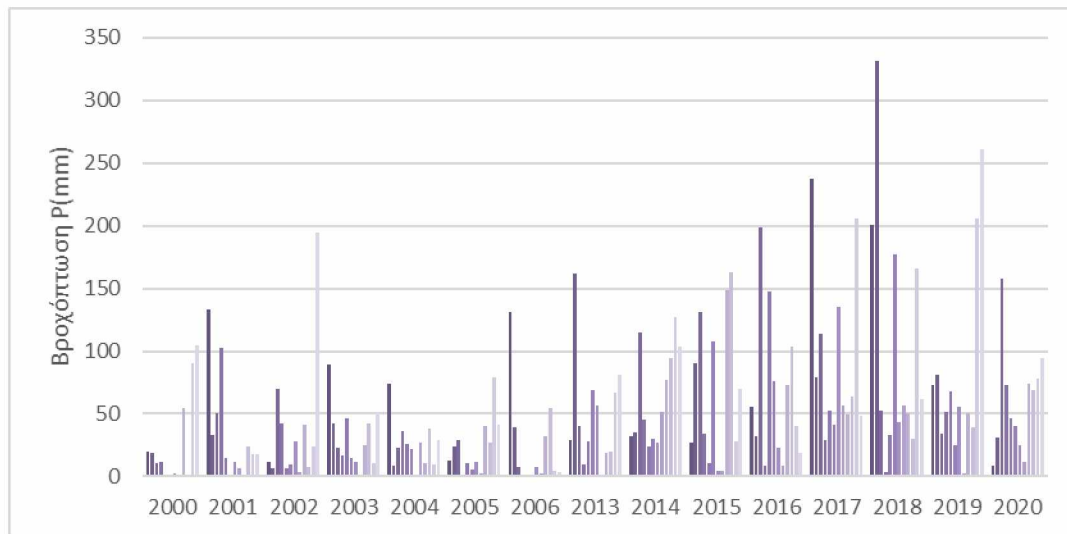
Οι βροχοπτώσεις και όλα γενικά τα κατακρημνίσματα αποτελούν το βασικότερο κλιματικό στοιχείο μιας περιοχής. Ιδιαίτερη σημασία έχουν τόσο το ετήσιο ύψος βροχής όσο και η κατανομή του στις εποχές του έτους.

Με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Αγιάς για τα έτη από το 2000 έως το 2007 και 2012 έως το 2020 και αφού διορθώθηκαν και υπολογίστηκαν οι

τιμές με βάση την εξίσωση της βροχοβαθμίδας ¹ ($y=0.59x+501.8$) για τη λεκάνη απορροής προκύπτει:

- Μέσο ετήσιο ύψος βροχής: 623.5 mm
- Μέγιστο ετήσιο ύψος βροχής: 1206 mm (2018)
- Ελάχιστο ετήσιο ύψος βροχής: 284.9 mm (2006)

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κατανέμεται ανάλογα σε κάθε μήνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.



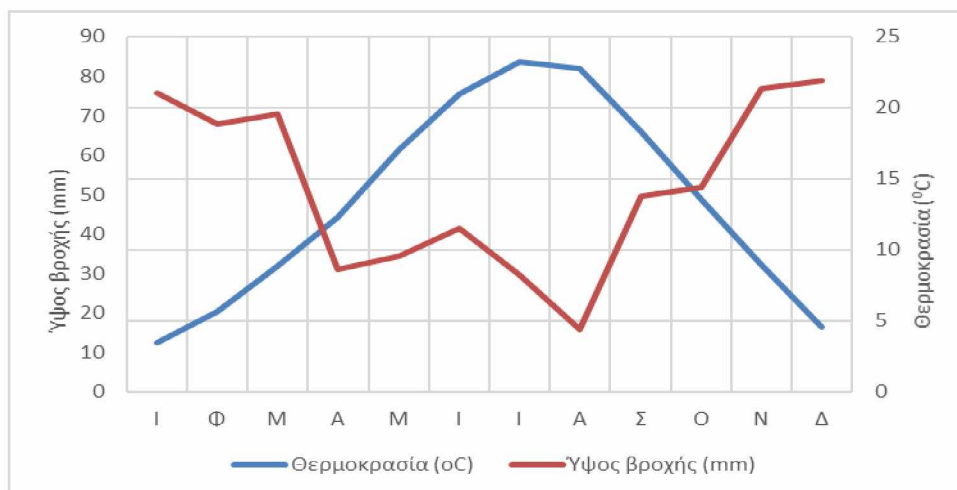
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα με τις μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης για τα έτη 2000-2006 και 2013-2020 για την περιοχή της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Παρατηρούμε μέγιστες τιμές τον Νοέμβριο με μέσο όρο βροχόπτωσης 76.9mm, τον Δεκέμβριο με 78.8mm και τον Ιανουάριο με 75.7mm, ενώ οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται το δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου με 29.6mm και 15.7mm αντίστοιχα.

Με βάση τα στοιχεία των δύο αυτών παραμέτρων, δηλαδή του μέσου μηνιαίου ύψους βροχής και της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, συντάχθηκε το ομβροθερμικό διάγραμμα της περιοχής (Εικόνα 3.10).

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό η ξηροθερμική περίοδος παρουσιάζεται από τα μέσα Μαΐου μέχρι το τέλος Σεπτεμβρίου. Αυτό δεν μπορεί να είναι απόλυτο, γιατί εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως τα αποταμιεύματα του εδάφους σε διαθέσιμο για τα φυτά νερό, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από το προηγούμενο ύψος βροχής σε συνδυασμό με τις φυσικές, μορφολογικές ιδιότητες και το βάθος του εδάφους.

¹ Για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας, βλ..Ενότητα 4.1

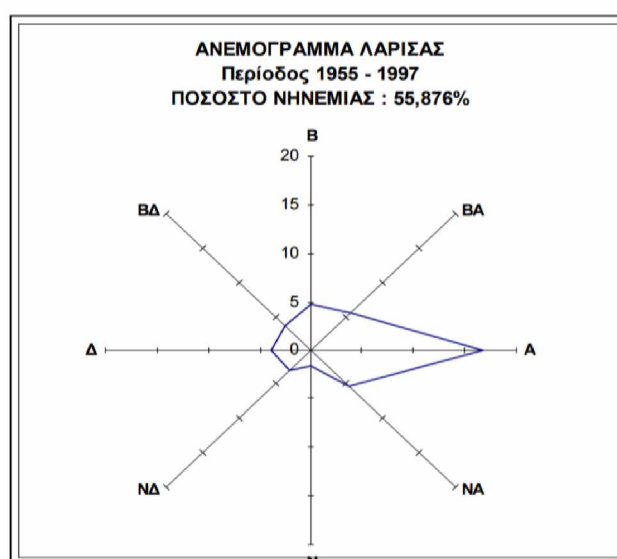


Εικόνα 3.10: Ομβροθερμικό διάγραμμα της περιοχής του του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.

Γ. Άνεμοι

Εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων από τον μετεωρολογικό σταθμό της Αγιάς χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της ΕΜΥ (Μ.Σ. Λάρισας) και προέκυψε πως οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι οι ανατολικοί με ποσοστό εμφάνισης 16.7% και ακολουθούν οι βορειοανατολικοί και οι νοτιοανατολικοί, οι βόρειοι, οι δυτικοί και οι βορειοδυτικοί.

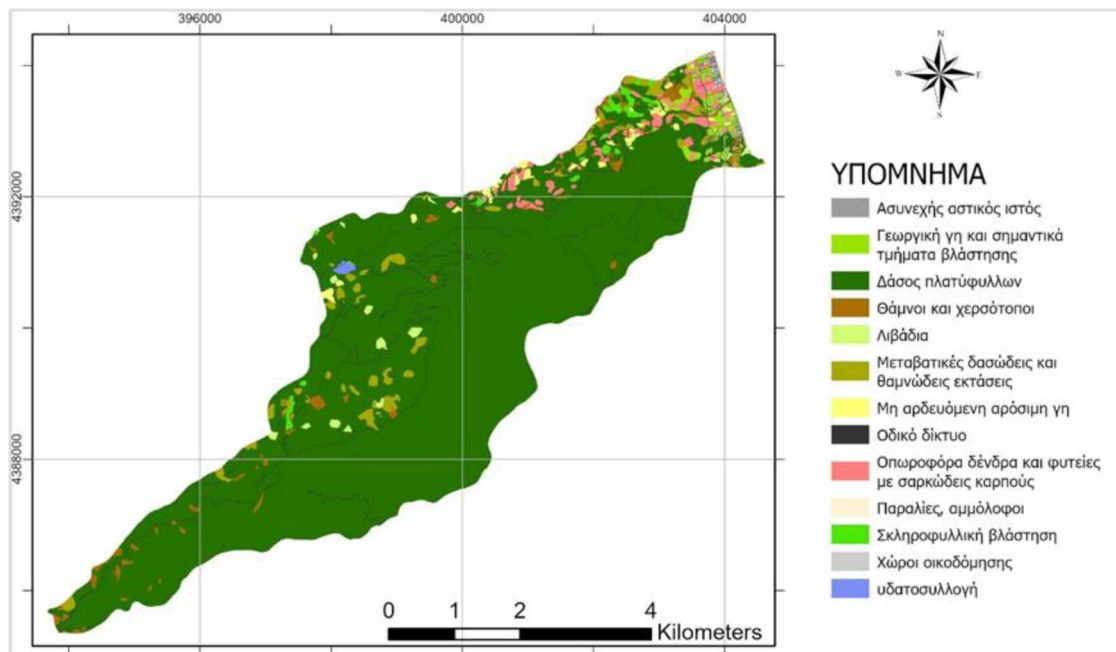
Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι οι άνεμοι είναι χαμηλής εντάσεως κυρίως 2 - 4 Beaufort ενώ το ποσοστό νηνεμίας είναι πολύ μεγάλο και ξεπερνά το 55%. Στο διάγραμμα της εικόνας 3.11 παρουσιάζεται το ανεμόγραμμα για την περιοχή μελέτης όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Μ.Σ. Λάρισας για την περίοδο 1955 - 1997.



Εικόνα 3.11: Ανεμόγραμμα για την περιοχή μελέτης όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Μ.Σ. Λάρισας για την περίοδο 1955 – 1997 (ΦΕΚ 523/ΑΑΠ/09.10.2009).

3.5 Χρήσεις γης

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για τη μελέτη της διάβρωσης σε μία περιοχή αποτελούν οι χρήσεις γης και για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε η ψηφιοποίησή τους μέσω του προγράμματος ArcGIS PRO. Ως υπόβαθρο για την ψηφιοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης Imagery Hybrid που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO και είναι χάρτης που βασίζεται σε εικόνες και ενημερώνεται περίπου κάθε τρεις εβδομάδες με τυχόν νέα δεδομένα που παρέχονται τόσο ως προς το διάνυσμά του όσο και ως προς το περιεχόμενό του. Στη συνέχεια, παρατίθεται ο χάρτης της εικόνας 3.12 που αποτυπώνονται με ακρίβεια οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.7 προέκυψαν 11 κατηγορίες χρήσεων γης. Τη μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης, δηλαδή το 86.2%, καλύπτει το δάσος πλατύφυλλων από δρυς, οξιές και καστανιές και ουσιαστικά καθορίζει και την τιμή του συντελεστή φυτοκάλυψης για την υπόψη λεκάνη απορροής.



Εικόνα 3.12: Χάρτης με τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση του χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα.

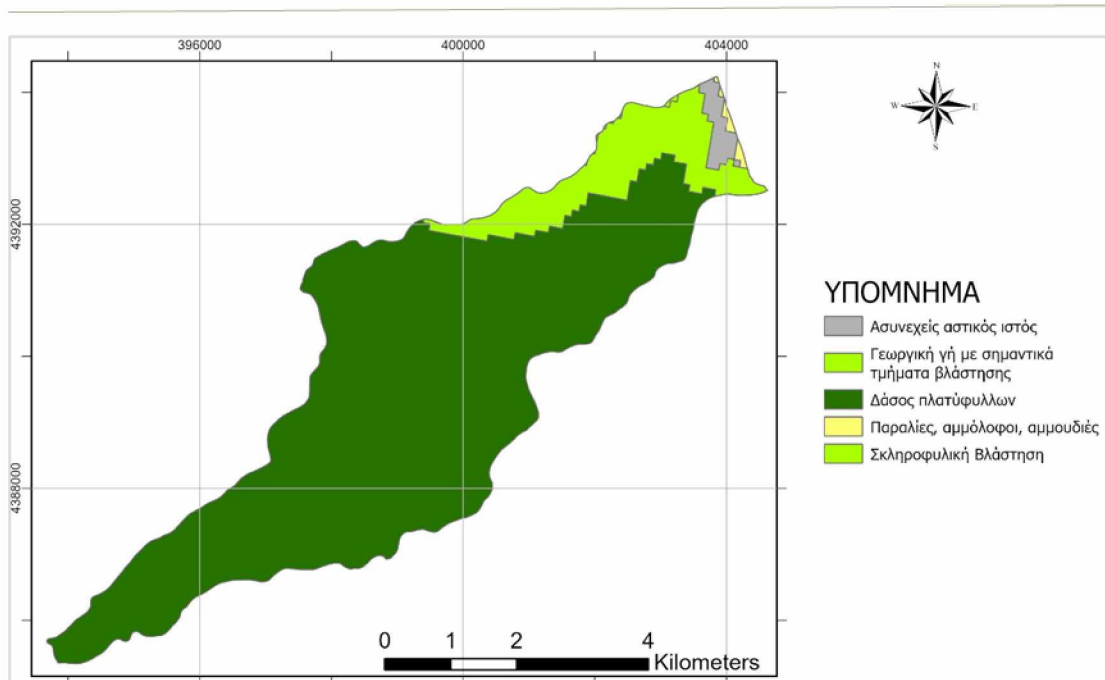
Πίνακας 3.7: Κατηγορίες χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση του χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO.

Κατηγορία Χρήσης γης	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
Ασυνεχής αστικός ιστός	0.11	0.41
Δάσος πλατύφυλλων	24.28	86.2
Γεωργική γη και σημαντικά τμήματα βλάστησης	0.30	1.07
Θάμνοι και χερσότοποι	0.53	1.91
Λιβάδια	0.21	0.73
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.79	2.83
Παραλίες, αμμόλοφοι και αμμουδιές	0.03	0.13
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	0.23	0.83
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	0.65	2.31
Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	0.61	2.16
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.24	0.85
Υδατοσυλλογή	0.04	0.16
Χώροι οικοδόμησης	0.03	0.12

Για λόγους αντιπαράθεσης αποφασίστηκε να ληφθούν οι χρήσεις γης και από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα κατανομής χρήσεων γης CORINE Land Cover με την πιο πρόσφατη έκδοσή του, το 2018. Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.13 για τη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος προκύπτουν 5 χρήσεις γης με μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης το δάσος πλατύφυλλων 86.2% και με μικρότερα ποσοστά η γεωργική γη με σημαντικά τμήματα βλάστησης 11.9%, ο ασυνεχής αστικός ιστός με 1.46%, ενώ οι παραλίες, αμμόλοφοι και αμμουδιές και η σκληροφυλλική βλάστηση έχουν σχεδόν μηδαμινή συμμετοχή με 0.32% και 0.07% αντίστοιχα (Πίνακας 3.8).

Πίνακας 3.8: Κατηγορίες χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας που προέκυψαν από την κατανομή χρήσεων γης CORINE Land Cover 2018.

Κατηγορία Χρήσης γης	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
Ασυνεχής αστικός ιστός	0.41	1.46
Δάσος πλατύφυλλων	24.2	86.2
Γεωργική γη και σημαντικά τμήματα βλάστησης	3.34	11.9
Παραλίες, αμμόλοφοι και αμμουδιές	0.09	0.32
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.02	0.07

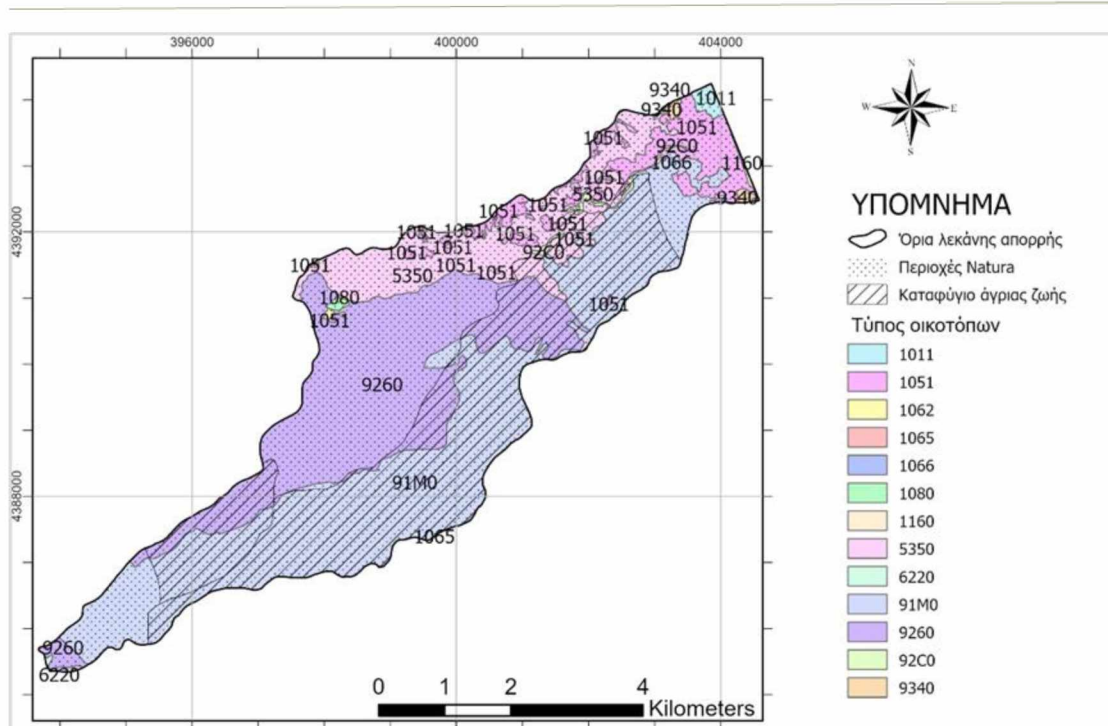


Εικόνα 3.13: Χάρτης με τις χρήσεις γης που προέκυψαν από την κατανομή χρήσεων γης CORINE Land Cover 2018 στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

3.6. Οικολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Η περιοχή ενδιαφέροντος ανήκει στους τόπους κοινοτικής σημασίας (ΤΚΣ)-Περιοχές Natura 2000 και πιο συγκεκριμένα στο GR-142004 Κάρλα-Μαυροβούνι ενώ η ίδια περιοχή ανήκει και στις «Περιοχές Ειδικής Προστασίας της Ορνιθοπανίδας» (SPA) GR 14006. Προστατευόμενη περιοχή αποτελεί επίσης το Δασόκτημα Πολυδενδρίου και το δάσος Πλατάνια ως καταφύγιο άγριας ζωής (Κ 226 και Κ 230 αντίστοιχα).

Στη συνέχεια, παρατίθεται ο χάρτης (Εικόνα 3.14) των οικοτόπων της λεκάνης απορροής που προέκυψε μετά από κατάλληλη επεξεργασία χαρτών της Διαδικτυακής Πύλης Γεωχωρικών Πληροφοριών Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΠΕΝ). Στον χάρτη αυτό παρουσιάζονται οι περιοχές καταφυγίου άγριας ζωής και Natura 2000 καθώς και οι τύποι των οικοτόπων με τους αντίστοιχους κωδικούς που δόθηκαν από την ΟΔΗΓΙΑ 92/43/ΕΟΚ του συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1992 για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας. Η αναλυτική περιγραφή με τους αντίστοιχους κωδικούς των οικοτόπων της περιοχής παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.14: Χάρτης που αποτυπώνονται οι περιοχές καταφυγίου άγριας ζωής, η περιοχή Natura καθώς και οι διαφορετικοί τύποι οικοτόπων της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα.

3.6.1 Χαρακτηριστικά βλάστησης

Οι κυριότερες κατηγορίες των δασών και των δασικών εκτάσεων στην περιοχή της λεκάνης απορροής είναι οι ακόλουθες:

α) **Θερμόβια κωνοφόρα:** Αποτελούνται από φυσικά πευκοδάση (χαλέπιος, τραχεία) και από αναδασώσεις που κατά κύριο λόγο φύονται σε χαμηλά υψόμετρα. Τα δάση αυτά όμως είναι ευάλωτα στις πυρκαγιές, διότι φύονται σε ξηροθερμικά περιβάλλοντα και στον υπόροφο συνήθως συμμετέχουν ξυλώδη είδη αειφύλλων πλατυφύλλων [κωδικός οικοτόπου 5350] (πουρνάρι, φυλλίκι, κουμαριά) και φρυγάνων (ασφάκα, θυμάρι, λαδανιές) τα οποία είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα.

β) **Φυλλοβόλα πλατύφυλλα:** Αποτελούνται από πλατύφυλλα φυλλοβόλα είδη όπως καστανιά, δρυς και πλατάνια.

- Τα δάση της καστανιάς [κωδικός οικοτόπου 9260] (*Castanea sativa*) είναι πολύτιμα, τόσο για τους καρπούς όσο και για την υψηλή αξία του ξύλου (για επιπλοποιία και οικοδομική χρήση).

- Τα δάση της δρυός [κωδικός οικοτόπου 91M0] (*Quercus* sp.) είναι και αυτά πολύτιμα δάση, διότι παράγουν δασικά προϊόντα. Το κυριότερο δασικό είδος είναι η

πλατύφυλλος δρυς (*Quercus fraineto* ή *conferta*), αλλά σποραδικά σε λόχμες ή μικρές συστάδες απαντώνται και άλλα είδη δρυός, όπως η χνοώδης (*Quercus pubescens*), η αριά (*Quercus ilex*).

- Τα δάση πλατάνου [κωδικός οικοτόπου 92C0] (*Platanus orientalis*) καλύπτουν παραποτάμιες και υγρές θέσεις κατά κύριο λόγο.

γ) Θαμνώνες αειφύλλων πλατυφύλλων [κωδικός οικοτόπου 9340]: Φύονται στις παραθαλάσσιες, λοφώδεις και ημιορεινές περιοχές της χώρας μας. Η φυσική τους βλάστηση αποτελείται από θάμνους και γενικότερα από ξυλώδη είδη αειφύλλων πλατυφύλλων, όπως η κουμαριά (*Arbutus unedo*), το πουρνάρι (*Quercus coccifera*), το φυλλίκι (*Phyllirea latifolia*), ο σχοίνος (*Pistacia lentiscus*), η κοκορεβυθιά (*Pistacia terebinthus*), το ρείκι (*Erica arborea*).

Εκτός από τα δάση περιλαμβάνονται και ποολίβαδα [κωδικός οικοτόπου 6220] Μέσο- και Θέρμο Μεσογειακά, ξηρόφυλλα χαμηλών υψομέτρων και ετήσιων φυτών (θερόφυτων).

3.6.2 Χαρακτηριστικά πανίδας

Χαρακτηριστικό της περιοχής αποτελεί η πλούσια πανίδα που αποτελείται από πληθώρα ερπετών, αμφιβίων, θηλαστικών, ιχθύων και πτηνών. Τα περισσότερα από αυτά προστατεύονται από την εθνική και διεθνή νομοθεσία. Στον πίνακα 3.9 φαίνονται τα πιο σημαντικά είδη [Πηγές: Επιχειρησιακό Πρόγραμμα 2012-2014- Δήμος Αγιάς, Ελληνική Ζωολογική Εταιρία (2009), Ψάλλα (2015)]

Πίνακας 3.9: Είδη θηλαστικών, ερπετών και αμφιβίων, ιχθύων και πτηνών της λεκάνης απορροής του υδατορεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Κατηγορία είδους	Λατινική ονομασία	Κοινή ονομασία
Θηλαστικά	<i>Capreolus capreolus</i>	Ζαρκάδι
	<i>Felis sylvestris</i>	Αγριόγατα
	<i>Lepus europaeus</i>	Λαγός
	<i>Martes foina</i>	Κουνάβι
	<i>Meles meles</i>	Ασβός
	<i>Sciurus vulgaris</i>	Σκίουρος
	<i>Sus scrofa</i>	Αγριογούρουνο
	<i>Canis lupus</i>	Λύκος
Αμφίβια	<i>Bufo viridis</i>	Πράσινος Φρύνος
	<i>Hyla arborea</i>	Δενδροβάτραχος
	<i>Salamandra salamandra</i>	Σαλαμάνδρα
Ερπετά	<i>Coluber gemonensis</i>	Δενδρογαλιά
	<i>Lacerta viridis</i>	Πράσινη σαύρα
	<i>Natrix natrix</i>	Νερόφιδο
	<i>Ophisaurus apodus</i>	Τυφλίτης
	<i>Podarcis tautica</i>	Γουστέρα του Ταύρου
	<i>Typhlops vermicularis</i>	Τυφλίνος
	<i>Vipera ammodytes</i>	Οχιά
Ιχθύες	<i>Barbus spp</i>	Μπριάνα
	<i>Ctenopharyngodon c. idella Valenciennes</i>	Κυπρίνος
Πτηνά	<i>Aquila pomarina</i>	Κραυγαετός
	<i>Buteo rufinus</i>	Αετογερακίνα
	<i>Circaetus gallicus</i>	Φιδαετός
	<i>Dendrocopos medius</i>	Μεσαίος Δρυοκολάπτης
	<i>Falco biarmicus</i>	Χρυσογέρακο
	<i>Falco naumanni</i>	Κιρκινέζι
	<i>Ficedula semitorquata</i>	Δρυομυγοχάφτης
	<i>Hipollais olivetorum</i>	Λιοστριτσίδα
	<i>Lanius collurio</i>	Αετομάχος
	<i>Lanius nubicus</i>	Παρδαλοκεφαλός

4. Μεθοδολογία

4.1. Υπολογισμός συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R

Για την εκτίμηση του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R (Rainfall- Runoff Erosivity Factor), είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η μέση ετήσια βροχόπτωση από τον κάθε κοντινό με την περιοχή μελέτης βροχομετρικό σταθμό. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία βροχόπτωσης 7 μετεωρολογικών σταθμών, του Πολυδενδρίου, της Αγιάς, του Έλαφου, της Λάρισας από το 6^ο Γυμνάσιο, του Σωτηρίου, του μετεωρολογικού σταθμού ΑΤΑ της Λάρισας καθώς και της Μακρινίτσας (Εικόνα 4.1) [Πηγές: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας- Τμήμα Παρακολούθησης και Προστασίας Υδατικών Πόρων, ΔΕΗ].

