



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ**



**ΑΡΙΑΔΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ
ΕΙΡΗΝΗ-ΡΑΦΑΕΛΑ ΜΙΧΑΗΛ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΝΕΣΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2023





ΑΡΙΑΔΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ, ΕΙΡΗΝΗ-ΡΑΦΑΕΛΑ ΜΙΧΑΗΛ
Φοιτήτριες Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5719, 5720

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΝΕΣΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Περιβαλλοντολογικής Γεωγραφίας,
Τεκτονικής Γεωλογίας και Στρωματογραφίας

Επιβλέπων

ΜΙΧΑΗΛ ΦΟΥΜΕΛΗΣ



©Αριάδνη Αντωνίου και Ειρήνη-Ραφαέλα Μιχαήλ, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.,
Τομέας Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας και τομέας Τεκτονικής και Στρωματογραφίας,
2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΝΕΣΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ –

Διπλωματική Εργασία

©Ariadni Antoniou and Eirini-Rafaela Michail, School of Geology, Department of
Environmental Geography and Department of Tectonics and Stratigraphy, 2023
All rights reserved.

EVALUATION OF AUTOMATICALLY EXTRACTED DRAINAGE NETWORK
OF NESTOS RIVER WITHIN A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM –

Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ
ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση,
αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής
φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το
παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό
σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το
συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Το υδρογραφικό δίκτυο του Νέστου (https://www.visitkavala.gr/wp-content/uploads/2017/04/nestos_00-825x510.jpg)



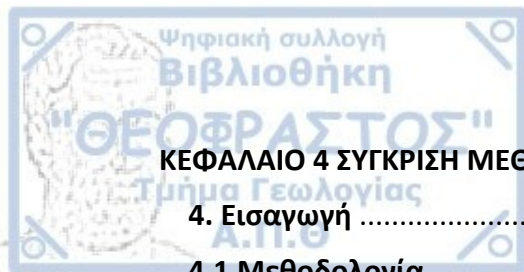
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Επιβλέποντα Επικ. Καθηγητή Μιχαήλ Φουμέλη, για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του στην περάτωση της, καθώς και την όρεξή του να μας μεταλαμπαδεύσει τις γνώσεις του και να παρέχει οποιαδήποτε βοήθεια χρειαστεί. Επίσης, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την υπομονή τους.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

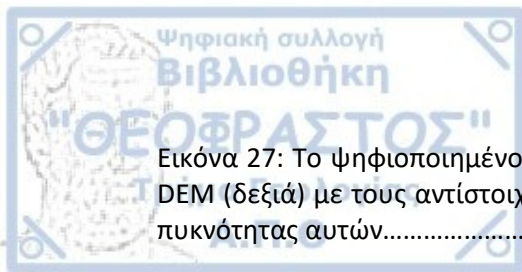
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	11
1.1 Ορισμός.....	11
1.2 Ανάλυση υδρογραφικών δικτύων.....	11
1.3 Μορφομετρικές παράμετροι.....	13
1.4 Εξέλιξη υδρογραφικών δικτύων.....	14
1.5 Μορφές υδρογραφικών δικτύων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΛΕΚΑΝΗ ΝΕΣΤΟΥ	18
2.1 Βασικά γεωγραφικά στοιχεία του ποταμού Νέστου	18
2.2 Υδρογραφικό δίκτυο ποταμού Νέστου.....	19
2.3 Γεωτεκτονική θέση του ποταμού Νέστου	20
2.4 Μορφολογία λεκάνης Νέστου	21
2.5 Γεωμορφολογία λεκάνης Νέστου	22
2.6 Τεκτονική δομή ευρύτερης λεκάνης Νέστου	22
2.7 Λιθολογία ευρύτερης λεκάνης Νέστου	23
2.8 Υδρογεωλογία της λεκάνης του Νέστου	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ.....	30
3. Εισαγωγή	30
3.1 Ψηφιοποίηση υδρογραφικού δικτύου	30
3.1.1 Γεωαναφορά χαρτών (Georeference).....	30
3.1.2 Δημιουργία θεματικού επιπέδου (shapefile)	30
3.1.3 Ενεργοποίηση κουμπώματος (Enable snapping).....	31
3.1.4 Συγχώνευση διανυσματικών επιπέδων (Merge vector layers)	31
3.2 Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου	33
3.3 Αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από DEM.....	35
3.3.1 Πλήρωση βυθισμάτων ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (Filling sinks in a DEM).....	35
3.3.2 Λεκάνη απορροής (Catchment area)	36
3.3.3 Αριθμομηχανή ψηφιδωτών αρχείων (Raster calculator)	37
3.3.4 Μετατροπή ψηφιδωτών σε διανυσματικά δεδομένα (raster to vector)	38



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	40
4. Εισαγωγή	40
4.1 Μεθοδολογία	40
4.2 Αποτελέσματα σύγκρισης των υδρογραφικών δικτύων	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Horton.....	11
Εικόνα 2: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler.....	12
Εικόνα 3: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Scheidegger.....	12
Εικόνα 4: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Sheve.....	13
Εικόνα 5: Ανάπτυξη δενδριτικής μορφής δικτύου.....	15
Εικόνα 6: Ανάπτυξη παράλληλης μορφής δικτύου.....	15
Εικόνα 7: Ανάπτυξη κλιμακωτής μορφής δικτύου.....	16
Εικόνα 8: Ανάπτυξη ορθογώνιας μορφής δικτύου.....	16
Εικόνα 9: Ανάπτυξη ακτινωτής μορφής δικτύου.....	16
Εικόνα 10: Ανάπτυξη δακτυλιοειδούς μορφής δικτύου.....	17
Εικόνα 11: Ανάπτυξη πολυλεκανώδους μορφής δικτύου.....	17
Εικόνα 12: Ανάπτυξη στρεβλωμένης μορφής δικτύου.....	17
Εικόνα 13: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του Νέστου	18
Εικόνα 14: Μαιανδρισμοί ποταμού Νέστου κατά την έξοδό του από την ορεινή περιοχή...20	
Εικόνα 15: Μορφολογικός χάρτης λεκάνης Νέστου	21
Εικόνα 16: Τεκτονικό σκαρίφημα του ευρύτερου χώρου της μάζας της Ροδόπης. 1.Μεταλπικά ιζήματα, 2.Ενότητα Παγγαίου, 3.Ενότητα Σιδηρόνερου, 4.Σχηματισμοί της Περιοδοπικής ζώνης, 5.Γραμμή επώθησης.....	23
Εικόνα 17: Γεωλογικός χάρτης λεκάνης Νέστου	26
Εικόνα 18: Χάρτης περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών	29
Εικόνα 19: Το εικονίδιο που εμφανίζει κατά τη σύνδεση με segment έχει τη μορφή κλεψύδρας	31
Εικόνα 20: Χάρτης ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου του Νέστου	32
Εικόνα 21: Χάρτης πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου του Νέστου.....	33
Εικόνα 22: Χάρτης πυκνότητας μηκών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου....	34
Εικόνα 23: Το αρχικό DEM (αριστερά) και το DEM με τα πληρωμένα βυθίσματα (Filled DEM, δεξιά).....	35
Εικόνα 24: Επίπεδο "Catchment area" με τη μέθοδο "D8".....	36
Εικόνα 25: Χάρτης εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου σε μορφή ψηφιδωτού.....	37
Εικόνα 26: Χάρτης εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου σε διανυσματική μορφή	39



Εικόνα 27: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους τους (κοκκινο χρώμα) πριν από την αύξηση της πυκνότητάς αυτών.....40

Εικόνα 28: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους τους (κοκκινο χρώμα) μετά από την αύξηση της πυκνότητάς αυτών41

Εικόνα 29: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους που απομονώθηκαν από τα δίκτυα.....41

Εικόνα 30: Οι κόμβοι του ψηφιοποιημένου (ανοιχτό μπλε) και του εξαγόμενου (σκούρο μπλε) υδρογραφικού δικτύου και οι αποστάσεις (κόκκινες γραμμές) των εγγύτερων μεταξύ τους κόμβων42

Εικόνα 31: Συγκριτική παρουσίαση του ψηφιοποιημένου και αυτόματα εξαγόμενου Υ/Δ σε περιοχή χαμηλών μορφολογικών κλίσεων στο ΝΔ τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Νέστου.....43

Εικόνα 32: Χάρτης υψηλών μορφολογικών κλίσεων στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Νέστου.....44

Εικόνα 33: Χάρτης ΒΔ τμήματος της λεκάνης του Νέστου με αποκλίσεις λόγω γεωαναφοράς.....45

Εικόνα 34: Χάρτης ΝΔ τμήματος της λεκάνης του Νέστου με αποκλίσεις λόγω ύπαρξης αστικού κέντρου.....46

Εικόνα 35: Χάρτης μέσης πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου σε σχέση με την περατότητα των σχηματισμών48

Εικόνα 36: Χάρτης όπου διακρίνεται ότι τα σημεία έναρξης των κλάδων 1^{ης} τάξης του ψηφιοποιημένου δικτύου είναι ψηλότερα από του εξαγόμενου.....49

Εικόνα 37: Χάρτης του Δέλτα του Νέστου στον οποίο εμφανίζονται περισσότεροι κλάδοι δικτύου από το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο.....50

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι σημαντικότεροι κλάδοι του ποταμού Νέστου βάση του εμβαδού της λεκάνης απορροής τους.....19

Πίνακας 2: Κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών σύμφωνα με την περατότητά τους.....28



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται το υδρογραφικό δίκτυο του Νέστου με δύο διαφορετικούς ψηφιακούς τρόπους εξαγωγής του με τη χρήση ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ, Geographic Information System – GIS). Ο Νέστος αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Ελλάδας, ο οποίος μάλιστα είναι διακρατικός, αφού τμήμα αυτού και της λεκάνης απορροής του εκτείνονται και στη γειτονική Βουλγαρία. Το υδρογραφικό δίκτυο του Νέστου περιλαμβάνει δεκάδες παραπόταμους, οι οποίοι συμβάλλουν στη δημιουργία ενός πολυσχιδούς δικτύου με σημαντικά υδάτινα οικοσυστήματα, με σημαντικότερο ίσως εκείνο του Δέλτα του Νέστου. Κατά τη διάρκεια της έρευνας, έγινε αναφορά στις παραμέτρους που επηρεάζουν την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, όπως είναι η γεωλογία, η περατότητα των σχηματισμών και η τεκτονική. Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η επιλογή του ακριβέστερου τρόπου ψηφιακής απεικόνισης του δικτύου, η οποία επιτυγχάνεται με την σύγκριση ενός αυτόματα εξαγόμενου δικτύου και ενός ψηφιοποιημένου τοπογραφικού χάρτη μέσα από το λογισμικό QGIS 3.16. Τα αποτελέσματα που εξάγονται δείχνουν, ότι η εκτέλεση του αλγορίθμου ως πιο γρήγορη διαδικασία εξαγωγής του δικτύου, εξαρτάται τόσο από τις παραμέτρους που θέτονται (π.χ. μέση τιμή συγκέντρωσης ροής νερού) όσο και από άλλους παράγοντες (γεωλογία, περατότητα, τεκτονική, μορφολογία). Για το λόγο αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του.

Λέξεις κλειδιά: Υδρογραφικό δίκτυο Νέστου, Ψηφιοποίηση, Αυτόματη εξαγωγή, Χωρική ανάλυση, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών



ABSTRACT

In the present study, Nestos Drainage network is studied with two different digital ways of extracting it using a Geographic Information System (GIS). Nestos is one of the largest rivers in Greece, which in fact is transnational, since part of it and its catchment area also extend into neighboring Bulgaria. The hydrographic network of Nestos includes dozens of tributaries, which contribute to the creation of a diverse network with important water ecosystems, with perhaps the most important being the Delta of Nestos. During the research, reference was made to the parameters that influence the density of the hydrographic network, such as geology, permeability of formations and tectonics. The main purpose of this study is the choice of the most accurate way of digital representation of the network, which is achieved by comparing an automatically extracted network and a digitized topographic map through the software QGIS 3.16. The extracted results show that the execution of the algorithm as a faster network extraction process depends both on the parameters set (e.g. average value of water flow concentration) and on other factors (geology, permeability, tectonics, morphology). For this reason, special care is required in the interpretation of its results.

Keywords: Nestos Drainage network, Digitization, Automatic extraction, Spatial analysis, Geographic Information System (GIS)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1 Ορισμός

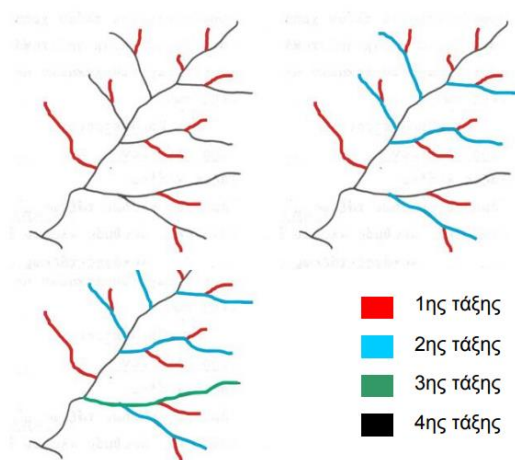
Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί ουσιαστικά το «μεταφορικό μέσο» για την κίνηση του επιφανειακού νερού και των ιζημάτων μιας υδρολογικής λεκάνης. Η μελέτη ενός υδρογραφικού δικτύου εστιάζεται στις ιδιότητες του και στους πιθανούς τρόπους ανάπτυξής του. Στην πρώτη περίπτωση η μελέτη του επιτυγχάνεται από την ποσοτική ανάλυση των κλάδων του. Στη δεύτερη περίπτωση σπανίως η εξέλιξή του παρατηρείται άμεσα. Για να έχουμε έναν πλήρη προσδιορισμό της εξέλιξης ενός υδρογραφικού δικτύου είναι απαραίτητη η γνώση των αρχικών συνθηκών δημιουργίας, των φυσικών διεργασιών, του χρόνου κλπ (Βουβαλίδης, 2011).

1.2 Ανάλυση υδρογραφικών δικτύων

Η ανάλυση των υδρογραφικών δικτύων εκτός από το γεγονός ότι εκφράζει τα χαρακτηριστικά της δομής του, χρησιμοποιείται και σαν βάση για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των γεωλογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων σε ένα ποτάμιο σύστημα. Ακόμη, χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξέλιξής του και για τον προσδιορισμό της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής (Βουβαλίδης, 2011).

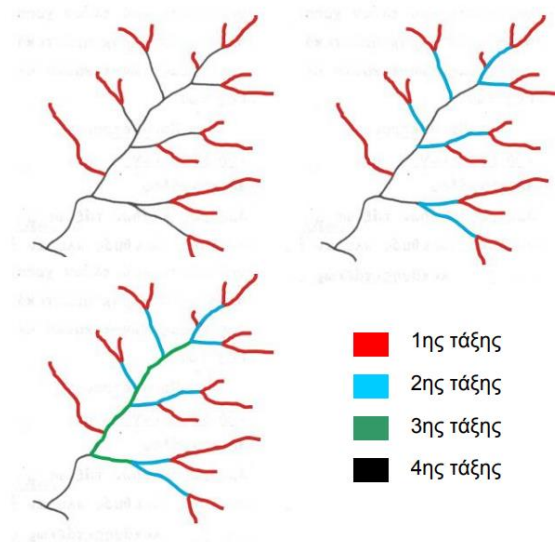
Για την ποσοτική ανάλυση ενός υδρογραφικού δικτύου είναι αναγκαίος ο καθορισμός κάποιας σχέσης μεταξύ των κλάδων του. Ο Horton (1945), ο Strahler (1952), ο Scheidegger (1965) και ο Sheve (1967) πρότειναν μια ποσοτική έκφραση της ανάπτυξης ενός υδρογραφικού δικτύου με τη μορφή αρίθμησης των κλάδων του.

1. Σύμφωνα με τον Horton, οι μικρότεροι κλάδοι του δικτύου που δεν δέχονται τα νερά κανενός άλλου μικρότερου κλάδου, ονομάζονται 1^{ης} τάξης, ενώ οι μεγαλύτεροι κλάδοι που δέχονται τα νερά ενός κλάδου 1^{ης} τάξης χαρακτηρίζονται ως κλάδοι 2^{ης} τάξης κ.ο.κ. (**Εικόνα 1**).



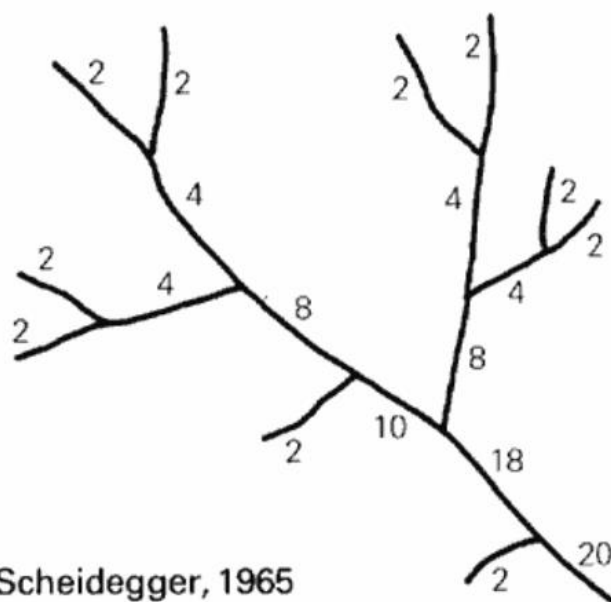
Εικόνα 1: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Horton (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi2.pdf>)

2. Κατά τον Strahler, ρεύματα που δεν δέχονται τα νερά μικρότερων κλάδων ρευμάτων ονομάζονται 1^{ης} τάξης και η σύνδεση δύο κλάδων ίδιας τάξης δημιουργεί έναν νέο κλάδο της αμέσου επόμενης τάξης (**Εικόνα 2**).



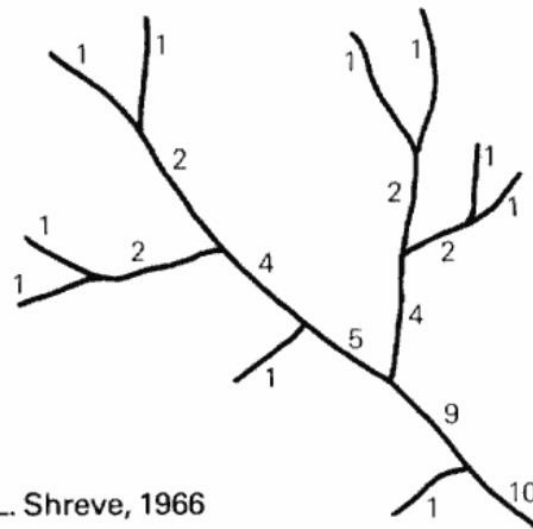
Εικόνα 2: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi2.pdf>)

3. Σύμφωνα με τον Scheidegger όλοι οι κλάδοι, οι οποίοι δεν δέχονται τα νερά άλλων κλάδων καλούνται 2^{ης} τάξεως. Η σύνδεση δύο κλάδων συνεπάγεται τη δημιουργία ενός νέου κλάδου με τάξη ίση με το άθροισμα των τάξεων των δύο συμβαλλομένων κλάδων (**Εικόνα 3**).



