



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΠΑΝΝΕΝΜΠΕΡΓΚ ΜΑΤΘΑΙΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ
ΤΗΣ ΦΛΑΜΟΥΡΙΑΣ, ΕΔΕΣΣΑ (ΕΛΛΑΔΑ)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»,
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2019





ΜΠΑΝΝΕΝΜΠΕΡΓΚ ΜΑΤΘΑΙΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ
ΦΛΑΜΟΥΡΙΑΣ, ΕΔΕΣΣΑ (ΕΛΛΑΔΑ)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Εφαρμοσμένη Γεωλογία', Κατεύθυνση 'Εφαρμοσμένη και
Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 03/07/2019

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Καθηγητής, Επιβλέπων
Γεώργιος Βαργεμέζης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής
Νεραντζής Καζάκης, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Μέλος Τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Καθηγητής,
Γεώργιος Βαργεμέζης, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Πανταζής Γεωργίου, Αναπληρωτής Καθηγητής



© Μπάννενμπεργκ Ε. Ματθαίος, Γεωλόγος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ
ΦΛΑΜΟΥΡΙΑΣ, ΕΔΕΣΣΑ (ΕΛΛΑΔΑ) – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Bannenberg E. Matthias, Geologist, 2019

All rights reserved.

INVESTIGATION OF THE HYDROGEOLOGICAL REGIME OF THE
FLAMOYRIA BASIN, EDESSA (GREECE) – *Master Thesis*

Citation:

Μπάννενμπεργκ Ε. Μ., 2019. – Διερεύνηση υδρογεωλογικών συνθηκών στη λεκάνη της Φλαμουριάς, Έδεσσα (Ελλάδα). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 78 σελ.

Bannenberg E. M., 2019. – Investigation of the Hydrogeological Regime of the Flamouria Basin, Edessa (Greece). Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 78 pp.

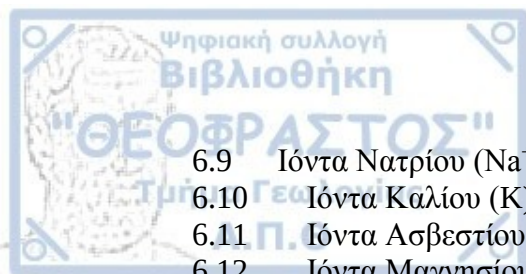
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται 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.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT	v
1 Εισαγωγή	1
1.1 Στόχος της Διατριβής	1
1.2 Περιοχή έρευνας.....	1
1.3 Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν	1
2 Γενικά χαρακτηριστικά	3
2.1 Γεωγραφικά – Μορφολογικά Στοιχεία	3
2.2 Πληθυσμιακά στοιχεία	5
2.3 Υδρογραφικά στοιχεία	6
3 Γεωλογία	7
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά	7
3.2 Γεωτεκτονική	7
3.3 Γεωλογικοί σχηματισμοί	8
3.4 Χρήσεις Γης	12
4 Υδρογεωλογία.....	14
4.1 Γενικά.....	14
4.2 Απογραφή γεωτρήσεων.....	17
4.3 Υδροφορείς	22
4.4 Υδρολογικό ισοζύγιο.....	25
4.4.1 Βροχόπτωση και Θερμοκρασία	26
4.4.2 Εξατμισοδιαπνοή	27
4.4.3 Κατείσδυση	28
4.4.4 Υπολογισμός υδρολογικού ισοζυγίου.....	30
4.5 Πιεζομετρία.....	31
4.5.1 Πεδιάδα της Φλαμουριάς.....	32
4.5.2 Ορεινό τμήμα	33
4.6 Συμπεράσματα	36
5 Γεωφυσικές διασκοπήσεις	37
5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	38
5.2 Γεωηλεκτρική διασκόπηση με τη μέθοδο της τομογραφίας.....	39
5.2.1 Ερμηνεία με ψευδοτομή	41
5.2.2 Ερμηνεία με αντιστροφή.....	42
5.2.3 Επιλογή παραμέτρων μετρήσεων	44
5.2.4 Γεωηλεκτρικές τομογραφίες.....	44
5.3 Συμπεράσματα	50
6 Υδροχημεία.....	51
6.1 Εισαγωγή.....	51
6.2 Ενεργός οξύτητα (pH).....	52
6.3 Θερμοκρασία (T).....	54
6.4 Συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)	55
6.5 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-)	56
6.6 Ιόντα Χλωρίου (Cl^-)	57
6.7 Θεϊκά ανιόντα (SO_4^{2-})	58
6.8 Νιτρικά ιόντα (NO_3^-).....	60