Τα δεδομένα του χιονιού συνυπολογίστηκαν με τις τιμές της βροχόπτωσης αφού πρώτα μετατράπηκαν σε τιμές ισοδύναμης βροχόπτωσης θεωρώντας την πυκνότητα του χιονιού ίση με 100 kg/m^3 .



Εικόνα 4.1: Χάρτης με τους Βροχομετρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα.

Πριν από την οποιαδήποτε συμπλήρωση των χρονοσειρών έγινε έλεγχος ακραίων τιμών και ομοιογένειας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999) με τη βοήθεια του προγράμματος Hydrognomon 4 (Hydrognomon 4, 2010). Παρατηρήθηκε ομοιογένεια των τιμών και δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές και εκτός των ορίων τιμές βροχόπτωσης και έτσι τα δεδομένα ήταν αποδεκτά στο σύνολό τους.

Εξαιτίας της έλλειψης μεγάλων χρονοσειρών και συγχρονισμού των δεδομένων βροχόπτωσης σε κάποιους από τους μετεωρολογικούς σταθμούς έγινε παραγωγή ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών ώστε να συμπληρωθούν οι ελλείψεις. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Castalia (με ανοικτή πρόσβαση) που είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών και έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2002). Με τον τρόπο αυτό συμπληρώθηκαν όλα τα στοιχεία βροχόπτωσης για τα έτη 1989-2020.

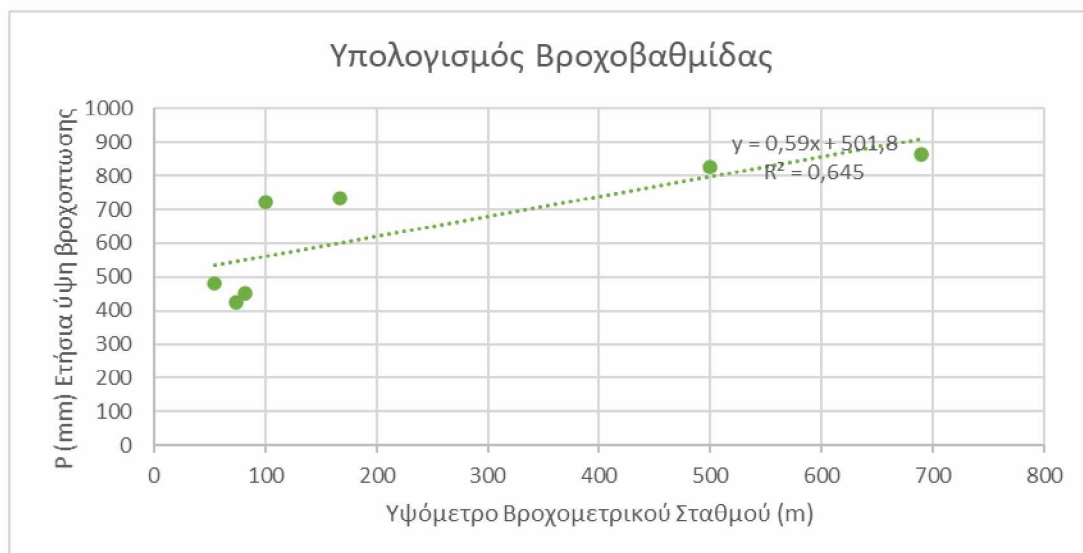
Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής για τα έτη 1989-2020 προέκυψε από τη μηνιαία μέτρηση των βροχοπτώσεων αντίστοιχα για το κάθε έτος και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των ετήσιων βροχοπτώσεων. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία βροχομετρικών σταθμών και μέση ετήσια βροχόπτωση για τα έτη 1989-2020.

Βροχομετρικός Σταθμός	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	ΠΗΓΗ	Υψόμετρο Σταθμού (m)	P (mm) Μέση ετήσια βροχόπτωση 1989-2020
Πολυδένδρι	401956.51	4390444.5	ΔΕΗ	100	721.1
Αγιά ΕΠΑΛ	393737.66	4396756.27	Εθνικό Αστ\πέιο Αθηνών	167	731.8
Έλαφος Αγιάς	395546.31	4381367.29	ΔΙΕΥ/ΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ	500	825.5
Σωτήριο	388633.43	4373313.63	ΔΙΕΥ/ΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ	54	479.6
Λάρισα ΑΤΑ	365172.71	4389093.28	ΕΘΝΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ	73.6	424.7
Λάρισα 6 ^ο Γυμνάσιο	362350.93	4387247.14	Εθνικό Αστ\πέιο Αθηνών	82	451.3
Μακρυνίτσα	412679.27	4361749.44	Εθνικό Αστ\πέιο Αθηνών	690	861.9

Εξαιτίας της διαφοράς του μέσου υψομέτρου της λεκάνης απορροής με τα υψόμετρα των βροχομετρικών σταθμών θα πρέπει να γίνει διόρθωση για την αναίρεση υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της επιφανειακής βροχόπτωσης σε σχέση με το υψόμετρο της λεκάνης απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Για τη συσχέτιση αυτή, της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης του κάθε σταθμού υπολογίστηκε η εξίσωση της βροχοβαθμίδας η οποία δηλώνει την αύξηση των βροχοπτώσεων ανά μονάδα αύξησης του υψομέτρου και εκφράζεται από τη σχέση $y=0.59x+501.8$, όπου το 0.59 αντιπροσωπεύει την αύξηση των βροχοπτώσεων y ανά μονάδα αύξησης υψομέτρου x , ενώ το 501.8 εκφράζει την τιμή των βροχοπτώσεων y για $x=0$, δηλαδή το ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχεί σε μηδενικό υψόμετρο (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης $P(\text{mm})$ σε σχέση με τα υψόμετρα των βροχομετρικών σταθμών (m) (βροχοβαθμίδα).

Για να είναι σημαντική στατιστικά η συσχέτιση θα πρέπει ο συντελεστής R που υπολογίζεται να είναι σε απόλυτη τιμή μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή r_c για αριθμό n μετεωρολογικών σταθμών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$r_c = \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει:

$R = 0.803$ και $r_c = 0.755$ και επομένως ισχύει ο ανωτέρω περιορισμός όπου $R > r_c$.

Η εκτίμηση της κατανομής της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα βασίστηκε στην επιφανειακή αναγωγή των σημειακών μετρήσεων του μετεωρολογικού σταθμού του Πολυδενδρίου, που είναι ο

πλησιέστερος μετεωρολογικός σταθμός στη λεκάνη απορροής, με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας. Για την εύρεση του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης σε κάθε σημείο της λεκάνης απορροής μέσω του raster calculator του προγράμματος ArcGIS-PRO χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$721.1 - ((100 - \text{DEM}) * 59 / 100)$$

Όπου,

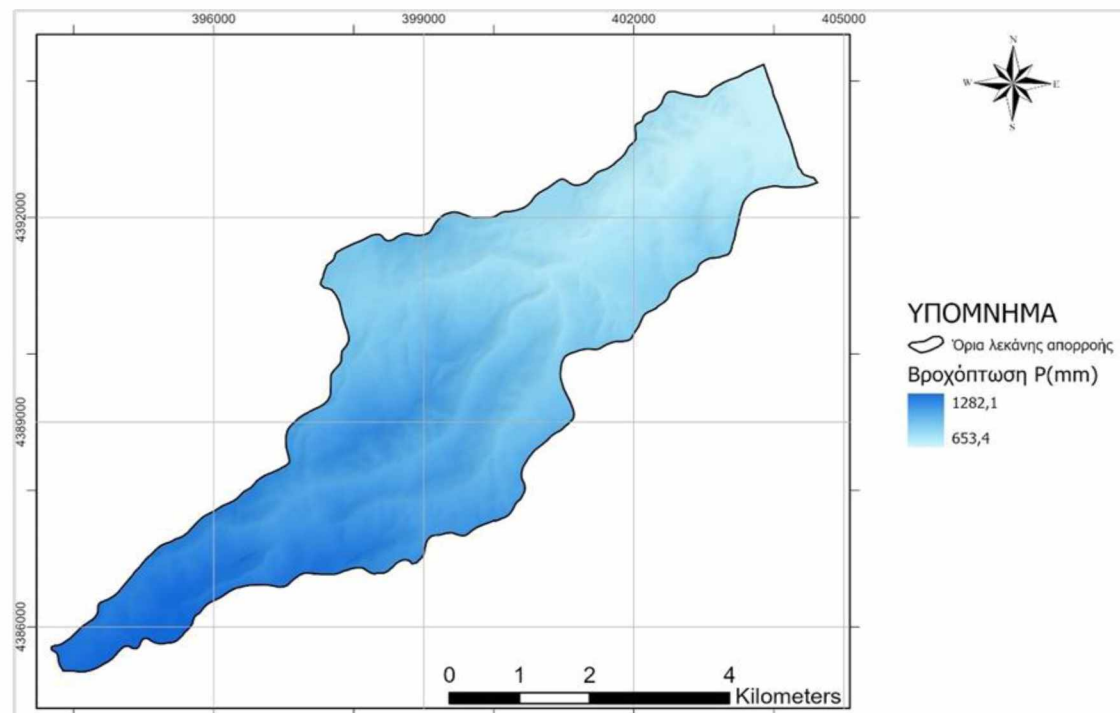
721.1: είναι το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό του Πολυδενδρίου

100: είναι το υψόμετρο στο βροχομετρικό σταθμό του Πολυδενδρίου

DEM: είναι το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου που περιέχει τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής και

59: είναι η βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μία συνεχής επιφάνεια βροχόπτωσης που φαίνεται στην εικόνα 4.3 και έχει χρησιμοποιηθεί στις δύο από τις τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης.



Εικόνα 4.3: Χάρτης κατανομής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα.

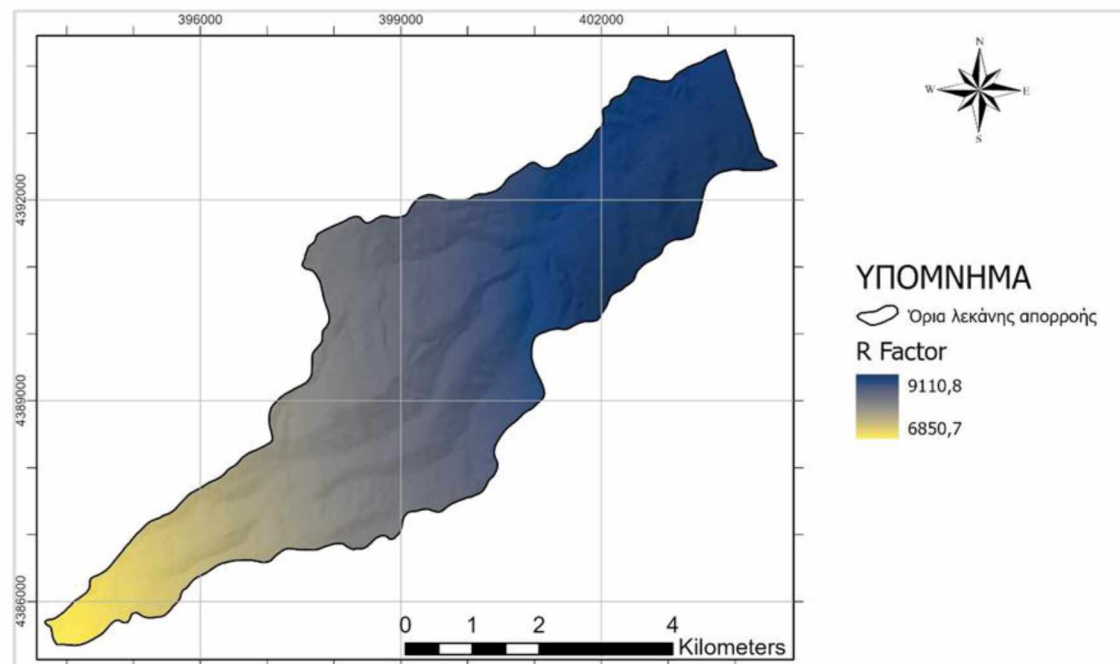
Ακολούθησε ο υπολογισμός του συντελεστή διαβρωτικότητας R της λεκάνης και για λόγους συγκρίσεων χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι υπολογισμού:

Αρχικά υπολογίστηκε το R με τις εξισώσεις των Renard and Freimund (1994)

(Εξίσωση 2.7 και 2.8). Με τη βοήθεια του calculate field υπολογίστηκαν οι τιμές MFI για τον κάθε μήνα και το κάθε έτος ξεχωριστά με την εξίσωση 2.5. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό του R χρησιμοποιήθηκε μέσω της Python 3 ο παρακάτω κώδικας ο οποίος επιλύει τις ανωτέρω εξισώσεις. Σύμφωνα με τη γλώσσα προγραμματισμού της PYTHON 3 αρχικά με το def ορίζεται μια σειρά εντολών η οποία επαναλαμβάνεται και περιλαμβάνει την υπόθεση (δηλώνεται με το if) ότι εάν το MFI είναι μεγαλύτερο από το 55 τότε να επιστρέψει το αποτέλεσμα της εξίσωσης 2.7 ενώ στην άλλη περίπτωση (δηλώνεται με το elif) που το MFI είναι μικρότερο ή ίσο από το 55 να επιστρέψει την τιμή της εξίσωσης 2.8:

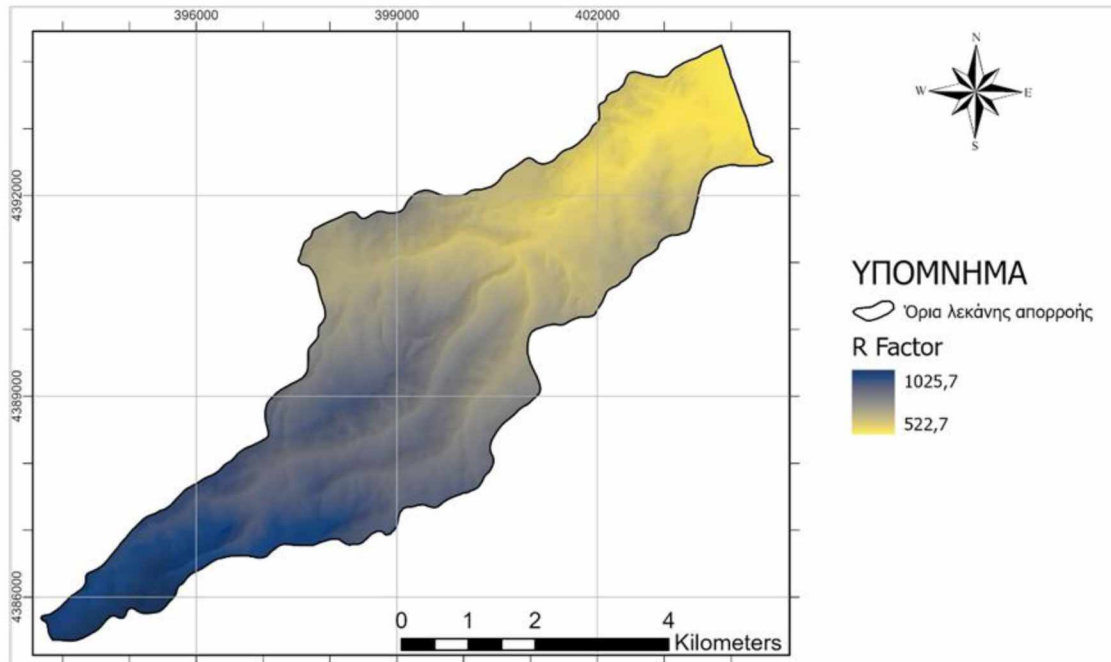
```
Reclass(!MFI!)
Code:
def Reclass(MFI):
    if (MFI > 55) :
        return (95.77-(6.081* MFI)+ (0.477* (MFI**2)))
    elif (MFI <= 55):
        return (0.07397* (MFI**1.847))
```

Στη συνέχεια αυτής της μεθοδολογίας ακολουθήθηκε η μέθοδος kriging (Gertner et al., 2001) στις τιμές R του κάθε σταθμού με την αντίστοιχη εντολή στο ArcGIS PRO και έτσι προέκυψε ο χάρτης της εικόνας 4.4 με μέση τιμή συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης $R = 8397.66 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$.



Εικόνα 4.4: Χάρτης κατανομής του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R σε $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$ στη λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Renard and Freimund (1994) και με τη χρήση του MFI.

Ο δεύτερος υπολογισμός του συντελεστή διαβρωτικότητας R έγινε με βάση την εξίσωση των Van der Knijff et al., (2000) (Εξίσωση 2.9) και υπολογίστηκε με το εργαλείο raster calculator πάνω στο raster αρχείο με την κατανομή της βροχόπτωσης ενώ για την τιμή του συντελεστή α χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.8 που εκτιμήθηκε για την περιοχή της Λάρισας από τον Φλαμπούρη (2008). Με τον τρόπο αυτό προέκυψε ο χάρτης της εικόνας 4.5 με μέση τιμή του $R=753.11 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

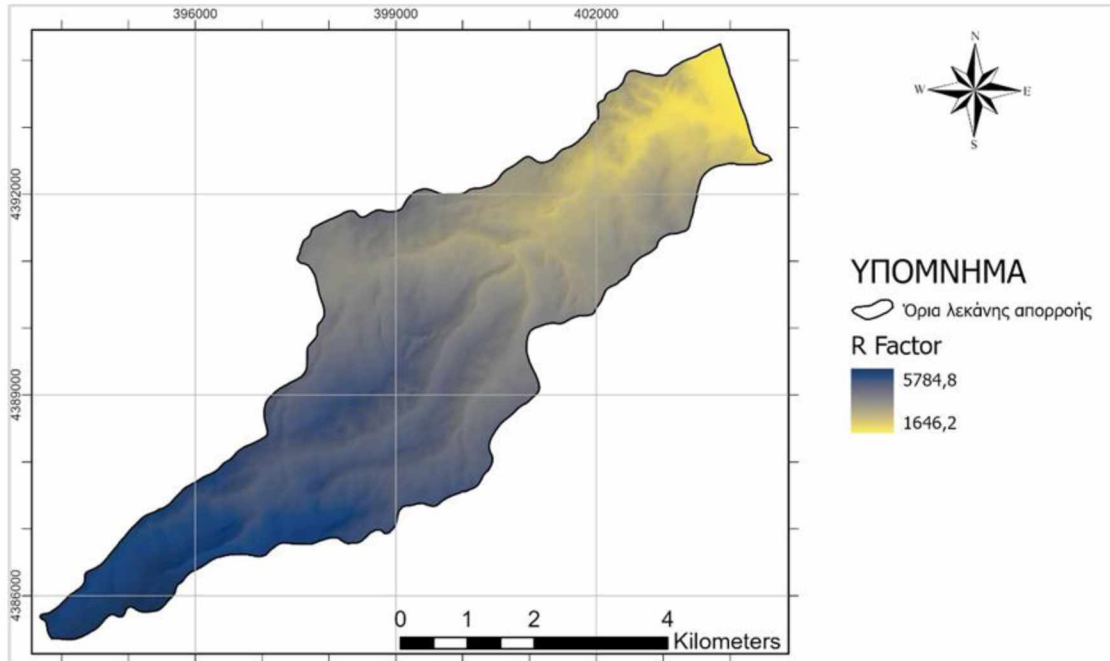


Εικόνα 4.5: Χάρτης κατανομής του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R σε $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$ στη λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Van der Knijff et al., (2000) και του συντελεστή α από τον Φλαμπούρη (2008).

Ο τρίτος υπολογισμός του R έγινε με βάση την εξίσωση με χρήση του P (Εξισώσεις 2.10, 2.11) των Renard and Freimund (1994) ενώ χρησιμοποιήθηκε το raster αρχείο με την κατανομή της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα. Για τη μεθοδολογία αυτή από το spatial analysis tools επιλέχθηκε το εργαλείο raster calculator και έγινε εισαγωγή των εξισώσεων με τον ακόλουθο κώδικα σύμφωνα με τον οποίο ορίστηκαν οι δύο συνθήκες με το Con (Condition). Έτσι στην πρώτη συνθήκη που οι τιμές της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερες ή ίσες με 850mm να επιστρέφει τις τιμές της εξίσωσης 2.11 ενώ στην περίπτωση που οι τιμές της βροχόπτωσης είναι μικρότερες από 850mm να επιστρέφει τις τιμές της εξίσωσης 2.10:

Con(("P_raster" >= 850), 587.8-(1.21* " P_raster ") + Square("P_raster ") * 0.004105,
Con(("P_raster " < 850), 0.04830* Power("P_raster ", 1.610)))

Με τον τρόπο αυτό προέκυψε ο χάρτης της εικόνας 4.6 με μέση τιμή διαβρωτικότητας $R = 3219.51 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$.



Εικόνα 4.6: Χάρτης κατανομής του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R σε $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$ στη λεκάνης απορροής του υδατορρευμάτος Μουργουλήθρα όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Renard and Freimund (1994) με τη χρήση της μέσης βροχόπτωσης P.

Σύμφωνα με τον Βαχαβιώλο (2014) που συγκρίνει τον αναλυτικό υπολογισμό του συντελεστή R με τις εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού, καλύτερες και με λιγότερα σφάλματα σχέσεις είναι οι εξισώσεις 2.10 και 2.11 των Renard and Freimund (1994) με χρήση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης P.

Η σχέση με τη χρήση του MFI των Renard και Freimund (1994) εμφανίζει μια αξιόλογη υπερεκτίμηση και συγχρόνως τη μεγαλύτερη απόκλιση από τα αποτελέσματα των αναλυτικών υπολογισμών.

Αντίθετα η σχέση των Van der Knijff et al., (2000) παρουσιάζει υποεκτίμηση ενώ η τιμή του συντελεστή α από τον Φλαμπούρη (2008) είναι γενικευμένη για την περιοχή της Λάρισας και ίσως να μην ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής με αποτέλεσμα την αύξηση του σφάλματος του αποτελέσματος στη σχέση αυτή.

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις (Εξισώσεις 2.10 και 2.11) των Renard and Freimund (1994) με χρήση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης P θεωρήθηκαν ως η καταλληλότερη μεθοδολογία και χρησιμοποιήθηκε στην πορεία της εργασίας, διότι αν και χρησιμοποιεί έναν γενικό τρόπο συσχέτισης της βροχόπτωσης με τη διαβρωτικότητα, σε ένα στοχαστικό μέγεθος όπως η βροχόπτωση αυτή η γενικότητα αποτελεί όπως φαίνεται μεγάλο προτέρημα στο χειρισμό της (Βαχαβιώλος, 2014).

4.2. Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K

Αρχικά, για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K κρίθηκε αναγκαία η περιγραφή και η ψηφιοποίηση του γεωλογικού υποβάθρου καθώς καθορίζει την υδροπερατότητα των σχηματισμών και άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από τα οποία εξαρτάται η ποσότητα του νερού που απορρέει επιφανειακά ή κατεισδύει προς τους υδροφόρους ορίζοντες. Χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) της περιοχής, φ.χ. Αγιά- Αγιά Παναγιάς 1:50.000, ο οποίος ψηφιοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS PRO (Εικόνα 3.6- Κεφάλαιο 3°)

Σε κάθε ένα από τους σχηματισμούς της λεκάνης απορροής αποδόθηκε μια τιμή του συντελεστή διαβρωσιμότητας K του εδάφους που αν και δεν προέρχονται από μετρήσεις πεδίου και εργαστηριακές μετρήσεις δειγματοληψίας ωστόσο αποδίδουν με ικανοποιητική προσέγγιση την τιμή του συντελεστή. Κάποιες από τις τιμές αυτές στηρίχτηκαν σε βιβλιογραφικά δεδομένα ενώ κάποιες άλλες βασίστηκαν σε λιθολογικά δεδομένα που προέκυψαν από τη λεπτομερή περιγραφή του γεωλογικού χάρτη, τα οποία εκτιμήθηκαν κατά προσέγγιση και υπολογίστηκαν με βάση την εξίσωση (2.12) των Wischmeier και Smith, (1978).

Πιο συγκεκριμένα, η λεπτομερής επεξήγηση των μετααλπικών αποθέσεων στον Γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ καθώς και το εάν εμφανίζουν απολιθωματοφόρες θέσεις σε συνδυασμό με την πετρολογία των ιζηματογενών πετρωμάτων (Τσιραμπίδης, 1996, Ψιλοβίκος, 1985, Ψιλοβίκος, 2019) οδήγησε στην κατά προσέγγιση εκτίμηση των ποσοστών αργίλου, ιλύος και άμμου καθώς και την περιεκτικότητα σε οργανικά στοιχεία. Οι τιμές των υπόλοιπων σχηματισμών προέκυψαν αποκλειστικά από βιβλιογραφικά δεδομένα.

Έτσι λοιπόν προέκυψε ο πίνακας 4.2 με τους συντελεστές διαβρωσιμότητας κάθε σχηματισμού.

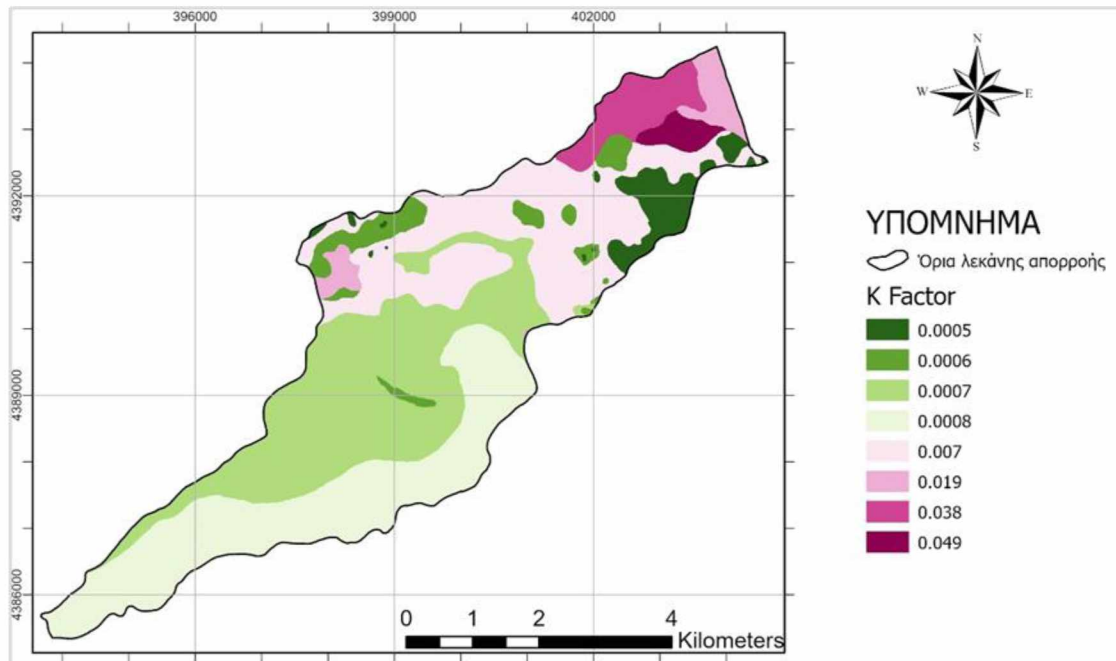
Πίνακας 4.2: Εκτίμηση του συντελεστή διαβρωσιμότητας των σχηματισμών της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα (K) σε (ton*hr)/(MJ*mm).