Εικόνα 3: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Scheidegger (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/img/img0705sm.gif>)

4. Κατά τον Shreve κάθε εξωτερικός κλάδος έχει μέγεθος 1, ενώ αν κλάδοι μεγεθών α και β συνδέονται, προκύπτει κλάδος με μέγεθος $\alpha + \beta$ (Εικόνα 4).



L. Shreve, 1966

Εικόνα 4: Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Shreve (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/img/img0705sm.gif>)

1.3 Μορφομετρικές παράμετροι

Πέραν της αρίθμησης των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός διαφόρων μορφομετρικών παραμέτρων τόσο των ίδιων δικτύων όσο και των υδρολογικών λεκανών τους. Οι κυριότερες παράμετροι που συνήθως υπολογίζονται είναι:

1. Οι μετρούμενες παράμετροι του υδρογραφικού δικτύου

- Τάξεις κλάδου (u): Είναι η ιεράρχηση των κλάδων του δικτύου με κάποια από τις μεθόδους, που αναπτύχθηκαν παραπάνω.
- Αριθμός κλάδων τάξεως u (N_u): Είναι το σύνολο των κλάδων τάξεως u .
- Συνολικός αριθμός κλάδων εντός λεκάνης τάξεως u (ΣN_u): Είναι ο αριθμός των κλάδων που βρίσκονται μέσα σε μία λεκάνη τάξεως u .
- Συνολικό μήκος κλάδων τάξεως u (L_u): Είναι το άθροισμα των μηκών των κλάδων της ίδιας τάξης μέσα σε μία λεκάνη.
- Μέσο μήκος τάξεως u (L_u): Είναι ο λόγος L_u/N_u .
- Συνολικό μήκος κλάδων εντός λεκάνης τάξεως u (ΣL_u): Είναι το άθροισμα των μηκών όλων των κλάδων εντός λεκάνης τάξεως u .
- Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου (ρ): Εκφράζεται ως το συνολικό μήκος κλάδων εντός λεκάνης προς την έκταση της, $\Sigma L/A$.

2. Οι υπολογιζόμενες μορφομετρικές παράμετροι του υδρογραφικού δικτύου

- Συντελεστής διακλάδωσης (R_b): Είναι ο λόγος μεταξύ του αριθμού των κλάδων μιας δεδομένης τάξης δια του αριθμού των κλάδων της επόμενης τάξης $R_b = N_u / N_{(u+1)}$.
- Λόγος μήκους κλάδων (R_L): Είναι ο λόγος του μέσου μήκους των κλάδων μιας δεδομένης τάξης ρεύματος δια του μέσου μήκους των κοιτών της αμέσως προηγούμενης τάξης $R_L = L_u / L_{(u-1)}$.

1.4 Εξέλιξη υδρογραφικών δικτύων

Η εξέλιξη ενός υδρογραφικού δικτύου έχει να κάνει με το τρόπο που το δίκτυο εξελίσσεται, ώστε να επιτευχθεί η κατάσταση εκείνη που θα επιτρέπει την καλύτερη δυνατή απομάκρυνση του τρεχούμενου νερού και των ιζημάτων που μεταφέρει, στις δεδομένες τοπικές συνθήκες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό και την εξέλιξη ενός υδρογραφικού δικτύου είναι:

1. Το κλίμα

Οι σημαντικότεροι κλιματικοί παράγοντες είναι το ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων, η μέση θερμοκρασία αέρα και η διεύθυνση και ένταση ανέμων. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την ποσότητα του νερού που εισέρχεται στην λεκάνη καθώς και την συμπεριφορά των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών.

2. Η γεωλογία

Ανάλογα με το είδος του πετρώματος που επικρατεί στην κάθε περιοχή η επίδραση της γεωλογίας είναι διαφορετική:

- Τα Ιζηματογενή πετρώματα είναι επιδεκτικά στην διάβρωση με αποτέλεσμα το υδρογραφικό δίκτυο να εμφανίζεται σε όλη την έκταση του πετρώματος.
- Τα Κρυσταλλικά πετρώματα δεν διαβρώνονται εύκολα, με συνέπεια τα υδρογραφικά δίκτυα να ακολουθούν τεκτονικές δομές (ρήγματα-πτυχές) όπου η διάβρωση προχωρά γρηγορότερα.
- Στα Μεταμορφωμένα πετρώματα ο σχηματισμός του δικτύου εξαρτάται κυρίως από το είδος της μεταμόρφωσης αλλά και την τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών.
- Στα Καρστικά πετρώματα αναπτύσσονται υποτυπώδη και ατελή υδρογραφικά δίκτυα αφού λόγο της διάλυσης των ασβεστόλιθων ευνοείται η υπόγεια αποστράγγιση και απορροή.

3. Η τεκτονική

Η γεωμετρία των λεκανών αναπτύσσεται ανάλογα με την τεκτονική ανύψωση και βύθιση του ευρύτερου αναγλύφου και τη χωρική κατανομή των ρηγμάτων.

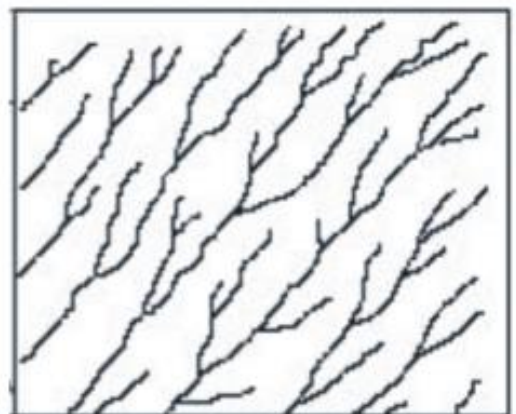
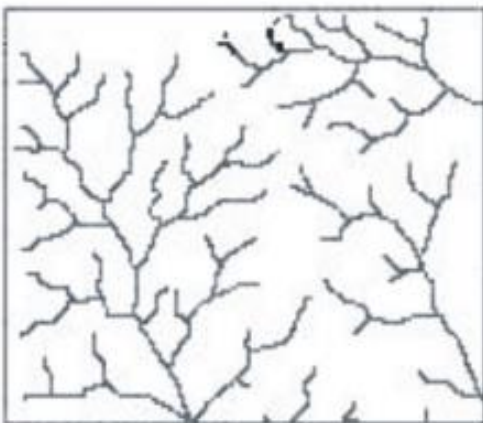
4. Ανθρωπογενείς επεμβάσεις και χρήσεις γης

Οι διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες τόσο σε τοπικό χαρακτήρα (φράγματα, τεχνητές λίμνες), όσο και σε μεγαλύτερης έκτασης έργα (εκτροπές ποταμών) επηρεάζουν τη μορφή του δικτύου.

1.5 Μορφές υδρογραφικών δικτύων

Μέρος της ανάλυσης των υδρογραφικών δικτύων αποτελεί και ο προσδιορισμός της μορφής τους. Η διαφορετική μορφή τους οφείλεται στις τοπικές κλιματολογικές, γεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες (Βουβαλίδης, 2011).

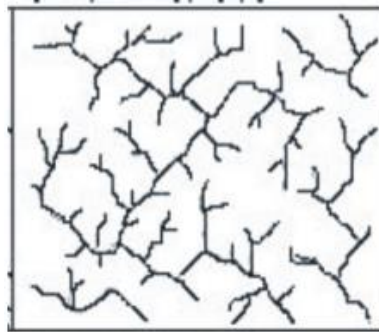
- Η **δενδριτική** μορφή υδρογραφικού δικτύου, θεωρείται ως η απλούστερη μορφή υδρογραφικού δικτύου, η οποία προκύπτει από τη δράση ποτάμιων διεργασιών σε περιοχές ομογενών εδαφών χωρίς έντονη γεωλογική δομή (**Εικόνα 5**).
- Η **παράλληλη** μορφή αναπτύσσεται εκεί όπου υπάρχει απότομη κλίση πετρωμάτων σε ένα πεδίο όπου επιβάλλει μια επιλεκτική κατεύθυνση του υδρογραφικού δικτύου (**Εικόνα 6**).



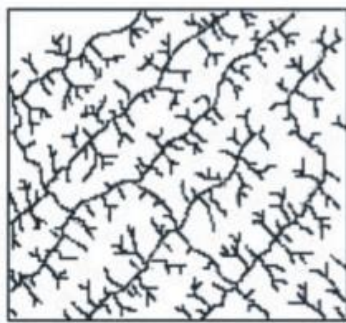
Εικόνα 5: Ανάπτυξη δενδριτικής μορφής δικτύου(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/pdf/askisi1.pdf>)

Εικόνα 6: Ανάπτυξη παράλληλης μορφής δικτύου(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/pdf/askisi1.pdf>)

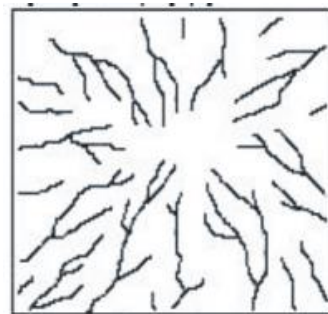
- Η **κλιμακωτή** μορφή υδρογραφικού δικτύου αποτελεί ένδειξη της ύπαρξης απότομης κλίσης πετρωμάτων και ισχυρής γεωλογικής δομής, που οφείλεται στην παρουσία πτυχωμένων μεταμορφωμένων πετρωμάτων (**Εικόνα 7**).
- Η **ορθογώνια** μορφή σχετίζεται με ισχυρή γεωλογική δομή, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη διακλάσεων και ρηγμάτων κάθετων μεταξύ τους (**Εικόνα 8**).
- Η **ακτινωτή** μορφή εμφανίζεται γύρω από ένα γεωλογικό δόμο ή ηφαίστειο και είναι ενδεικτική παλαιότερης ή ακόμα και σύγχρονης τεκτονικής-ηφαιστειακής δραστηριότητας (**Εικόνα 9**).



Εικόνα 7: Ανάπτυξη κλιμακωτής μορφής δικτύου(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/pdf/askisi1.pdf>)

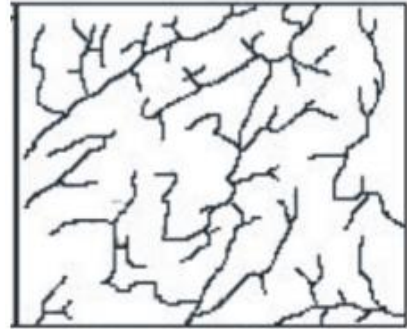
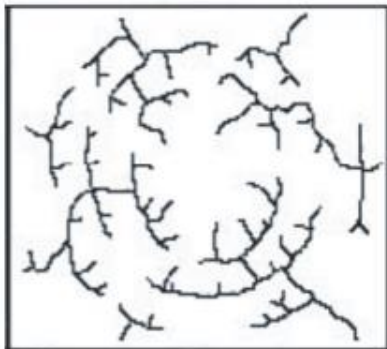


Εικόνα 8: Ανάπτυξη ορθογώνιας μορφής δικτύου(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/pdf/askisi1.pdf>)



Εικόνα 9: Ανάπτυξη ακτινωτής μορφής δικτύου
(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/pdf/askisi1.pdf>)

- Η **δακτυλιοειδής** μορφή σχετίζεται με τη διάβρωση ενός δόμου. Η διαφορά της με την ακτινωτή μορφή, οφείλεται στην παρουσία ενδιάμεσων στρώσεων, ασθενέστερων στην διάβρωση (**Εικόνα 10**).
- Η **πολυλεκανώδης** μορφή υδρογραφικού δικτύου εμφανίζεται τόσο σε λοφώδεις ιζηματογενείς αποθέσεις που οφείλονται στη δράση των παγετώνων, όσο και σε καρστικές περιοχές εξαιτίας της διάλυσης του ασβεστόλιθου (**Εικόνα 11**).
- Η **σύνθετης παραμόρφωσης** μορφή υδρογραφικού δικτύου εμφανίζεται σε περιοχές με έντονες γεωλογικές δομές που οφείλονται στη δράση της μεταμόρφωσης και της νεοτεκτονικής (**Εικόνα 12**).

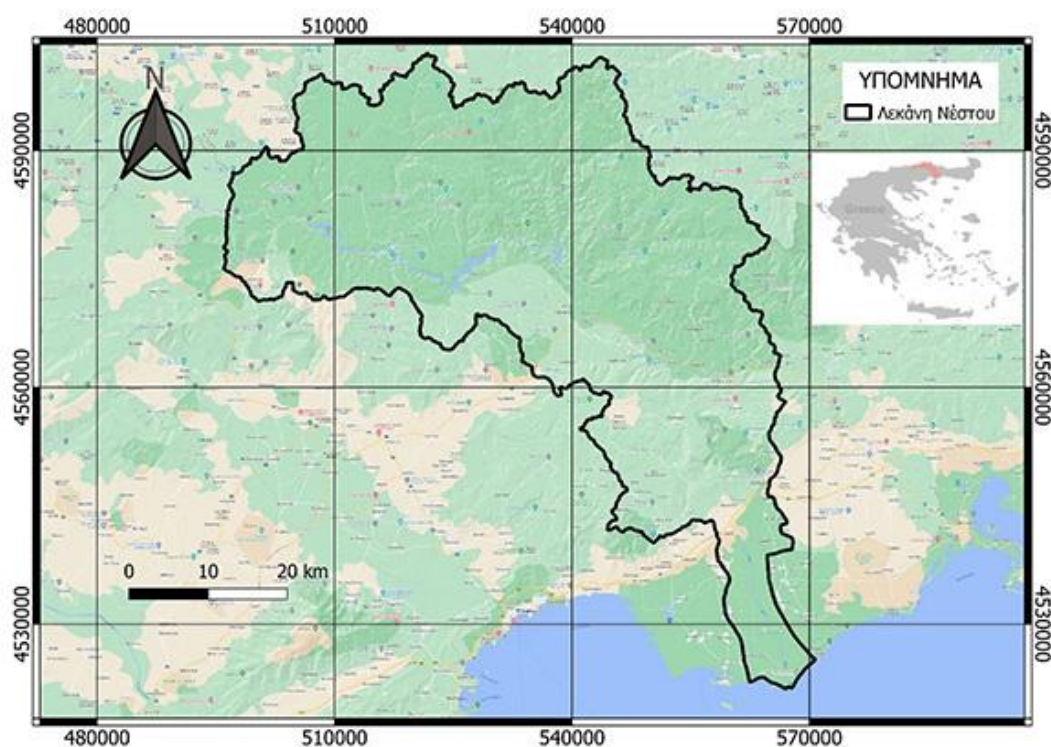


Εικόνα 10: Ανάπτυξη δακτυλιοειδούς μορφής δικτύου (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi1.pdf)	Εικόνα 11: Ανάπτυξη πολυλεκανώδους μορφής δικτύου (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi1.pdf)	Εικόνα 12: Ανάπτυξη στρεβλωμένης μορφής δικτύου (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi1.pdf)
---	---	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΛΕΚΑΝΗ ΝΕΣΤΟΥ

2.1 Βασικά γεωγραφικά στοιχεία του ποταμού Νέστου

Ο Νέστος είναι ένας διακρατικός ποταμός με συνολικό μήκος 243 km, που πηγάζει από τα όρη Ρίλα της Βουλγαρίας και στη συνέχεια διέρχεται στο Ελληνικό έδαφος, διασχίζοντας το νομό της Δράμας, τα όρη της δυτικής Ροδόπης και το Φαλακρό και εκβάλλει τα νερά του στο Θρακικό Πέλαγος απέναντι από το νησί της Θάσου (**Εικόνα 13**).



Εικόνα 13: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του Νέστου

Το μήκος του ποταμού εντός της Ελληνικής επικράτειας είναι 104 km ενώ τα υπόλοιπα 139 km διασχίζουν τη Βουλγαρία. Ο Νέστος αποτελεί επίσης το φυσικό όριο της Μακεδονίας με τη Θράκη αλλά και το φυσικό όριο ανάμεσα στον νομό Καβάλας και το νομό Ξάνθης. Είναι ο πέμπτος μεγαλύτερος ποταμός της Ελλάδας και ο μεγαλύτερος παραπόταμος του είναι ο Δεσπότης. Επίσης σημαντικοί κλάδοι του ποταμού Νέστου αποτελούν ο Ξεριάς, το Ψυχρόρεμα και το Μουσδά ρέμα όπως φαίνεται στον **Πίνακα 1**, ο οποίος αναφέρεται μόνο στα τμήματα της λεκάνης που βρίσκονται στο Ελληνικό έδαφος (Παπάδας, 2010).

α/α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΛΕΚΑΝΗΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ	α/α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΛΕΚΑΝΗΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ
1	Δεσπότης	118,9*	10	Μαυρόρεμα	11,4
2	Ξεριάς	14,1	11	Αγ. Γεωργίου	10,7
3	Ψυχρόρεμα	28,4	12	Καστανιτούρεμα	60,9
4	Μουσδα ρέμα	203,0	13	Διχαλόρεμα	28,5
5	Καμπερογλουρέμα	11,9	14	Ρέμα	45,7
6	Διαβολόρεμα	356,4	15	Μεγαλόρεμα	10,8
7	Αρκουδόρεμα	283,3	16	Μαυροματίρεμα	46,8
8	Δροσόρεμα	11,2	17	Λεύκες ρέμα	9,5
9	Μελισσόρεμα	7,4	18	Μυλόρεμα	93,1

Πίνακας 1: Οι σημαντικότεροι κλάδοι του ποταμού Νέστου βάση του εμβαδού της λεκάνης απορροής τους(Πηγή:http://ardefitika.decentral.minagric.gr/files/results/hydro/3.%20HYDRO_NESTOU.pdf)

Η λεκάνη απορροής του ποταμού είναι 8^{ης} τάξης και έχει συνολικό εμβαδόν 5479 km², από το οποίο το 40% (2042 km²) είναι εντός της Ελλάδας. Λίγο πριν τις εκβολές, εμφανίζει μία στενή, επιμήκη, μαιανδρίζουσα κοιλάδα με γενικό προσανατολισμό ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερα αναπτυγμένη χλωρίδα και πανίδα και είναι γνωστή ως η κοιλάδα του Νέστου. Το μήκος της κοιλάδας είναι 13km και το πλάτος της 0,8- 1,5 km. Μετά τη κοιλάδα του Νέστου, στις εκβολές του ποταμού, δημιουργείται ένα τεράστιο αλλουβιακό ριπίδιο μορφής δέλτα, το οποίο ξεκινάει από τα χωριά Γαλάνη και Τοξότες και απλώνεται προς τα Νότια μέχρι τη θάλασσα. Η κλίση σε αυτό το σημείο του ποταμού είναι πολύ ήπια και χαρακτηριστική είναι η δημιουργία πολλών αβαθών, ελώδων, λιμναζόντων επιφανειών που στα παλαιότερα χρόνια ήταν περισσότερες σε αριθμό και μεγαλύτερες σε μέγεθος (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και τροφίμων). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παλαιότερα υπήρχαν περισσότερες απολήξεις από δευτερεύουσες κοίτες και ρέματα από τις γύρω λοφώδεις περιοχές καθώς και η δημιουργία φραγμάτων κατά μήκος του ποταμού που μείωσαν τη γενική ροή του (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και τροφίμων).