6.9	Ιόντα Νατρίου (Na^+).....	61
6.10	Ιόντα Καλίου (K).....	62
6.11	Ιόντα Ασβεστίου (Ca^{2+}).....	63
6.12	Ιόντα Μαγνησίου (Mg).....	64
6.13	Υδροχημικός τύπος νερού	66
6.14	Συμπεράσματα.....	67
7	Συμπεράσματα – Συζήτηση	68
8	Βιβλιογραφία	69
9	Παράρτημα.....	75

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συνεχόμενη πληθυσμιακή αύξηση σε συνδυασμό με την ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου στις σύγχρονες κοινωνίες έχουν καταστήσει επιτακτική την εξεύρεση φυσικών πόρων για την κάλυψη των αναγκών της αγοράς. Ο πρωτογενής τομέας καλείται να αναπτύσσει διαρκώς τους ρυθμούς παραγωγής του για να ικανοποιεί την παγκόσμια ζήτηση που επικρατεί. Ειδικότερα, ο κλάδος των τροφίμων βρίσκεται σε καθεστώς υψηλής πίεσης, τόσο από τις αναπτυσσόμενες όσο και από τις ανεπτυγμένες χώρες για την κάλυψη των αναγκών σίτισης των πληθυσμών τους. Μοιραία, οι αγροτικές και ζωικές παραγωγές καλούνται να πολλαπλασιάζουν τους ρυθμούς απόδοσης τους με αποτέλεσμα να ενδιαφέρονται περισσότερο για τα όψιμα αποτελέσματα παρά για τη βιωσιμότητα της παραγωγής τους. Το νερό αποτελεί το βασικό στοιχείο για την αύξηση των αγροτικών προϊόντων. Στον Ελληνικό χώρο οι υδατικές ανάγκες καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από το υπόγειο νερό, το οποίο συνεπακόλουθα δέχεται ισχυρές πιέσεις.

Το υπόγειο νερό, ως βασικός πόρος, τείνει να υποβαθμίζεται στο βωμό της επίτευξης μιας μεγαλύτερης παραγωγής, ενώ η αντίληψη ότι είναι ανεξάντλητος πόρος συντελεί στην ποσοτική και ποιοτική του υποβάθμιση. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού μπορεί να οδηγήσει σε ταπείνωση της στάθμης του, γεγονός που αυξάνει το κόστος άντλησης και παράλληλα αυξάνει το κόστος παραγωγής γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων. Επίσης, βρίσκεται εκτεθειμένο σε ποιοτική υποβάθμιση τόσο από φυσικές διεργασίες, όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Η λεκάνη της Φλαμουριάς αποτελεί μια περιοχή με έντονο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, καθώς η αγροτική παραγωγή αποτελεί την κύρια απασχόληση των κατοίκων της περιοχής, ενώ υπάρχουν και κάποιες κτηνοτροφικές μονάδες. Η απουσία ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης του επιφανειακού και υπογείου νερού έχουν ως αποτέλεσμα την επικράτηση ενός καθεστώτος κακοδιαχείρισης των υδάτινων πόρων. Ως εκ τούτου, αποτέλεσε μεγάλο ενδιαφέρον η διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής. Για το λόγο αυτό ανατέθηκε η Μεταπτυχιακή Διατριβή με τίτλο *«Διερεύνηση υδρογεωλογικών συνθηκών στη λεκάνη της Φλαμουριάς, Έδεσσα»*.



Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους, οι οποίοι με τη συμβολή και συμβουλή τους βοήθησαν ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διατριβή.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη, καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. για την ανάθεση του θέματος αλλά και για τη συνεχή καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Γεώργιο Βαργεμέζη, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. για την συνδρομή του στις μετρήσεις υπαίθρου και για τη βοήθειά του στην ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων.

Ευχαριστώ από καρδιάς τον κ. Νεραντζή Καζάκη, μεταδιδακτορικό ερευνητή του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. για την εμπιστοσύνη, τις συμβουλές και τη διαρκή στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Ευχαριστώ τον κ. Ηλία Φίκο, Δρ. γεωλόγο-γεωφυσικό και μέλος ΕΔΙΠ του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. για τη συνδρομή και βοήθεια του στις λήψεις των μετρήσεων υπαίθρου.

Ευχαριστώ τις κ. Ευθυμία Καπράρα, μεταδιδακτορική ερευνήτρια του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. και Κυριακή Καλαϊτζίδου, υποψήφια διδάκτορα του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. για τη βοήθεια τους στη χημική ανάλυση των δειγμάτων νερού.

Ευχαριστώ τον κ. Αθανάσιο Σταυρίδη, προϊστάμενο της Γενικής Διεύθυνσης Προγραμματισμού και Υποδομών / Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Περιφερειακών Ενοτήτων της περιφερειακής ενότητας Πέλλας για την παραχώρηση δεδομένων.

Ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Τριψιάνη, πρόεδρο του Τ.Ο.Ε.Β Έδεσσας, καθώς και όλο το προσωπικό της υπηρεσίας για την παραχώρηση δεδομένων και τη βοήθεια τους στις λήψεις μετρήσεων υπαίθρου.

Ευχαριστώ τον κ. Νικόλαο Ουζούνη, γεωπόνο του τμήματος Περιβάλλοντος και Πρασίνου του δήμου Έδεσσας για τη παραχώρηση δεδομένων και τη βοήθεια του.

Ευχαριστώ τον κ. Ιωσήφ Παπαδόπουλο, γεωλόγο και εισηγητή του Τμήματος Πολιτικής Προστασίας της περιφερειακής ενότητας Πέλλας για την παραχώρηση δεδομένων.

Ευχαριστώ την κ. Τσίτση Μαρία, γεωλόγο της περιοχής Εδέσσης για την παραχώρηση δεδομένων.

Ευχαριστώ από καρδιάς τη συνάδελφο Ελισάβετ Γαβριηλίδου για τη βοήθειά της στις μετρήσεις υπαίθρου, αλλά και την αέναη συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.



Ευχαριστώ θερμά τις συναδέλφους Γρηγορία – Βασιλική Δήμου και Χριστίνα Κρικώνη για τη βοήθειά τους στις μετρήσεις υπαίθρου και τη διαρκή στήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Ευχαριστώ θερμά τους συναδέλφους Άγγελο Αλμπάνη, Ευτυχία Αμανατίδου, και Νικόλαο Κορδάτο για τη βοήθειά τους στις μετρήσεις υπαίθρου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συνεχή τους στήριξη τόσο ψυχικά όσο και οικονομικά κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς η εκπόνηση της διατριβής δε θα μπορούσε να είχε πραγματοποιηθεί χωρίς τη συμβολή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στη λεκάνη της Φλαμουριάς, στο Δήμο Έδεσσας. Η έκταση της περιοχής έρευνας είναι 77,8 km² και έχει 984 μόνιμους κατοίκους. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, ενώ γεωλογικά ανήκει στη ζώνη Αλμωπίας με κύριο σχηματισμό το φλύσχη της Αλμωπίας.

Η υδροφορία στην περιοχή έρευνας εντοπίζεται στους πορώδεις υδροφορείς της πεδιάδας της Φλαμουριάς, στους καρστικούς και τους υδροφορείς των διερρηγμένων πετρωμάτων που αναπτύσσονται στους γύρω λοφώδεις και ορεινούς όγκους. Η τροφοδοσία των πορωδών υδροφορέων πραγματοποιείται πλευρικά είτε από τους διερρηγμένους υδροφορείς, είτε από τους ποταμοχειμάρους και τα ρέματα που διασχίζουν την περιοχή, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η κατείσδυση των κατακρημνισμάτων. Όσον αφορά τους καρστικούς υδροφορείς, δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για να καθορισθεί η σχέση μεταξύ αυτών και των πορωδών υδροφορέων.