Σχηματισμός	VFS	SI	CL	OM	St	Υδροπερατότητα Pr	K σε (ton*hr)/(MJ*mm)
Αλλουβιακές αποθέσεις	10	30	40	όχι	2	Μεγάλη (2)	0.019
Κώνοι κορρημάτων	20	35	15	όχι	3	Μεγάλη (2)	0.049
Χερσαίοι λιμναίοι σχηματισμοί	25	40	15	ναι (5%)	3	Μέτρια (3)	0.038
Μάρμαρα Αγιάς	-	-	-	-	-	Μέτρια (3)	0.007
Σερπεντινίτες	-	-	-	-	-	Πολύ μικρή (6)	0.0006
Οφιόλιθοι	-	-	-	-	-	Πολύ μικρή (6)	0.007
Σχιστόλιθοι	-	-	-	-	-	Μικρή (5)	0.007
Μάρμαρα και σιπολίτες	-	-	-	-	-	Μικρή- μέτρια (4)	0.0006
Μαρμαριγιακοί σχιστόλιθοι	-	-	-	-	-	Μικρή (5)	0.0007
Γνεύσιοι – γνευσιοσχιστόλιθοι	-	-	-	-	-	Πολύ μικρή (6)	0.0008

Με την κατάλληλη επεξεργασία μέσω του προγράμματος ArcGIS PRO σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό αποδόθηκε η κατάλληλη τιμή του συντελεστή K και έτσι προέκυψε ο πίνακας 4.3 καθώς και ο χάρτης της εικόνας 4.7 για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος.

Πίνακας 4.3: Τιμές του συντελεστή K σε (ton*hr)/(MJ*mm) στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή του σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Τιμές συντελεστή K	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
0.0006	2.58	9.19
0.0007	8.65	30.78
0.0008	7.25	25.80
0.007	6.78	24.11
0.019	0.95	3.39
0.038	1.42	5.07
0.049	0.45	1.62



Εικόνα 4.7: Χάρτης κατανομής του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K σε $(\text{ton}\cdot\text{hr})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$.

Όπως προκύπτει από τον χάρτη της εικόνας 4.7 οι μεγαλύτερες τιμές του K βρίσκονται στους μετααλπικούς γεωλογικούς σχηματισμούς δηλαδή στις πιο σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, στους κώνους κορημάτων, στους χερσαίους και λιμναίους σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί αυτοί όμως βρίσκονται σε περιορισμένη έκταση, στα βορειοανατολικά σημεία της λεκάνης απορροής, στα πολύ χαμηλά υψόμετρα που είναι και η έξοδος του υδατορρέυματος στο παραλιακό μέτωπο. Στα σημεία αυτά της λεκάνης απορροής εκτός από τη διάβρωση υπάρχει και μεγάλη εναπόθεση αφού η περιοχή εμφανίζει ήπιες έως επίπεδες κλίσεις. Οι ενδιάμεσες τιμές συντελεστή K βρίσκονται στους οφιολιθικούς σχηματισμούς, στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής και κυρίως στη ζώνη μεταφοράς του υδατορρέυματος ενώ οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή K που καταλαμβάνουν και τη μεγαλύτερη έκταση βρίσκονται στα ανάντη τμήματα της λεκάνης απορροής μέσα στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και τους γενευσιοσχιστόλιθους.

Η μέση τιμή του συντελεστή K για τη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα βρέθηκε ίση με $0.005 (\text{ton}\cdot\text{hr})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$ που θεωρείται χαμηλή τιμή συντελεστή K. Το 66% της έκτασης της λεκάνης απορροής αντιπροσωπεύεται από πολύ μικρές τιμές του K δηλαδή από $0.006 (\text{ton}\cdot\text{hr})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$ έως $0.008 (\text{ton}\cdot\text{hr})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$, το 24% της έκτασης έχει ενδιάμεσες τιμές 0.007 ενώ το υπόλοιπο 10% της έκτασης έχει μεγάλες τιμές από 0.019 έως 0.049.

Για λόγους συγκρίσεων ακολουθήθηκε και ένας δεύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K που στηρίχθηκε σε εδαφολογικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά χορηγήθηκαν μετά από αίτηση από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους (European Soil Data Centre (ESDAC)) (Panagos et al., 2012) ενώ ταυτόχρονα χορηγήθηκε και η άδεια χρήσης τους. Τα δεδομένα αυτά περιλάμβαναν:

- Ψηφιδωτά αρχεία με τις φυσικές ιδιότητες εδάφους για την Ευρώπη (Topsoil physical properties for Europe) (Ballabio et al., 2016) που περιέχουν δεδομένα όπως:
 - Περιεκτικότητα σε άργιλο (%)
 - Περιεκτικότητα σε ιλύ (%)
 - Περιεκτικότητα σε άμμο (%)
 - Κατηγορίες υφής του εδάφους (USDA Texture)
- Ψηφιδωτά αρχεία με τα Κλάσματα οργανικής ύλης εδάφους (SOM- Soil Organic Matter fractions) (Lugato et al., 2021, Cotrufo et al., 2019) που περιέχουν τα σωματίδια οργανικής ύλης (POM) και την οργανική ύλη που σχετίζεται με τα ορυκτά (MAOM).
- Ψηφιδωτά αρχεία και αναλυτική βάση δεδομένων εδάφους από την οποία προέκυψαν στοιχεία για τη δομή του εδάφους (European Soil Database v2.0 (vector and attribute data)) (Panagos, 2006, ESDB v2.0, 2004).
- Ψηφιδωτά αρχεία με δεδομένα διαβρωσιμότητας εδάφους (K - Factor) υψηλής ανάλυσης για την Ευρώπη (Soil Erodibility (K - Factor) High Resolution dataset for Europe) που περιέχει ψηφιδωτό αρχείο με το ποσοστό των βραχωδών τμημάτων (Effect of Stoniness in K -factor (% reduction)) (Panagos et al., 2014, (Panagos et al., 2012).

Πριν από τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K με την εξίσωση των Wischmeier και Smith, (1978), η οποία με τη μετατροπή των μονάδων εκφράζεται από τη σχέση 4.2 (Panagos et al., 2014), πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των ψηφιδωτών αρχείων και αποκοπή στα όρια της λεκάνης απορροής.

Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή θα πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της συνάρτησης του μεγέθους των κόκκων (M), το ποσοστό της οργανικής ύλης (OM), η δομή του εδάφους (St) και ο βαθμός διαπερατότητας εδάφους (Pr)

$$K = \frac{2.1 M^{1.14}(10^{-4})(12-OM)+3.25(St-2)+2.5(Pr-3)}{100} * 0.1317 \quad (4.2)$$

Ο υπολογισμός του M γίνεται από την εξίσωση:

$$M = (\%SI + \%VFS (100 - \%CL)) \quad (4.3)$$

Για τον υπολογισμό του ποσοστού της πολύ λεπτής άμμου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιδωτό αρχείο με το ποσοστό άμμου (Topsoil physical properties for Europe) και το αρχείο με τις κατηγορίες υφής του εδάφους. Σύμφωνα με τις κατηγορίες αυτές η υφή του εδάφους στη λεκάνη απορροής είναι sandy loam που σύμφωνα με τους Mays et al. (1986) σε αυτή την υφή εδάφους το ποσοστό της πολύ λεπτής άμμου (VFS) σχετικά με το ποσοστό της άμμου (SAND) είναι έως 30% και επομένως για τον υπολογισμό λαμβάνεται η τιμή αυτή. Έτσι για την εύρεση της πολύ λεπτής άμμου (VFS) χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης με τα ποσοστά της άμμου και εισήχθη η εξίσωση:

$$(\text{"Sand"} * 30) / 100$$

Στη συνέχεια εισήχθη η εξίσωση της συνάρτησης του μεγέθους των κόκκων (M) στο εργαλείο raster calculator με την εξής μορφή:

$$(\text{"SILT"} + \text{"VFS"}) * (100 - \text{"CLAY"})$$

Όπου:

"SILT" ο χάρτης με την περιεκτικότητα σε ιλύ (%),

"VFS" ο χάρτης που προέκυψε από το 30% της περιεκτικότητας της άμμου και

"CLAY" ο χάρτης με την περιεκτικότητα σε άργιλο (%).

Για την εύρεση του ποσοστού της οργανικής ύλης (OM) προστέθηκαν οι χάρτες με τα σωματίδια οργανικής ύλης (POM) και της οργανικής ύλης που σχετίζεται με τα ορυκτά (MAOM) αφού πρώτα μετατράπηκαν σε ποσοστιαία περιεκτικότητα %.

Για την εύρεση της δομής του εδάφους (St) χρησιμοποιήθηκαν οι πληροφορίες από την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων εδάφους (European Soil Database) με βάση τον πίνακα 4.4 (Panagos et al., 2014).

Πίνακας 4.4: Κατηγορίες της δομής του εδάφους οι οποίες προέρχονται από την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων εδάφους (Panagos et al., 2014).

Κατηγορίες δομής	Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων εδάφους
1 (very fine granular: 1–2 mm)	G (good)
2 (fine granular: 2–5 mm)	N (normal)
3 (medium or coarse granular: 5–10 mm)	P (poor)
4 (blocky, platy or massive: > 10 mm)	H (humic or peaty top soil)

Για την εύρεση του βαθμού διαπερατότητας εδάφους (Pr) χρησιμοποιήθηκε το ψηφιδωτό αρχείο με τις κύριες κατηγορίες υφής του εδάφους και βασίστηκε στον πίνακα 4.5 (Panagos et al., 2014).

Πίνακας 4.5: Κατηγορίες διαπερατότητας του εδάφους και τα εύρη κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας που εκτιμώνται από τις κύριες κατηγορίες υφής του εδάφους (Panagos et al., 2014).

Κατηγορία διαπερατότητας (p)	Υφή	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, mm h ⁻¹
1 (fast and very fast)	Sand	> 61.0
2 (moderate fast)	Loamy sand, sandy loam	20.3–61.0
3 (moderate)	Loam, silty loam	5.1–20.3
4 (moderate low)	Sandy clay loam, clay loam	2.0–5.1
5 (slow)	Silty clay loam, sand clay	1.0–2.0
6 (very slow)	Silty clay, clay	< 1.0

Τέλος εισήχθη στο raster calculator η εξίσωση 4.2 με την εξής μορφή:

$$(((2.1 * 0.0001 * (12 - "OM") * \text{Power}("M", 1.14)) + (3.25 * ("ST" - 2)) + (2.5 * ("PR" - 3)))) / 100) * 0.137$$

Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένα ψηφιδωτό αρχείο που αποτυπώνει τις τιμές του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K. Ωστόσο σε πολλές περιοχές, κυρίως της Μεσογείου, οι τιμές που υπολογίζονται με τη μέθοδο αυτή εμφανίζονται υπερεκτιμημένες σε σχέση με την αναλυτή τιμή του συντελεστή διαβρωσιμότητας. Το σφάλμα αυτό έχει αποδοθεί στη μη εκτίμηση των βραχυδών τμημάτων αφού τα τμήματα αυτά είναι περιοχές που λειτουργούν ως ένας φυσικός σταθεροποιητής του εδάφους (Panagos et al., 2014). Για τον λόγο αυτό οι Rubio και Recatalá (2006) πρότειναν να συμπεριληφθούν τα τμήματα αυτά στην ποιοτική εκτίμηση του δείκτη διαβρωσιμότητας του εδάφους, ενώ οι Poesen et al. (1994) ανέπτυξαν έναν παράγοντα μείωσης της διαβρωσιμότητας του εδάφους με βάση πειραματικά δεδομένα πεδίου που εκφράζεται με τη σχέση:

$$ST = e^{-0.04(R_c - 10)} \quad (4.4)$$

Όπου

ST: ο συντελεστής διόρθωσης και

R_c: το ποσοστό κάλυψης με βραχώδη τμήματα (10% < R_c < 100%).

Ενώ

$$K_{st}=ST*K \quad (4.5)$$

Όπου

K_{st} : είναι η διορθωμένη τιμή του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K που συμπεριλαμβάνει τα βραχώδη τμήματα της περιοχής.

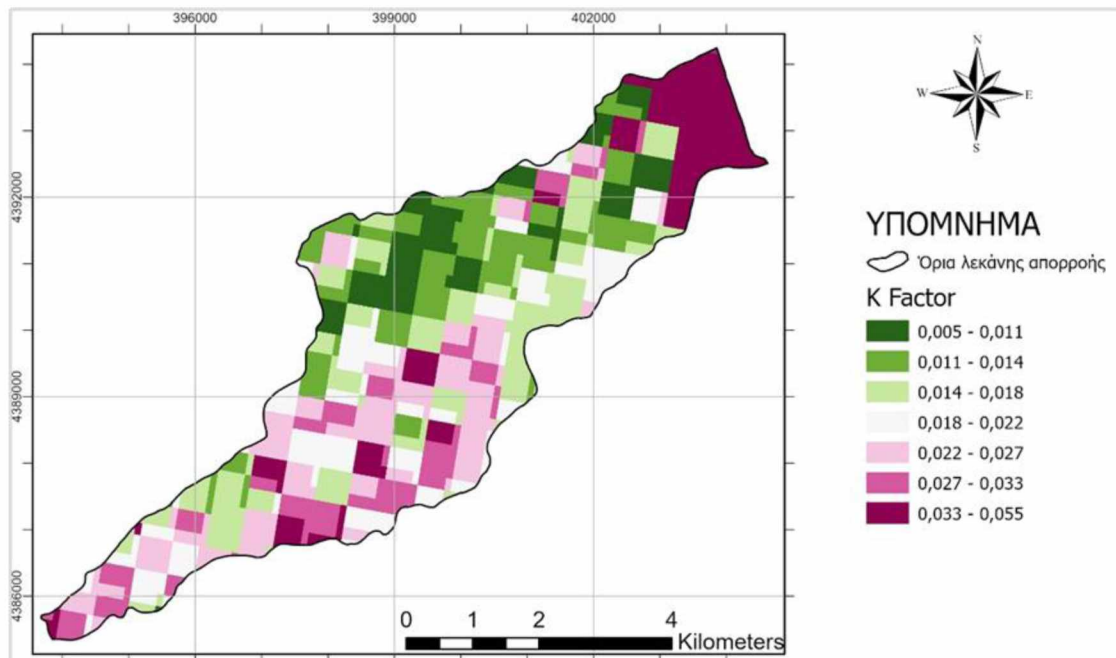
Είναι γεγονός πως η εμφάνιση των βραχωδών τμημάτων στην περιοχή είναι εκτεταμένη και για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να γίνει διόρθωση του συντελεστή που εκτιμήθηκε συμπεριλαμβάνοντας την εμφάνιση των τμημάτων αυτών. Τα στοιχεία με τα βραχώδη τμήματα περιλαμβάνεται στα ψηφιδωτά αρχεία με δεδομένα διαβρωσιμότητας εδάφους (K - Factor) υψηλής ανάλυσης για την Ευρώπη. Έτσι εισήχθη η εξίσωση 4.4 στο raster calculator με τη μορφή για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης (ST) με την εξής μορφή:

$$\text{Exp}(-0.04*(\text{"rocks_percent"}-10))$$

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε ο διορθωμένος συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K_{st} εισάγοντας την εξίσωση 4.5 όπου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιδωτό αρχείο με τον συντελεστή διόρθωσης και το αρχείο με τον αρχικό συντελεστή K με την εξής μορφή:

$$\text{"ST"}*\text{"K"}$$

Έτσι προέκυψε το τελικό ψηφιδωτό αρχείο με την εκτίμηση του διορθωμένου συντελεστή K όπως φαίνεται στον χάρτη της εικόνας 4.8.



Εικόνα 4.8: Χάρτης κατανομής του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K σε $(\text{ton}\cdot\text{hr})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$ η εύρεση του οποίου στηρίχθηκε σε εδαφολογικά δεδομένα που χορηγήθηκαν από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους (European Soil Data Centre (ESDAC)).

Η μέση τιμή του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K με τη μεθοδολογία αυτή βρέθηκε ίση με $0.021 \text{ ton*hr/MJ*mm}$ και η τιμή αυτή φαίνεται πως περιγράφει πληρέστερα τον συντελεστή καθώς στηρίχθηκε σε εδαφολογικά δεδομένα περιλαμβάνοντας ωστόσο και την παρουσία των βραχωδών τμημάτων. Για τον λόγο αυτό η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης της περιοχής ως πιο αξιόπιστη και περισσότερο τεκμηριωμένη.

4.3.Υπολογισμός του συντελεστή μήκους και κλίσης LS

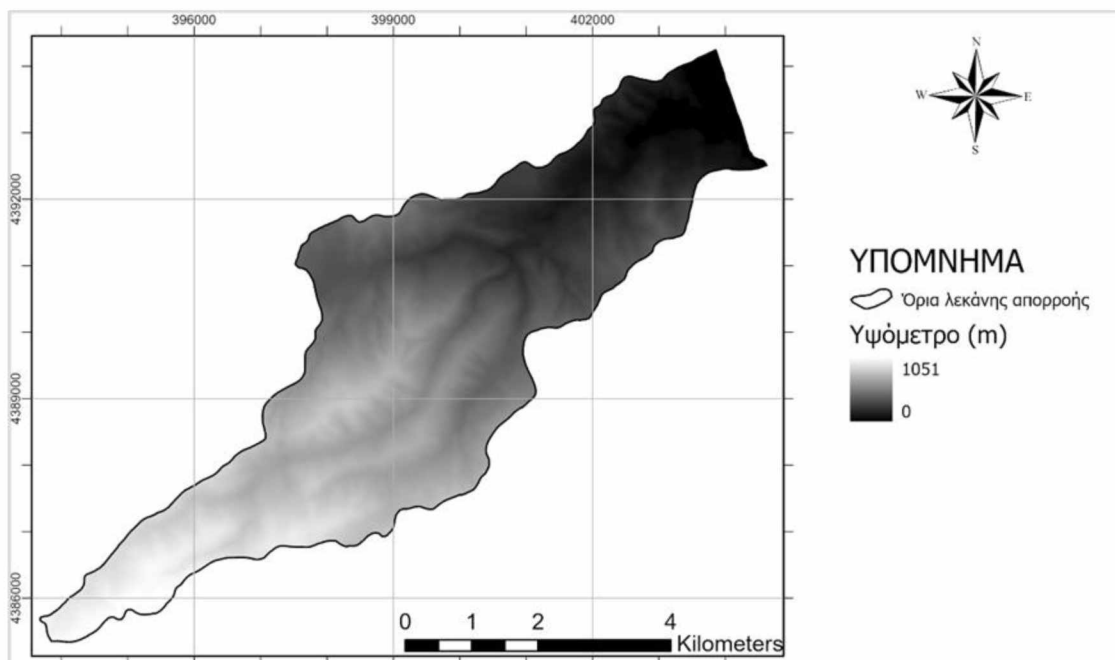
Ο συντελεστής μήκους και κλίσης LS αρχικά εκτιμήθηκε με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) σε συνδυασμό με τη διορθωμένη εξίσωση των Mitasova et al. (1996). Μετά την εφαρμογή του μοντέλου προέκυψαν σημαντικά σφάλματα και αυξημένες τιμές του συντελεστή μήκους L κυρίως κατά μήκος των ροών του ποταμού. Οι τιμές αυτές οδήγησαν σε σημαντική υπερεκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στις θέσεις αυτές, γεγονός που δικαιολογείται καθώς οι θέσεις αυτές σύμφωνα με τη θεωρία της RUSLE ορίζονται ως θέσεις εναπόθεσης των υλικών διάβρωσης και όχι σαν σημεία διαβρώσεων. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία μία δεύτερη διαφορετική μεθοδολογία, η οποία περιλάμβανε διόρθωση του συντελεστή L ορίζοντας τις περιοχές εναποθέσεων στα επίπεδα των δρόμων και του υδρογραφικού δικτύου.

Στις δύο μεθοδολογίες που περιγράφονται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του συντελεστή μήκους και κλίσης LS χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (2.29) των Mitasova et al. (1996). Η εξίσωση αυτή εξηγεί πληρέστερα την τοπογραφική πολυπλοκότητα της περιοχής λαμβάνοντας υπόψη τόσο την καμπυλότητα του προφίλ (στην κατηφορική κατεύθυνση) όσο και την εφαπτομενική καμπυλότητα (κάθετη προς την κατηφορική κατεύθυνση) και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του LS στην παρούσα εργασία και με τις δύο μεθοδολογίες.

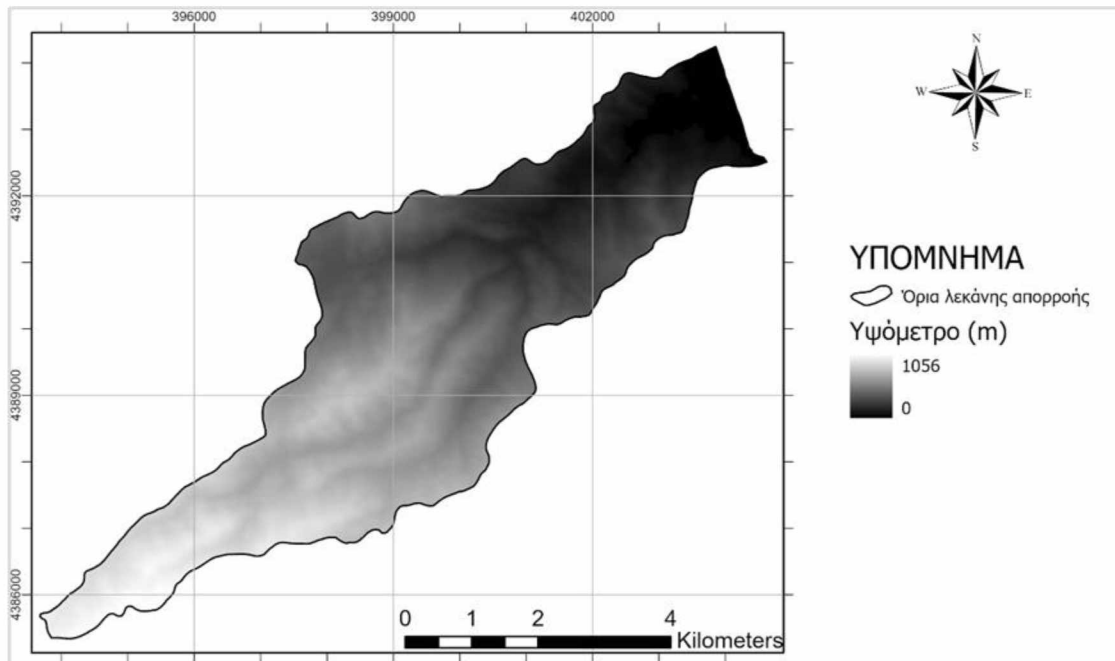
Μεγάλη ωστόσο αβεβαιότητα υπάρχει στην επιλογή των τιμών m , n της εξίσωσης καθώς οι τιμές αυτές μπορεί να μεταβάλλονται στα διάφορα σημεία της λεκάνης απορροής. Λόγω της μεταβλητότητας του τύπου ροής και των ιδιοτήτων της χρήσης γης από περιοχή σε περιοχή δεν μπορεί να υπάρξει ομοιόμορφη τιμή των m και n για τη μοντελοποίηση της διάβρωσης και στην πραγματικότητα οι συντελεστές αυτοί θα πρέπει να είναι χωρικά μεταβλητοί (Mitas and Mitasova, 1998). Σύμφωνα με τους Moore et al., (1992) οι καλύτερες τιμές ταύτισης στη RUSLE είναι $m=0.6$ και $n=1.3$.

Ο αντίκτυπος του συντελεστή m στο προκύπτον μοτίβο ρυθμού διάβρωσης και απόθεσης (Mitasova et al., 2013) προβλέπει για τις μικρότερες τιμές του m διάβρωση στο 87% της περιοχής και απόθεση στο 13%, ενώ για τις μεγαλύτερες τιμές του m προβλέπει διάβρωση στο 92% της περιοχής και περιορισμό της εναπόθεσης στο 8% της περιοχής κυρίως σε χαμηλές, ευρύτερες κοίλες μορφές που θεωρείται και το δυσμενέστερο σενάριο της διάβρωσης. Για τους λόγους που προαναφέρονται οι τιμές των m και n που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι 0.6 και 1.3 αντίστοιχα ως οι καταλληλότερες.

Για τον υπολογισμό του παράγοντα LS χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM) που προέκυψε από τη δημιουργία μωσαϊκού επιμέρους φύλλων κλίμακας 1:5.000 που χορηγήθηκαν από το Ελληνικό Κτηματολόγιο με υψηλή ακρίβεια 5m και χρονολογείται μεταξύ 2015-2016 (Εικόνα 4.9), ενώ για λόγους συγκρίσεως χρησιμοποιήθηκε και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χαμηλότερης ακρίβειας 27.4m (Εικόνα 4.10), η λήψη του οποίου έγινε από τη Γεωλογική Έρευνα των ΗΠΑ (USGS) και χρονολογείται το 2021. Τα ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου εισήχθησαν στο περιβάλλον του ArcGIS PRO ενώ ο υπολογισμός του LS για την πρώτη μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου που αναπτύχθηκε στο model builder.