2.2 Υδρογραφικό δίκτυο ποταμού Νέστου

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Νέστου χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές, οι οποίες έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (Ψιλοβίκος, 1999). Στο βόρειο τμήμα ο Νέστος έχει τη μορφή εγκιβωτισμένου μαιάνδρου ή εγκιβωτισμένου ποταμού με κανονική πορεία και μικρές κλίσεις. Οι εγκιβωτισμένοι μαιάνδροι σχηματίζονται όταν τα οφιοειδής κοίτη ενός μαιάνδρου εκβαθύνονται από τη διάβρωση λόγω της αύξησης της μεταφορικής του ικανότητας. Γενικά θεωρείται ότι η εκβάθυνση συμβαίνει όταν υπάρχει μια αλλαγή στο περιβάλλον του ποταμού ο οποίος

μαιανδριζε σε μια πεδιάδα. Στην περιοχή της κάμψης ο Νέστος είναι ένας τυπικός εγκιβωτισμένος μαιανδρικός ποταμός με ανώμαλες και υψηλές κλίσεις της κοίτης του και συνεχείς κάμψεις. Στην κεντρική περιοχή Παρανεστίου-Σταυρούπολης ο Νέστος μετατρέπεται σ' ένα κλασικό πλεξοειδή ποταμό, με πλατιά κοίτη, πολλά φράγματα, μικρό βάθος κοίτης, πληθώρα χονδροκλαστικών φερτών υλών και ελαφρές κάμψεις. Η κύρια αιτία δημιουργίας του πλεξοειδούς ποταμού φαίνεται να είναι η εμφάνιση ενός κεντρικού φράγματος, το οποίο οφείλεται στη μεταφορική ανικανότητα του χονδρόκοκκου υλικού του ποταμού. Στην περιοχή των Θρακικών Τεμπών ο Νέστος αποτελεί κλασικό εγκιβωτισμένο μαιανδρικό ποτάμι με πολύπλοκες κάμψεις, διευρυμένη κοίτη και μεγάλο βάθος εγκιβωτισμού (**Εικόνα 14**). Στη νότια περιοχή, όπου βρίσκεται το Δέλτα, η κοίτη του Νέστου είναι σήμερα τεχνητή και περιορίζεται από πλευρικά αναχώματα. Γύρω από το Δέλτα του ποταμού Νέστου, στα δυτικά της εκβολής, βρίσκονται αρκετές λιμνοθάλασσες που καταλαμβάνουν συνολική έκταση 17.500 περίπου στρεμμάτων.



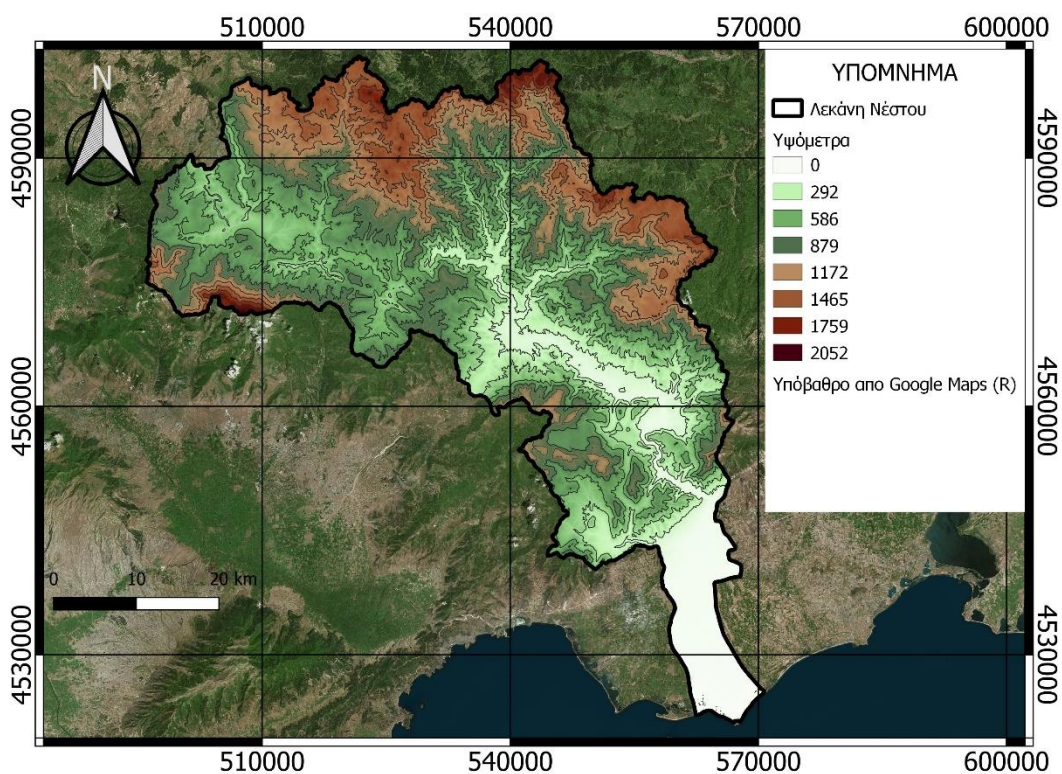
Εικόνα 14: Μαιανδρισμοί ποταμού Νέστου κατά την έξοδό του από την ορεινή περιοχή (Πηγή: https://images.squarespacecdn.com/content/v1/55549512e4b0b9618acd1e2b/1562272102618-FLOPC1ENRF873K8TZE0V/132_Tsal_70x_100.png)

2.3 Γεωτεκτονική θέση του ποταμού Νέστου

Ο ποταμός Νέστος αναπτύσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη της μάζας της Ροδόπης. Η μάζα της Ροδόπης αποτελεί την ελληνική ενδοχώρα και περιλαμβάνει γεωγραφικά ένα τμήμα της νότιας Βουλγαρίας, τη Θράκη, τη Ροδόπη, τη Θάσο και την ανατολική Μακεδονία με φυσικό δυτικό όριο τον Στρυμόνα ποταμό (Μουντράκης, 2010). Σύμφωνα με τα σύγχρονα γεωτεκτονικά μοντέλα εξέλιξης, η μάζας της Ροδόπης αποτέλεσε είτε το ηπειρωτικό κομμάτι της πλάκας της Ευρασίας είτε κομμάτι της Κιμμερίας πλάκας που είχε αποσπαστεί από την Γκοντβάνα και κινήθηκε προς τα Βορειοανατολικά για να ενσωματωθεί τελικά στην Ευρασία (Μουντράκης, 2010). Η Ροδόπη βρίσκεται επίσης μεταξύ δύο οροσειρών, των Δυναρίδων και των Καρπαθοβαλκανίδων.

2.4 Μορφολογία λεκάνης Νέστου

Το ανάγλυφο λεκάνης απορροής του Νέστου, διακρίνεται σε δύο γεωμορφολογικούς τύπους: την ορεινή ζώνη, που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα και την πεδινή ζώνη, που βρίσκεται στο νότιο, δηλαδή στο Δέλτα του ποταμού (**Εικόνα 15**). Οι δύο ζώνες δημιουργήθηκαν εξαιτίας της οрукτολογικής σύστασης των σχηματισμών που αποτελούν τη λεκάνη. Επίσης, ο σχηματισμός τους οφείλεται στον έντονο τεκτονισμό που υπέστη η ευρύτερη περιοχή με τις τρεις φάσεις πτυχώσεων αλλά και στα διαδοχικά στάδια εναλλαγών διάβρωσης – απόθεσης ιζημάτων του ποταμού. Η ορεινή ζώνη είναι αρκετά μεγαλύτερη σε έκταση από τη πεδινή και σε αυτή παρατηρείται εντονότερο ανάγλυφο με το υδρογραφικό δίκτυο να είναι πυκνότερο στο βόρειο τμήμα της και αραιότερο στο νότιο. Τα απότομα πρανή είναι χαρακτηριστικό της ορεινής ζώνης και διαμορφώθηκαν λόγω της κατά βάθος διάβρωσης που οφείλεται στον έντονο τεκτονισμό της περιοχής. Οι σχηματισμοί του βόρειου τμήματος της λεκάνης που είναι πιο επιδεκτικοί στην διάβρωση-αποσάθρωση είναι τα μάρμαρα, των οποίων τα προϊόντα αποσάθρωσης δυσχεραίνουν τη δημιουργία εδάφους, με συνέπεια την έλλειψη βλάστησης και τη δημιουργία πρανών με μεγάλες κλίσεις. Στο νότιο τμήμα της ορεινής ζώνης, ο ποταμός ξεκινά να μαιανδρίζει λόγω της μεταβολής του αναγλύφου από αδρό σε ομαλότερο με την παρουσία πεδινών τμημάτων. Η πεδινή ζώνη αποτελείται από μικρότερες μορφολογικές κλίσεις από τα βόρεια προς τα νότια, οι οποίες συμβάλουν στη διαμόρφωση λιμναζουσών επιφανειών (Παπάδας, 2010).



Εικόνα 15: Μορφολογικός χάρτης λεκάνης Νέστου

2.5 Γεωμορφολογία λεκάνης Νέστου

Το γεωμορφολογικό καθεστώς που εμφανίζει ο Νέστος είναι ενός αναστομωμένου, διακλαδιζόμενου ποταμού με μεγάλο πλάτος (d) και μικρό βάθος (h) κοίτης. Στο Βόρειο, ορεινό, τμήμα ο λόγος πλάτους προς βάθος (d/h) μειώνεται στο 15-50 ενώ στα πεδινά τμήματα ο λόγος φτάνει 150-300. Ο ποταμός Νέστος, κατά το μεγαλύτερο μέρος του, παρουσιάζει ευθύγραμμη πορεία και νησίδες με φυτοκάλυψη, που διακλαδίζουν και επανενώνουν τις κοίτες του ποταμού, γεγονός που υποδηλώνει τον αναστομωτικό χαρακτήρα του ποταμού. Σε πολλά σημεία είναι έντονη η ανάπτυξη αναβαθμίδων στις πλευρές της κοίτης του ποταμού, ανάλογα με τη κίνηση του νερού, τη διάβρωση και τη απόθεση υλικών στις πλευρές του ποταμού.

2.6 Τεκτονική δομή ευρύτερης λεκάνης Νέστου

Σύγχρονες μελέτες χωρίζουν τη μάζα της Ροδόπης σε δύο ζώνες, με βάση κυρίως τη τεκτονική της περιοχής (Paranikolaou & Panagoroulos, 1981). Αυτές είναι η ανώτερη «τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου» που εκτείνεται προς τα σύνορα της Ελλάδας με τη Βουλγαρία και η κατώτερη και ηλικιακά νεότερη - «τεκτονική ενότητα του Παγγαίου». Η ενότητα του Σιδηρόνερου εφίππευει την ενότητα του Παγγαίου, με το όριο της εφίππευσης να αποτελεί τεκτονική ζώνη με γενική διεύθυνση ΒΔ- ΝΑ. Η πτύχωγενής τεκτονική στη περιοχή της Ροδόπης έχει χωριστεί σε τρεις ομάδες σύμφωνα με τον Μουντράκη (1985) (**Εικόνα 16**).

- Η πρώτη ομάδα λαμβάνει χώρα κατά το Παλαιοζωικό και έχει δημιουργήσει ισοκλινείς πτυχές γενικής διεύθυνσης Β-Ν και σε αυτή αποδίδεται η πρώτη παραμόρφωση του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου.

- Η δεύτερη φάση λαμβάνει χώρα κατά το Ηώκαινο - Ολιγόκαινο, κατά τη δημιουργία των πλουτωνιτών της Ροδόπης και συναντώνται υποϊσοκλινείς πτυχές με γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η πτύχωση αυτή αποτελεί τη κύρια πτύχωση στα πετρώματα της Ροδόπης. Χαρακτηριστικό αυτής της φάσης αποτελεί μια γράμμωση που παρατηρείται σε όλο το μήκος της Ροδόπης και δημιουργήθηκε από τη τομή της φύλλωσης του Παλαιοζωικού με τη δεύτερη σχιστότητα, που δημιουργήθηκε από τη δεύτερη φάση πτύχωσης. Τα πλουτωνικά πετρώματα είναι επηρεασμένα από τη δράση αυτού του σταδίου πτύχωσης και καθορίζουν την ηλικία της δεύτερης φάσης.

- Η τρίτη φάση πτυχώσεων συνδέεται με τη εφίππευση της ενότητας Σιδηρόνερου πάνω στη ενότητα Παγγαίου. Η ηλικία της χρονολογείται κατά το Ολιγόκαινο και αποτελείται από ανοιχτές πτυχές γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ που επαναπτυχώνουν τους σχηματισμούς που έχουν επηρεαστεί προγενέστερα και από τις δύο άλλες φάσεις.

Γενικά η δημιουργία όλων των δομών συμπίεστικής τεκτονικής όπως τα τεκτονικά λέπια, οι επωθήσεις και οι εφίππευσεις, σχετίζονται με τη σύγκρουση της Απουλίας μικροπλάκας με την Ευρασιατική. Αργότερα, κατά το Τριτογενές, η κύρια τεκτονική

που επικράτησε ήταν εφελκυστική και ευθύνεται για τη δημιουργία κανονικών ρηγματών αποκόλλησης, μικρής γωνίας κλίσης που οδήγησαν στη κατάρρευση των τεκτονικών καλυμμάτων και λεπίων που είχαν δημιουργηθεί κατά το συμπιεστικό στάδιο. Κύριο παράδειγμα αποτελεί η κατάρρευση της δομής του Σιδηρόνερου, με γενική διεύθυνση προς τα ΝΔ, όπου εμφανίστηκαν τα υποκείμενα στρώματα της ενότητας του Παγγαίου (Μουντράκης, 1985).



2.7 Λιθολογία ευρύτερης λεκάνης Νέστου

Η λιθολογική ταξινόμηση και μελέτη των σχηματισμών, που παρουσιάζονται κατά μήκος του ποταμού Νέστου και ανήκουν στη μάζα της Ροδόπης, δεν καθίσταται εύκολη λόγω της έλλειψης χαρακτηριστικών ιζηματογενών οριζόντων και της ασυνεχούς στρωματογραφίας ολόκληρης της περιοχής. Έτσι, ο διαχωρισμός της περιοχής έγινε κυρίως βασιζόμενος σε τεκτονικά και λιθολογικά κριτήρια, παρά με βάση τη στρωματογραφική σύνδεση και συσχέτιση των σχηματισμών (Osswald, 1938).

Η περιοχή αποτελείται κυρίως από μάρμαρα, πυριγενή και κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, με το πάχος των τελευταίων να υπολογίζεται περίπου 10-20 km. Ο Oswalt πρώτος χώρισε τη μάζα σε τέσσερις οριζόντες που από τους κατώτερους προς τους ανώτερους αποτελούνται από:

- Τη σειρά Ε, που συναντάται στο δυτικό μέρος της Ροδόπης. Αποτελεί τη βάση της ακολουθίας, με πάχος 7 km και απαρτίζεται από μοσχοβιτικούς, βιοιτικούς και

διμαρμαρυγιακούς γνευσίους. Ακόμα, περιλαμβάνει σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και ενδιαμέσα αυτών παρεμβάλλονται λεπτές ενστρώσεις σιπολινών και ορίζοντες από μάρμαρα.

- Την ακολουθία F των μαρμάρων που έρχεται σε ομαλή μετάβαση με τη προηγούμενη σειρά, με πάχος 5.5-7 km και εμφανίζεται από τη ανατολική Μακεδονία μέχρι το δυτικό μέρος του ποταμού Νέστου.
- Ακολουθεί η σειρά G των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, με συχνές εναλλαγές γνευσίων και φακούς μαρμάρων, με συνολικό πάχος περίπου 5 km.
- Τέλος, έπεται η σειρά H με σχιστόλιθους και μάρμαρα που εμφανίζεται προς τη ΒΑ Ροδόπη, με πάχος 3 km.

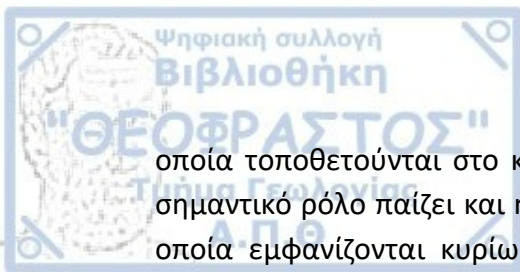
Ωστόσο πιο σύγχρονες μελέτες χωρίζουν τη μάζα της Ροδόπης σε δύο ζώνες, με βάση κυρίως τη τεκτονική της περιοχής (Paranikolaou & Panagoroulos, 1981). Αυτές είναι, η ανώτερη «τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου» που εκτείνεται προς τα σύνορα της Ελλάδας με τη Βουλγαρία και αποτελείται κυρίως από ορθογνεύσιους, αμφιβολίτες σχιστόλιθους και ενστρώσεις μαρμάρων και σιπολινών. Η κατώτερη «τεκτονική ενότητα του Παγγαίου» αποτελείται από ορίζοντα μεγάλους πάχους από μάρμαρα μαζί με ορθογνεύσιους, αμφιβολίτες και σχιστόλιθους και είναι νεότερη της πρώτης τεκτονικής ενότητας.

Στη μάζα της Ροδόπης παρατηρείται επίσης, πλήθος πλουτωνικών και ηφαιστειακών πετρωμάτων. Τα πλουτωνικά είναι κυρίως γρανίτες, γρανοδιορίτες, διορίτες, μονζονίτες και τοναλίτες ενώ τα ηφαιστειακά που εμφανίζονται είναι βασικής έως όξινης σύστασης με βασάλτες, ανδεσίτες, δακίτες, τραχύτες και ρυόλιθους.