Από το συνδυασμό των υδρογεωλογικών δεδομένων και των γεωφυσικών διασκοπήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής καθορίστηκε η μορφολογία και η γεωμετρία των υδροφόρων σχηματισμών που αναπτύσσονται στην περιοχή. Εκτιμήθηκε το πάχος της ακόρεστης ζώνης, εντοπίστηκε ζώνη διάρρηξης, ενώ καθορίστηκε και η λιθολογία του υπεδάφους, καθώς και οι σχηματισμοί στους οποίους αναπτύσσονται υδροφορίες.

Οι υδροχημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ανέδειξαν τις επιπτώσεις που έχουν οι σύγχρονες καλλιέργειες στην περιοχή, με την εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων, ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση εντοπίστηκε στο κέντρο της πεδιάδας της Φλαμουριάς. Στην περιοχή αυτή βρίσκονται και οι γεωτρήσεις που καλύπτουν τις υδρευτικές ανάγκες της τοπικής κοινωνίας. Αντιθέτως, τα δείγματα που λήφθηκαν από το ορεινό τμήμα της λεκάνης δεν παρουσιάζουν ποιοτικά προβλήματα.



ABSTRACT

The purpose of this Master Thesis is the investigation of the hydrogeological regime that exists at the Flamouria Basin, Edessa, with an estimated study area of 77.8 km² and 984 permanent residents. Administratively, the area is under the jurisdiction of the prefecture of Central Macedonia, while geologically it belongs to the Almopian zone with the Almopian flysch being the main geological formation of the area.

The water reserves of the area are located within the porous aquifers of the Flamouria plain as well as karst and fissured rocks aquifers at the nearby hilly and mountainous terrains. The recharge of the porous aquifers occurs laterally either via the fissured rock aquifers or via the various streams and torrents that cross the area, while the infiltration of the precipitation plays a vital role. As for the karst aquifer, there aren't enough data available to determine the connection between them and the porous aquifers.

The morphology and geometry of the aquifers were determined by combining hydrogeological data along with data obtained by geophysical surveys that took place in the area. The width of the unsaturated zone was calculated, a ruptured zone was detected, while the lithology of the subsoil was determined along with geological formations that favor the formation of aquifers.

The hydrochemical analyses that took place showcased the environmental impact of modern agriculture in the study area, as the highest concentration of nitrates was detected at the center of the plain, an area from which the water supplies that sustain and maintain the local population are being drawn. On the contrary, the samples taken from the mountainous part of the basin do not exhibit any qualitative anomaly.



1 Εισαγωγή

1.1 Στόχος της Διατριβής

Στόχος της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής αποτελεί η υδρογεωλογική έρευνα στην υδρολογική λεκάνη της Φλαμουριάς με έμφαση στις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, τις επιπτώσεις της αγροτικής παραγωγής στο υπόγειο και το επιφανειακό νερό καθώς και τον καθορισμό του υδρογεωλογικού καθεστώτος που επικρατεί στην περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παρούσα Διατριβή αποτελεί και την πρώτη υδρογεωλογική έρευνα στην περιοχή, ενώ τα διαθέσιμα δεδομένα ήταν ελάχιστα καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες μελέτες ή τεχνικές εκθέσεις με υδρογεωλογικές πληροφορίες.

1.2 Περιοχή έρευνας

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται στο νότιο τμήμα του νομού Πέλλας και αποτελεί μια γεωργική έκταση που υδρεύεται και αρδεύεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους από τα υπόγεια και επιφανειακά νερά της περιοχής. Η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συνδυάζει αγροτικές δραστηριότητες τόσο σε πεδινά, όσο και σε λοφώδη και ορεινά τμήματα με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η μελέτη των επιπτώσεων των εν λόγω δραστηριοτήτων στα διάφορα υδροφόρα στρώματα της περιοχής.