Εικόνα 4.9: Χάρτης με τροποποιημένο DEM υψηλής ανάλυσης 5m της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

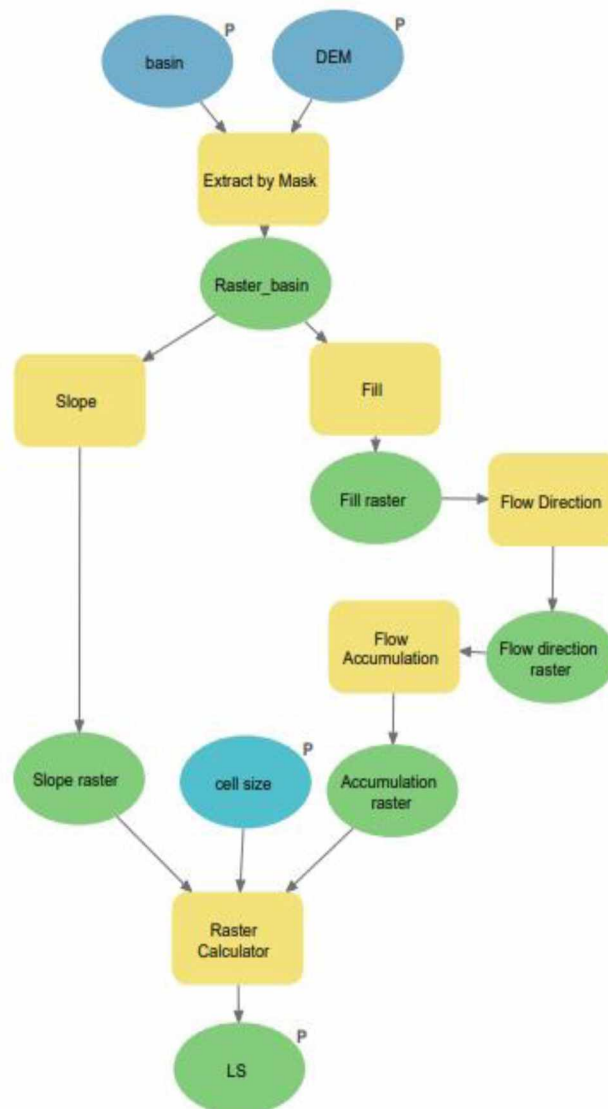


Εικόνα 4.10: Χάρτης με τροποποιημένο DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4m της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Το Model Builder στο ArcGIS PRO δημιουργεί ένα μοντέλο προσθέτοντας εργαλεία γεωεπεξεργασίας, επίπεδα χάρτη, σύνολα και τύπους δεδομένων τα οποία συνδέει μεταξύ τους και τα παρουσιάζει με ένα διάγραμμα ροής σε ένα γραφικό περιβάλλον όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11, το οποίο διευκολύνει τον χρήστη στη συνεχή εφαρμογή του. Επεξεργάζεται επαναληπτικά κάθε κατηγορία χαρακτηριστικών, raster, αρχείων ή πινάκων σε ένα χώρο εργασίας. Η ακολουθία ροής της εργασίας οπτικοποιείται ως ένα κατανοητό διάγραμμα. Το μοντέλο εκτελείται βήμα προς βήμα, μέχρι ένα επιλεγμένο βήμα ή εκτελεί ολόκληρο το μοντέλο. Το μοντέλο που δημιουργείται μετατρέπεται σε εργαλείο γεωεπεξεργασίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δέσμες ενεργειών Python καθώς και σε άλλα μοντέλα.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 4.11 κάθε βήμα του μοντέλου στο model builder έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα και χρώμα, ώστε να είναι εύκολη η ανάγνωση του προγράμματος στον χρήστη. Τα δεδομένα εισόδου απεικονίζονται με μία μπλε έλλειψη, τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν εμφανίζονται με κίτρινο παραλληλόγραμμο ενώ τα αποτελέσματα που παράγονται παρουσιάζονται με μία πράσινη έλλειψη. Δίνεται επίσης η δυνατότητα με το καθορισμό P (parameter) να ορίζονται κάθε φορά κάποιες μεταβλητοί παράμετροι τους οποίους εισάγει κάθε φορά ο χρήστης σαν δεδομένο εισόδου σε οποιοδήποτε στάδιο επεξεργασίας του μοντέλου.

Συγκεκριμένα ως δεδομένα εισόδου ορίστηκαν το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM), το διανυσματικό αρχείο με τη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα (BASIN) καθώς η τιμή του μεγέθους του κελιού του αντίστοιχου ψηφιακού μοντέλου που είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της εξίσωσης (2.29) των Mitasova et al. (1996). Επίσης ορίστηκε το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτεί το raster αρχείο με τις τιμές του συντελεστή LS. Μετέπειτα εισήχθησαν τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συντελεστή μήκους και κλίσης LS σύμφωνα με την πρώτη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) ενώ η αναλυτική περιγραφή τους εμφανίζεται στη συνέχεια της εργασίας.

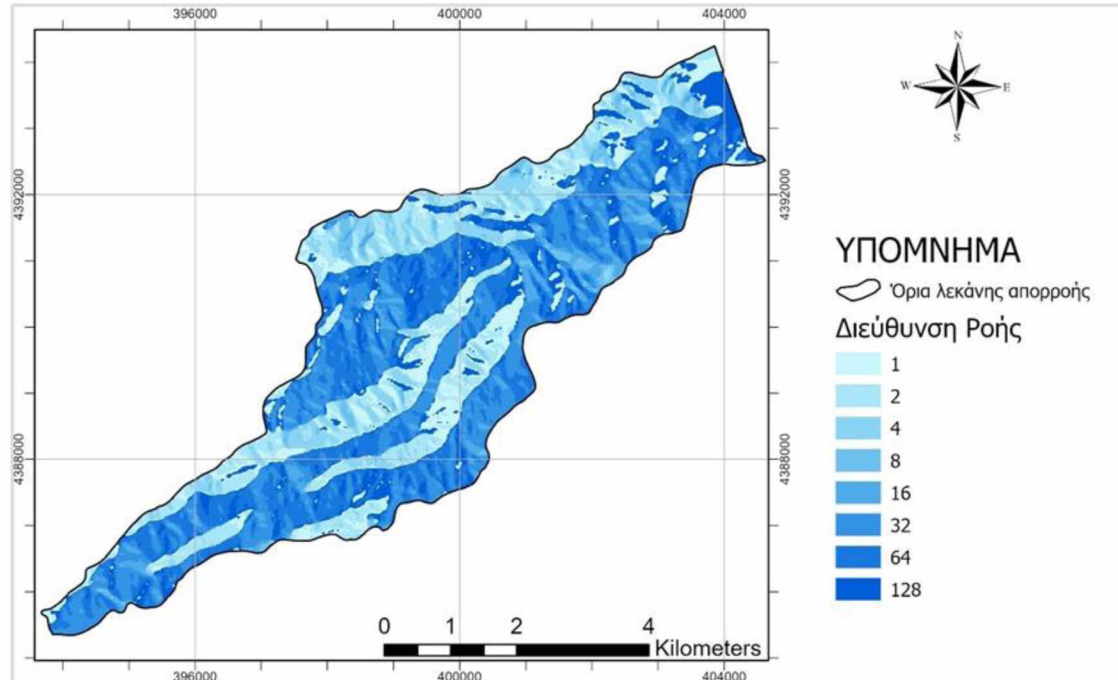


Εικόνα 4.11: Γραφική αναπαράσταση εφαρμογής του μοντέλου LS σε περιβάλλον Model Builder.

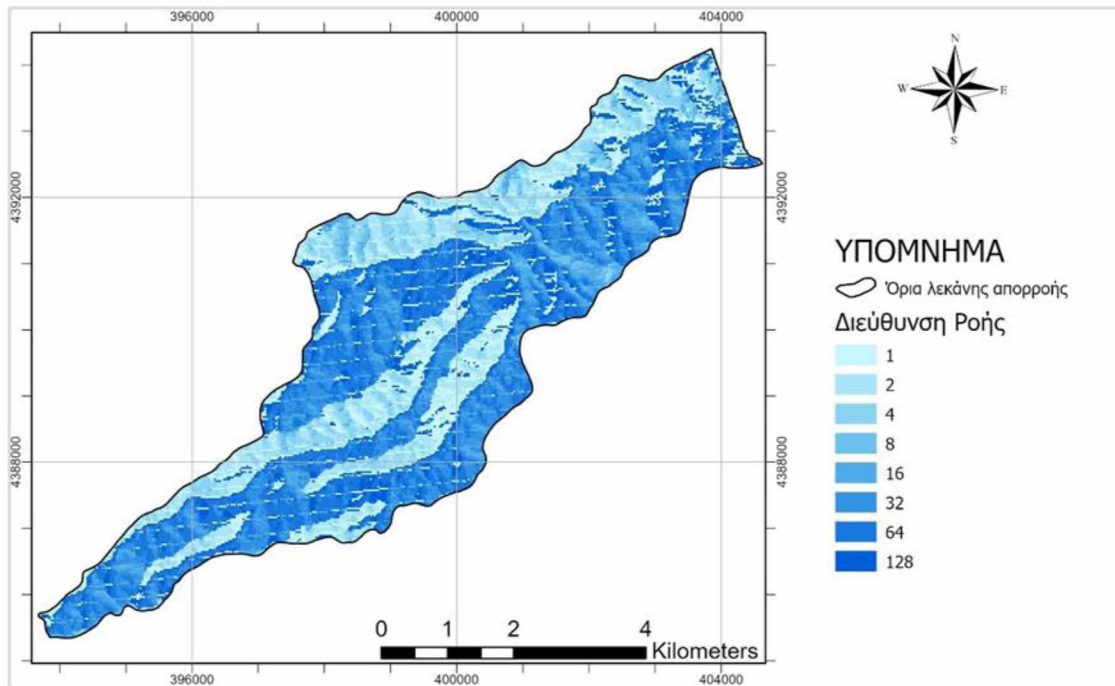
Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε δύο φορές, μία για το DEM υψηλής ανάλυσης 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου και μία για το DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4m της Γεωλογικής Έρευνας των ΗΠΑ (USGS).

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 4.11 μετά από την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου (DEM) και το διανυσματικό αρχείο της λεκάνης δίνεται η εντολή `extract by mask` ώστε να αποκοπεί το DEM στα όρια της λεκάνης απορροής. Στη συνέχεια ακολουθούνται δύο διαδρομές επεξεργασίας οι οποίες εκτελούνται διαδοχικά.

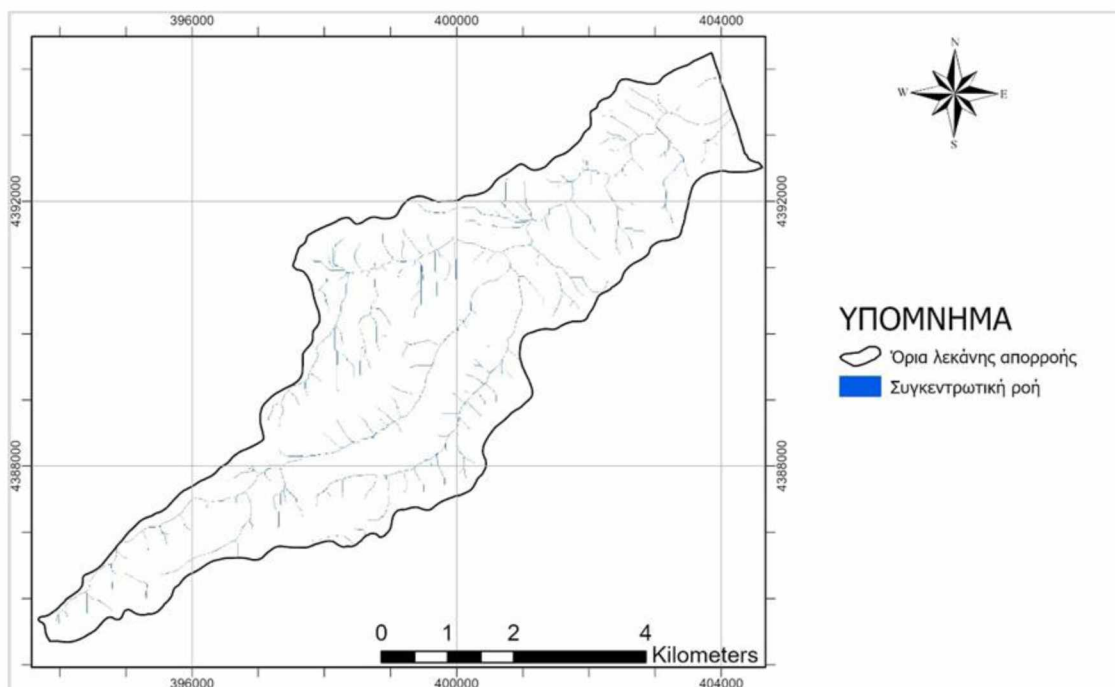
Αρχικά εκτελείται η εντολή `Fill` που αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα στην υδρολογική ανάλυση καθώς ελαχιστοποιεί τις τοπικές ταπεινώσεις του εδάφους και παρέχει ακριβέστερη εικόνα του υδροκρίτη. Στη συνέχεια δίνεται η εντολή `Flow Direction` με την οποία εκτελείται η δημιουργία κανάβου διεύθυνσης απορροής (Εικόνα 4.12 και 4.13) και ακολουθεί η δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής με την εντολή `Flow Accumulation` (Εικόνα 4.14 και 4.15).



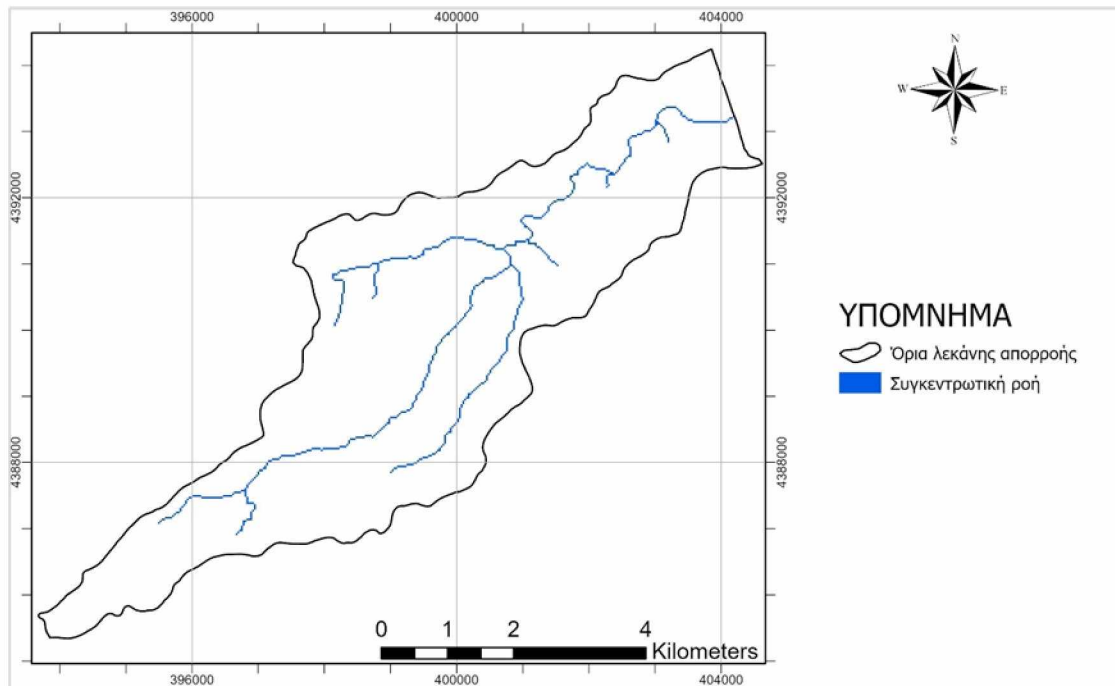
Εικόνα 4.12: Χάρτης που απεικονίζει τις Διευθύνσεις Ροής (Flow Direction) στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα και έχει εξαχθεί από το DEM υψηλής ανάλυσης 5m.



Εικόνα 4.13: Χάρτης που απεικονίζει τις Διευθύνσεις Ροής (Flow Direction) στη λεκάνη απορροής και έχει εξαχθεί από το DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

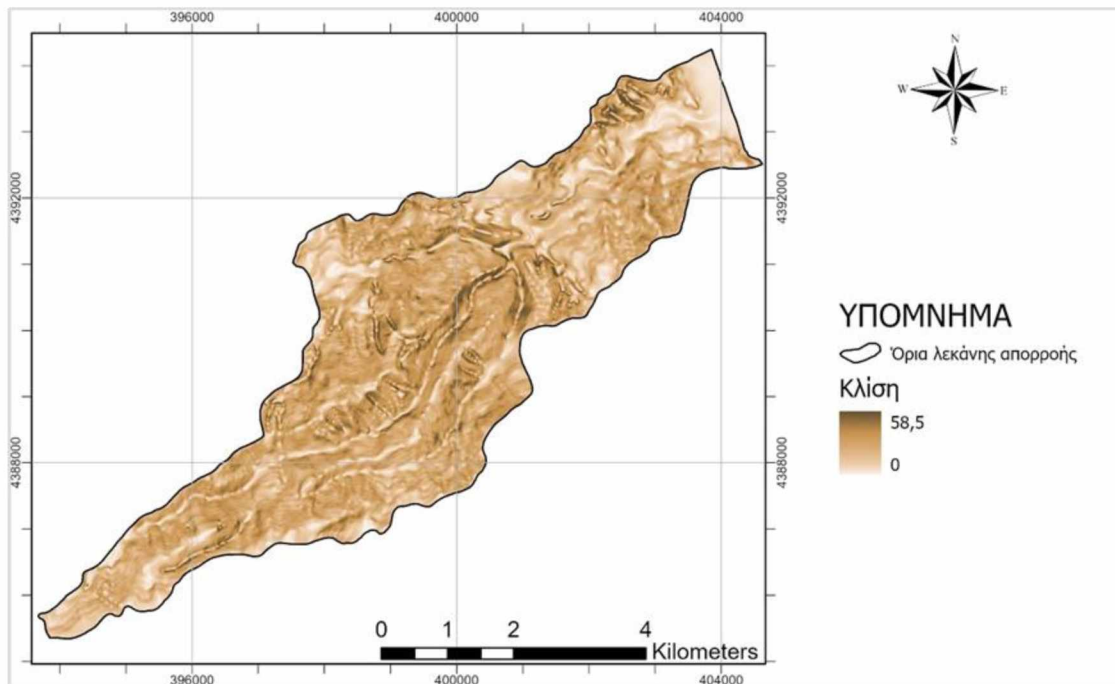


Εικόνα 4.14: Χάρτης που απεικονίζει τη συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation) στη λεκάνη απορροής και έχει εξαχθεί από το DEM υψηλής ανάλυσης 5m.

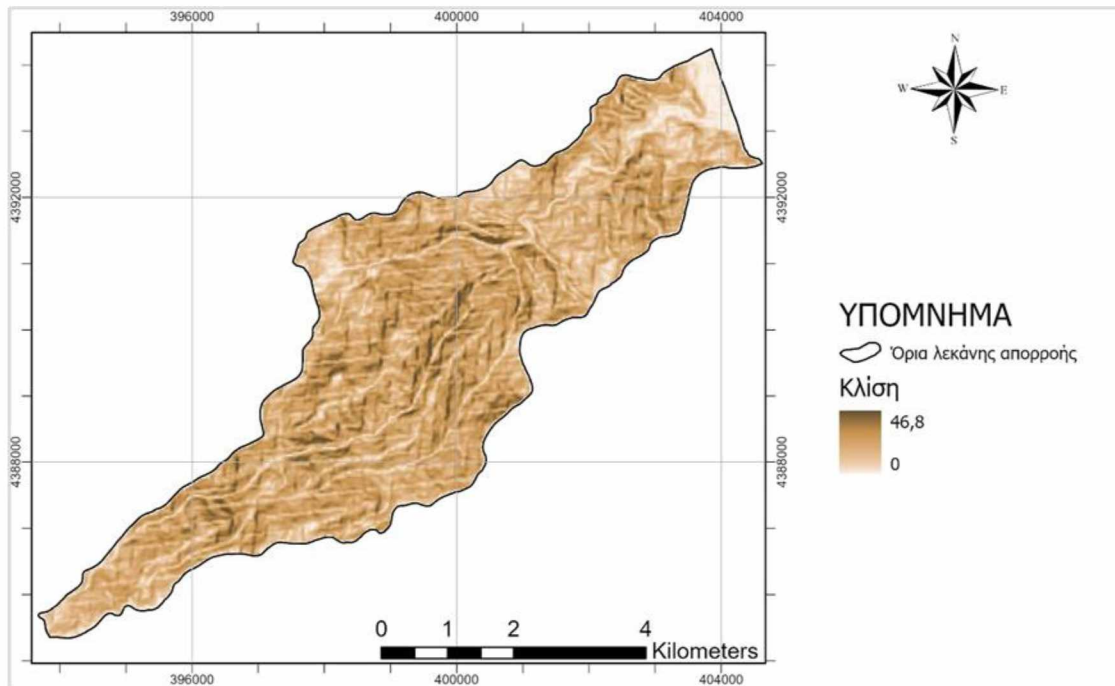


Εικόνα 4.15: Χάρτης που απεικονίζει τη συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation) στη λεκάνη απορροής και έχει εξαχθεί από το DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

Στη δεύτερη διαδρομή επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους πραγματοποιείται η εύρεση της κλίσης του εδάφους με την εντολή slope και προκύπτει ο χάρτης της εικόνας 4.16 και 4.17.



Εικόνα 4.16: Χάρτης που απεικονίζει τις κλίσεις (Slope) της λεκάνης απορροής και έχει εξαχθεί από το DEM υψηλής ανάλυσης 5m.



Εικόνα 4.17: Χάρτης που απεικονίζει τις κλίσεις (Slope) της λεκάνης απορροής και έχει εξαχθεί από το DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

Οι διαφορές στα παραγόμενα raster αρχεία είναι σημαντικές. Το υδρογραφικό δίκτυο με το χαμηλότερης ψηφιακής ανάλυσης DEM παρουσιάζει ένα φτωχό υδρογραφικό δίκτυο και όπως φαίνεται δεν απεικονίζει το πραγματικό υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη περιοχής. Η μέση τιμή των κλίσεων της περιοχής που βρέθηκε με την επεξεργασία του DEM ανάλυσης 5 m είναι ίση με 17.3° και η μέγιστη τιμή ίση με 58.5° ενώ με την επεξεργασία του DEM ανάλυσης 27.4 m προέκυψε ίση με 16.5° και μέγιστη τιμή ίση με 46.8° .

Στο τελευταίο στάδιο εισάγεται η εξίσωση των Mitasova et al. (1996):

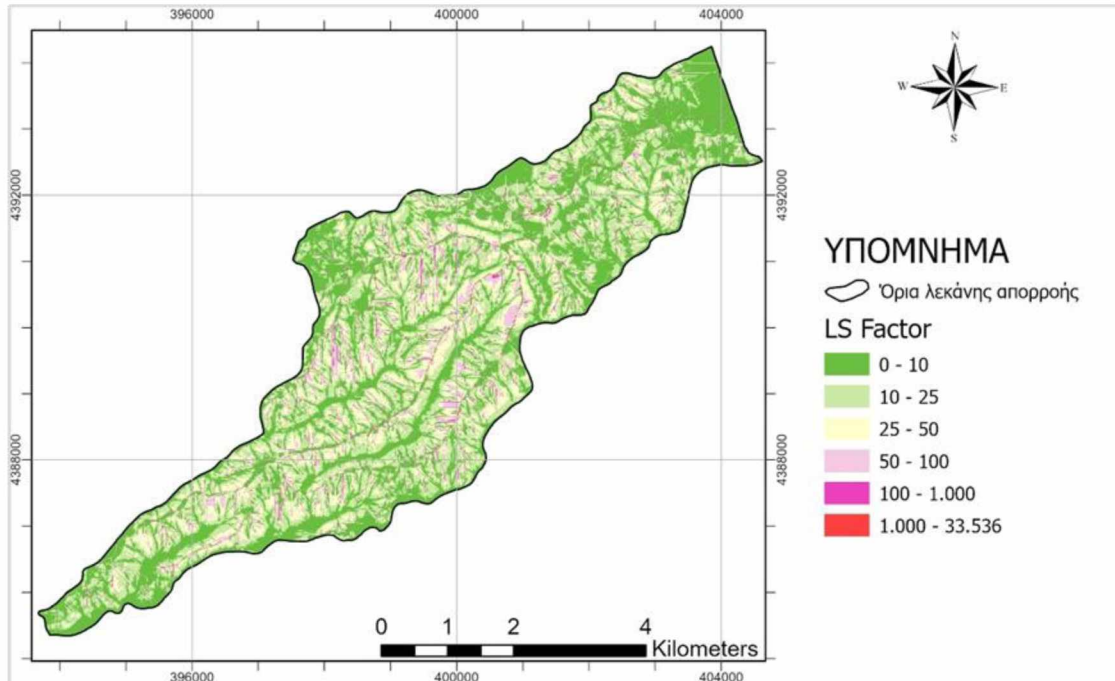
$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.09} \right)^n$$

Η εισαγωγή πραγματοποιείται με το εργαλείο Raster calculator με την εξής μορφή:

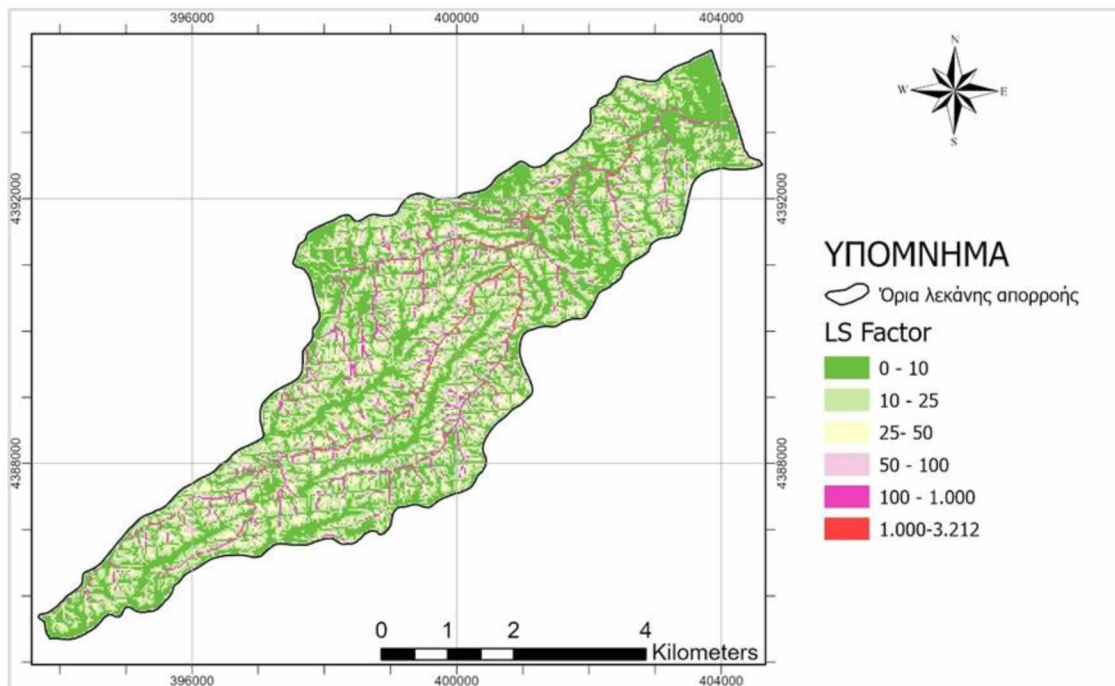
Power ("Flow_Accumulation raster" * cellsize / 22.13, 0.6) * Power (Sin ("Slope raster" * 0.01745) / 0.09, 1.3) * 1.6

Όπου cell size ορίζεται η τιμή του μεγέθους του κελιού και είναι ίση με 5m για το DEM υψηλής ακρίβειας και 27.4m για το DEM που προέκυψε από το USGS.