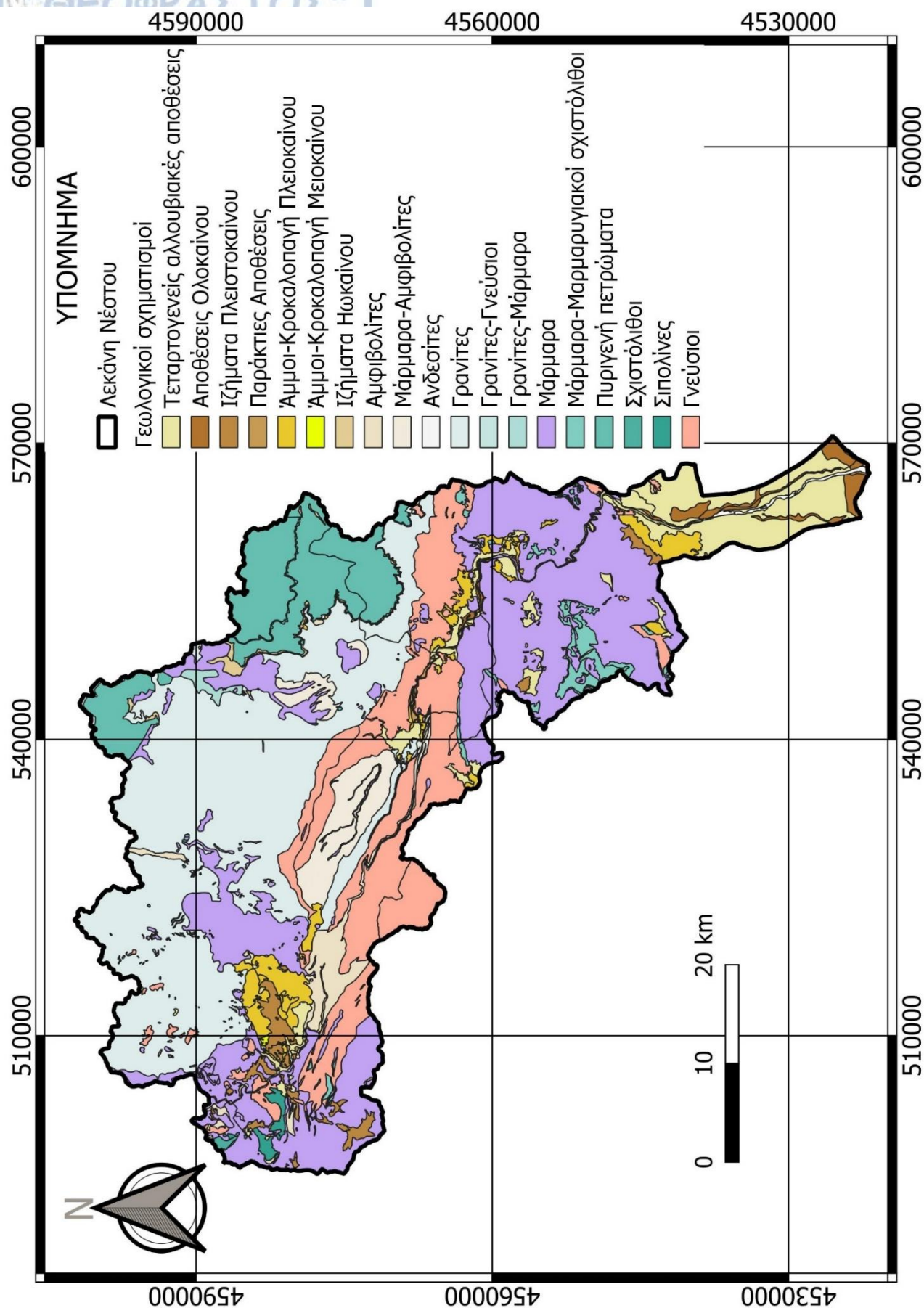
Η ηλικία των πλουτωνιτών, μετά από πλήθος ραδιοχρονολογήσεων, αποδίδεται στο Τριτογενές και συγκεκριμένα από Ηώκαινο έως Μειόκαινο. Η εμφάνιση τους σχετίζεται με τις εφελκυστικές τεκτονικές συνθήκες, που δημιουργήθηκαν κατά τη τελική υποβύθιση του ωκεανού της Τηθύος κάτω από τη ελληνική ενδοχώρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της ομάδας αποτελεί ο γρανίτης της Ελατιάς άνω Κρητιδικής ηλικίας. Στη περιοχή έχουν βρεθεί και πλουτωνίτες που περιέχουν πετρώματα με παλαιότερες ηλικίες κρυστάλλωσης, όπως ο γρανίτης Συμβόλου - Καβάλας, ηλικίας Λιθανθρακοφόρου. Αυτή η ηλικιακή διαφορά των ίδιων πλουτωνιτών, διαπιστώθηκε ότι οφείλεται στη απορρόφηση σχιστολιθικών πετρωμάτων του Παλαιογενούς από το μάγμα, με ζirkόνια ανάλογων ηλικιών που έδωσαν πιο παλιές ηλικίες κατά τη ραδιοχρονολόγηση των πλουτωνιτών.

Τα ηφαιστειακά που συναντώνται στη μάζα της Ροδόπης είναι ηλικίας Τριτογενούς και σχηματίστηκαν σε παρόμοιο εφελκυστικό περιβάλλον υποβύθισης του ωκεανού της Τηθύος κάτω από τη ελληνική ενδοχώρα, όπως η δημιουργία των πλουτωνιτών, και έχουν ηλικία κυρίως Ολιγοκαινική (Μουντράκης, 1985).

Από το χάρτη αυτόν (**Εικόνα 17**) προκύπτει ότι στη λεκάνη του ποταμού Νέστου κυριαρχούν τα πυριγενή και συγκεκριμένα οι γρανίτες, οι οποίοι βρίσκονται στο βόρειο - βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης και αποτελούν μέρος της Μάζας της Ροδόπης. Δεύτεροι μεγαλύτεροι σε έκταση σχηματισμοί είναι τα μάρμαρα, τα



οποία τοποθετούνται στο κεντρικό και στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η παρουσία γνευσίων, αμφιβολιτών και σχιστολίθων, τα οποία εμφανίζονται κυρίως στη βορειοδυτική πλευρά της λεκάνης. Τέλος, στην περιοχή του Δέλτα, στο νότιο τμήμα, εντοπίζονται οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής αυτής.



Εικόνα 17: Γεωλογικός χάρτης λεκάνης Νέστου

2.8 Υδρογεωλογία της λεκάνης του Νέστου

Η περατότητα είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων που αποτελούν τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και είναι ανεξάρτητη του ρευστού (Βουδούρης, 2013). Είναι ουσιαστικά συνάρτηση του μεγέθους των ανοιγμάτων, δια μέσου των οποίων κινείται το υγρό. Τα χαλαρά υλικά έχουν μεγαλύτερη περατότητα σε σχέση με τα συνεκτικά γιατί το συγκολλητικό υλικό σε αυτά, μειώνει τον συνολικό όγκο των κενών. Η πρωτογενής περατότητα στα κρυσταλλικά πετρώματα (μεταμορφωμένα, πυριγενή ή ιζηματογενή χημικής προέλευσης) είναι κατά κανόνα χαμηλή, όπως και η τιμή του πορώδους τους. Η δομή τους περιέχει λίγα διάκενα και έτσι το ρευστό δεν μπορεί να κινηθεί γρήγορα μέσα στη μάζα τους. Η περατότητα αυξάνει λόγω διαρρήξεων και διακλάσεων (δευτερογενής περατότητα) αλλά και λόγω της αποσάθρωσης. Στην πρώτη περίπτωση το νερό καθώς κινείται διαλύει ορυκτά από το πέτρωμα και έτσι αυξάνεται η περατότητα, ενώ στη δεύτερη αυξάνεται ο αριθμός και το μέγεθος των διακένων και των διακλάσεων με την αποσύνθεση του πετρώματος με αποτέλεσμα την αύξηση της περατότητας (Βουδούρης, 2013).

Εκτός από τους περατούς υπάρχουν και άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί, χαμηλής περατότητας που δεν επιτρέπουν την κίνηση του νερού δια μέσου της μάζας τους και χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Σύμφωνα με την αγγλική βιβλιογραφία διακρίνονται σε στεγανούς, δηλαδή σε απόλυτα αδιαπέρατους σχηματισμούς που δεν μπορούν να αποθηκεύσουν ούτε να μεταφέρουν νερό και σε ημιπερατούς που είναι σχηματισμοί χαμηλής περατότητας που μπορούν να αποθηκεύσουν υπόγειο νερό και να το μεταφέρουν αλλά με σχετικά μικρό ρυθμό (Βουδούρης, 2013).

Στη λεκάνη του Νέστου μεγαλύτερο ενδιαφέρον από υδρογεωλογικής άποψης, εμφανίζουν οι αλλουβιακές αποθέσεις του Δέλτα στο νότιο τμήμα της λεκάνης, καθώς και οι καρστικοί υδροφορείς των σχηματισμών που βρίσκονται στο ορεινό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης, βόρεια του Δέλτα και αποτελούνται κυρίως από μάρμαρα, γνευσίους και αμφιβολίτες (**Εικόνα 18**).

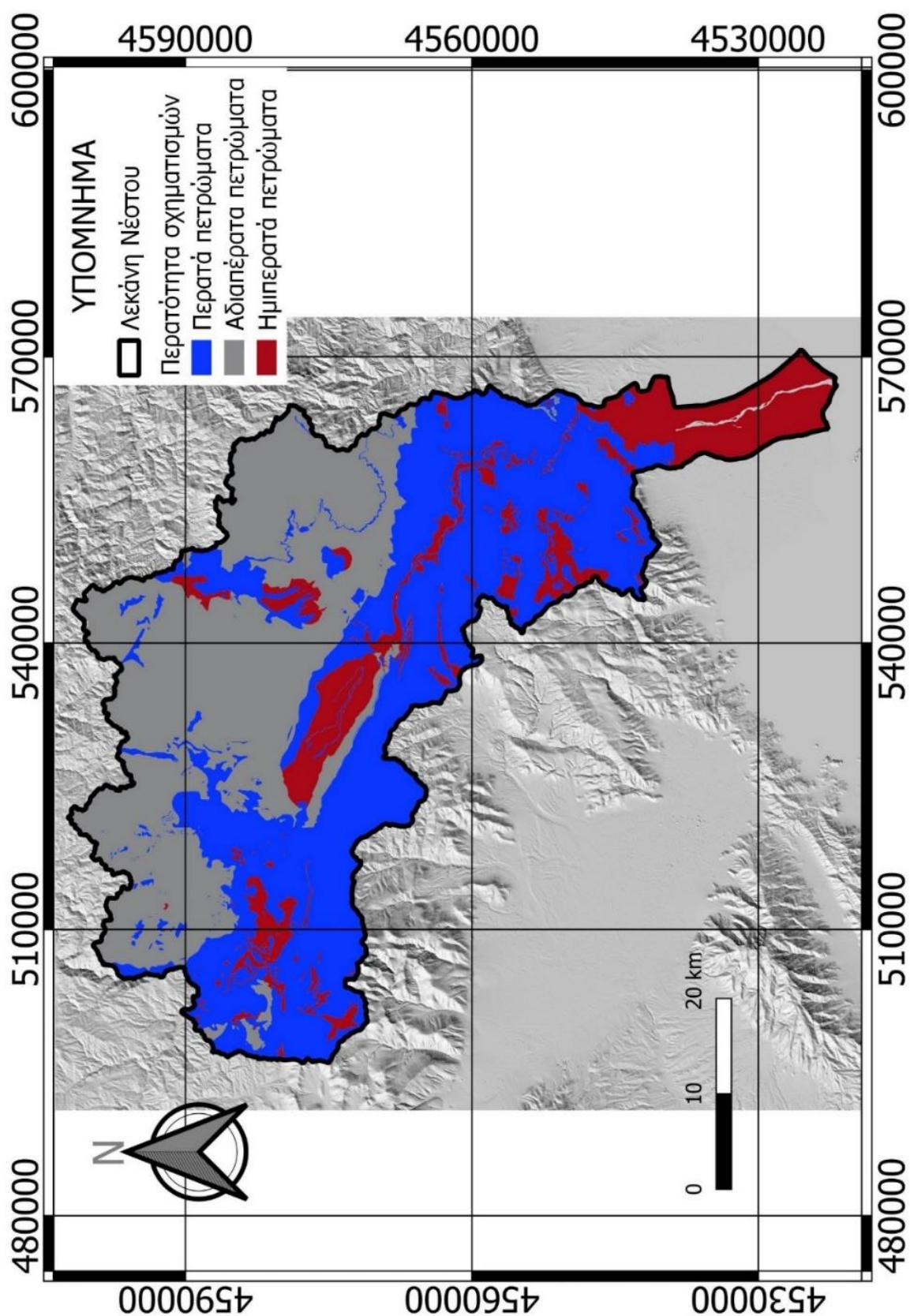
Οι Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο Δέλτα του Νέστου και βασικό τους χαρακτηριστικό αποτελεί η ετερογένεια των υλικών από τα οποία αποτελούνται (άργιλοι, άμμοι, χάλικες), η οποία χαρακτηρίζει περισσότερο το δυτικό κομμάτι του ποταμού. Η ετερογένεια αυτή οφείλεται στα διαδοχικά στάδια διάβρωσης – απόθεσης και γενικότερα στις μεταβολές που υπέστη η κοίτη του Νέστου. Εξαιτίας, του διαφορετικού κοκκομετρικού μεγέθους των υλικών, οι αλλουβιακές αποθέσεις κατατάσσονται στα ημιπερατά πετρώματα (**Πίνακας 2**), με την περατότητα τους να αυξάνεται από τις άμμους και τις κροκάλες και να ελαττώνεται προς τα λεπτόκοκκα.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της λεκάνης, τα οποία είναι εξίσου υψίστης υδρογεωλογικής σημασίας πετρώματα, αποτελούν τη ζώνη κατείσδυσης του επιφανειακού νερού εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς, εξαιτίας της

τεκτονικής και της καρστικοποίησης που έχουν υποστεί. Επομένως τα μάρμαρα, οι γνεύσιοι και οι αμφιβολίτες έχουν μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης και κατατάσσονται στα περατά πετρώματα της λεκάνης (**Πίνακας 2**).

Εκτός από την παρουσία των ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, εμφανίζονται σχιστόλιθοι, πυριγενή plutωνικά και ηφαιστειακά πετρώματα, τα οποία είναι σκληρά άρρηκτα πετρώματα, τα οποία δύσκολα αποσαθρώνονται και έτσι παρουσιάζουν πολύ μικρό συντελεστή κατείσδυσης καθώς και μεγάλο συντελεστή απορροής, γεγονός που τα καθιστά αδιαπέρατα (**Πίνακας 2**).

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ
Μάρμαρα	Περατά
Γνεύσιοι	Περατά
Άμμοι - Κροκαλοπαγή	Περατά
Αμφιβολίτες	Περατά
Ιζήματα	Ημιπερατά
Παράκτιες αποθέσεις	Ημιπερατά
Μάρμαρα - αμφιβολίτες	Ημιπερατά
Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις	Ημιπερατά
Αποθέσεις Ολοκαίνου	Ημιπερατά
Μάρμαρα – Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι	Ημιπερατά
Γρανίτες - Μάρμαρα	Ημιπερατά
Ανδεσίτες	Αδιαπέρατα
Γρανίτες	Αδιαπέρατα
Γρανίτες - Γνεύσιοι	Αδιαπέρατα
Πυριγενή πετρώματα	Αδιαπέρατα
Σχιστόλιθοι	Αδιαπέρατα
Σιπολίνες	Αδιαπέρατα
Πίνακας 2: Κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών σύμφωνα με την περατότητά τους	



Εικόνα 18: Χάρτης περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

3. Εισαγωγή

Σε αυτή την ερευνητική εργασία πρωταρχικός στόχος είναι να εξεταστεί η ποιότητα ενός αυτόματα εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιώντας ως αναφορά το ψηφιοποιημένο δίκτυο από τους τοπογραφικούς χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ). Σε αυτό το κεφάλαιο όμως θα αναλυθούν δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί κανείς να δημιουργήσει το υδρογραφικό δίκτυο ενός ποταμού σε ψηφιακή μορφή. Ο πρώτος τρόπος αφορά την ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Νέστου, αποκλειστικά για το κομμάτι που βρίσκεται στον Ελληνικό χώρο, βάσει τοπογραφικών χαρτών 1:50000 της Γ.Υ.Σ. Ο δεύτερος τρόπος αφορά την αυτόματη εξαγωγή του δικτύου του ποταμού από μία εικόνα Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (ΨΜΑ, Digital Elevation Model - DEM) μέσα από μία σειρά βημάτων. Ένα DEM είναι η απεικόνιση της τοπογραφικής επιφάνειας του γυμνού εδάφους της γης εξαιρουμένων των δέντρων, των κτηρίων και οποιωνδήποτε άλλων επιφανειακών αντικειμένων. Τα DEMs από το Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (Γ.Ι.Η.Π. - United States Geological Survey, USGS) που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται κυρίως από τοπογραφικούς χάρτες.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το QGIS 3.16 το οποίο είναι μια εφαρμογή γεωγραφικών πληροφοριών που υποστηρίζει την προβολή, την επεξεργασία και την ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων. Το QGIS δηλαδή, λειτουργεί ως λογισμικό συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών που εκτός από την σύνθεση και εξαγωγή χαρτών, επιτρέπει την ανάλυση και επεξεργασία χωρικών πληροφοριών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ψηφιοποίηση και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου θα αναλυθεί παρακάτω.

3.1 Ψηφιοποίηση υδρογραφικού δικτύου

Η ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου έγινε με βάση την ταξινόμηση κατά Stahler. Η διαδικασία ψηφιοποίησης παρότι σχετικά απλή είναι αρκετά απαιτητική και χρονοβόρα.

3.1.1 Γεωαναφορά χαρτών (Georeference)

Αρχικά, γεωαναφέρθηκαν οι έντεκα τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50000, που περιλαμβάνουν και το υδρογραφικό δίκτυο του Νέστου ποταμού. Το QGIS είναι ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει εργαλεία για την γεωαναφορά μιας εικόνας, ώστε να επιτευχθεί ο σωστός εντοπισμός και προσανατολισμός αυτής. Τέλος, επιλέχθηκε το Ελληνικό προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ-87 EPSG:2100.

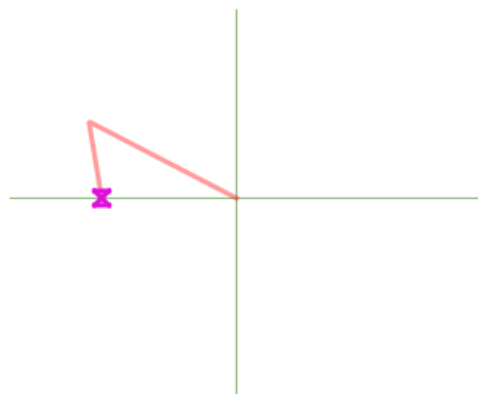
3.1.2 Δημιουργία θεματικού επιπέδου (shapefile)

Μετά την γεωαναφορά των χαρτών, για την έναρξη της ψηφιοποίησης, δημιουργήθηκε ένα νέο θεματικό επίπεδο στο οποίο θα αποθηκευτεί το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο σε μορφή γραμμικών διανυσματικών

δεδομένων. Τα διανυσματικά δεδομένα θα αναφέρονται στο προβολικό ΕΓΣΑ'87, αντίστοιχα με τους χάρτες από τους οποίους εξάχθηκε.