1.3 Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν

Για τη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής της Φλαμουριάς πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

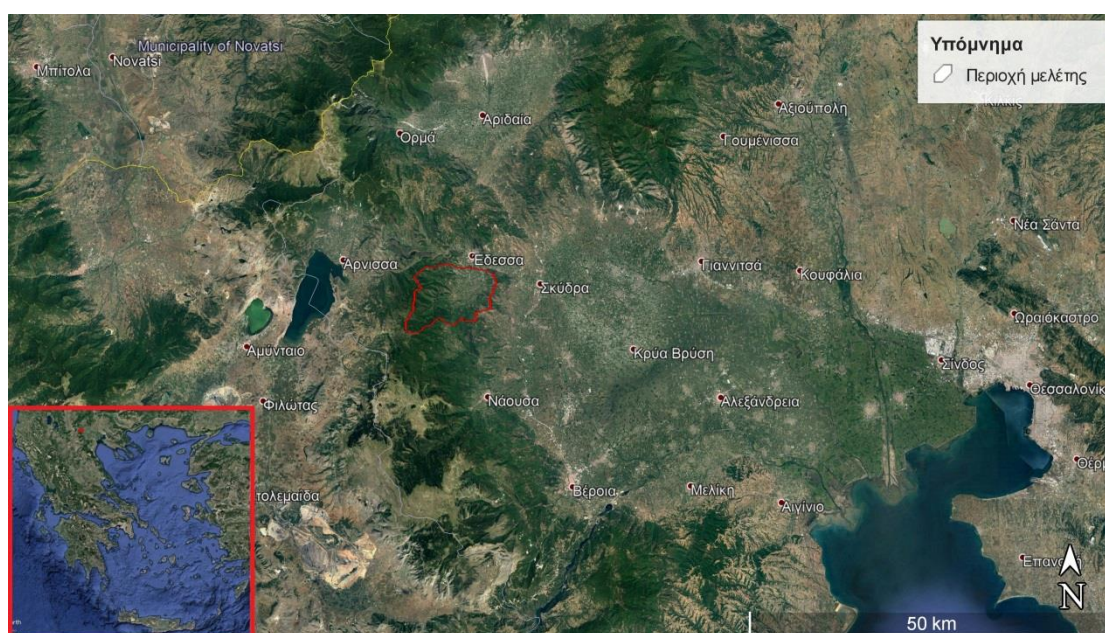
- i. Αναζήτηση και μελέτη εργασιών που σχετίζονται με την περιοχή έρευνας και το αντικείμενο της διατριβής.
- ii. Συλλογή από δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς λιθολογικών τομών, γεωλογικών, τοπογραφικών και υδρολογικών στοιχείων.
- iii. Ψηφιοποίηση χαρτών ΙΓΜΕ (φύλλα Έδεσσας, Άρνισσας, Πύργων και Βέροιας) και διαφόρων δεδομένων (υδροχημικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών, τοπογραφικών) χρησιμοποιώντας γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (G.I.S.) σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87.
- iv. Απογραφή δημόσιων, ιδιωτικών, αρδευτικών και υδρευτικών γεωτρήσεων.

- v. Μετρήσεις της στάθμης του υπογείου νερού κατά την υγρή και ξηρή περίοδο, Απρίλιο – Μάιο 2017 - 2018 και Σεπτέμβριο – Οκτώβριο 2017.
- vi. Δειγματοληψία υπόγειου νερού και χημική ανάλυσή των δειγμάτων.
- vii. Σύνταξη θεματικών χαρτών με τη χρήση G.I.S.
- viii. Εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων και συγκεκριμένα ηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιώντας το όργανο SyscalPro του τομέα γεωφυσικής Α.Π.Θ.
- ix. Επεξεργασία των δεδομένων των γεωφυσικών διασκοπήσεων με τη χρήση του λογισμικού DC2DPRO.
- x. Αξιολόγηση των υδροχημικών δεδομένων με το λογισμικό Aquachem.
- xi. Σύνταξη υδρογεωλογικών και υδροχημικών χαρτών.