Με τη μεθοδολογία αυτή εκτιμήθηκε ο συντελεστής LS της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και παρουσιάζεται στους χάρτες των εικόνων 4.18 και 4.19 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.18: Χάρτης απεικόνισης του τοπογραφικού συντελεστή LS της λεκάνης απορροής που έχει στηριχθεί στο DEM υψηλής ανάλυσης 5m.



Εικόνα 4.19: Χάρτης απεικόνισης του τοπογραφικού συντελεστή LS της λεκάνης απορροής που έχει στηριχθεί στο DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

Τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισαγωγής. Συνήθως συνιστάται οριζόντια ανάλυση μικρότερη των 30m, ενώ για εφαρμογή σε μετρήσεις περιφερειακής κλίμακας ακόμη και χαμηλότερες αναλύσεις μπορεί να είναι χρήσιμες (Mitasova et al., 2013).

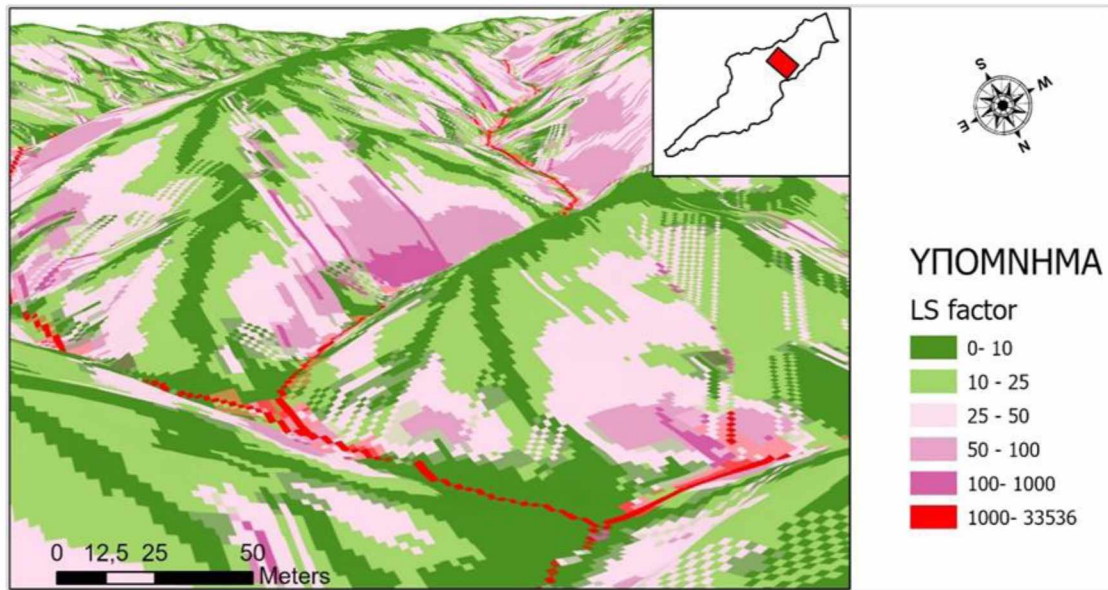
Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές του LS για τα δύο DEM που χρησιμοποιήθηκαν με τις αντίστοιχες επιφάνειες και τα ποσοστά των τιμών στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος. Η μέση τιμή LS του DEM ανάλυσης 5 m είναι 26.9 ενώ για το DEM ανάλυσης 27.4 m είναι 33.2.

Πίνακας 4.6: Τιμές του συντελεστή LS στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Τιμές LS	Επιφάνεια (km ²)		Ποσοστό επιφάνειας (%)	
	DEM 5m	DEM 27.4 m	DEM 5m	DEM 27.4 m
0-10	10.97	11.97	39.3	43.9
10-25	9.79	7.82	35.1	28.7
25-50	5.27	4.26	18.8	15.6
50-100	1.27	1.78	4.6	6.5
>100	0.63	1.45	2.3	5.3

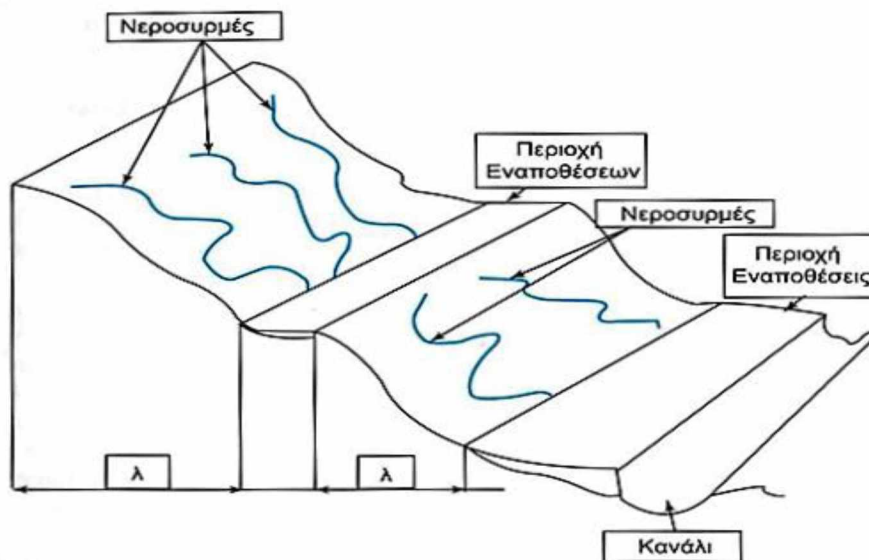
Με τη μεθοδολογία αυτή στις περιοχές συμπυκνωμένης ροής εμφανίστηκαν μη ρεαλιστικές τιμές LS και επομένως θα εμφανιστούν και μη ρεαλιστικές τιμές διάβρωσης. Κάποιες από αυτές τις μη ρεαλιστικές τιμές φαίνονται στην εικόνα 4.20 κατά μήκος της ροής του υδατορρέυματος και είναι οι περιοχές που εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα και έχουν τιμές >1000 ενώ σε κάποιες θέσεις της λεκάνης απορροής η τιμή του LS ανέρχεται σε 33536 στο DEM υψηλής ανάλυσης 5m.

Είναι γεγονός πως η εμπειρική εξίσωση της RUSLE δεν έχει σχεδιαστεί για την πρόβλεψη απώλειας εδάφους σε τέτοιες περιοχές. Αυτές οι μη ρεαλιστικές τιμές του LS εμφανίστηκαν στην περιοχή με την ίδια συχνότητα και στο DEM υψηλής ανάλυσης 5m που αποτυπώθηκαν με ακρίβεια οι περιοχές συγκεντρωμένης ροής αλλά και στο DEM χαμηλότερης ανάλυσης.



Εικόνα 4.20: Τρισδιάστατος χάρτης του συντελεστή μήκους και κλίσης LS σε περιοχή της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα που αποτυπώνει με κόκκινο χρώμα τη μη ρεαλιστική αύξηση του συντελεστή LS στις περιοχές συμπυκνωμένης ροής.

Σύμφωνα με τη θεωρία της RUSLE και όπως φαίνεται από το σκαρίφημα της εικόνας 4.21 (Δερμίσης, 2013) ο συντελεστής μήκους κλίσης L δεν ορίζεται για τις περιοχές των εναποθέσεων αλλά μόνο για τις περιοχές διάβρωσης. Ως περιοχές διάβρωσης ορίζονται ως οι περιοχές μεταξύ των σημείων έναρξης της διάβρωσης (υδροκρίτες και τομές του δρόμου με την πλαγιά) και των περιοχών εναποθέσεων (το υδρογραφικό δίκτυο και τις πλημμυρικές κοίτες, τους οδικούς άξονες και τον αστικό ιστό).



Εικόνα 4.21: Σκαρίφημα κεκλιμένου εδάφους μη ομοιόμορφης κλίσης όπου εμφανίζονται σχηματικά οι νεροσυρμές, οι θέσεις εναπόθεσης των διαβρωθέντων υλικών, το κανάλι συγκέντρωσης ροών και τα μήκη λ των κεκλιμένων επιφανειών (Δερμίσης, 2013).

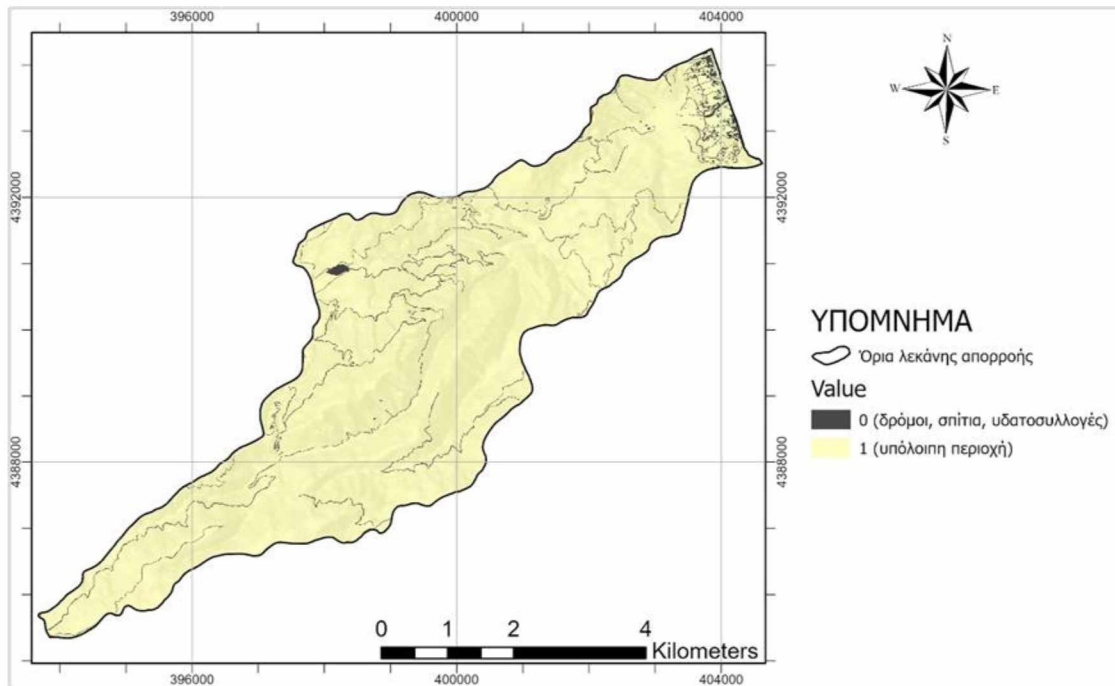
Οι Mitasova et al., (2013) θεωρούν ότι είναι χρήσιμο να συμπεριληφθούν αυτές οι περιοχές επειδή αντικατοπτρίζουν τη ρεαλιστική αύξηση της διάβρωσης συχνά με πιθανότητα σχηματισμού ρεμάτων και ότι η χωρική τους έκταση είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με ολόκληρη την περιοχή, οπότε ο αντίκτυπός τους π.χ. στη μέση απώλεια εδάφους από ολόκληρη την περιοχή θα είναι συνήθως μικρή.

Ωστόσο για την ορθότερη και λεπτομερέστερη αποτύπωση του συντελεστή μήκους κλίσης L σε όλες τις θέσεις της λεκάνης απορροής, αποφασίστηκε να ακολουθηθεί μια διαφορετική μεθοδολογία με την οποία θα ορίζονται οι θέσεις εναπόθεσης και οι θέσεις διάβρωσης και θα εκτιμάται ο συντελεστής L στα σημεία διάβρωσης και όχι στα σημεία εναπόθεσης.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό αποτελούν ένα διανυσματικό αρχείο με το οδικό δίκτυο, τα σπίτια και τις υδατοσυλλογές της λεκάνης απορροής καθώς και το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου του εδάφους (DEM). Τα δύο ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το DEM με υψηλή ακρίβεια 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου και το χαμηλότερης ακρίβειας DEM 27.4m από τη Γεωλογική Έρευνα των ΗΠΑ (USGS).

Αρχικά έγινε ο προσδιορισμός των δρόμων, των σπιτιών και των υδατοσυλλογών ως περιοχές εναποθέσεων. Το απαραίτητο διανυσματικό αρχείο δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση μέσω του προγράμματος ArcGIS-PRO και βασίστηκε για το οδικό δίκτυο στον χάρτη "Οδικό δίκτυο" που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO ενώ για τα σπίτια και τις υδατοσυλλογές στον χάρτη "Imagery Hybrid" των βασικών χαρτών του προγράμματος.

Ακολούθησε η μετατροπή του διανυσματικού αρχείου (vector) σε ψηφιδωτό αρχείο (raster) με την εντολή feature to raster που περιλαμβάνεται στα Geoprocessing tools του προγράμματος ArcGIS-PRO. Στη συνέχεια με την εντολή Reclassify αποδόθηκε μηδενική τιμή στις θέσεις εναποθέσεων, δηλαδή στο οδικό δίκτυο, τα σπίτια και τις υδατοσυλλογές ενώ στα υπόλοιπα σημεία της λεκάνης απορροής, δηλαδή στις περιοχές διάβρωσης, αποδόθηκε η τιμή 1 (Εικόνα 4.22). Το αρχείο αυτό ονομάστηκε Road_Mask.



Εικόνα 4.22: Χάρτης απεικόνισης των περιοχών εναποθέσεων (δρόμων, σπιτιών και υδατοσυλλογών) που αποδόθηκε η μηδενική τιμή και των περιοχών διάβρωσης που αποδόθηκε η τιμή 1 (αρχείο Road_Mask).

Για τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου που επίσης αποτελεί περιοχή εναποθέσεων χρησιμοποιήθηκαν τα δύο ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) υψηλής 5m και χαμηλής 27.4m ανάλυσης. Αρχικά πραγματοποιήθηκε διόρθωση των κοιλοτήτων του εδάφους με την εντολή fill στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Ακολούθησε η δημιουργία κανάβου της διεύθυνσης απορροής με την εντολή Flow Direction και το αρχείο που προέκυψε ονομάστηκε FlowDirection.

Ακολούθως και πριν από τη δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής για την εύρεση του υδρογραφικού δικτύου, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του raster αρχείου με τις θέσεις εναποθέσεων των δρόμων, των σπιτιών και των υδατοσυλλογών στον κανάβο της διεύθυνσης απορροής (αρχείο FlowDirection) με την εντολή Raster Calculator και πολλαπλασιασμό των δύο επιπέδων πληροφορίας:

"FlowDirection " * " Road_Mask"

Το αρχείο που προέκυψε ονομάστηκε FlowDir_Road_Mask.

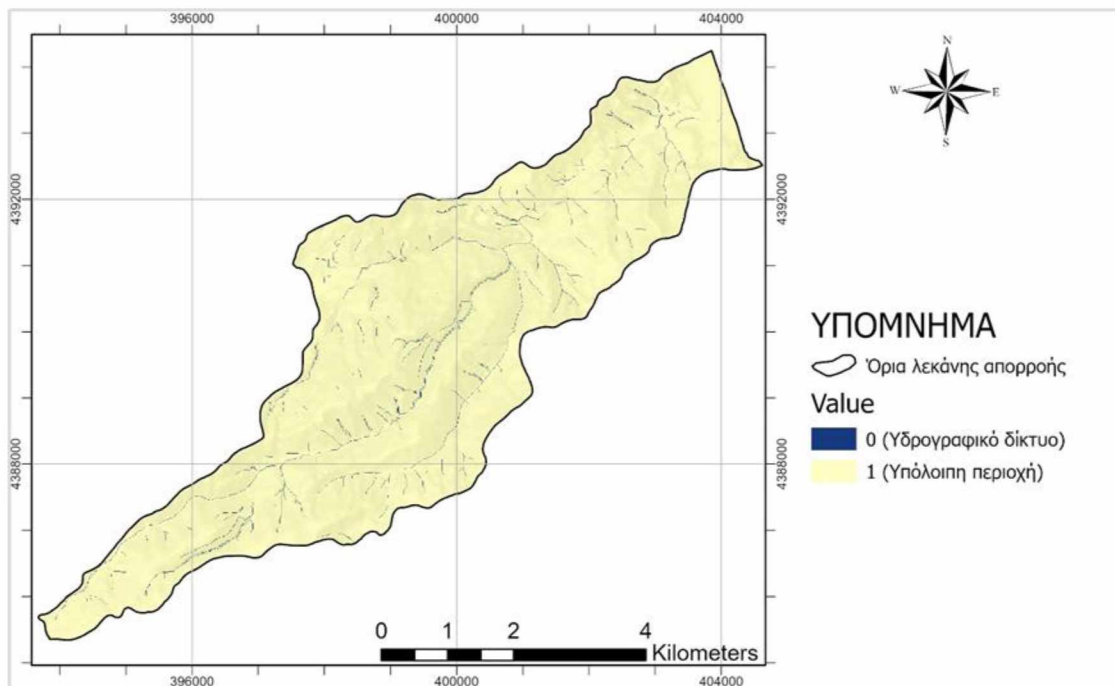
Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την ορθή εύρεση της συγκεντρωτικής ροής γιατί όπως φαίνεται από το σκαρίφημα της εικόνας 4.21 οι νεροσυρμές που δημιουργούνται μετά από αυτές τις περιοχές εναποθέσεων δεν ακολουθούν τις νεροσυρμές πριν από τις θέσεις εναποθέσεων και επομένως οι θέσεις αυτές θα πρέπει να περιλαμβάνονται στην εκτίμηση. Έτσι στο αρχείο αυτό που δημιουργήθηκε

(FlowDir_Road_Mask) έγινε εύρεση της συγκεντρωτικής ροής με την εντολή Flow Accumulation και δημιουργήθηκε το αρχείο Accumulation_River.

Για τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου και χρησιμοποιώντας το raster αρχείο που προέκυψε προηγουμένως με το Raster Calculator εισάγουμε την εξίσωση:

$$\text{Accumulation_River} \leq 1000$$

Το raster αρχείο που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, ονομάστηκε River_Mask και περιέχει μηδενικές τιμές για την περιοχή του υδατορρεύματος και την τιμή 1 για τις υπόλοιπες περιοχές (Εικόνα 4.23).



Εικόνα 4.23: Χάρτης απεικόνισης του υδρογραφικού δικτύου που αποτελεί περιοχή εναποθέσεων που αποδόθηκε η μηδενική τιμή και των υπόλοιπων περιοχών διάβρωσης που αποδόθηκε η τιμή 1 (αρχείο River_Mask)

Το αρχείο αυτό (River_Mask) εισήχθη με πολλαπλασιασμό στο αρχείο FlowDir_Road_Mask με το εργαλείο Raster Calculator και τη μορφή:

$$\text{River_Mask} * \text{FlowDir_Road_mask}$$

Έτσι δημιουργήθηκε ένα αρχείο με τον τελικό κানাβο διεύθυνσης απορροής που περιλαμβάνει τις οριοθετημένες πλέον περιοχές των εναποθέσεων και των διαβρώσεων και ονομάστηκε FlowDir_Final. Τέλος με την εντολή Flow Accumulation και τη χρήση του αρχείου FlowDir_Final, δημιουργήθηκε το αρχείο FlowAcc_Final που παρουσιάζει τον κানাβο της τελικής συγκεντρωτικής ροής.

Η εύρεση της κλίσης του εδάφους πραγματοποιήθηκε με την εντολή slope από τα Geoprocessing tools του προγράμματος ArcGIS-PRO χρησιμοποιώντας τα δύο ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου.

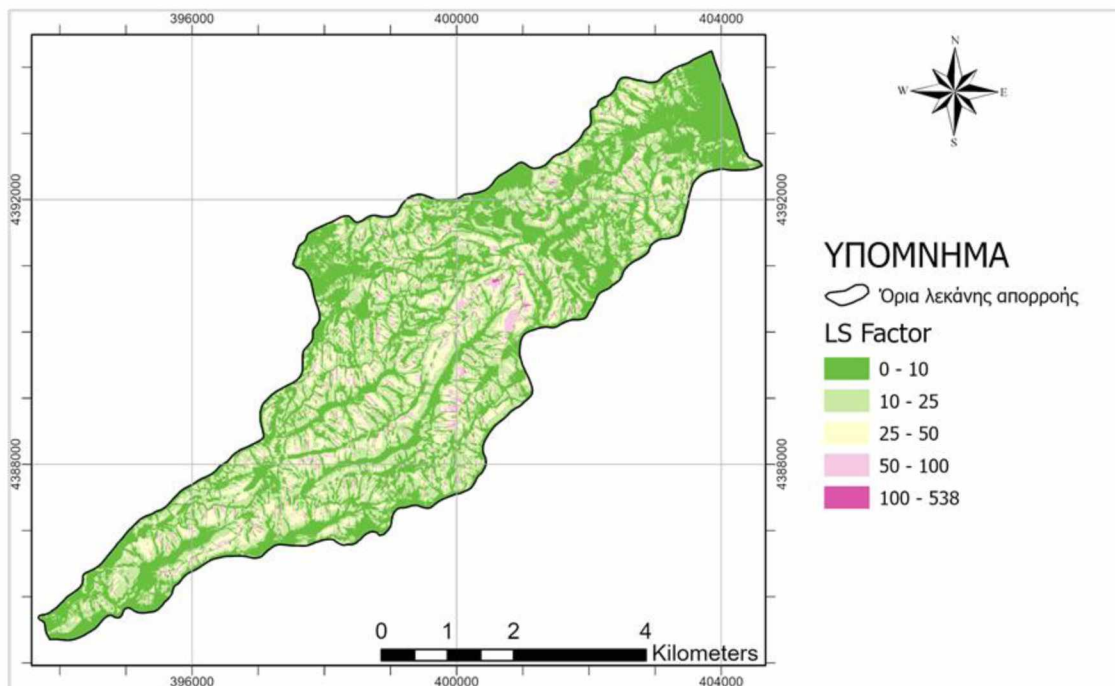
Τέλος εισήχθη η εξίσωση των Mitasova et al. (1996):

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.09} \right)^n$$

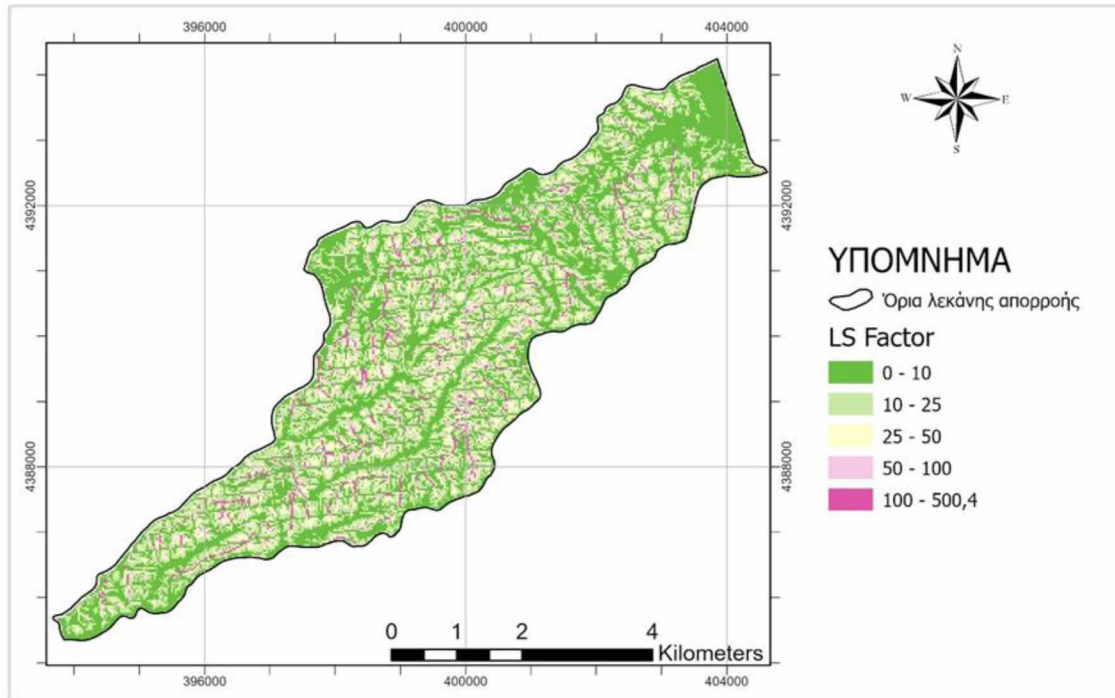
με το εργαλείο Raster calculator με την εξής μορφή:

Power ("FlowAcc_Final" * cellsize / 22.13, 0.6) * Power (Sin ("Slope_raster" * 0.01745) / 0.09, 1.3) * 1.6

Τα αποτελέσματα και για τα δύο διαθέσιμα ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου, το DEM υψηλής ανάλυσης 5m του Κτηματολογίου και το DEM χαμηλότερης ανάλυσης 27.4m από το USGS εμφανίζονται στις εικόνες 4.24 και 4.25 καθώς και στον πίνακα 4.7. Η μέση τιμή LS του DEM ανάλυσης 5 m είναι 15.8 ενώ για το DEM ανάλυσης 27.4 m είναι 20.3.