3.1.3 Ενεργοποίηση κουμπώματος (Enable snapping)

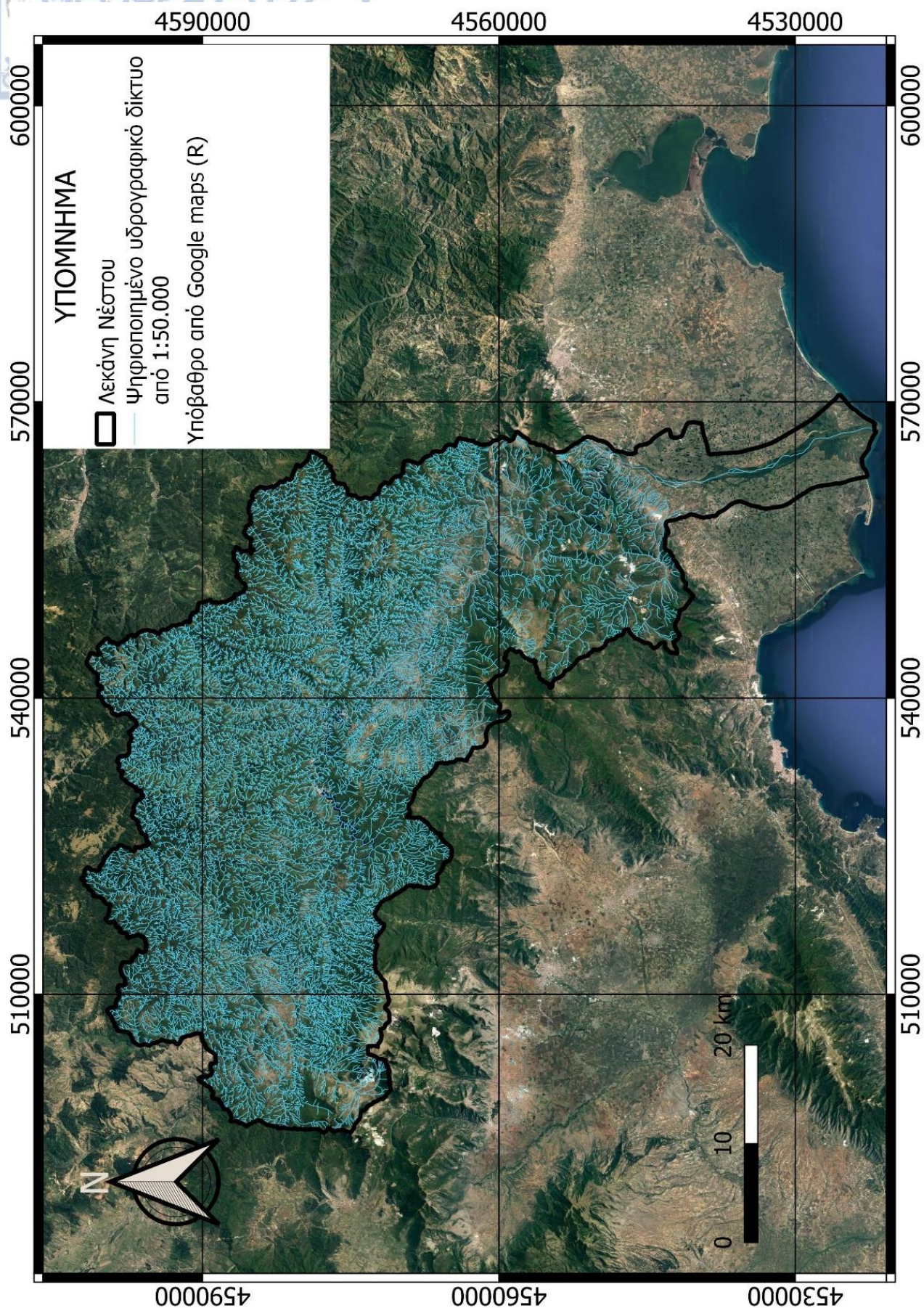
Πριν από την έναρξη της ψηφιοποίησης είναι αναγκαίο να ενεργοποιηθεί το εργαλείο "Enable snapping" , το οποίο χρησιμοποιείται για την επίτευξη της σύνδεσης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και συμβάλλει στο να αποφευχθεί η μη συνεχής σύνδεση των κλάδων του δικτύου. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κλάδων, αυτή η επιλογή μπορεί να είναι χρήσιμη για να διασφαλιστεί ότι δεν θα είναι οι κόμβοι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, αλλά θα είναι ενωμένοι. Έτσι όταν προστίθεται ένας νέος κόμβος ή μετακινείται ένας υπάρχων, το λογισμικό αναζητά τον πλησιέστερο κόμβο ή τμήμα με το οποίο προσπαθεί να συνδεθεί. Όσον αφορά τη λειτουργία σύνδεσης (snapping mode), μπορεί να γίνει επιλογή μεταξύ vertex (κόμβου), segment (τμήμα), area, centroid και middle of segments. Στην εργασία επιλέχθηκε το segment, ως τρόπος σύνδεσης των κλάδων (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Το εικονίδιο που εμφανίζει κατά τη σύνδεση με segment έχει τη μορφή κλεψύδρας
(Πηγή: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/working_with_vector/editing_geometry_attributes.html?highlight=enable%20snapping)

3.1.4 Συγχώνευση διανυσματικών επιπέδων (Merge vector layers)

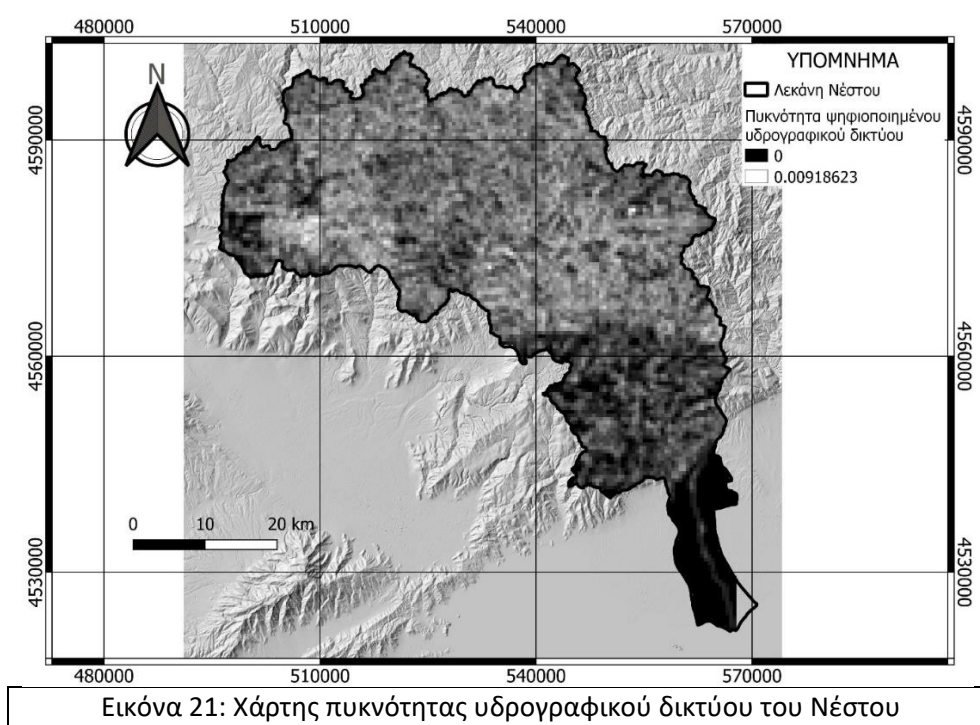
Αυτός ο αλγόριθμος συνδυάζει πολλαπλά διανυσματικά στρώματα του ίδιου τύπου γεωμετρίας σε ένα. Εάν οι πίνακες χαρακτηριστικών (attributes tables) είναι διαφορετικοί, ο νέος πίνακας χαρακτηριστικών του επιπέδου που προκύπτει θα περιέχει τα χαρακτηριστικά από όλα τα επίπεδα εισόδου. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ώστε να συγχωνευτούν επιμέρους τμήματα του υδρογραφικού δικτύου που ψηφιοποιήθηκαν ξεχωριστά (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Χάρτης ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου του Νέστου

3.2 Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου

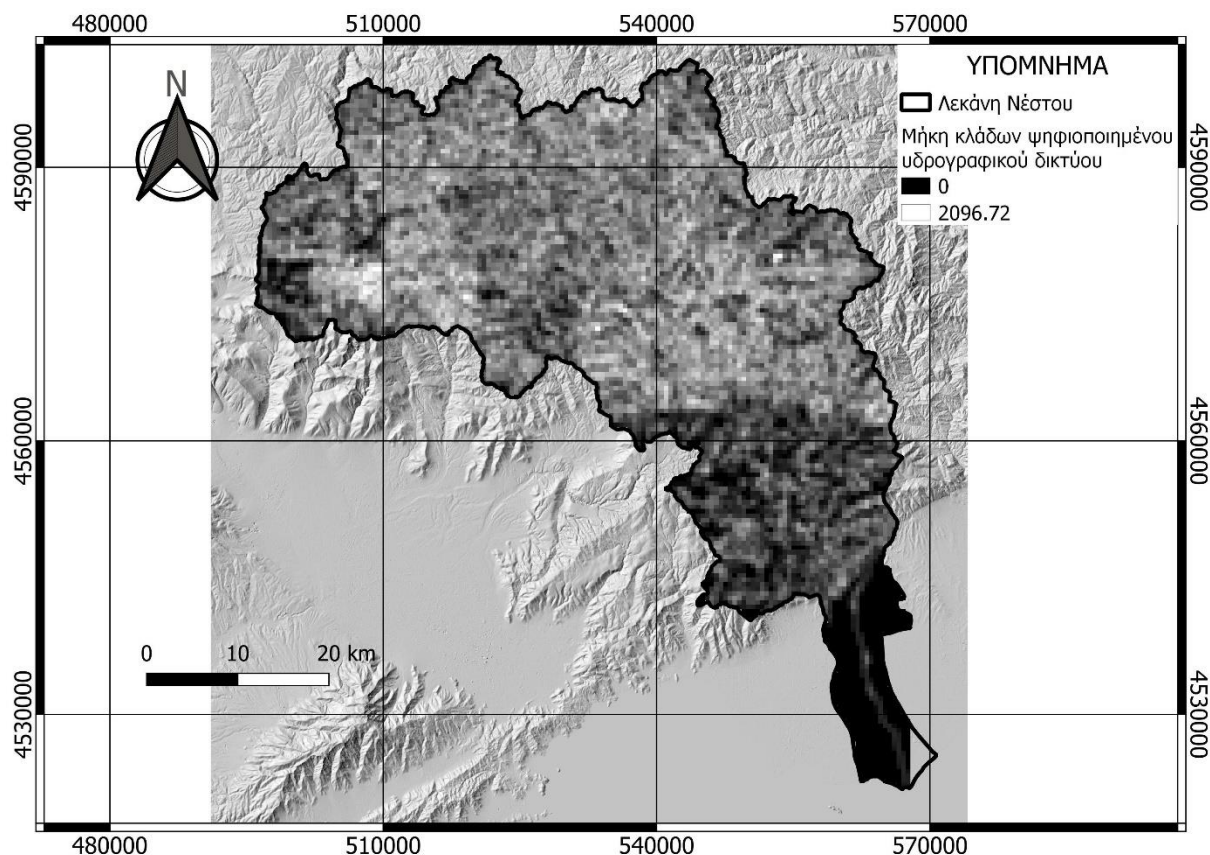
Η πυκνότητα του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου του Νέστου υπολογίστηκε με σκοπό ναδειχθεί ότι η πυκνότητα δεν επηρεάζεται μόνο από την περατότητα, αλλά και από άλλους παράγοντες. Αυτοί μπορεί να είναι η λιθολογία και η τεκτονική της περιοχής. Η ανάλυση της πυκνότητας έγινε από τον λογάριθμο "line density", όπου ορίστηκε ως ακτίνα (radius) τα 500 m και ως μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel) επίσης 500 m. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της πυκνότητας γραμμικών διανυσματικών δεδομένων (line density) υπολογίζει την πυκνότητα γραμμικών χαρακτηριστικών που υπάρχουν σε μια συγκεκριμένη κυκλική έκταση. Όλες οι τιμές μήκους αθροίζονται και διαιρούνται με το εμβαδόν της έκτασης της κυκλικής περιοχής, στην προκειμένη περίπτωση $\rho = \text{μήκος κλάδων} / (500 * 500)$. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα κελιά raster, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του χάρτη πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (**Εικόνα 21**). Σε αυτόν απεικονίζονται με φωτεινό χρώμα οι περιοχές υψηλής πυκνότητας, ενώ πιο σκουρόχρωμες οι περιοχές με χαμηλή πυκνότητα κλάδων. Η πυκνότητα του δικτύου φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στο βόρειο τμήμα της λεκάνης γεγονός που οφείλεται στην τεκτονική της περιοχής, αφού εκεί υπάρχουν ανυψώσεις αναγλύφου που προκαλούν κατά βάθος διάβρωση. Η διάβρωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών κλάδων 1^{ης} τάξης και επομένως την ανάπτυξη πυκνού δικτύου. Αντίθετα, στο νότιο τμήμα της λεκάνης, όπου είναι πεδινό, η πυκνότητα του δικτύου ελαττώνεται, διότι η περιοχή έχει περάσει το στάδιο της νεότητας και βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται με τη μείωση των κλίσεων, την ύπαρξη μαιάνδρων σε ορισμένα σημεία της κοίτης, καθώς και το μειωμένο ρυθμό



Εικόνα 21: Χάρτης πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου του Νέστου

τεκτονικής δραστηριότητας, που έχει ως επακόλουθο την απουσία πολλών κλάδων 1^{ης} τάξης.

Η πυκνότητα μηκών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου δημιουργήθηκε από τον κώδικα "Raster calculator" μέσω της παράστασης "line_density@1"*500*500". Στον χάρτη (**Εικόνα 22**) απεικονίζεται και πάλι στο βόρειο τμήμα με ανοιχτόχρωμο χρώμα η μεγάλη πυκνότητα των μηκών κλάδων, ενώ στο νότιο με σκουρόχρωμο η μικρότερη πυκνότητα των μηκών κλάδων του δικτύου. Εκτός από την τεκτονική, η διάκριση αυτή οφείλεται στη λιθολογία και συνεπώς στην περατότητα των σχηματισμών. Όσο πιο μεγάλη η περατότητα των σχηματισμών της υδρολογικής λεκάνης, τόσο αραιότερο είναι το δίκτυο και το αντίστροφο.



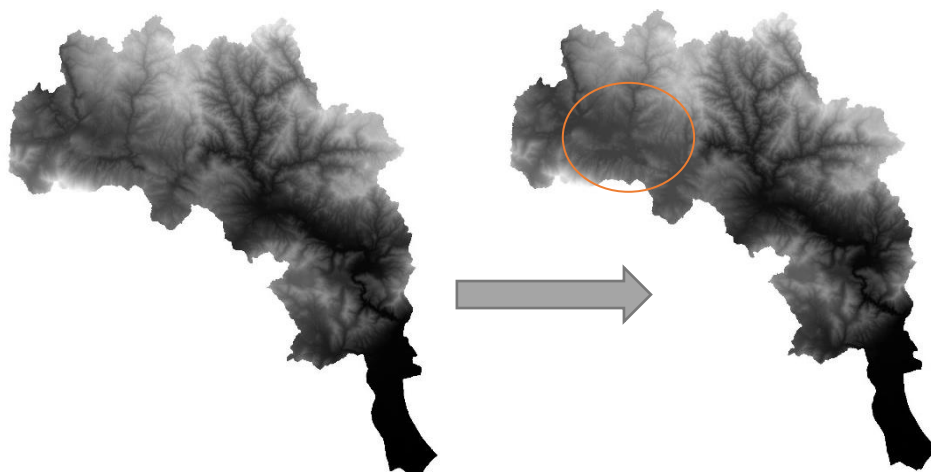
Εικόνα 22: Χάρτης πυκνότητας μηκών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου

3.3 Αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από DEM

Το πρόγραμμα QGIS 3.16 δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του, να κάνουν υδρογραφική ανάλυση της περιοχής από την οποία διέρχεται ένας ποταμός, έχοντας ως δεδομένο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (ΨΜΑ, Digital Elevation Model - DEM). Η υδρογραφική ανάλυση ενός DEM περιλαμβάνει μοντέλα απορροής (διεύθυνση απορροής, μήκος απορροής κλπ.), εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου, λεκανών απορροής και υδροκριτών, ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου (κατά Stahler, Shreve κλπ.) και εξαγωγή τους σε διανυσματική μορφή. Η αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από DEM, εξοικονομεί χρόνο και κόπο, σε σχέση με την διαδικασία της ψηφιοποίησης που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Αυτό όμως που πρέπει να εξεταστεί είναι αν η αυτόματη εξαγωγή είναι ακριβής ή όχι.

3.3.1 Πλήρωση βυθισμάτων ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (Filling sinks in a DEM)

Το πρώτο βήμα για την αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου είναι η χρήση του αλγορίθμου "Fill sinks", ο οποίος πληρώνει τα βυθίσματα που υπάρχουν σε ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (**Εικόνα 23**). Ένα DEM αποτελείται από κελιά, όπου το κάθε κελί αντιστοιχεί σε μια υψομετρική τιμή. "Sink" είναι το κελί με τη χαμηλότερη υψομετρική τιμή από τα γύρω κελιά στο DEM, το οποίο παρακωλύει τη φυσική απορροή του νερού προς τα κατάντη. Τα βυθίσματα αυτά υπάρχουν στα δεδομένα εξαιτίας σφαλμάτων ή της παρουσίας λιμνών ή φυσικών ταπεινώσεων αναγλύφου (depressions), οι οποίες είναι μορφές εδάφους που βυθίζονται ή βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τη γύρω περιοχή. Για παράδειγμα, η ροή του ποταμού ξεκινά από μέρη με μεγαλύτερο υψόμετρο προς



Εικόνα 23: Το αρχικό DEM (αριστερά) και το DEM με τα πληρωμένα βυθίσματα (Filled DEM, δεξιά)

περιοχές με χαμηλότερο. Τα υψόμετρα όμως, δεν μειώνονται πάντα εκθετικά, αλλά μπορεί να υπάρχει ενδιάμεσα αυτό το βύθισμα (sink) με το χαμηλότερο υψόμετρο. Στην περίπτωση αυτή, το ποτάμι δε μπορεί να συνεχίσει τη πορεία του και σταματά εκεί. Ο αλγόριθμος αυτός, πληρώνει αυτά τα βυθίσματα, ουσιαστικά αυξάνει τοπικά το υψόμετρό τους, ώστε να υπάρχει μια ομαλή μετάβαση του νερού από τα ψηλά προς τα χαμηλά. Μετά την εκτέλεση αυτού του βήματος παράγεται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, όπου τα υψόμετρα πλέον μειώνονται ομαλά προς τα κατάντη.