2 Γενικά χαρακτηριστικά

2.1 Γεωγραφικά – Μορφολογικά Στοιχεία

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και υπάγεται διοικητικά μέσω του δήμου Εδέσσης στην Περιφερειακή Ενότητα Πέλλας. Καταλαμβάνει εκτάσεις που διοικητικά εντάσσονται στις κοινότητες Μεσημερίου, Πλατάνης και Φλαμουριάς (Σχ. 2.1). Ανήκει στο 9^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας μέσω της ευρύτερης υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Εδεσσαίου, ενώ καταλαμβάνει έκταση 78,08 km² και περίμετρο 40,97 km.



Σχήμα 2.1: Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας (πηγή Google Earth, τροποποιημένη από τον συγγραφέα).

Η περιοχή περικλείεται από τις κορυφές Φούρκο (834 m) στα βόρεια, Κάστρο (1146 m) και Γυμνή Κορυφή (1268 m) στα δυτικά, Μαύρες Πέτρες (1159 m) και Νερόλακκοι (949 m) στα νότια, ενώ ανατολικά επικρατεί ένα πιο ομαλό ανάγλυφο όπου και εντοπίζεται ο κάμπος της Φλαμουριάς. Το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι τα 550 m, ενώ το μέγιστο υψόμετρο φτάνει τα 1244,4 m.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως υγρό ηπειρωτικό κατηγορίας Dfb (Korpen 1936) με βροχοπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και βραχύ θερμό θέρος.

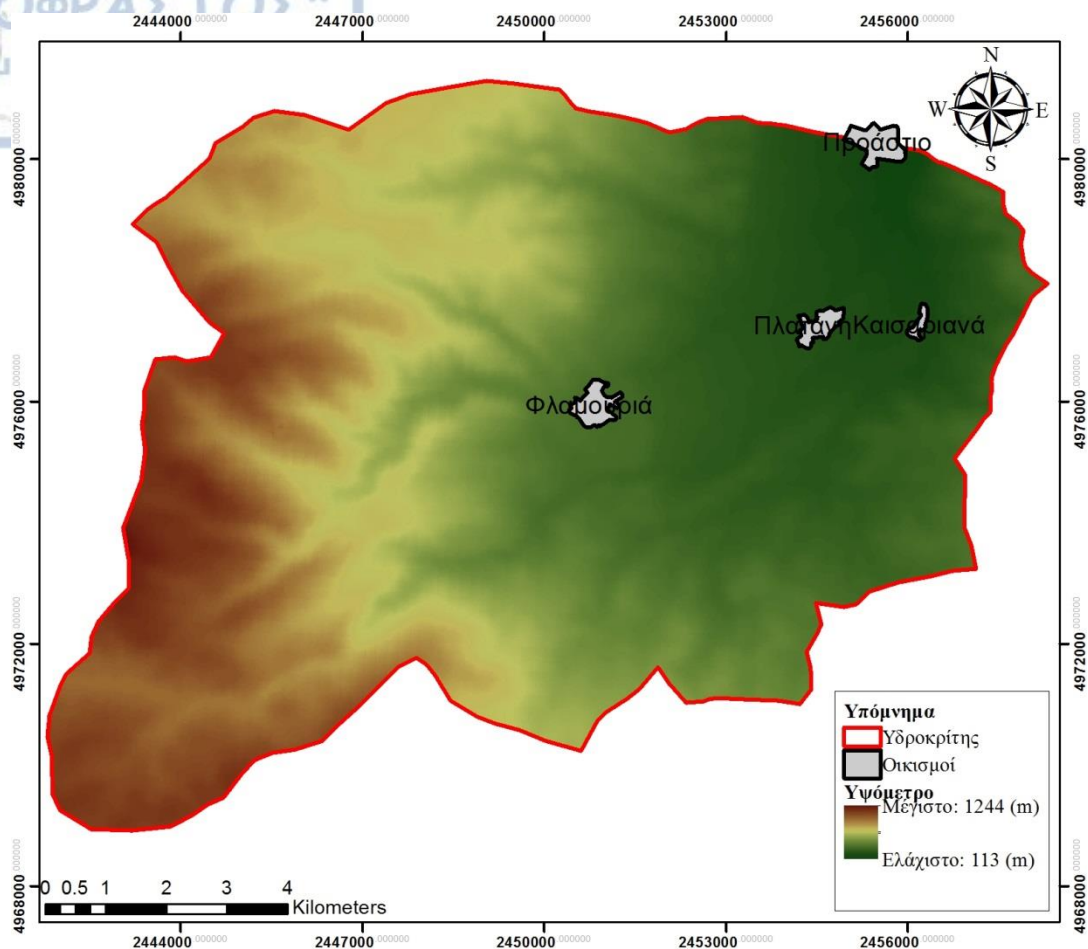
Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση του αναγλύφου με βάση το υψόμετρο (Dikau 1989)