Εικόνα 4.24: Χάρτης απεικόνισης του τοπογραφικού συντελεστή LS της λεκάνης απορροής που έχει στηριχθεί στο DEM υψηλής ανάλυσης 5m.

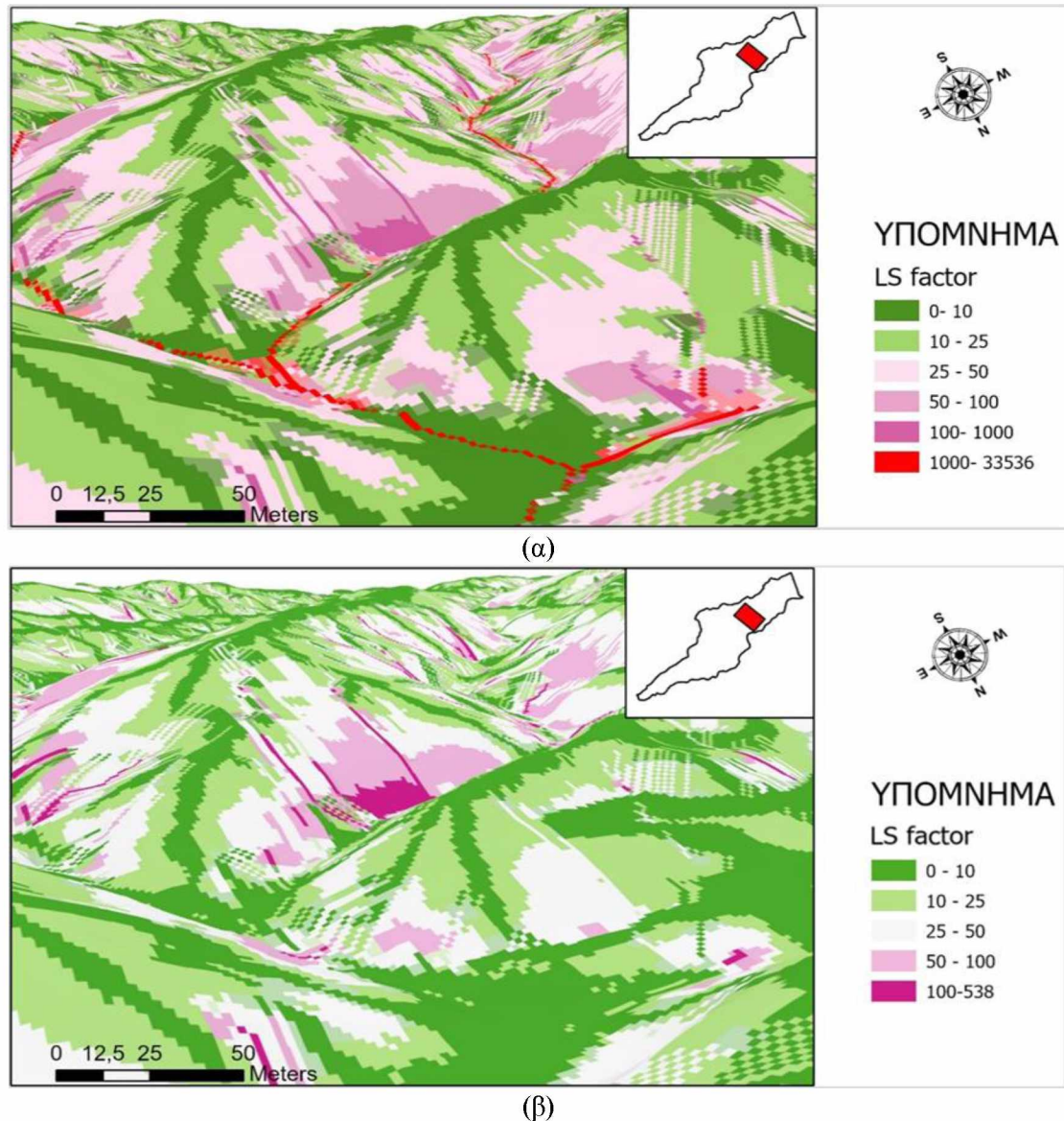


Εικόνα 4.25: Χάρτης απεικόνισης του τοπογραφικού συντελεστή LS της λεκάνης απορροής που έχει στηριχθεί στο DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

Πίνακας 4.7: Τιμές του συντελεστή LS στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Τιμές LS	Επιφάνεια (km ²)		Ποσοστό επιφάνειας (%)	
	DEM 5m	DEM 27.4 m	DEM 5m	DEM 27.4 m
0-10	12.91	12.68	46.4	46.5
10-25	9.57	7.90	34.4	29.1
25-50	4.39	4.18	15.6	15.4
50-100	0.81	1.67	2.9	6.2
>100	0.19	0.81	0.7	2.8

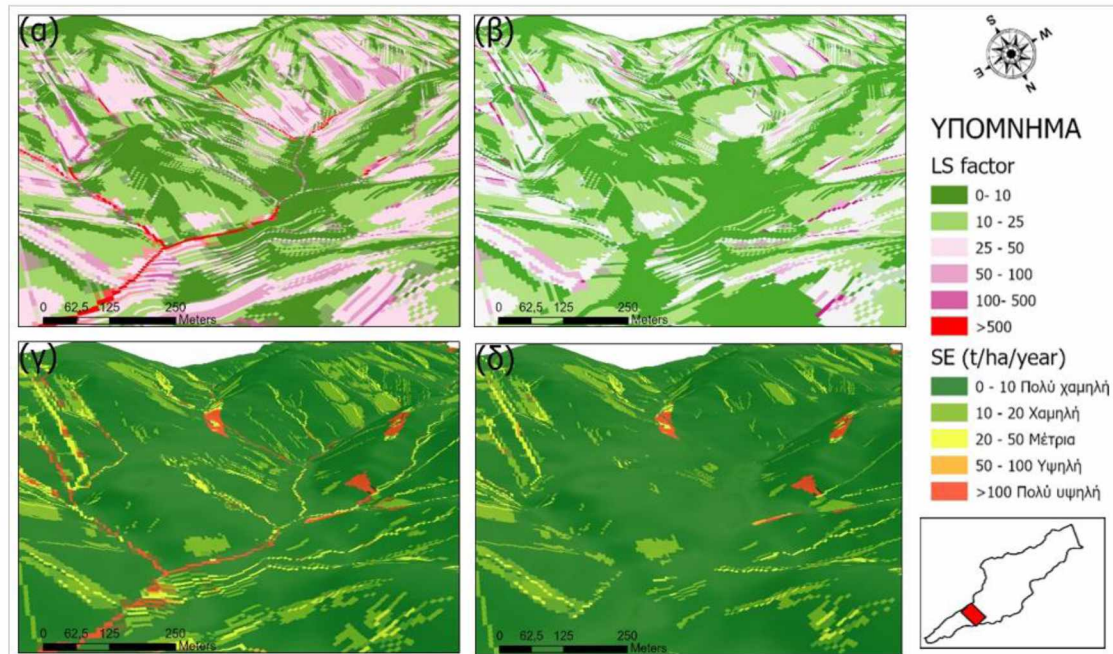
Όπως φαίνεται από την αποτύπωση του συντελεστή μήκους και κλίσης LS σε τρισδιάστατη απεικόνιση στην εικόνα 4.26, η δεύτερη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σχετικά με τη θεωρία της εμπειρικής εξίσωσης RUSLE φαίνεται πως περιγράφει με ορθότερο τρόπο τον συντελεστή. Η μέγιστη τιμή LS με την πρώτη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) και την εξίσωση των Mitasova et al. (1996) ανέρχεται για το DEM υψηλής 5m του Κτηματολογίου σε 33536 ενώ για το ίδιο DEM με τη δεύτερη διορθωμένη μεθοδολογία η μέγιστη τιμή του συντελεστή ανέρχεται σε 538.



Εικόνα 4.26: Τρισδιάστατος χάρτης του συντελεστή μήκους και κλίσης LS στην ίδια περιοχή της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα, (α) εκτίμηση με τη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) και την εξίσωση των Mitasova et al. (1996) που αποτυπώνει με κόκκινο χρώμα τη μη ρεαλιστική αύξηση του συντελεστή LS στις περιοχές συμπυκνωμένης ροής (β) εκτίμηση με τη διορθωμένη μεθοδολογία που περιλαμβάνει οριοθέτηση των περιοχών εναποθέσεων και διαβρώσεων και την εξίσωση των Mitasova et al. (1996).

Είναι γεγονός ότι η χωρική έκταση των περιοχών με τις πολύ υψηλές τιμές του LS με τη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με ολόκληρη την περιοχή, όμως ο αντίκτυπός τους στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης είναι μεγάλος και ως προς τη μέση τιμή της εδαφικής διάβρωσης αλλά κυρίως ως προς τις μέγιστες τιμές στις οποίες μπορεί να φτάσει η εδαφική διάβρωση καθώς και τη χωρική κατανομή της (Εικόνα 4.27). Η μέγιστη τιμή της εδαφικής διάβρωσης (Soil Erosion- SE) με τη χρήση του LS που προέκυψε από την πρώτη

μεθοδολογία για τη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος ήταν $27048 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ενώ η μέγιστη τιμή SE με τη χρήση του LS που προέκυψε με τη διορθωμένη μεθοδολογία είναι $4317 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, ενώ οι μέσες τιμές ήταν $13.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ και $8.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, αντίστοιχα για το DEM υψηλής ανάλυσης 5m.



Εικόνα 4.27: Τρισδιάστατη απεικόνιση του τοπογραφικού συντελεστή LS και SE (α) και (γ) εκτίμηση με τη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) και την εξίσωση των Mitasova et al. (1996), (β) και (δ) εκτίμηση με τη διορθωμένη μεθοδολογία που περιλαμβάνει οριοθέτηση των περιοχών εναποθέσεων και διαβρώσεων και την εξίσωση των Mitasova et al. (1996), σε περιοχή της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα που έχει στηριχθεί στο DEM υψηλής ανάλυσης 5m.

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης η δεύτερη μεθοδολογία εκτίμησης του συντελεστή μήκους και κλίσης LS που περιέχει διόρθωση με οριοθέτηση των περιοχών εναποθέσεων και διαβρώσεων.

4.4 Υπολογισμός συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C προέκυψε από την ψηφιοποίηση των χρήσεων γης της περιοχής, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο τον χάρτη Imagery Hybrid που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO και από την απόδοση των επιμέρους κατάλληλων τιμών C. Για λόγους αντιπαράθεσης εκτιμήθηκε και ο συντελεστής C με τη βοήθεια της ψηφιοποίησης των χρήσεων γης από τους χάρτες του προγράμματος CORINE Land Cover 2018.

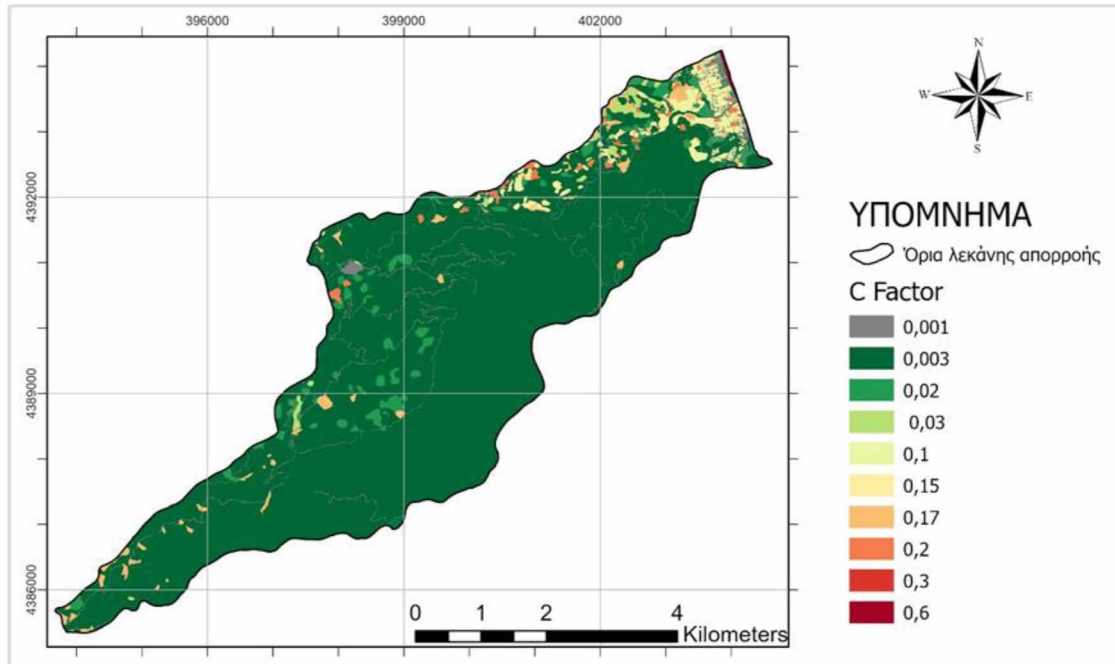
Σε κάθε μία χρήση γης αποδόθηκε μια τιμή του συντελεστή φυτοκάλυψης C όπως φαίνεται στον πίνακα 4.8. Οι τιμές αυτές στηρίχτηκαν αποκλειστικά σε βιβλιογραφικά δεδομένα και δεν προέρχονται από μετρήσεις πεδίου και εργαστηριακές μετρήσεις δειγματοληψίας σίγουρα όμως αποδίδουν με ικανοποιητική προσέγγιση την τιμή του συντελεστή C.

Πίνακας 4.8: Κατηγορίες χρήσεων γης στην περιοχή έρευνας και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή C που αποδόθηκαν.

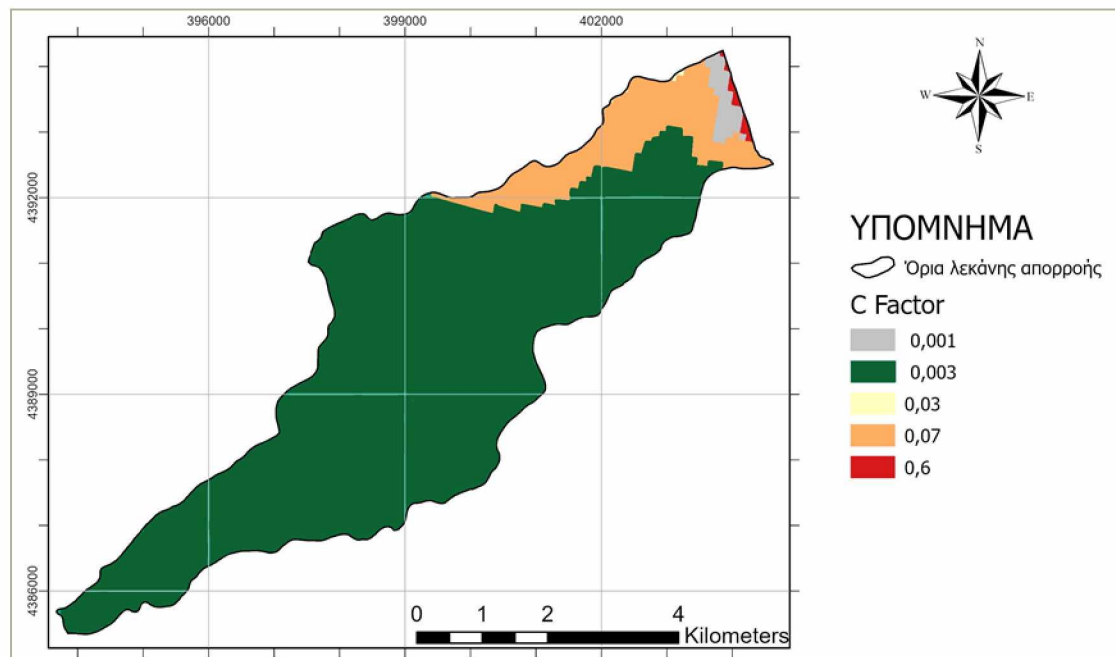
Χρήσεις γης	Τιμή συντελεστή C
Ασυνεχής αστικός ιστός	0.001
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	0.001
Γεωργική γη και σημαντικά τμήματα βλάστησης	0.07
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	0.2
Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.15
Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	0.15
Χώροι οικοδόμησης	0.01
Λιβάδια	0.02
Δάσος πλατύφυλλων	0.003
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.02
Θάμνοι και χερσότοποι	0.17
Φυσικοί βοσκότοποι	0.3
Παραλίες, αμμόλοφοι	0.6
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.03
Υδατοσυλλογή	0

Με τον τρόπο αυτό προέκυψε ο χάρτης της εικόνας 4.28, που στηρίχθηκε στις χρήσεις γης που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση με τη βοήθεια του χάρτη Imagery Hybrid του προγράμματος ArcGIS-PRO και ο χάρτης της εικόνας 4.29, που στηρίχθηκε στις χρήσεις γης που προέκυψαν από τους χάρτες του προγράμματος CORINE Land Cover 2018, όπου αποτυπώνονται οι τιμές του συντελεστή C για τη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής, 86.2%, έχει χαμηλή τιμή C (0.003) και σχετίζεται με το δάσος πλατύφυλλων της περιοχής ενώ η έκταση της περιοχής με τις χαμηλές τιμές C είναι ίδια και για τους δύο χάρτες χρήσεων γης (Πίνακας 4.9). Οι περιοχές με τις μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή C εμφανίζονται στα βόρεια κατάντη τμήματα της λεκάνης απορροής όπου κυριαρχούν οι καλλιέργειες ενώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στο παραλιακό μέτωπο με τις παραλίες και τους αμμόλοφους σε πολύ περιορισμένη ωστόσο έκταση. Η μέση τιμή του συντελεστή C που προέκυψε είναι σχεδόν ίδια και για τις δύο πηγές χρήσεων γης, δηλαδή 0.0131 από τον Imagery Hybrid και 0.0129 από τον χάρτη CORINE Land Cover 2018.



Εικόνα 4.28: Χάρτης απεικόνισης του συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα που στηρίχθηκε στις χρήσεις γης που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση με τη βοήθεια του Imagery Hybrid των βασικών χαρτών του προγράμματος ArcGIS-PRO.



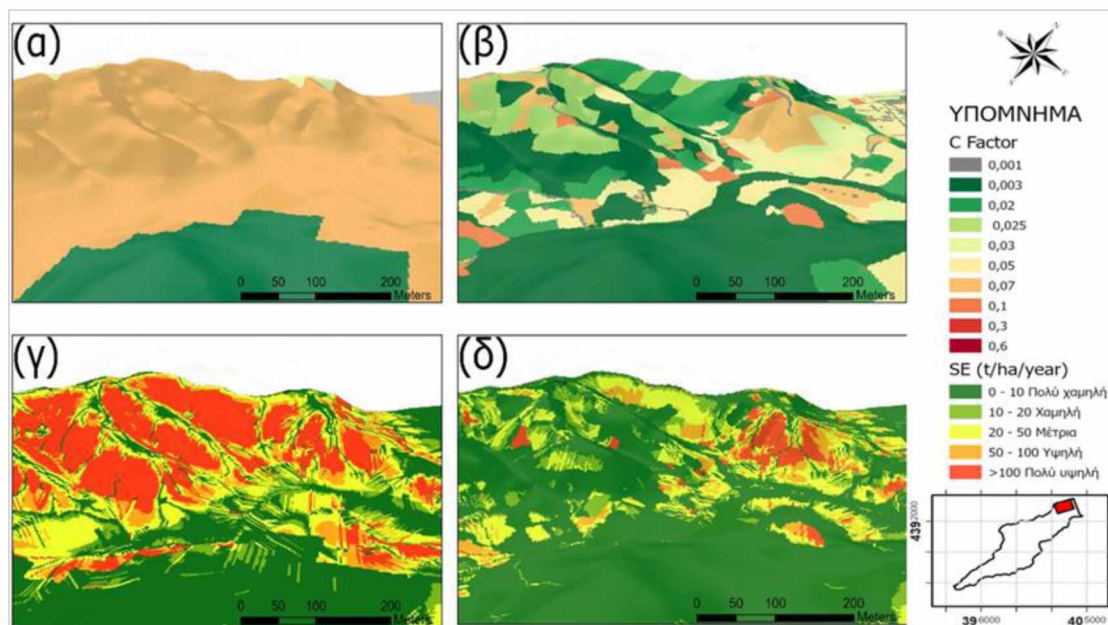
Εικόνα 4.29: Χάρτης απεικόνισης του συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα που στηρίχθηκε στις χρήσεις γης που προέκυψαν από τους χάρτες του προγράμματος CORINE Land Cover 2018.

Στον πίνακα 4.9 εμφανίζονται οι τιμές του συντελεστή C στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας που προέκυψαν.

Πίνακας 4.9: Τιμές του συντελεστή C στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και η κατανομή τους σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Τιμές C	Από την ψηφιοποίηση του Imagery Hybrid		Από CORINE Land Cover 2018	
	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)	Επιφάνεια (km ²)	Ποσοστό επιφάνειας (%)
0-0.001	0.8	2.8	0.41	1.4
0.003	24.2	86.2	24.2	86.2
0.01	0.03	0.1	-	-
0.02	1.02	3.4	-	-
0.03	0.2	0.7	0.09	0.4
0.07	0.3	1.0	3.34	11.90
0.15	0.8	2.8	-	-
0.17	0.7	2.7	-	-
0.3	0.045	0.2	-	-
0.6	0.03	0.1	0.02	0.1

Εκτός από την περιοχή του δάσους των πλατύφυλλων σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές τα δύο αρχεία με τις τιμές του συντελεστή C που προέκυψαν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ως προς τη χωρική κατανομή του συντελεστή. Στις περισσότερες από αυτές τις περιοχές ο συντελεστής C εμφανίζεται υπερεκτιμημένος στους χάρτες του CORINE Land Cover 2018 σε σχέση με την εκτίμηση από τον χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO. Το γεγονός αυτό οδηγεί και σε αντίστοιχη υπερεκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στα ίδια σημεία όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.30.



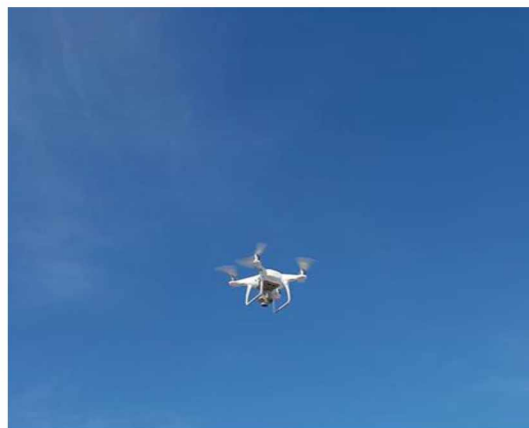
Εικόνα 4.30: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συντελεστή φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C και της εδαφικής διάβρωσης SE (α) και (γ) εκτίμηση που προέκυψε με βάση τους χάρτες του CORINE Land Cover 2018 (β) και (δ) εκτίμηση που προέκυψε με βάση τον χάρτη Imagery Hybrid ArcGIS-PRO.

Η μέση τιμή της εδαφικής διάβρωσης (Soil Erosion- SE) με τη χρήση του C που προέκυψε από τους χάρτες του CORINE Land Cover 2018 για τη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος ήταν $7.55 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ενώ η μέση τιμή SE με τη χρήση του C που προέκυψε από τον χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO $8.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα ο συντελεστής C σχετικά με τους άλλους συντελεστές της εξίσωσης RUSLE έχει σημαντική χωρική δυναμική στη λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα και φαίνεται πως οι διαφορές στις τιμές του είναι σημαντικές για τον χωρικό και ποσοτικό προσδιορισμό της διάβρωσης του εδάφους.

Για τους λόγους αυτούς κρίθηκε σκόπιμο με εργασίες πεδίου να πραγματοποιηθούν λήψεις αεροφωτογραφιών από το μη επανδρωμένο αεροσκάφος, τετρακόπτερο Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) ώστε να εξακριβωθούν και να συγκριθούν τα δεδομένα των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος που προέκυψαν από τον χάρτη CORINE Land Cover 2018 και από τον χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO.

Οι εργασίες πεδίου πραγματοποιήθηκαν στις 16/9/2021 (Εικόνα 4.31). Αρχικά και μετά τον έλεγχο του εξοπλισμού, των ελίκων και της μπαταρίας του τετρακόπτερου αεροσκάφους και την αναγνώριση της περιοχής μελέτης, έγινε ο εντοπισμός της έκτασης αποτύπωσης και επιλέχθηκε το ύψος της πτήσης. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η πτήση μέσω μιας οριοθετημένης διαδρομής και ελέγχθηκαν όλοι οι παράμετροι της πτήσης. Με την υλοποίηση της πτήσης του τετρακόπτερου αεροσκάφους έγιναν λήψεις με εμπρόσθια επικάλυψη ενώ τέλος για την ορθή γεωαναφορά των λήψεων πραγματοποιήθηκε δορυφορικός εντοπισμός ακριβής θέσης σημείων ελέγχου στο έδαφος (Εικόνα 4.32).