3.3.2 Λεκάνη απορροής (Catchment area)

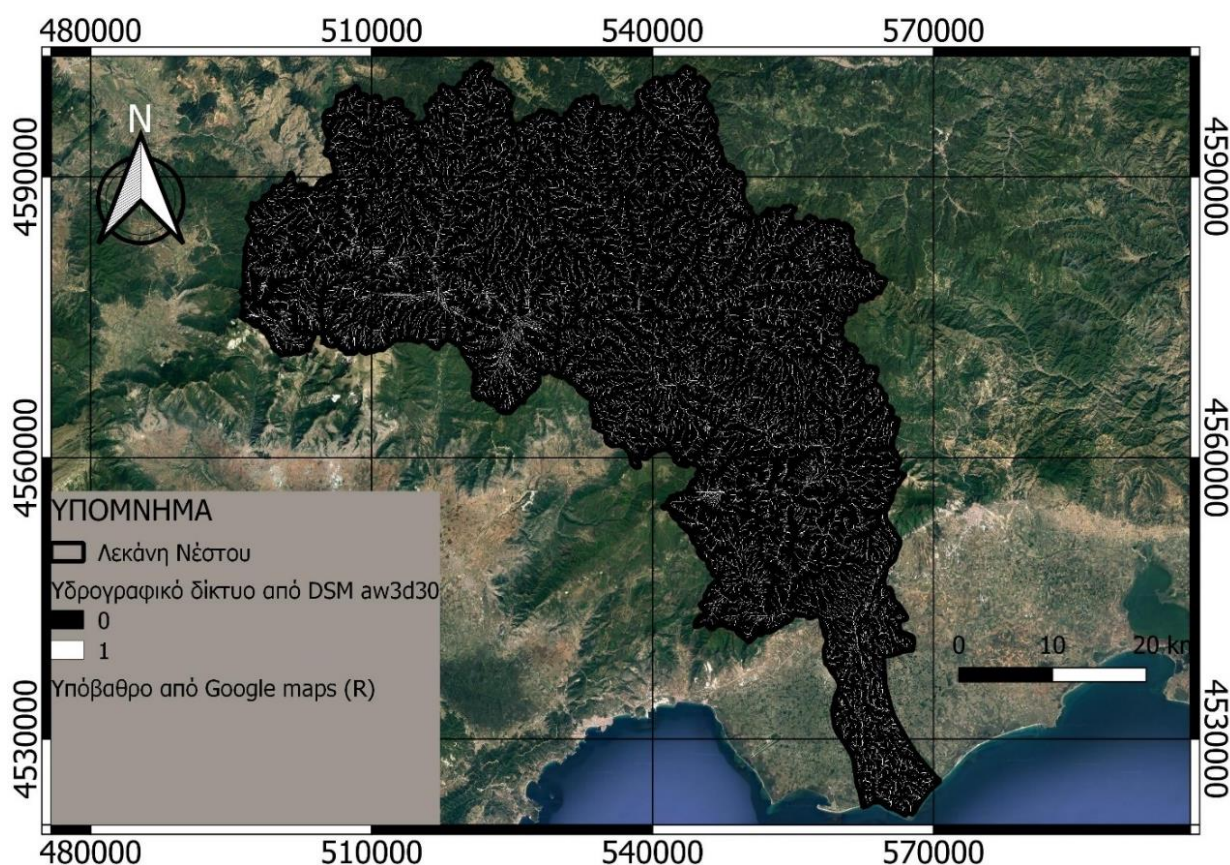
Η χρήση του αλγόριθμου "Catchment area" αποτελεί το δεύτερο βήμα, το οποίο δημιουργεί ένα αρχείο που περιέχει τη συγκέντρωση ροής του ποταμού. Η εντολή αυτή περιλαμβάνει πέντε μεθόδους, με τη κάθε μία από τις οποίες η συγκέντρωση ροής του Νέστου μπορεί να διαμορφωθεί με διαφορετικό τρόπο. Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής: Deterministic 8, Rho 8, Braunschweiger Reliefmodell, Deterministic Infinity, Multiple Flow Direction και Multiple Triangular Flow Direction (QGIS 3.16). Σε αυτή την εργασία, ο αλγόριθμος "Catchment area" εκτελέσθηκε με βάση τη μέθοδο Deterministic 8 (**Εικόνα 24**). Αυτή είναι η κλασσική μέθοδος στην οποία η ροή του νερού μετακινείται από το κέντρο ενός κελιού, στο κέντρο ενός από τα κελιά, που περιβάλλουν το αρχικό. Δηλαδή υπάρχει ένα πλέγμα κατευθύνσεων ροής D8, που ορίζεται για κάθε κελί ως η κατεύθυνση ενός από τους 8 γειτονικούς ή διαγώνιους γείτονές του με την πιο απότομη κλίση προς τα κάτω.



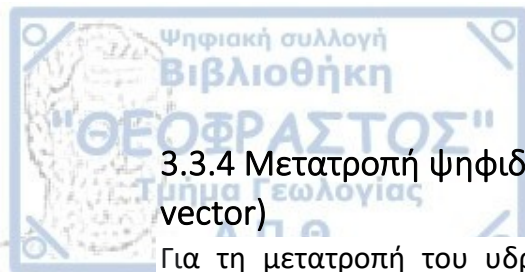
Εικόνα 24: Επίπεδο "Catchment area" με τη μέθοδο "D8"

3.3.3 Αριθμομηχανή ψηφιδωτών αρχείων (Raster calculator)

Το τελικό στάδιο για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου είναι η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων συγκεντρωτικής ροής με το εργαλείο "Raster calculator". Το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει την εκτέλεση αλγεβρικών πράξεων χρησιμοποιώντας ψηφιδωτά δεδομένων (raster). Η έκταση, το μέγεθος κελιών και το προβολικό των δεδομένων εξόδου μπορούν να οριστούν από τον χρήστη. Η αριθμητική παράσταση που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι η "catchment_d8@1">53860. Ο αριθμός 53.860 αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο της συγκέντρωσης της ροής του νερού (Flow accumulation) που προκύπτει από τις στατιστικές πληροφορίες του θεματικού επιπέδου που περιέχει τα σημεία εκκίνησης των κλάδων 1^{ης} τάξης του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Τα σημεία έναρξης προέκυψαν από τον αλγόριθμο "lines to polygons". Το μέγεθος των κελιών καθορίστηκε 30, η έκταση ίδια με το επιλεγμένο επίπεδο και το προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87. Έτσι προέκυψε ένα ψηφιδωτό αρχείο σε μορφή Float32, όπου η τιμή 1 αντιπροσωπεύει τα κελιά στα οποία υπάρχει ροή νερού, ενώ η τιμή 0 τα κελιά τα οποία δεν παρουσιάζουν συγκέντρωση νερού (**Εικόνα 25**).

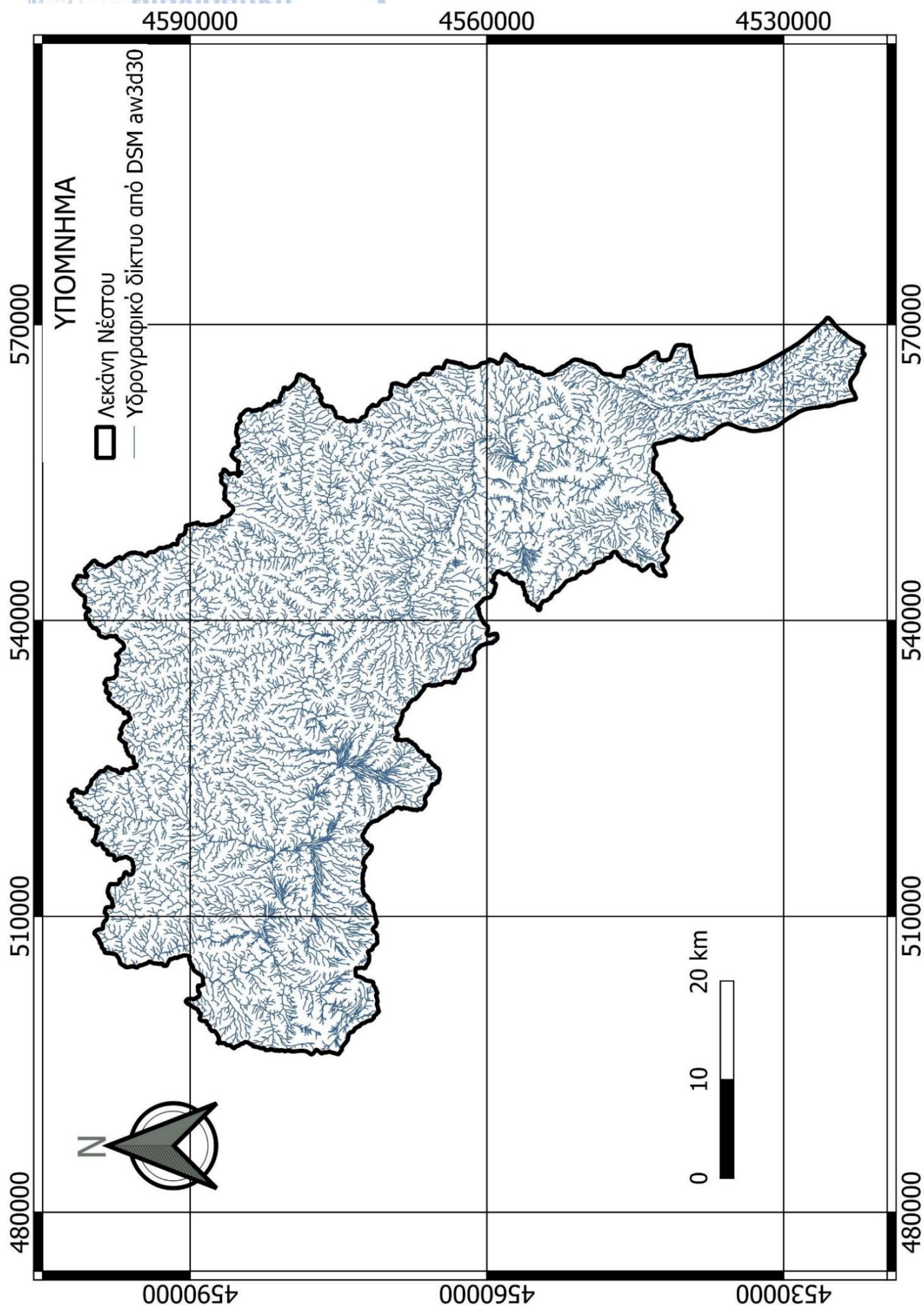


Εικόνα 25: Χάρτης εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου σε μορφή ψηφιδωτού



3.3.4 Μετατροπή ψηφιδωτών σε διανυσματικά δεδομένα (raster to vector)

Για τη μετατροπή του υδρογραφικού δικτύου από ψηφιδωτό σε διανυσματικό δεδομένο είναι αναγκαίο να γίνει η μετατροπή του τύπου των δεδομένων από δεκαδική μορφή (float) σε ακέραιους (integer). Για τον πρώτο τύπο δεν ενδείκνυται η χρήση του κώδικα που μετατρέπει τα ψηφιδωτά δεδομένα σε διανυσματικά, εξαιτίας των δεκαδικών ψηφίων που περιέχει (**Εικόνα 26**). Για τον λόγο αυτό, το αρχείο με τη συγκεντρωτική απορροή σε δεκαδική μορφή χρειάζεται να μετατραπεί σε ακέραιους αριθμούς μέσω του εργαλείου “raster calculator” του προγράμματος GDAL. Το τελικό στάδιο για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου είναι η εκτέλεση των εργαλείων “r.thin” και “r.to.vect” στο QGIS Desktop 3.16.2 with GRASS 7.8.4, τα οποία εξάγουν διανυσματικά δεδομένα σε μορφή γραμμικών στοιχείων από έναν ψηφιδωτό χάρτη. Στην προκειμένη περίπτωση τα γραμμικά αυτά στοιχεία αντιπροσωπεύουν τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

4. Εισαγωγή

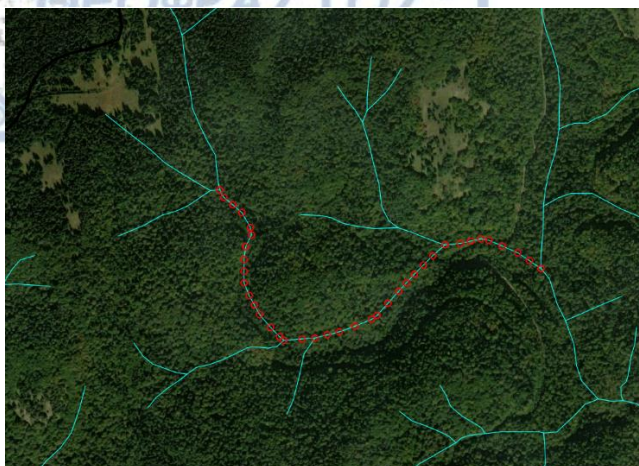
Αφού παράχθηκε το υδρογραφικό δίκτυο του Νέστου με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, με ψηφιοποίηση από τοπογραφικούς χάρτες και την αυτόματη εξαγωγή από DEM, ακολουθεί μια διαδικασία για τη σύγκρισή τους σε ότι αφορά την ταύτιση των κλάδων τους. Τελικός στόχος η αξιολόγηση του αυτόματα εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου βάσει του ψηφιοποιημένου από τα τοπογραφικά υπόβαθρα της περιοχής.

4.1 Μεθοδολογία

Οι κλάδοι των δύο υδρογραφικών δικτύων είναι γραμμικά στοιχεία και αποτελούνται από κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για να υλοποιηθεί η σύγκριση των δύο δικτύων. Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο, λόγω της χειρωνακτικής εργασίας, δεν διαθέτει σταθερές αποστάσεις μεταξύ των κόμβων. Αντίθετα, στο εξαγόμενο δίκτυο οι κόμβοι έχουν σταθερές αποστάσεις αλλά η πυκνότητά τους ενδεχομένως να διαφέρει από το αντίστοιχο ψηφιοποιημένο (**Εικόνα 27**). Για αυτό με τον αλγόριθμο "Densify by interval" αυξήθηκε η πυκνότητα των κόμβων κατά μήκος των δύο υδρογραφικών δικτύων με βήμα 50 m, ώστε αμφότερα τα δίκτυα να έχουν ομοιόμορφη κατανομή κόμβων και να επιτραπεί η ορθή σύγκρισή τους (**Εικόνα 28**). Στη συνέχεια, οι κόμβοι από τα δύο δίκτυα απομονώθηκαν για να μετρηθούν οι αποστάσεις μεταξύ τους (**Εικόνα 29**).



Εικόνα 27: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους τους (κοκκίνο χρώμα) πριν από την αύξηση της πυκνότητας αυτών

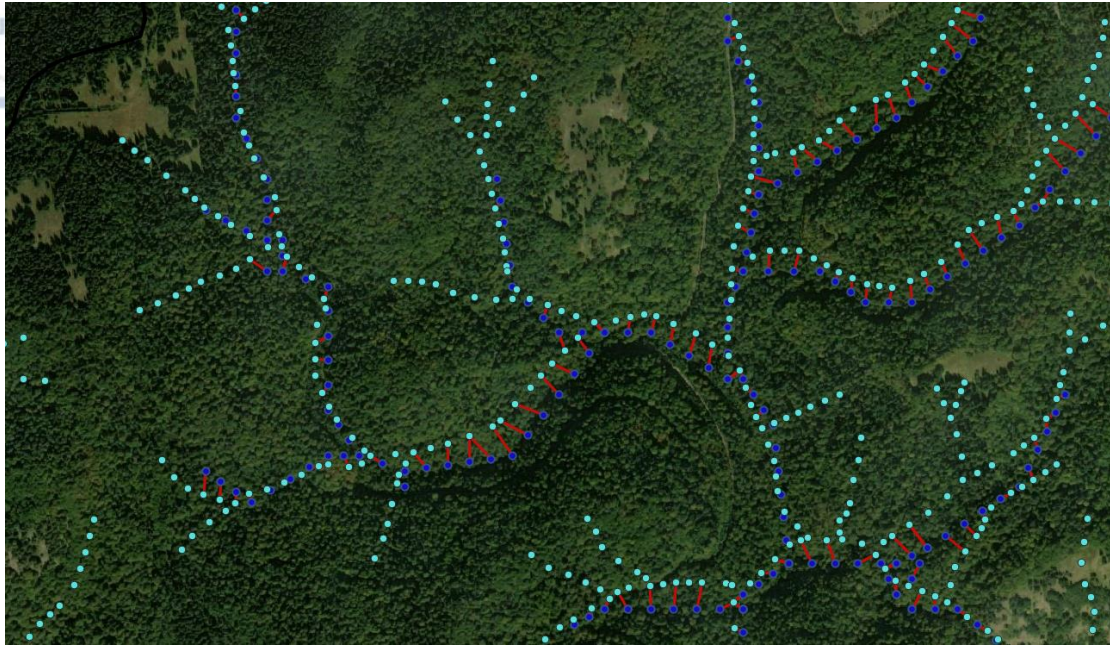


Εικόνα 28: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους τους (κοκκίνο χρώμα) μετά από την αύξηση της πυκνότητας αυτών



Εικόνα 29: Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο (αριστερά) και το εξαγόμενο βάσει του DEM (δεξιά) με τους αντίστοιχους κόμβους που απομονώθηκαν από τα δίκτυα

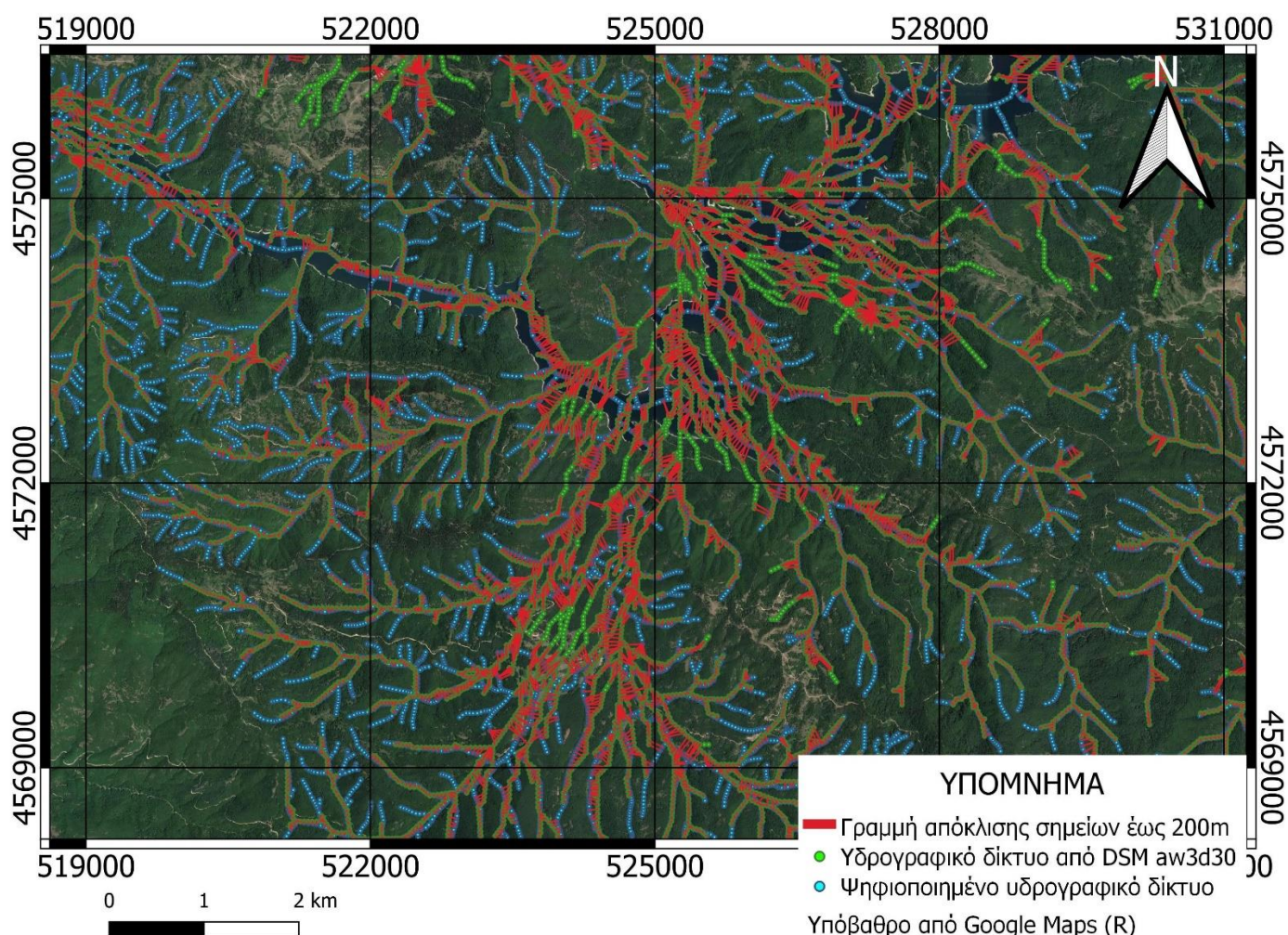
Τέλος, η μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων των δύο δικτύων, πραγματοποιήθηκε μέσω του κώδικα "Nearest Features", ο οποίος μετρά την απόσταση του εγγύτερου σημείου (κόμβου), μεταξύ δύο διανυσματικών αρχείων. Στη συγκεκριμένη εργασία ορίστηκε μέγιστη απόσταση τα 200 m (Εικόνα 30). Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων που υπολογίζονται άνω των 200 m δεν λήφθηκαν υπόψη. Η σύγκριση λοιπόν θα γίνει με βάση την απόσταση των κόμβων του αυτόματα εξαγόμενου δικτύου από τους κοντινότερους κόμβους του ψηφιοποιημένου.