Τύπος αναγλύφου	Υψόμετρο (m)	Επιφάνεια (%)
Πεδινό	<150	12,05
Λοφώδεις	150-600	36,17
Ημιορεινό	600-900	24,11
Ορεινό	>900	27,67

Στον πίνακα παρουσιάζεται το ποσοστό της επιφάνειας ανά τύπο αναγλύφου (Dikau 1989). Σύμφωνα με τον Dikau (1989), η περιοχή χαρακτηρίζεται ως ημιορεινή – λοφώδης, καθώς το 60,3 % της έκτασης βρίσκεται σε υψόμετρο μεταξύ 150-900 m (Σχ. 2.2).

Πίνακας 2.2: Κατανομή της επιφάνειας στην περιοχή έρευνας.

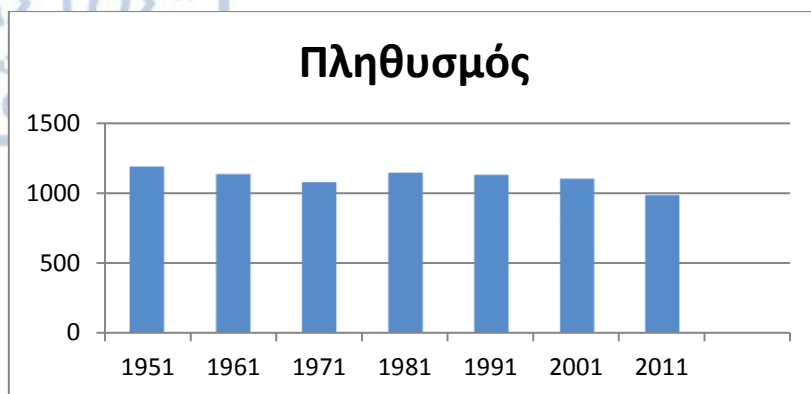
Ισοϋψείς ανά 100 m	Επιφάνεια μεταξύ των ισοϋψών (km ²)	Ποσοστό μεταξύ των ισοϋψών (%)	Αθροιστική επιφάνεια (%)
100-200	10,04	12,90	12,90
200-300	13,72	17,63	30,53
300-400	8,73	11,22	41,75
400-500	6,37	8,19	49,94
500-600	6,17	7,93	57,87
600-700	7,47	9,60	67,47
700-800	6,02	7,74	75,21
800-900	4,82	6,19	81,4
900-1000	4,82	6,19	87,59
1000-1100	6,05	7,77	95,36
1100-1200	3,48	4,47	99,83
1200-1300	0,12	0,17	100
Σύνολο	77,82	100,00	



Σχήμα 2.2: Μορφολογικός χάρτης περιοχής έρευνας.