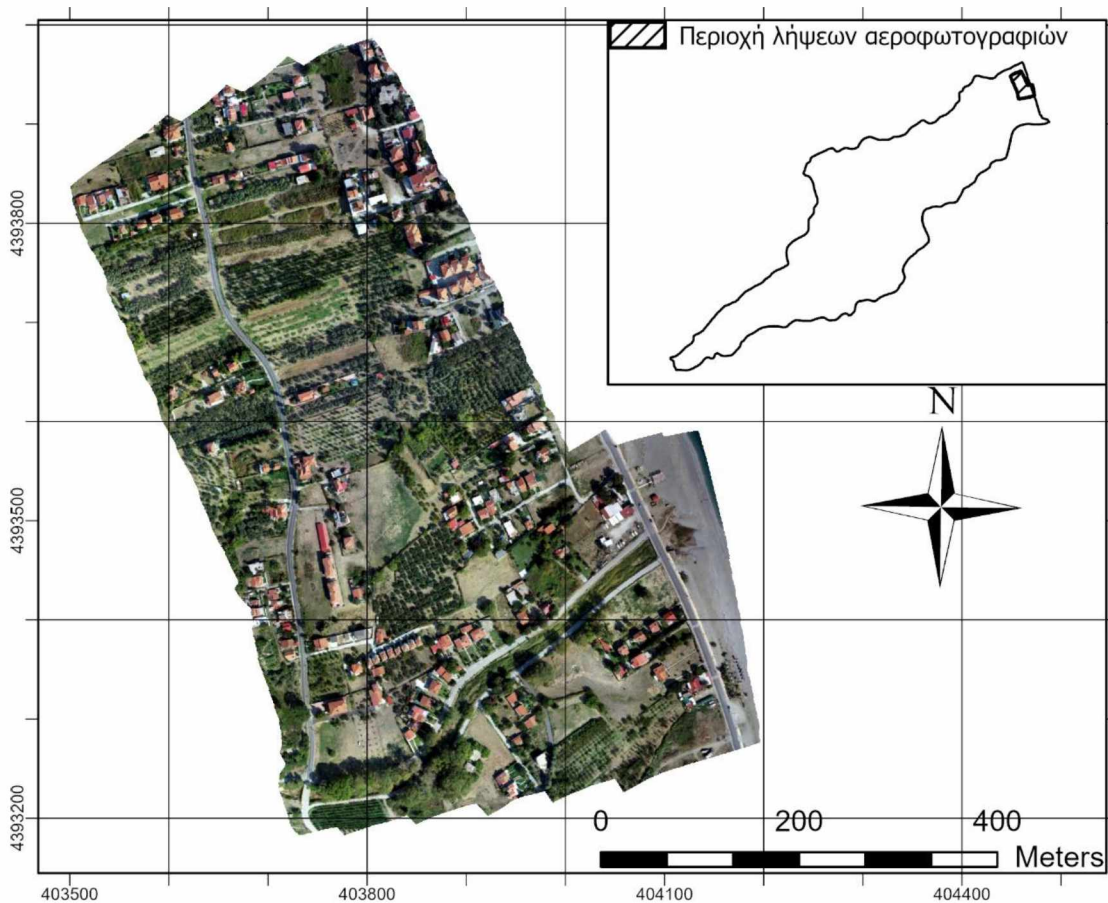


Εικόνα 4.31: Υλοποίηση πτήσης του μη επανδρωμένου αεροσκάφους, τετρακόπτερου Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) (Προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 4.32: (α) Δορυφορικός εντοπισμός ακριβούς θέσης σημείων ελέγχου στο έδαφος, (β) Λήψεις που προέκυψαν από την πτήση του μη επανδρωμένου αεροσκάφους, τετρακόπτερου Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) (Προσωπικό αρχείο).

Μετά από την επεξεργασία και την ενοποίηση των λήψεων του μη επανδρωμένου τετρακόπτερου Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) προέκυψε ο γεωαναφερμένος ορθοφωτοχάρτης της εικόνας 4.33.

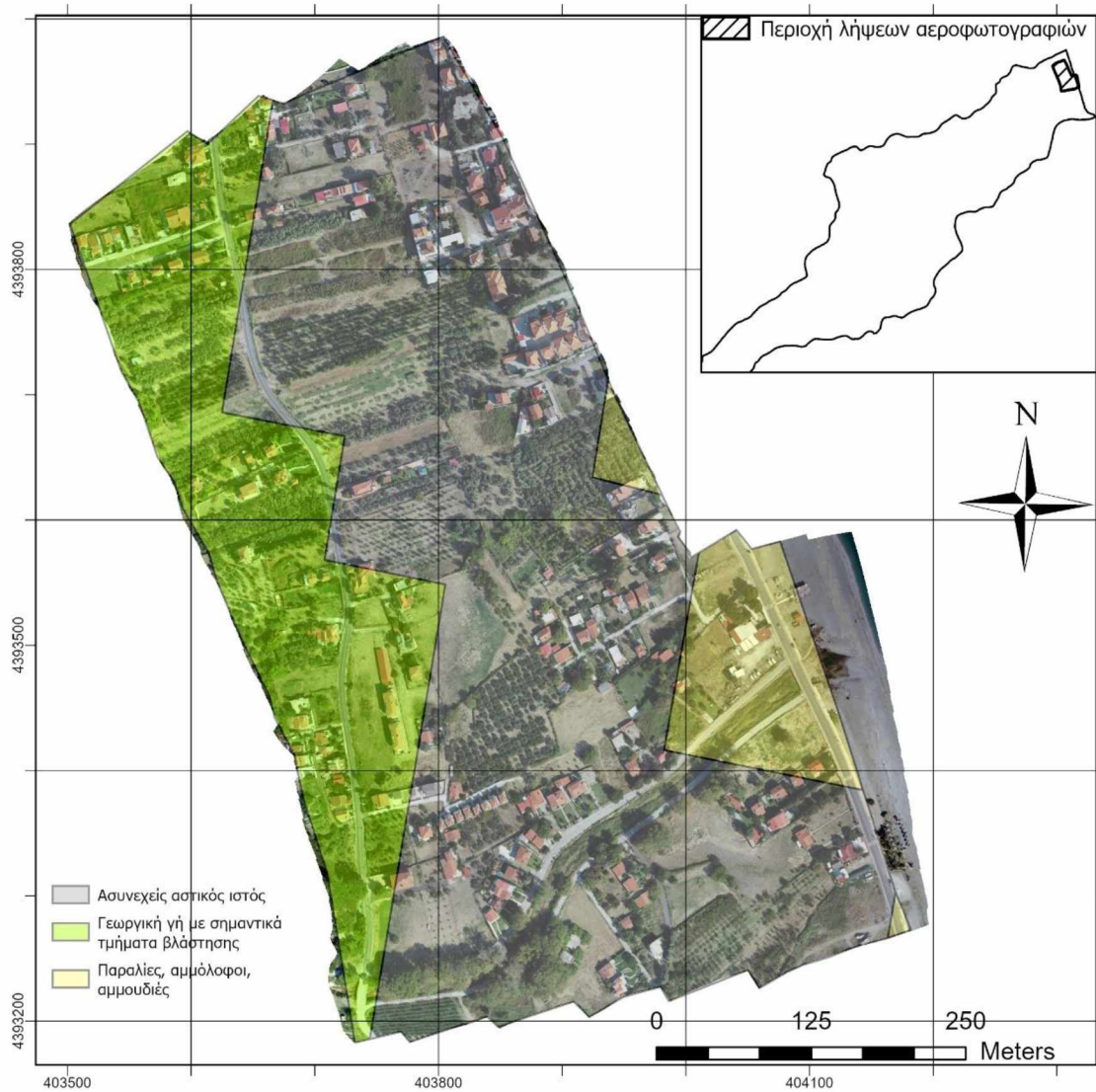


Εικόνα 4.33: Γεωαναφερμένος ορθοφωτοχάρτης που προέκυψε από τις λήψεις του μη επανδρωμένου αεροσκάφους, τετρακόπτερου Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone).

Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των χρήσεων γης και του ορθοφωτοχάρτη στην εικόνα 4.34, οι χρήσεις γης που προέκυψαν από τον χάρτη Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO ανταποκρίνονται πλήρως στις πραγματικές χρήσεις γης της περιοχής αφού υπάρχει ταύτιση. Αντίθετα, και όπως φαίνεται από την εικόνα 4.35, οι χρήσεις γης που προήλθαν από τον χάρτη CORINE Land Cover 2018 δεν αποτυπώνουν με ακρίβεια τις πραγματικές χρήσεις γης της περιοχής με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν σημαντικά σφάλματα στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης.



Εικόνα 4.34: Σύγκριση του ορθοφωτοχάρτη και των χρήσεων γης που προέκυψαν από τον Imagery Hybrid του ArcGIS-PRO.

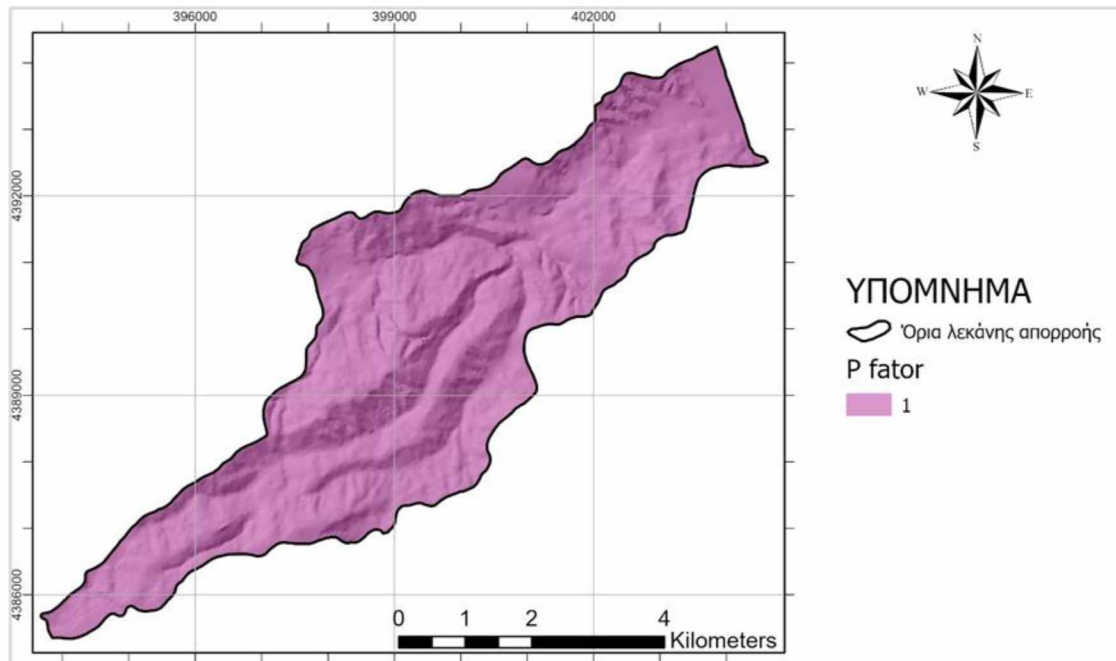


Εικόνα 4.35: Σύγκριση του ορθοφωτοχάρτη και των χρήσεων γης που προέκυψαν από τον χάρτη CORINE Land Cover 2018.

Για τους λόγους αυτούς η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στηρίχθηκε στις χρήσεις γης που προήλθαν από την ψηφιοποίηση με τον χάρτη Imagery Hybrid του προγράμματος ArcGIS-PRO.

4.5 Υπολογισμός συντελεστή ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P

Ο συντελεστής P λαμβάνει την τιμή 1 για το σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης απορροής καθώς απουσιάζουν δεδομένα ύπαρξης υποστηρικτικών πρακτικών για τη διατήρηση του εδάφους στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής (Εικόνα 4.36).



Εικόνα 4.36: Χάρτης συντελεστή ελέγχου και περιορισμού της διάβρωσης P της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα.

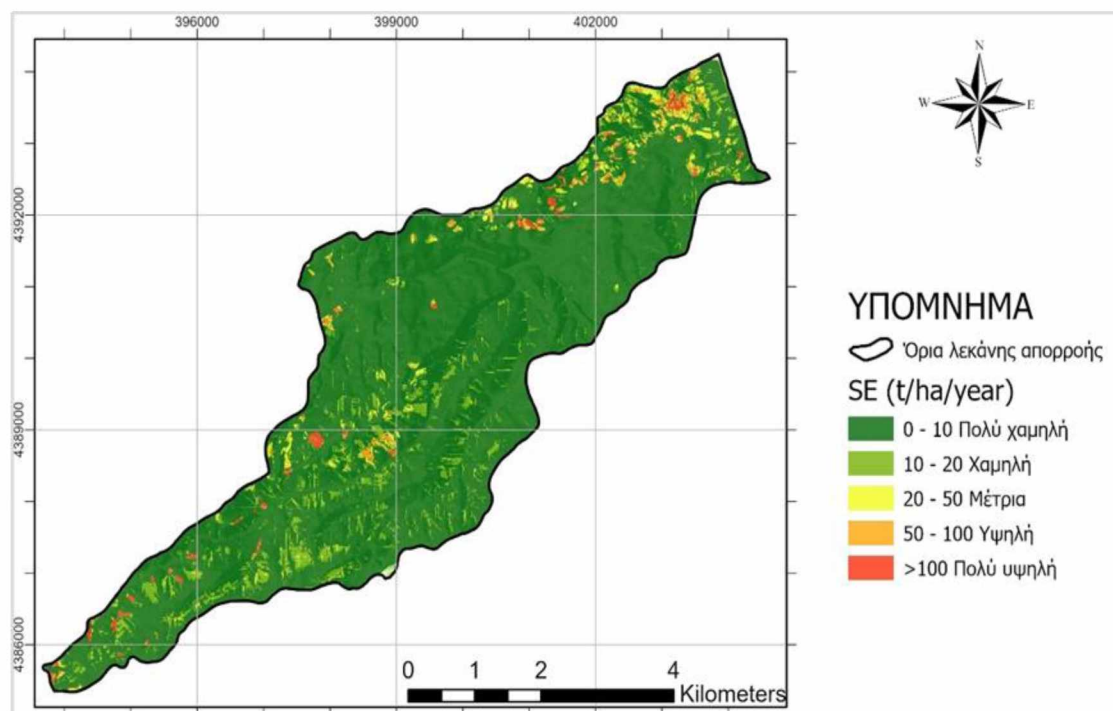
5. Υπολογισμός της Εδαφικής Διάβρωσης και δημιουργία χάρτη τρωτότητας

Τα παραγόμενα ψηφιδωτά αρχεία (raster αρχεία) που δημιουργήθηκαν με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε εισήχθησαν στην εξίσωση RUSLE (2.1) για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με τη βοήθεια του εργαλείου raster calculator και τη μορφή:

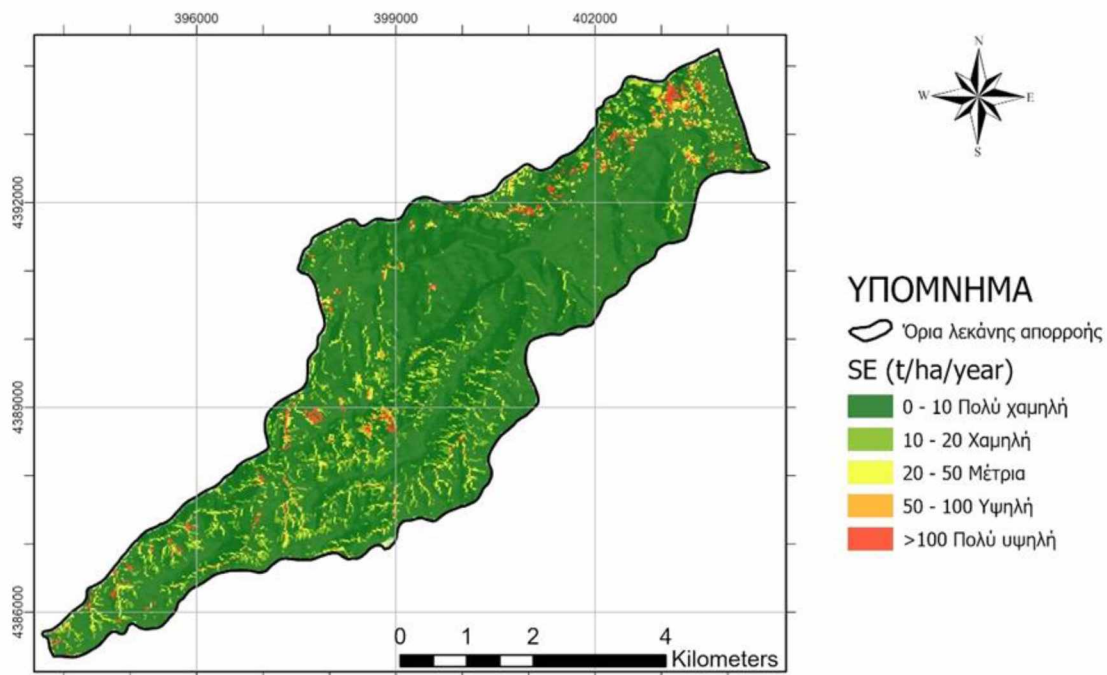
$$\text{"raster_R"} * \text{"raster_K"} * \text{"raster_LS"} * \text{"raster_C"} * \text{"raster_P"}$$

Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε δύο φορές, την πρώτη με το παραγόμενο LS που προέκυψε από το DEM ανάλυσης 5m και τη δεύτερη με το παραγόμενο LS που προέκυψε από το DEM ανάλυσης 27.4m. Έτσι προέκυψαν οι χάρτες των εικόνων 5.1 και 5.2, αντίστοιχα.

Η συνολική μέση ετήσια απώλεια εδάφους της λεκάνης απορροής που υπολογίστηκε με βάση το DEM υψηλής ανάλυσης 5 m είναι $8.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ και η μέγιστη τιμή $4317 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ενώ η συνολική μέση ετήσια απώλεια εδάφους που υπολογίστηκε από το DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m είναι $10.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ και η μέγιστη τιμή είναι $2712 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$.



Εικόνα 5.1: Χάρτης εδαφικής απώλειας (SE) της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα που στηρίχθηκε στο DEM υψηλής ανάλυσης 5 m.



Εικόνα 5.2: Χάρτης εδαφικής απώλειας (SE) της λεκάνης απορροής του υδατορρέυματος Μπουρμπουλήθρα που στηρίχθηκε στο DEM χαμηλής ανάλυσης 27.4 m.

Η επιλογή του DEM μπορεί να επηρεάσει την εκτίμηση όχι μόνο του συντελεστή LS αλλά και των άλλων παραμέτρων που προέρχονται από τα DEM και τελικά τις τιμές της εδαφικής διάβρωσης. Έτσι, η επιλογή της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ποια ανάλυση μπορεί να αντιπροσωπεύει με την καλύτερη ακρίβεια όλα τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Η σημασία της προσαρμογής των στόχων της χαρτογράφησης σύμφωνα με το DEM ενισχύεται από τα αποτελέσματα της εδαφικής διάβρωσης καθώς οι αλλαγές στο μέγεθος των κυψελών προκαλούν διαφορές μεταξύ των χαρτών, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν αποτελέσματα είτε υποεκτίμησης είτε υπερεκτίμησης επηρεάζοντας την υιοθέτηση πολιτικών διατήρησης στην περιοχή.

Η χρήση εικόνων υψηλής ανάλυσης είναι μια συνθήκη που οδηγεί σε διαδικασίες ανάπτυξης και βελτίωσης των περιβαλλοντικών πολιτικών. Αυτό επιτρέπει την πρόσβαση σε ακριβέστερες πληροφορίες και, κατά συνέπεια, στη μείωση του κόστους, είτε για τη διαστασιολόγηση των έργων που προωθούν την εδαφική διατήρηση είτε για την αναδάσωση των πιο κρίσιμων περιοχών από τη διάβρωση του εδάφους εντός της λεκάνης απορροής.

Στον πίνακα 5.1 εμφανίζεται ο χαρακτηρισμός των τιμών τις εδαφικής διάβρωσης (SE) με τις αντίστοιχες τιμές και η κατανομή των επιφανειών σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηρισμός των τιμών τις εδαφικής διάβρωσης (SE) με τις αντίστοιχες τιμές και η κατανομή των επιφανειών σε km² και σε ποσοστά επιφάνειας.

Χαρακτηρισμός εδαφικής διάβρωσης	Τιμές εδαφικής διάβρωσης t ha ⁻¹ yr ⁻¹	Επιφάνεια (km ²)		Ποσοστό επιφάνειας (%)	
		DEM 5m	DEM 27.4 m	DEM 5m	DEM 27.4 m
Πολύ χαμηλή	0-5	24.53	23.62	88.1	86.8
Χαμηλή	5-10	1.78	1.74	6.3	6.4
Μέτρια	10-20	0.86	1.07	3.2	3.9
Υψηλή	20-50	0.36	0.39	1.3	1.4
Πολύ υψηλή	>50	0.33	0.42	1.1	1.5

Η μελέτη επέδειξε ότι το βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής αντιμετωπίζει υψηλό κίνδυνο διάβρωσης ενώ το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης δηλαδή το 88.1% εμπίπτει στην κατηγορία της πολύ χαμηλής διάβρωσης.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η χρήση γης είναι ο κύριος παράγοντας ελέγχου του ρυθμού διάβρωσης καθώς και της χωρικής κατανομής της δυνατότητας διάβρωσης του εδάφους σε όλη τη λεκάνη. Η σημασία της κάλυψης από τη βλάστηση στον έλεγχο της διάβρωσης του νερού είναι ευρέως αποδεκτή. Βραχυπρόθεσμα, η βλάστηση επηρεάζει τη διάβρωση κυρίως αναχαιτίζοντας τις σταγόνες της βροχής και προστατεύοντας την επιφάνεια του εδάφους από τον αντίκτυπο της βροχόπτωσης παρεμποδίζοντας την απορροή. Μακροπρόθεσμα, η βλάστηση επηρεάζει τη ροή του νερού και των ιζημάτων αυξάνοντας τη σταθερότητα και τη συνοχή του εδάφους και βελτιώνοντας τη διείσδυση του νερού.

Ωστόσο μόνο η κατάσταση των χρήσεων γης στην περιοχή δεν είναι αρκετή για την ανάλυση της τρωτότητας σε εδαφική διάβρωση και, ως εκ τούτου, αξιολογήθηκε μαζί και με τους άλλους παράγοντες της εμπειρικής μεθοδολογίας RUSLE και κυρίως με την τοπογραφική κατάσταση της περιοχής.

Οι πιο ευαίσθητες περιοχές βρέθηκαν σε περιοχές με υψηλές τιμές LS γεγονός που καταδεικνύει πως τα επικλινή εδάφη έχουν πολύ υψηλότερες τιμές εδαφικής διάβρωσης σε σύγκριση με τις επίπεδες περιοχές. Η συμβολή του τοπογραφικού παράγοντα LS στη συνολική απώλεια εδάφους στην περιοχή είναι αξιόλογη

ενισχύοντας έτσι την ανάγκη για πρακτικές διατήρησης και την προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών στα πιο επικλινή εδάφη.

Οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν σε άμεσες μετρήσεις στο πεδίο της απώλειας εδάφους σε αυτήν τη λεκάνη για να επικυρώσουν τα αποτελέσματα που εκτιμώνται σύμφωνα με την εμπειρική εξίσωση RUSLE.

6. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα του Δήμου Αγιάς του νομού Λάρισας με τη χρήση εμπειρικού μοντέλου και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μετά από συστηματική μελέτη και ανάλυση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η εμπειρική εξίσωση RUSLE. Η επιλογή της εξαρτήθηκε από την απλότητά της, τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων για την εφαρμογή της καθώς και από τη σύνδεσή της με τα γεωγραφικά συστήματα Πληροφοριών και το πρόγραμμα ArcGIS-PRO.

Τον σημαντικότερο ρόλο για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης είχε η κατάλληλη επιλογή της μεθοδολογίας και των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο η ακρίβεια των μοντέλων και των δεδομένων θα πρέπει να αξιολογηθεί με επί τόπου ποσοτικές μετρήσεις της εδαφικής απώλειας.

Η επιλογή της μεθοδολογίας και των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στηρίχθηκε:

- σε στοιχεία που προέκυψαν μετά από σύγκριση τριών διαφορετικών τιμών του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R που εξήχθησαν από διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις,
- σε στοιχεία που προέκυψαν μετά από την σύγκριση δύο διαφορετικών μεθοδολογιών εύρεσης του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K , που στηρίχθηκαν σε γεωλογικά και εδαφολογικά δεδομένα,
- σε δύο διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) ένα με υψηλή ακρίβεια 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου και ένα χαμηλότερης ακρίβειας 27.4m από τη Γεωλογική Έρευνα των ΗΠΑ (USGS),
- σε δύο διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης του τοπογραφικού συντελεστή LS ,
- σε δύο διαφορετικές πηγές χρήσεων γης, τη βάση δεδομένων CORINE Land Cover 2018 και τον χάρτη Imagery Hybrid που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO,
- στη σύγκριση και εξακρίβωση των χρήσεων γης με βάση τις λήψεις αεροφωτογραφιών που προέκυψαν από το μη επανδρωμένο αεροσκάφος, τετρακόπτερο *Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone)* σε επιλεγμένες θέσεις.

Αρχικά, εκτιμήθηκε ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R με τρεις διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ενώ η εκτίμηση της κατανομής της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα βασίστηκε στην επιφανειακή αναγωγή των σημειακών μετρήσεων του μετεωρολογικού σταθμού του Πολυδενδρίου, που είναι ο πλησιέστερος μετεωρολογικός σταθμός στη λεκάνη απορροής, με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας. Από την εξέταση των εμπειρικών εξισώσεων προέκυψαν αξιοσημείωτες διαφορές στην τιμή του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης. Οι εξισώσεις αυτές έχουν εξαχθεί για συγκεκριμένες περιοχές με συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες και φαίνεται πως δεν μπορούν να γενικευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις περιοχές. Για τις συνθήκες της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα καταλληλότερη μεθοδολογία θεωρήθηκε η εμπειρική εξίσωση των Renard and Freimund (1994) με χρήση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης P .

Οι τιμές του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους, K στηρίχθηκαν σε γεωλογικά και βιβλιογραφικά δεδομένα και αποδόθηκαν στους γεωλογικούς σχηματισμούς που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση του γεωλογικού χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME) της περιοχής. Οι τιμές αυτές φαίνεται να περιγράφονται σωστά από τις διάφορες βιβλιογραφικές τιμές που έχουν κατά καιρούς δημοσιευθεί, ωστόσο η εμπειρία και οι γνώσεις για τη γεωλογία και την πετρολογία της περιοχής της έρευνας θεωρούνται απαραίτητα στοιχεία για τη σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K στηρίχθηκε αποκλειστικά σε εδαφολογικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά χορηγήθηκαν μετά από αίτηση από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους (European Soil Data Centre (ESDAC)). Η δεύτερη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη ως πιο τεκμηριωμένη.