Εικόνα 30: Οι κόμβοι του ψηφιοποιημένου (ανοιχτό μπλε) και του εξαγόμενου (σκούρο μπλε) υδρογραφικού δικτύου και οι αποστάσεις (κόκκινες γραμμές) των εγγύτερων μεταξύ τους κόμβων

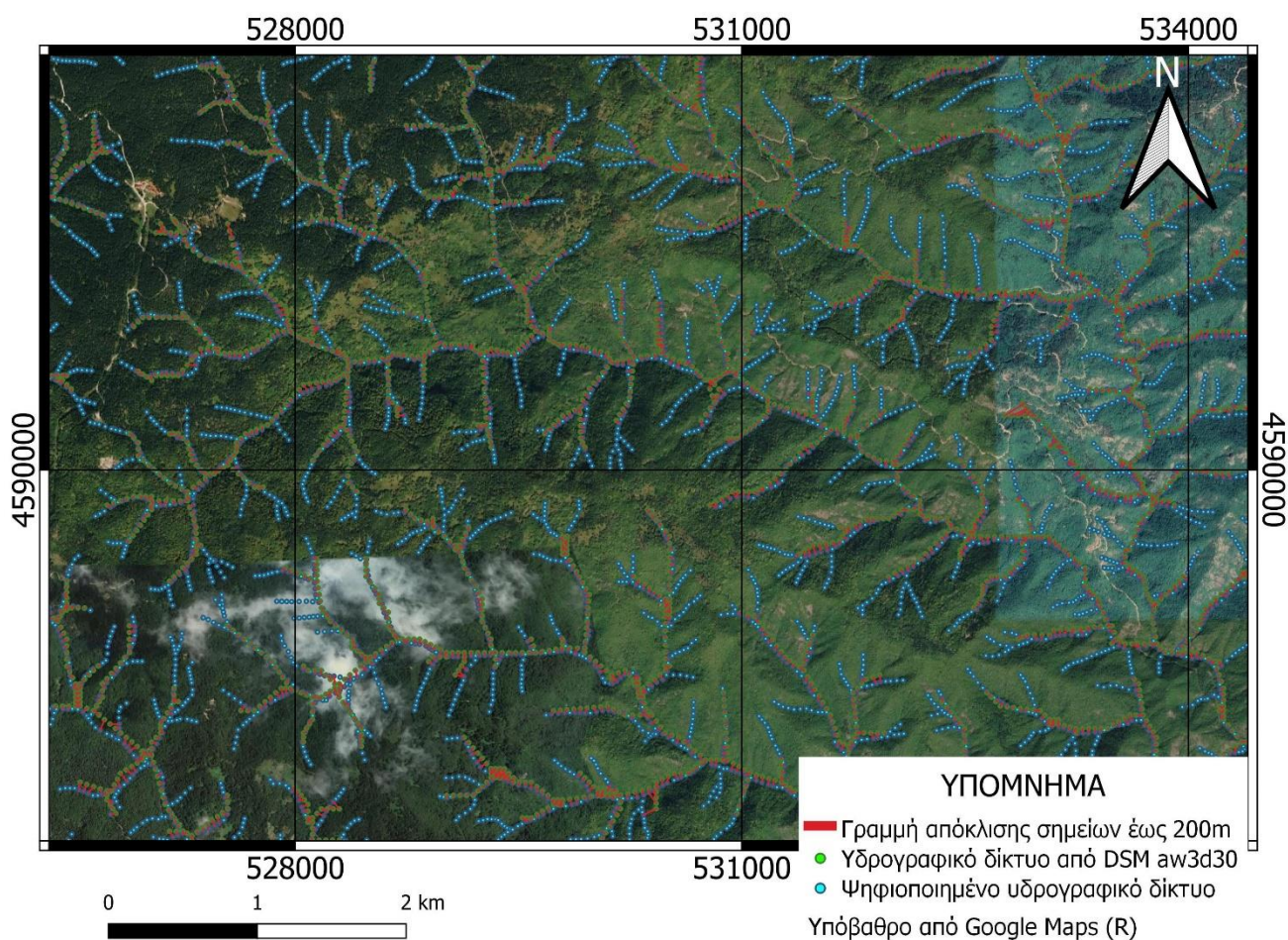
4.2 Αποτελέσματα σύγκρισης των υδρογραφικών δικτύων

Για την αξιολόγηση του αυτόματα εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου, δηλαδή την εκτίμηση της εγκυρότητάς του, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιοποιημένο δίκτυο ως αναφορά. Παρ' όλα αυτά σφάλματα πιθανόν να υπάρχουν τόσο κατά την εξαγωγή του δικτύου, όσο και κατά την ψηφιοποίηση. Έτσι, όσον αφορά την αυτόματη εξαγωγή τα μεγαλύτερα προβλήματα εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές των χαμηλών και όχι τόσο των υψηλών κλίσεων. Η μεθοδολογία αυτόματης εξαγωγής δεν αποδίδει το ίδιο στις πεδινές περιοχές της λεκάνης, διότι εκεί το ανάγλυφο είναι πιο ομαλό με ίδιες περίπου τιμές υψομέτρων και έτσι ο αλγόριθμος D8 δεν έχει τη δυνατότητα να διακρίνει με ακρίβεια την κατεύθυνση ροής του νερού και κατά συνέπεια τους επιμέρους κλάδους του δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση σφαλμάτων και μεγάλων αποκλίσεων από το ψηφιοποιημένο σε πολλά τμήματα της λεκάνης, ιδιαίτερα σε σχεδόν επίπεδες περιοχές (**Εικόνα 31**).



Εικόνα 31: Συγκριτική παρουσίαση του ψηφιοποιημένου και αυτόματα εξαγόμενου Υ/Δ σε περιοχή χαμηλών μορφολογικών κλίσεων στο ΝΔ τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Νέστου

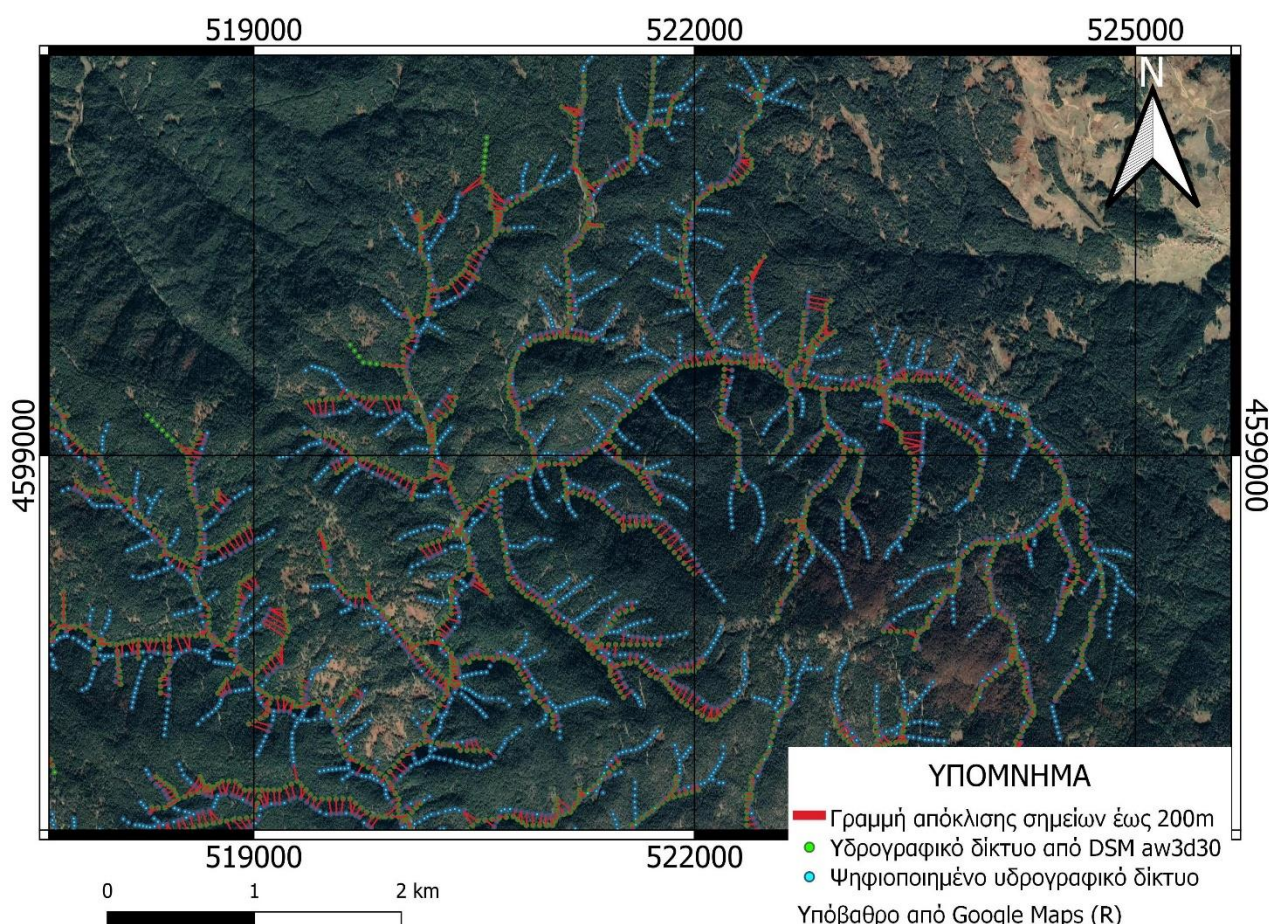
Αντίθετα, στις ορεινές περιοχές της λεκάνης οι αποκλίσεις των δύο δικτύων είναι περιορισμένες, αφού το ανάγλυφο είναι έντονο και έτσι είναι σχετικά ευκολότερη η αναγνώριση της κατεύθυνσης ροής του επιφανειακού νερού. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο D8 για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, η επιφανειακή απορροή οδηγείται από τα υψηλότερα υψόμετρα στα χαμηλότερα και επομένως στις ορεινές περιοχές ταυτίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό με το ψηφιοποιημένο δίκτυο. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32** οι γραμμές απόκλισης, δεν είναι τόσο πυκνές και το μήκος των αποστάσεων τους φαίνεται μικρό, που σημαίνει ότι δεν παρουσιάζονται σημαντικά σφάλματα.



Εικόνα 32: Χάρτης υψηλών μορφολογικών κλίσεων στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Νέστου

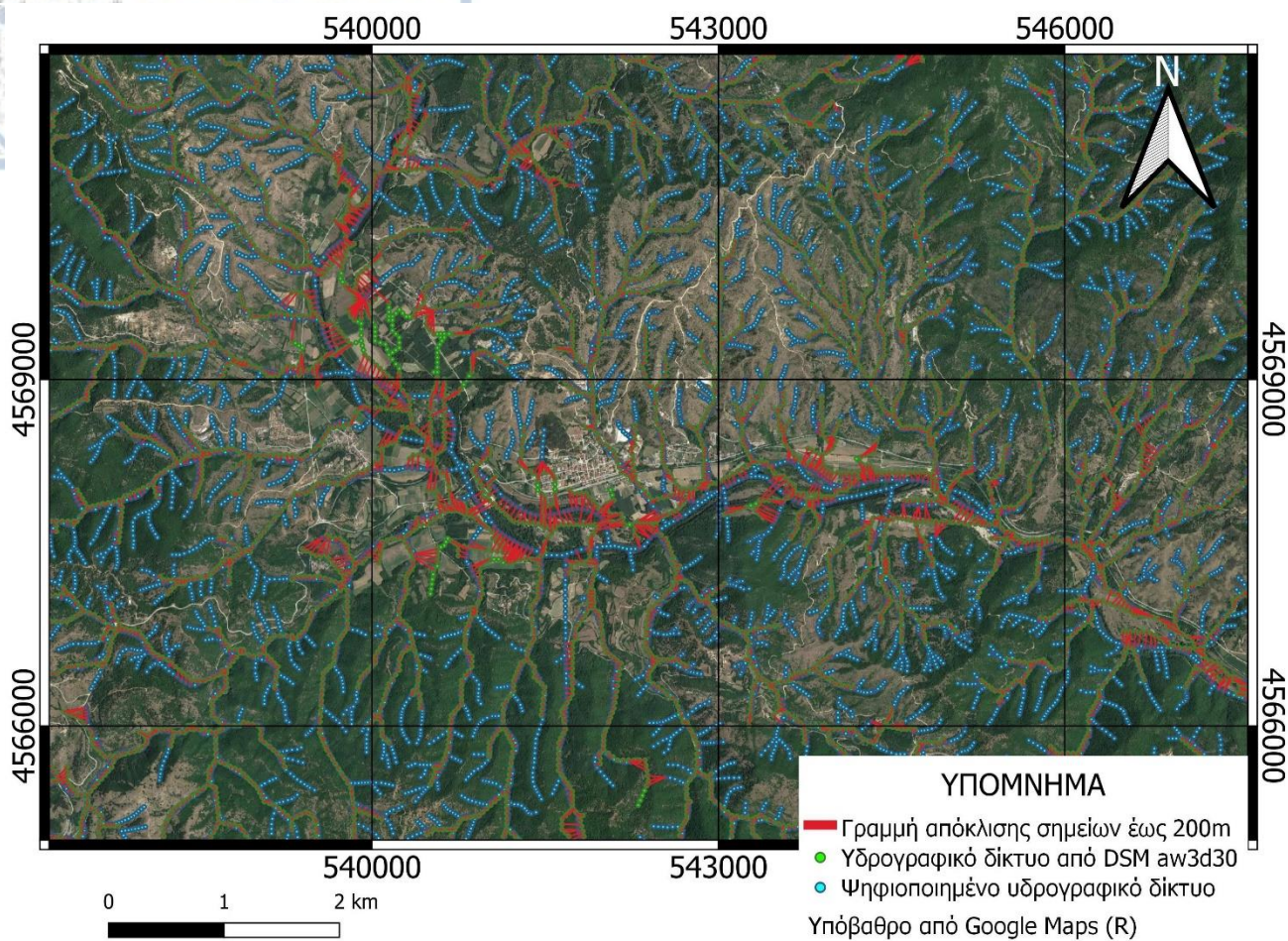
Συστηματικές αποκλίσεις επίσης εμφανίζονται στη ΒΔ πλευρά της λεκάνης του Νέστου, οι οποίες οφείλονται πιθανότατα στη λανθασμένη γεωαναφορά του τοπογραφικού χάρτη (1:50000) που χρησιμοποιήθηκε για τη ψηφιοποίηση. Η γεωαναφορά θεωρήθηκε σαν αίτιο σφάλματος, (**Εικόνα 33**), διότι σε συγκεκριμένο φύλλο τοπογραφικού χάρτη στη βόρεια πλευρά της λεκάνης, οι κλάδοι δεν ταυτίζονται. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 33**, στη συγκεκριμένη περιοχή υπάρχει

μια γενική μετατόπιση ίσων περίπου αποστάσεων, περίπου στα 100 m, κατά μήκος όλων των κλάδων. Εδώ όμως, πρόκειται για ένα σφάλμα που οφείλεται σε δευτερογενή αίτια και δεν οφείλεται στο τρόπο που εκτελέστηκε ο αλγόριθμος D8.



Εικόνα 33: Χάρτης ΒΔ τμήματος της λεκάνης του Νέστου με αποκλίσεις λόγω γεωαναφοράς

Τέλος, ένα από τα σφάλματα που εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση σχετίζονται με τα σημεία έναρξης των κλάδων 1^{ης} τάξης. Σε κάποιες περιοχές δε συμπίπτουν τα σημεία έναρξης του ψηφιοποιημένου δικτύου με εκείνα του εξαγόμενου. Για την εξαγωγή του αυτόματου υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές έναρξης αποστράγγισης ώστε οι κλάδοι πρώτης τάξης του εξαγόμενου να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν εκείνο της αναφοράς. Τελικά χρησιμοποιήθηκε η τιμή 53.860, ως η πιο αντιπροσωπευτική τιμή έναρξης αποστράγγισης, η οποία προκύπτει από τον μέσο όρο της συγκέντρωσης της ροής του νερού. Ο μέσος όρος εξάχθηκε από τις στατιστικές πληροφορίες των σημείων εκκίνησης των κλάδων 1^{ης} τάξης του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Στην **Εικόνα 34** είναι φανερό ότι υπάρχουν αποκλίσεις των κλάδων 1^{ης} τάξης του εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου, καθώς δεν συμπίπτουν με αντίστοιχους του ψηφιοποιημένου.

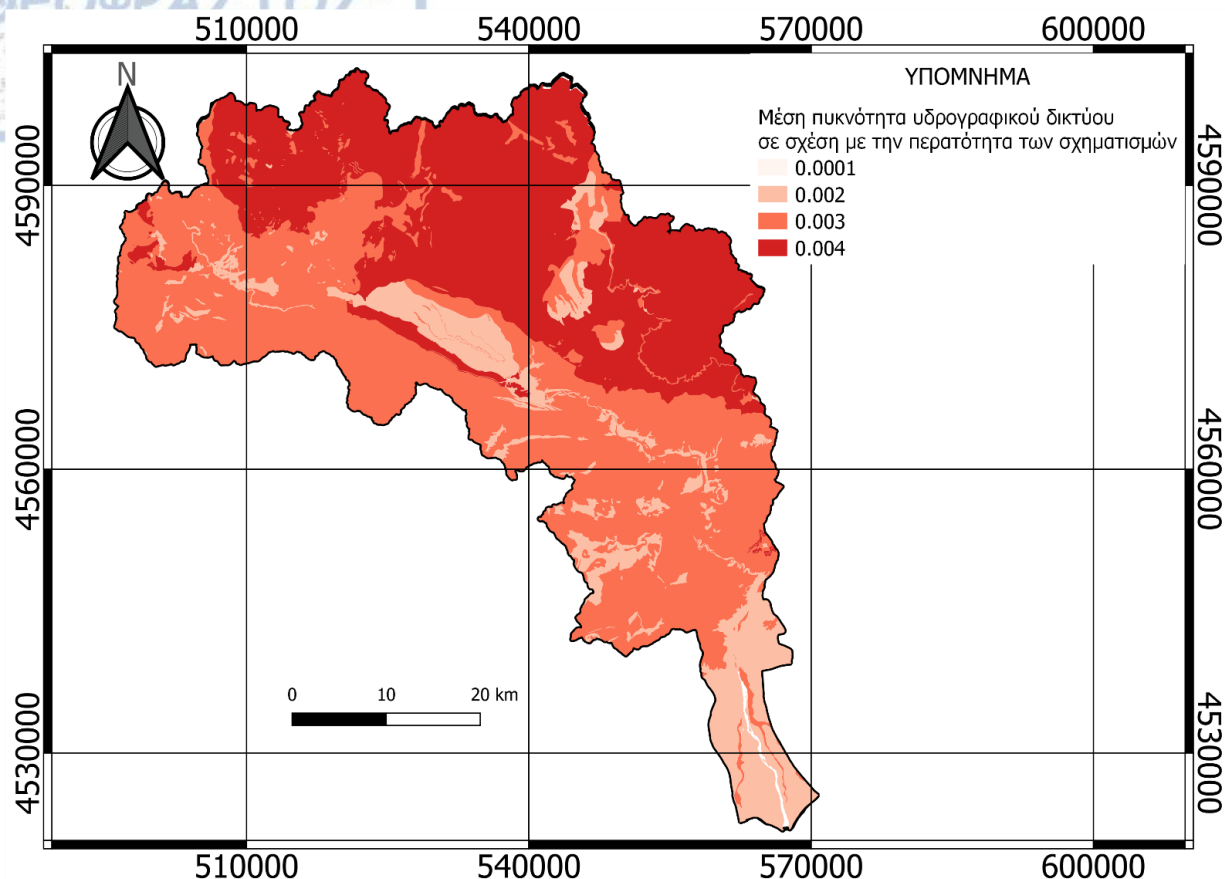


Εικόνα 34: Χάρτης ΝΔ τμήματος της λεκάνης του Νέστου με αποκλίσεις λόγω ύπαρξης αστικού κέντρου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, η ερευνητική αυτή εργασία ασχολήθηκε με τη σύγκριση δύο διαφορετικών τρόπων παραγωγής ενός υδρογραφικού δικτύου στο πρόγραμμα του QGIS με στόχο να αξιολογηθεί η τεχνική της αυτόματης εξαγωγής βάσει ενός ψηφιοποιημένου Υ/Δ. Για την επίτευξη αυτού του στόχου αρχικά, ψηφιοποιήθηκε το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Νέστου βάσει των τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. Έπειτα, υπολογίστηκε η πυκνότητα του ψηφιοποιημένου δικτύου, της οποίας εξετάστηκε η χωρική διακύμανση σε σχέση με τους παράγοντες της γεωλογίας, της περατότητας των σχηματισμών, της τεκτονικής και της μορφολογίας της λεκάνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πυκνότητα έχει μέση τιμή $\rho = 0.0042 \text{ m/m}^2$. Το υδρογραφικό δίκτυο λοιπόν, είναι αραιότερο στη νότια και νοτιοδυτική περιοχή της υδρολογικής λεκάνης, όπου αποτελούνται από αποσαθρωμένα-καρστικοποιημένα πετρώματα ή λεπτόκοκκα ιζηματογενή, τα οποία έχουν μεγάλη περατότητα. Αντίθετα, είναι πυκνότερο στα βόρεια τμήματα της λεκάνης που αποτελούνται από πυριγενή και μεταμορφωμένα, αδιαπέρατα πετρώματα. Ακόμη, από τους 28835 κλάδους του συνολικού Υ/Δ οι περισσότεροι βρίσκονται στα βόρεια τμήματα τα οποία έχουν υποστεί τεκτονική και έχουν μεγάλες κλίσεις και έτσι το δίκτυο εμφανίζεται πυκνότερο. Στα νότια που κυριαρχεί το ομαλό ανάγλυφο με μικρές κλίσεις και ήπια τεκτονική δράση, οι κλάδοι του Υ/Δ είναι λιγότεροι και άρα το δίκτυο είναι αραιότερο.

Από τον παρακάτω χάρτη (**Εικόνα 35**) προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα ότι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται άρρηκτα με την περατότητα των πετρωμάτων. Για παράδειγμα, στη βόρεια-βορειοανατολική πλευρά της λεκάνης, η οποία αποτελείται από γνευσιακά και γρανιτικά πετρώματα, δηλαδή αδιαπέρατους σχηματισμούς που ευνοούν την επιφανειακή απορροή, εμφανίζεται πυκνό υδρογραφικό δίκτυο. Αντίθετα, στο νότιο τμήμα της λεκάνης, το οποίο αποτελείται κυρίως από μάρμαρα που έχουν υποστεί διάβρωση (καρστικοποίηση), εντοπίζεται αραιότερο υδρογραφικό δίκτυο, αφού τα πετρώματα εκεί είναι περατά με μεγάλο συντελεστή κατεισδυσης. Επομένως, όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο τόσο πιο αδιαπέρατοι είναι οι σχηματισμοί στους οποίους ρέει, ενώ όσο πιο αραιό τόσο πιο περατοί οι σχηματισμοί στους οποίους κατεισδύει.

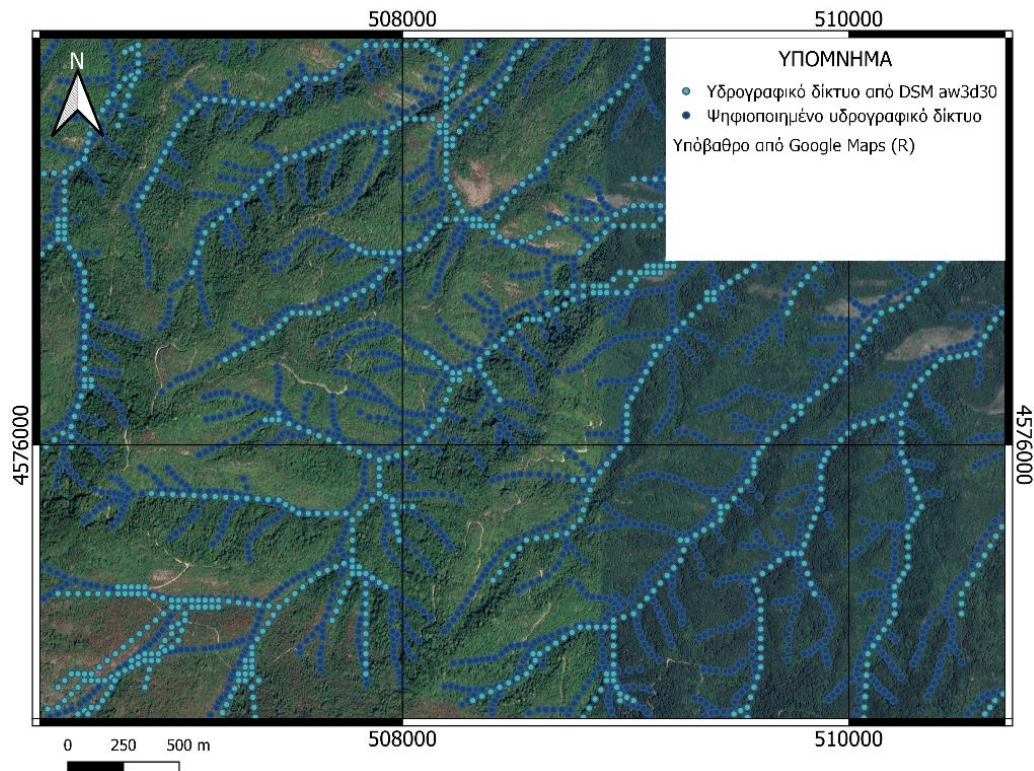


Εικόνα 35: Χάρτης μέσης πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου σε σχέση με την περατότητα των σχηματισμών

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μέσω ενός DEM. Γενικά, και οι δύο μέθοδοι παραγωγής του υδρογραφικού δικτύου του Νέστου έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Από τη μία η ψηφιοποίηση είναι μία πολύ χρονοβόρα διαδικασία, που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποτυπωθούν με ακρίβεια τα στοιχεία του χάρτη. Είναι πιθανόν βέβαια να υπάρχουν αποκλίσεις που οφείλονται στη γεωαναφορά των χαρτών, οι οποίες όμως αποτυπώνονται και στην ψηφιοποιημένη πληροφορία που στην προκειμένη περίπτωση επηρεάζει τη θέση των κλάδων του Υ/Δ.

Από την άλλη, η αυτόματη εξαγωγή ενός υδρογραφικού δικτύου αποτελεί μια γρήγορη και εύκολη διαδικασία που όμως μπορεί να παρουσιάζει σφάλματα. Ο αλγόριθμος D8 παρουσιάζει αδυναμία κατά την εξαγωγή του Υ/Δ στα σημεία έναρξης των κλάδων του δικτύου. Για την βελτίωση αυτής της αδυναμίας και την αποφυγή μεγάλων σφαλμάτων ήταν αναγκαίο προηγουμένως, να απομονωθούν τα σημεία έναρξης των κλάδων του ψηφιοποιημένου δικτύου, ώστε να παρθεί η μέση τιμή της συγκέντρωσης ροής του νερού και να χρησιμοποιηθεί ως πιο αντιπροσωπευτική παράμετρος για την εξαγωγή του δικτύου. Αυτό όμως είχε σαν αποτέλεσμα σε κάποιες θέσεις η έναρξη του υδρογραφικού δικτύου να είναι χαμηλότερα δηλαδή, να έχουν μικρότερο μήκος οι πρώτης τάξης κλάδοι σε σχέση με το ψηφιοποιημένο

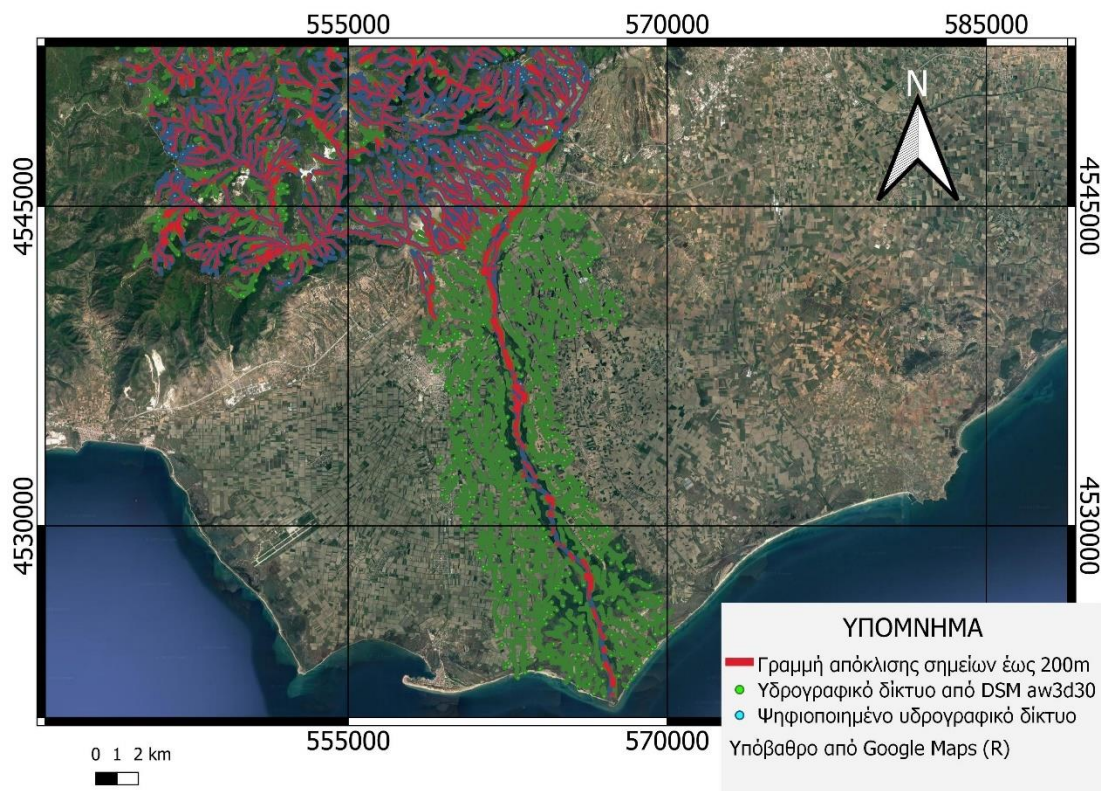
(Εικόνα 36). Αυτό φαίνεται από το συνολικό μήκος των κλάδων του εξαγόμενου δικτύου ($\Sigma L=6631562,186146$ m) που είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του ψηφιοποιημένου ($\Sigma L=8586257,881069$ m). Παρόλα αυτά θεωρήθηκε αποδεκτό για να συνεχιστεί η σύγκριση, καθώς κατά μέσο όρο πολλοί κλάδοι είχαν παρόμοια σημεία έναρξης.



Εικόνα 36: Χάρτης όπου διακρίνεται ότι τα σημεία έναρξης των κλάδων 1^{ης} τάξης του ψηφιοποιημένου δικτύου είναι ψηλότερα από του εξαγόμενου

Κατά τη σύγκριση παρατηρήθηκε ότι τα δύο δίκτυα δεν ταυτίζονταν πλήρως. Υπήρχαν τμήματά τους, που είτε ήταν μετατοπισμένα λόγω της λανθασμένης γεωαναφοράς των τοπογραφικών χαρτών, είτε εμφανίζονταν με μορφή “παράλιας” σε πεδινές περιοχές, εξαιτίας της αδυναμίας του αλγορίθμου D8 να κατευθύνει την επιφανειακή απορροή σε περιοχές με μικρές κλίσεις. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στα τμήματα του δικτύου που δε ταυτίζονται λόγω της λανθασμένης γεωαναφοράς είναι μικρές, μικρότερες των 100 m, σε αντίθεση με τα σφάλματα που παρατηρούνται στις πεδινές εκτάσεις που είναι μεγάλα, περίπου 200 m και άνω, και σημαντικά για την αξιολόγηση του αυτόματου αλγορίθμου.

Σημαντικές αποκλίσεις εμφανίζονται επίσης στη περιοχή του Δέλτα, όπου ο αλγόριθμος έχει δημιουργήσει πολύ περισσότερους κλάδους σε σχέση με τους ψηφιοποιημένους (**Εικόνα 37**). Αυτό οφείλεται πάλι στο γεγονός ότι το τμήμα αυτό είναι πεδινό για αυτό και το εξαγόμενο αποτελείται από περισσότερους κλάδους όλων των τάξεων (περίπου 28835) σε σχέση με το ψηφιοποιημένο δίκτυο που αποτελείται από 39032.



Εικόνα 37: Χάρτης του Δέλτα του Νέστου στον οποίο εμφανίζονται περισσότεροι κλάδοι δικτύου από το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο

Συμπερασματικά, η μέθοδος της ψηφιοποίησης είναι πιο αξιόπιστη για τη δημιουργία ενός λεπτομερούς δικτύου, αλλά ταυτόχρονα είναι και μια χρονοβόρα και κοπιαστική διαδικασία. Ωστόσο χρειάζεται προσοχή κατά τη γεωαναφορά των χαρτών που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς ενδέχεται να προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα που θα οδηγήσουν σε εσφαλμένες ερμηνείες. Από την άλλη πλευρά, η αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου είναι απλούστερη και γρηγορότερη μέθοδος, που όμως χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς ο αλγόριθμος στις ήπιες περιοχές με χαμηλές κλίσεις παρουσιάζει αρκετές αποκλίσεις σε σχέση με το ψηφιοποιημένο και έτσι το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας. Επομένως, η δεύτερη μέθοδος προτιμάται για έρευνες που δεν απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια και χρειάζονται μόνο μια γενικότερη εικόνα της περιοχής έρευνάς τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

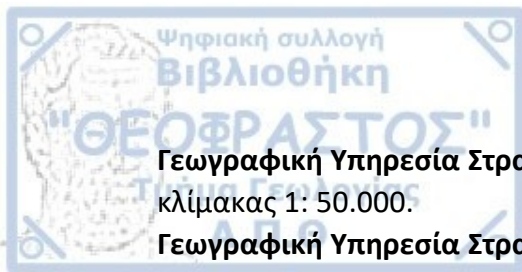
- Βουβαλίδης, Κ.** (2011). Φυσική Γεωγραφία. Εκδόσεις Δίσιγμα.
- Βουδούρης, Κ.** (2013). Τεχνική Υδρογεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Μουντράκης, Δ.** (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος. Εκδόσεις University Studio Press.
- Ψιλοβίκος, Α. και συνεργάτες,** (1999). Έρευνα παρακολούθησης των ποτάμιων διεργασιών του ποτάμιου συστήματος του Νέστου μέσω της εγκατάστασης και λειτουργίας πειραματικού και αυτοματοποιημένου τηλεμετρικού δικτύου και έρευνας της δυναμικής ισορροπίας των φερτών υλικών, Επιτροπή ερευνών του ΑΠΘ. Στάδιο 4. Τεύχος Δ, Θεσσαλονίκη.
- Γιολάνδης, Α.** (2019). Μετατόπιση της Δελταϊκής Ακτογραμμής του Νέστου Ποταμού. Χαρακόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Μποσκίδης, Ι.** (2011). Περιβαλλοντική διαχείριση λεκάνης ποταμού Νέστου. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Παπάδας, Κ.** (2010). Ιζηματολογικές διεργασίες της κύριας κοίτης και των παραποτάμων του ποταμού Νέστου στα κατάντη του φράγματος της Πλατανοβρύσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Γκιούγκης, Ι.Χ.** (2018). Διερεύνηση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφορείς σε δελταϊκό περιβάλλον. Η περίπτωση του Δέλτα του ποταμού Νέστου.
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και τροφίμων.** Διοικητικός τομέας κοινοτικών πόρων και υποδομών. Διεύθυνση σχεδιασμού εγγειοβελτιωτικών έργων και αξιοποίηση εδαφοϋδατικών πόρων. Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπογείων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας – Θράκης και Θεσσαλίας.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.** (2017). 1^η Αναθεώρηση σχεδίου διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θράκης (EL12), Καθορισμός και Καταγραφή Αρμόδιων Αρχών και Προσδιορισμός Περιοχής Άσκησης των Αρμοδιοτήτων τους.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Papanikolaou D. & Panagopoulos A.** (1981). On the structural style of the Southern Rhodope, Greece. Geologica Balcanica.
- Osswald, K.** (1938). Geologische geschichte von Griechisch-Nordmakedonien.

Διαδικτυακές Πηγές

- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ).** Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Χρυσούπολης, κλίμακας 1: 50.000.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ).** Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Άβδηρα, κλίμακας 1: 50.000.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ).** Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Κρηνίδες, κλίμακας 1: 50.000.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ).** Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Λεκάνη, κλίμακας 1: 50.000.



Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Μεσοχωρίου, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο **Ντεμπίν**, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο **Ντοσπάτ**, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Ξάνθη, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Παρανέστι, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο Ποταμοί, κλίμακας 1: 50.000.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ). Γεωλογικός Χάρτης, Φύλλο **Σμολγκιάν**, κλίμακας 1: 50.000.

? Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου

URL 1: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/pdf/askisi1.pdf>

URL 2: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/chapter086e.html#img0815>

URL 3: <http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427γ/chapter086f.html>

URL 4: <https://sites.google.com/a/wisc.edu/wiscsims-micro-qgis/learn-to-use-qgis/map-creation-basics/importing-and-georeferencing-an-image>

URL 5: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/index.html

URL 6: <https://www.youtube.com/watch?v=6rcx4OwnryI>

URL 7: http://ardeftika.decentral.minagric.gr/files/results/hydro/3.%20HYDRO_NESTOU.pdf

URL 8: https://www.usgs.gov/faqs/what-digital-elevation-modeldem?fbclid=IwAR2geziaF7qs6u7FLPVYr96Kil_w7-FdbLzUaAQdlZsW9AX6xj5cRiyqEZA