Ο συντελεστής μήκους και κλίσης LS αρχικά εκτιμήθηκε με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b) σε συνδυασμό με τη διορθωμένη εξίσωση των Mitasova et al. (1996). Για λόγους συγκρίσεως χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) ένα με υψηλή ακρίβεια 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου και ένα χαμηλότερης ακρίβειας 27.4m από τη Γεωλογική Έρευνα των ΗΠΑ (USGS). Μετά την εφαρμογή του μοντέλου προέκυψαν σημαντικά σφάλματα και αυξημένες τιμές του συντελεστή μήκους L κυρίως κατά

μήκος των ροών του ποταμού. Οι περιοχές συμπυκνωμένης ροής είχαν μεγαλύτερη απώλεια εδάφους με τη μεθοδολογία των Moore και Burch (1986 a, b). Η εμπειρική εξίσωση RUSLE δεν έχει σχεδιαστεί για την πρόβλεψη απώλειας εδάφους σε τέτοιες περιοχές με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης γεγονός που δικαιολογείται καθώς οι θέσεις αυτές σύμφωνα με τη θεωρία της RUSLE ορίζονται ως θέσεις εναπόθεσης των υλικών διάβρωσης και όχι σαν περιοχές διαβρώσεων. Αν και η χωρική έκταση των περιοχών αυτών είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την υπόλοιπη περιοχή και ο αντίκτυπός τους στη μέση απώλεια εδάφους είναι συνήθως μικρός αποφασίστηκε να γίνει διόρθωση στο επίπεδο των δρόμων και των ρεμάτων για την ακριβέστερη χωρική αποτύπωση της εδαφικής διάβρωσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μία διαφορετική μεθοδολογία, η οποία περιλάμβανε διόρθωση του συντελεστή L ορίζοντας τις περιοχές εναποθέσεων στα επίπεδα των δρόμων και του υδρογραφικού δικτύου και για τα δύο εφαρμοζόμενα ψηφιακά αρχεία του αναγλύφου. Η δεύτερη μεθοδολογία βελτίωσε σημαντικά τις υπερεκτιμημένες τιμές του συντελεστή LS, κυρίως κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, και κρίθηκε ως καταλληλότερη. Τα δύο ψηφιακά αρχεία αναγλύφου που χρησιμοποιήθηκαν δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές ωστόσο το DEM υψηλότερης ανάλυσης απεικόνισε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις περιοχές της εδαφικής διάβρωσης.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C προέκυψε από την ψηφιοποίηση των χρήσεων γης της περιοχής, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο τον χάρτη Imagery Hybrid που περιλαμβάνεται στους βασικούς χάρτες του προγράμματος ArcGIS-PRO ενώ η απόδοση των επιμέρους κατάλληλων τιμών C στηρίχθηκαν σε βιβλιογραφικά δεδομένα. Ακολούθως, για λόγους αντιπαράθεσης εκτιμήθηκε εκ νέου συντελεστής C με τη βοήθεια της ψηφιοποίησης των χρήσεων γης από τους χάρτες του προγράμματος CORINE Land Cover 2018. Για την εξακρίβωση, τη σύγκριση και την εγκυρότητα των δεδομένων των χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες των οποίων η λήψη προήλθε από το μη επανδρωμένο αεροσκάφος τετρακόπτερο Dji Phantom 4 Pro V2.0 (Drone) σε επιλεγμένες θέσεις. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αεροφωτογραφίες ο χάρτης Imagery Hybrid του προγράμματος ArcGIS-PRO αποτύπωσε με απόλυτη ακρίβεια τις χρήσεις γης της περιοχής ενώ οι χάρτες Corine, με τις γενικευμένες χρήσεις γης που περιέχουν, αποδίδουν σημαντικά σφάλματα σχετικά με την εδαφική διάβρωση της περιοχής καθώς ο συντελεστής

φυτοκάλυψης και διαχείρισης του εδάφους C είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους διαμόρφωσης χωρικής κατανομής της εδαφικής διάβρωσης.

Οι συντελεστές που εκτιμήθηκαν εισήχθησαν στην εμπειρική εξίσωση RUSLE και προέκυψε ο χάρτης τρωτότητας στην εδαφική διάβρωση της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα. Η διάβρωση στην περιοχή είναι σημαντική με τα κυριότερα προβλήματα της λεκάνης απορροής να εμφανίζονται στα κατάντη τμήματά της, που κυριαρχούν οι γεωργικές καλλιέργειες, ενώ σε όλη την υπόλοιπη περιοχή φαίνεται πως το δάσος πλατύφυλλων προσφέρει ικανοποιητική προστασία έναντι στη διάβρωση.

Σε όλα τα στάδια της μεθοδολογίας για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και συγκεκριμένα το πρόγραμμα ArcGIS-PRO ήταν ένα αναγκαίο εργαλείο με γρήγορη και εύκολη εξαγωγή αποτελεσμάτων για την περιοχή μελέτης. Η σύνδεση του σε όλα τα στάδια της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας ήταν επαρκής και κατάλληλη για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης.

Η προστασία από τη διάβρωση και η διατήρηση του εδάφους είναι μια παγκόσμια στρατηγική στο πλαίσιο μιας βιώσιμης και προανατολισμένης διαχείρισης ενάντια στην υποβάθμιση των φυσικών πόρων και για τον λόγο αυτό αποτελεί αναπόσπαστο μέρος μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Τα κυριότερα προβλήματα που δημιουργούνται από τη διάβρωση στην υπό μελέτη περιοχή είναι:

- Η αύξηση της επιφανειακής απορροής με συνέπεια την αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων, η οποία συνδυάζεται με τη μεταφορά των προϊόντων της διάβρωσης, των φερτών υλικών που οδηγούνται στα ποτάμια, συσσωρεύονται στα φράγματα και στους ταμιευτήρες με αποτέλεσμα τη μειωμένη δυνατότητα αποθήκευσης νερού και την εμφάνιση περεταίρω πλημμυρικών προβλημάτων στην ευρύτερη περιοχή.
- Η υποβάθμιση του εδάφους τόσο σε θέματα ποιότητας λόγω της απόπλυσης των θρεπτικών συστατικών του εδάφους όσο και σε θέματα ποσότητας με τη μείωση της παραγωγικότητας. Ως εκ τούτου η διάβρωση θα επιφέρει μείωση της παροχής και την απόδοσης στα διάφορα οικοσυστήματα με απώλεια της βιοποικιλότητας.
- Η μείωση της ικανότητας της επιφανειακής κατείσδυση ευνοώντας την επιφανειακή απορροή με αποτέλεσμα τη μείωση του εμπλουτισμού του

υδροφόρου ορίζοντα. Το γεγονός αυτό ειδικά σε μία παράκτια περιοχή όπως αυτή της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα και σε συνδυασμό με την υπεράντληση εξαιτίας των αυξημένων αναγκών κατανάλωσης νερού για πόση και άρδευση της περιοχής θα μπορούσε να οδηγήσει στο φαινόμενο της υφαλμύρινσης των υπόγειων υδροφορέων.

Οποιοδήποτε μέτρο προστασίας και περιορισμού της διάβρωσης στην υπό μελέτη λεκάνης απορροής θα μπορούσε να έχει ως σκοπό:

- την αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης της επιφανειακής απορροής επιτρέποντας έτσι να κατεισδύσει περισσότερο νερό στο έδαφος,
- τη διαίρεση των περιοχών με μεγάλες κλίσεις σε εκτάσεις με πιο ήπιες κλίσεις μειώνοντας έτσι την ποσότητα και την ταχύτητα της επιφανειακής απορροής,
- την προστασία από ζημιές λόγω της αυξημένης απορροής και της λασπώδης κατάκλισης καναλιών, φραγμάτων και ταμιευτήρων και
- την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας που μειώνει την απορροή και αυξάνει τη διήθηση.

Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης καταλαμβάνεται από το δάσος των πλατύφυλλων με αποτέλεσμα να προστατεύεται με φυσικό τρόπο από την εδαφική διάβρωση. Η προστασία του δάσους προς την κατεύθυνση αυτή είναι επιβεβλημένη και οποιαδήποτε καταστροφή του από πυρκαγιά, από υλοτόμηση ή από οποιαδήποτε άλλη αιτία θα μπορούσε να δημιουργήσει τεράστια προβλήματα εξαιτίας της εδαφικής διάβρωσης.

Στις υπόλοιπες περιοχές κάποια από τα μέτρα περιορισμού της εδαφικής διάβρωσης και τον συνεπειών της θα μπορούσαν να είναι:

- δημιουργία αναβαθμίδων στα τμήματα με απότομες κλίσεις
- αναδάσωση στις περιοχές των χερσότοπων και των φτωχών σε φυτική κάλυψη περιοχών
- αγρονομικά μέτρα όπως όργωμα περιγράμματος παράλληλο προς τις ισοϋψείς καμπύλες και καλλιέργειες των επικλινών εδαφών κατά ζώνες στα τμήματα που καλλιεργούνται συστηματικά
- ταμιευτήρες φερτών υλικών για την προστασία από τα υλικά της εδαφικής διάβρωσης.

Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στην συνέχεια παρατίθενται ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

- ❖ Αξιολόγηση, με άμεσες μετρήσεις στο πεδίο, της απώλειας εδάφους στην λεκάνη απορροής του υδατορρεύματος Μπουρμπουλήθρα με σκοπό την επικύρωση των αποτελεσμάτων που εκτιμώνται σύμφωνα με την εμπειρική εξίσωση RUSLE.
- ❖ Διερεύνηση και σύγκριση της εδαφικής διάβρωσης που προέκυψε από την εμπειρική εξίσωση της RUSLE με διαφορετικά μοντέλα εδαφικής διάβρωσης.
- ❖ Σύγκριση των συντελεστών R, K και C που εκτιμήθηκαν στην εργασία, είτε από εμπειρικές εξισώσεις, είτε από βιβλιογραφικές αναφορές, με τους αναλυτικούς υπολογισμούς των συντελεστών αυτών.
- ❖ Βελτίωση του συντελεστή LS με επιπλέον έρευνα των σημείων αποθέσεων και την εξαίρεση τους από την εκτίμηση του συντελεστή και διερεύνηση των τιμών m και n που χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση των Mitasova et al., (1996).
- ❖ Χωρική και ποσοτική σύνδεση της διάβρωσης του εδάφους που προέκυψε από την εμπειρική εξίσωση της RUSLE με την απόδοση των ίζημάτων στο υδατόρρευμα.
- ❖ Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να εξελιχθεί σε μεθοδολογία πρόβλεψης της εδαφικής διάβρωσης σε μελλοντικά σενάρια κλιματικής μεταβλητότητας.
- ❖ Με την διαμόρφωση υποθετικών σεναρίων αλλαγής χρήσεων γης θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση και ανάλυση της εδαφικής διάβρωσης ώστε να καθοριστεί το πλαίσιο των αλλαγών των χρήσεων γης προς την κατεύθυνση της εδαφικής προστασίας.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Arabi, M., Govindaraju, R., Hantush, M., & Engel, N. (2006). Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 42(2), pp. 513-528.
- Arnoldus, H. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*, pp. 39-51.
- Ballabio C., Panagos P., Montanarella L (2016) *Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database*. *Geoderma*, 261 , pp. 110-123.
- Barton, C., Ullah, I., & Mitasova, H. (2010). Computational modeling and neolithic socioecological dynamics: a case study from southwest Asia. *American Antiquity* 75(2), pp. 364–386.
- Charizopoulos N., Mourtziou P., Psilovikos T., Psilovikos A. & Karamoutsou L., 2019. Morphometric analysis of the drainage network of Samos Island (northern Aegean Sea): Insights into tectonic control and flood hazards. *Comptes Rendus Geoscience: Geomorphology & Hydrology*, Vol 351 (2019), pp 375-383.
- Cinnirella, S., Iovino, F., Porto, P., & Ferro, V. (1998). Anti-erosive effectiveness of Eucalyptus coppices through the cover management factor estimate. *Hydrol. Process.*, 12 (4) , σσ. 635-649.
- Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L. et al (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nat. Geosci.* doi:10.1038/s41561-019-0484-6
- CSMDS. (2011). *Community surface dynamics modeling system*. Ανάκτηση από [/http://csdms.colorado.edu/S](http://csdms.colorado.edu/S)
- Dalaris M., Psilovikos A., Sapountzis M. & Mourtziou P., 2013. Water Erosion Assessment in Skiathos Island using Gavrilović Method. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 22, No 10, pp. 2943 – 2952.
- De Roo, A., Jetten, V., Wesseling, C., & Ritsema, C. (1996). LISEM: a physically based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. *IAHS Publication* 235, σσ. 395–403.
- DeRose, R., Gomez, B., Marden, M., & Trustrum, N. (1998). Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(11), σσ. 1045–1053.

- Desmet, P., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, σσ. 427–433.
- Dikau, R. (1989). The application of digital relief model to landform analysis. In Raper, J. (Ed.): *Three Dimensional Application in Geographic Information Systems*, σσ. 51- 77.
- ESDB v2.0 (2004). *The European Soil Database distribution version 2.0*, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN.
- European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre
- Finlayson, D., & Montgomery, D. (2003). Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems. *Geomorphology* 53(1–2), 147–164.
- Flanagan, D., & Nearing, M. (1995). USDA-water erosion prediction project: technical documentation. *NSERL Rep 10*.
- Flanagan, D., Gilley, J., & Franti, T. (2007). Water erosion prediction project(WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASAE* 50(5), σσ. 1603–1612.
- Foster, G., & Wischmeier, W. (1974). valuating irregular slopes for soil loss prediction. *Transactions of the ASAE*, 17, σσ. 305–309.
- Foster, G. (1982). Modeling the erosion processes. In: Haan, C.T., Johnson, H.D., Brakensiek, D.L. (Eds.), *Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE Monograph No. 5, ASAE, St. Joseph, MI*, σσ. 197–380.
- Fournier, M. (1960). *Climate et erosion*. Paris: Presses universities de France.
- Gallant, J., & Hutchinson, M. (2011). A Differential Equation for Specific Catchment Area. *Water Resources Research* 47(5).
- Gertner, G., Wang, G., Singh, V., Shinkareva, S., Parysow, P., & Anderson, A. (2001, MAY). Spatial and Temporal Prediction and Uncertainty Analysis of Rainfall Erosivity for the Revised Universal Soil Loss Equation. *US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center*.
- Govers, G., Gimenez, R., & Van Oost, K. (2007). Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. *Earth-Science Reviews* 84(3-4), σσ. 87–102.
- Gutman, G., & Ignatov, A. (1998). The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *Int. J. Remote Sens.*, 19 (8), σσ. 1533-1543.
- Hancock, G., Willgoose, G., & Evans, K. (2002). Testing of the SIBERIA land-scape evolution model using the Tin Camp Creek, Northern Territory, Australia, field catchment. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(2), σσ. 125–143.

- Harmon, R., & Doe, W. (2001). *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. New York: Kluwer/Plenum Publishers.
- Hongming, z., Qinke, Y., Rui, L., Qinqrui, l., & et al., (2013). Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences. Volume 52*, σσ. 177-188.
- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their basins: hypsographical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Amer. Bul.* 54 pp. 275-370
- Jetten, V., Govers, G., & Hessel, R. (2003). Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes 17(5)*, σσ. 887–900.
- Karpilo, R., & Toy, T. (2004). Rusle C-Factors for Sklope Protection Applications. *National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force*.
- Karssenbergh, D., Burrough, P., Sluiter, R., & De Jong, K. (2001). The PCRaster software and course materials for teaching numerical modeling in the environmental sciences. *Transactions in GIS 5(2)*, σσ. 99–110.
- Kheir, R., Wilson, J., & Deng, Y. (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Land-Forms 32(12)*, σσ. 1770–1782.
- Kim, J., Park, Y., Yoo, D., & et al. (2009). Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45(4)*, σσ. 963–972.
- Krige, G. (1966). Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 66: 13-38*.
- Laflen, J., Foster, G., & Onstad, C. (1985). Simulation of individual-storm soil loss for modeling the impact of soil erosion on crop productivity. 285-295. S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer, A. Lo (Eds.), *Soil Erosion and Conservation, Soil Conserv. SOC. Am., Ankeny, Iowa*.
- Lim, K., Sagong, M., Engel, B., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *Catena 64(1)*, σσ. 61–80.
- Lugato, E., Lavallee, J.M., Haddix, M.L., Panagos, P., Cotrufo, F (2021). Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nat. Geosci.* <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>
- Luo, W. (2001). LANDSAP: a coupled surface and subsurface cellular automata model for landform simulation. *Computers and Geosciences 27*, σσ. 363–367.
- Luo, W., Duffin, K., Peronja, E., Stravers, J., Henryb, G., (2004). A web-based interactive landform simulation. *Computers & Geosciences 30*, 215–220.

- Martinez-Casasnovas, J., Ramos, M., & Poesen, J. (2004). Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58(1–4), σσ. 305–321.
- Mays, MD και Brasher, BR (1986), Problems with the Sandy Loam Subclass Definition. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 835-836. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030054x>
- McCool, D., Foster, G., Mutchler, . C., & Meyer, L. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*:32, σσ. 571–1576.
- McCool, D., George, G., Freckleton, M., Douglas, C., & Papendick, R. (1993). opographic effect on erosion from cropland inguide to conservation planning with Revised Universal Soil Lossthe northwestern wheat region. *Trans. ASAE* 36, σσ. 1067–1071.
- Mitas, L., & Mitasova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research* 34(3), σσ. 505–516.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, M. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science* 10(5), σσ. 629–641.
- Mitasova, H., Thaxton, C., Hofierka, J., McLaughlin, R., Moore, A., & Mitas, L. (2005). Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. In: Miller, C., Farthing, M., Gray, V., Pinder, G. Proceedings. *Proceedings, XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XV)*. Elsevier, σσ. 1479–1490.
- Mitasova, H., Barton, M., Ullah, I., Hofierka, J., & Harmon, R. (2013). GIS-based soil erosion modeling. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Bishop, M.P. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. 228–258. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X
- Mitchell, J., Engel, B., Srinivasan, R., & Wang, S. (1993). Validation of AGNPS for small watersheds using an integrated AGNPS/GIS system. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 29(5), σσ. 833–842.
- Moore, I., & Burch, G. (1986 a). Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions ASAE* 29, σσ. 1624–1640.
- Moore, I., & Burch, G. (1986 b). Physical basis of the lengthslope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50, σσ. 1294–1298.
- Moore, I., & Wilson, J. (1992). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47, σσ. 423–428.
- Moore, A., McLaughlin, R., Mitasova, H., & Line, D. (2007). Calibrating wepp model parameters for erosion prediction on construction sites. *Transactions of the ASABE* 50(2), σσ. 507–516.

- Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., & et al. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(6), σσ. 527–544.
- Murray, A., & Paola, C. (1994). A cellular model of braided rivers. *Nature* 371, σσ. 54–57.
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2008). Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. *Springer Verlag New York*.
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., Alewell, C. (2014) Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, *Science of Total Environment*, 479-480. pp. 189-200
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Alewell, C. (2014). The new assessment of soil loss by water erosion. *Environmental Science & Policy*. 54, σσ. 438-447. doi:DOI:10.1016/j.envsci.2015.08.01
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., Montanarella L. (2012). Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe, *Environmental Modelling & Software*, Volume 30, Pages 143-145, doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.002
- Panagos Panos (2006). The European soil database GEO: connexion, 5 (7), pp. 32-33.
- Park, Y., Kim, J., Engel, B., & et al. (2009). Development of web-based SWAT System. *Proceedings of ASABE*.
- Pelletier, J., Mitasova, H., Harmon, R., & Overton, M. (2009). The effects of interdune vegetation changes on eolian dune field evolution: a numerical-modeling case study at Jockey’s Ridge, North Carolina, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(9), σσ. 1245–1254.
- Poesen J., D. Torri, K. Bunte (1994). Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review *Catena*, 23 (1–2), pp. 141-166.
- Pike, A., Mueller, T., Schorgendorfer, A., Shearer, S., & Karathanasis, A. (2009). Erosion index derived from terrain attributes using logistic regression and neural networks. *Agronomy Journal* 101(5), σσ. 1068–1079.
- Polyakov, V., Nearing, M., & Shipitalo, M. (2004). Tracking sediment redistribution in a small watershed: implications for agro-landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(10), σσ. 1275–1291.
- Psilovikos Ar. & Margoni S., 2010. An empirical model of sediment deposition processes in Lake Kerkini Central Macedonia, Greece. *Environmental*

- Monitoring and Assessment*. Vol 164, Issues 1–4, pp 573 – 592, DOI: 10.1007/s10661-009-0914-9.
- Renard, k., & Freimund, j. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157, σσ. 287-306.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook εκδ.). US.
- Rewerts, C., & Engel, B. (1991). ANSWERS on GRASS: integrating a watershed simulation with a GIS. *ASAE paper*, σσ. 91–2621.
- Rubio J., L. (2006), Recatalá. The relevance and consequences of Mediterranean desertification including security aspects. Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue NATO Security Through Science Series, vol. 3 pp. 133-165
- Sheikh, V., van Loon, E., Hessel, R., & Jetten, V. (2010). Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. *Journal of Hydrology* 393(3–4), σσ. 174–185.
- Toy, T., Foster, G., & Renard, K. (1999). RUSLE for mining, construction and reclamation lands. *J. Soil Water Conserv.*, 54 (2), σσ. 462-467.
- Tucker, G., Lancaster, S., Gasparini, N., & Bras, R. (2001a). The channel-hillslope ntegrated landscape development model (CHILD). *n: Harmon, R.S., Doe, W.W. (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modeling.*, σσ. 349–388.
- Tucker, G., Lancaster, S., Gasparini, N., Bras, R., & Rybarczyk, S. (2001b). *Computers & Geosciences* 27(8), σσ. 959–973.
- U.S.G.S. (2021, Απριλιος). *U.S. Geological Survey*. Ανάκτηση από <https://www.usgs.gov/>
- Van der Knijff, M., Jones, A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe JRC Scientific and Technical Report*. European Soil Bureau, European Commission: - EUR 19022 EN,.
- Van Oost, K., Govers, G., Cerdan, O., & et al. (2005). Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. *Catena* 61(2–3), σσ. 105–121.
- Wainwright, J., Parsons, A., Muller, E., Brazier, R., Powell, D., & Fenti, B. (2008). A transport-distance approach to scaling erosion rates: 3. Evaluating scaling characteristics of Mahleran. *Earth Surface Processes and Land-forms* 33(7), σσ. 1113–1128.
- Weltz, M., Renard, K., & Simanton, J. (1987). evised universal, soil loss equation for western rangelands. In: *US/Mexico Symposium on Strategies for Classification and Management of Native Vegetation for Food Production in Arid Zones*. 104–111. U.S. Forest Serv. Gen. Tech.

- Willgoose, G., Bras, R., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 2. Nondimensionalization and applications. *Water Resources Research* 27(7), σσ. 1685–1696.
- Willgoose, G. (2004). Mathematical modeling of whole landscape evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33(1), σ. 443.
- Winchell, M., Jackson, S., Wadley, A., & Srinivasan, R. (2008). Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation May 2008*, 63 (3), σσ. 105-111.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning United States*. (Dept. of Agriculture. Agriculture Handbook εκδ., Τόμ. Dept. of Agriculture. Agriculture Handbook). Washington, DC.
- Woodward, D. (1999). Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena* 37(3–4), σσ. 393–399.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αρσένη-Παπαδημητρίου, Α., & Μπαλαφούτης, Χ. (2002). *Εισαγωγή στην Υδρομετεωρολογία, Τμήμα Γεωλογίας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Πανεπιστημιακό τυπογραφείο,.
- Βαχαβιώλος, Θ. (2014). *Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων*. Μεταπτυχιακή εργασία, Διεπιστημονικό- Διατμητικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δερμίσσης, Β. (2013). *Διευθετήσεις Υδατορρευμάτων*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών- Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος. (2021, Μάρτιος). Ανάκτηση από <http://meteosearch.meteo.gr/>
<http://meteosearch.meteo.gr/>
- Ελληνική Ζωολογική Εταιρία, (2009). *ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΒΙΒΛΙΟ των απειλούμενων ζώων της Ελλάδας*. Αθήνα: Επιμέλεια έκδοσης: Α. Λεγάκις, Π. Μαραγκού.
- Hydrognomon 4, Κ. Σ., Χριστοφίδης, Α., & Ευστρατιάδης, Α. (2010). *Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4), Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας»*. Αθήνα: Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανάκτηση από <http://hydrognomon.org/>
- Ι.Γ.Μ.Ε. (1984). Γεωλογικός Χάρτης 1:50000 Φύλλο Αγιά – Παναγιά.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία. Σημειώσεις μαθήματος, Έκδοση 3*. Αθήνα: ΕΜΠ.

- Κουτσογιάννης, Δ., & Ευστρατιάδης, Α. (2002). *Κασταλία: Ένα σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών*. Αθήνα: Τμήμα Υδατικών Πόρων Υδραυλικής και Ναυτιλιακής Μηχανικής - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανάκτηση από www.itia.ntua.gr
- Μουντράκης, Δ. (1985). *Γεωλογία της Ελλάδας*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
- Μπαλαφούτης, Χ. (1988). *Το ισοζύγιο του ύδατος στον Ελλαδικό χώρο*, Θεσσαλονίκη: Τμήμα Γεωλογίας, Εκδόσεις Πανεπιστημιακό τυπογραφείο, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- ΟΔΗΓΙΑ-92/43/ΕΟΚ. Του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1992 για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας (ΕΕ L 206 της 22.7.1992, σ. 7).
- Παναγούλια, Δ. (2008). *Διάβρωση, μεταφορά και απόθεση φερτών υλικών*. Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσιραμπίδης, Α. (1996). *Πετρολογία ιζηματογενών πετρωμάτων*. Θεσσαλονίκη: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- ΦΕΚ 523/ΑΑΠ/09.10.2009. (2009). Στραγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Διόρθωση και Τροποποίηση του Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου Δ.Ε. Λάρισας Δήμου Λαρισαίων Π.Ε. Λάρισας. *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ*.
- Φλαμπούρης, Κ. (2008). Μελέτη της Επίδρασης του Παράγοντα Βροχόπτωσης στο Νόμο του RUSLE. Διδακτορική διατριβή Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος.
- Ψάλτα, Π. (2015). «Σχέση πλημμυρικών παροχών και λεκάνης απορροής και επίδρασή της στους χειρσαίους και υδάτινους οργανισμούς στην περιοχή Αγιοκάμπου Δήμου Αγίας Ν. Λάρισας». *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*.
- Ψιλοβίκος, Α. (1985). *Στοιχεία εφαρμοσμένης ιζηματολογίας*. Θεσσαλονίκη: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Ψιλοβίκος Αντ. & Ψιλοβίκος Α., 2019. *Ιζηματολογία*. Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN: 978-960-418-253-4, σελ. 358, Θεσσαλονίκη, 2019.
- Ψιλοβίκος Α., 2020. *Υδατικοί Πόροι*. Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN: 978-960-418-602-0, σελ. 701, Θεσσαλονίκη, 2020.