2.2 Πληθυσμιακά στοιχεία

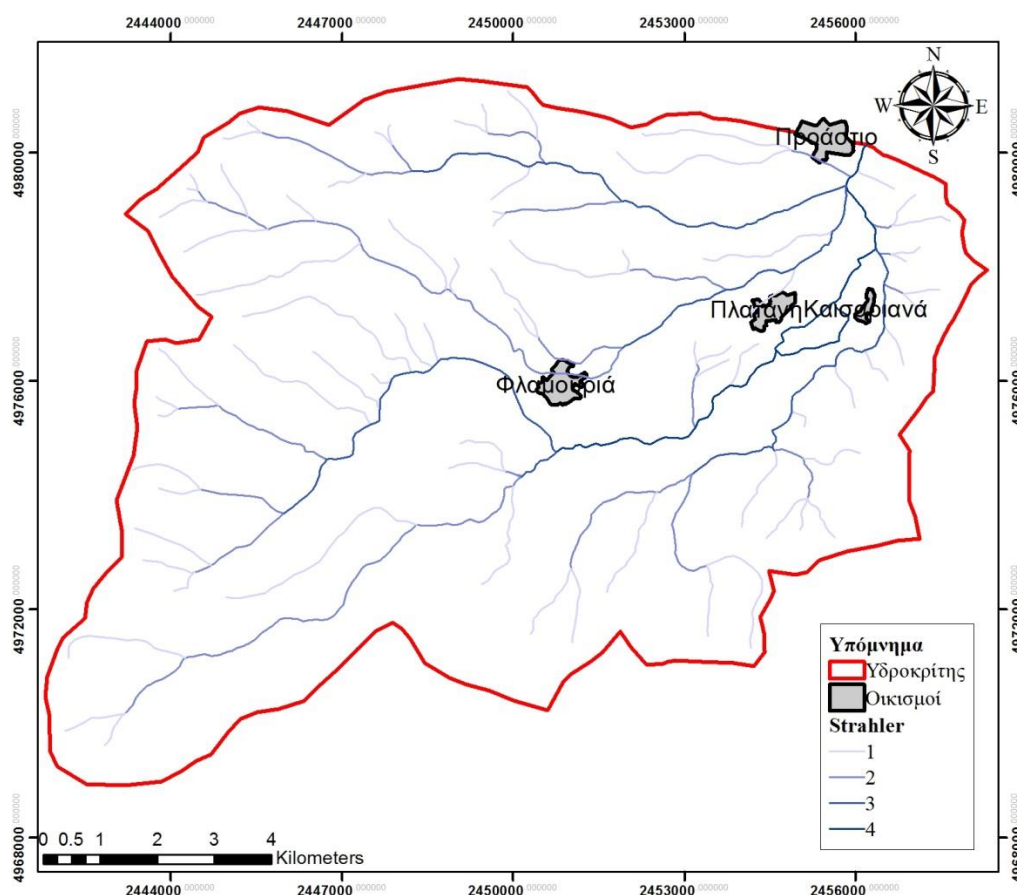
Με βάση την απογραφή του 2011, ο πληθυσμός της περιοχής ανέρχεται σε 984 κατοίκους (583 στη Φλαμουριά και 401 στην Πλατάνη). Στο Σχήμα 2.3 -απεικονίζεται η μεταβολή του πληθυσμού κατά τα τελευταία 60 έτη (1951-2011) όπου παρατηρείται μια μικρή αλλά σταθερή μείωση του πληθυσμού. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των νέων εγκαταλείπει την περιοχή προς αναζήτηση εργασίας είτε στην πλησιέστερη πόλη (Έδεσσα), είτε σε άλλα αστικά κέντρα (Γιαννιτσά, Θεσσαλονίκη).



Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του πληθυσμού στην περιοχή έρευνας.

2.3 Υδρογραφικά στοιχεία

Η περιοχή έρευνας αποτελεί και ανεξάρτητη υδρολογική λεκάνη (Σχήμα 2.4). Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης χαρακτηρίζεται ως δενδριτικού τύπου. Η κοίτη του κύριου ποταμού σύμφωνα με την αρίθμηση κατά Strahler (1957) είναι 4^{ης} τάξης. Το σύνολο όλων των κλάδων είναι ΣNu= 97 , με το συνολικό μήκος τα ΣLu= 129,67 km.



Σχήμα 2.4: Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής έρευνας.

3 Γεωλογία

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Από γεωλογικής σκοπιάς, στην περιοχή έρευνας εντοπίζεται μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών, κυρίως ιζηματογενών με Κρητιδική ηλικία. Ο σχηματισμός που επικρατεί είναι ο φλύσχης της Αλμωπίας, ενώ σημαντική έκταση καταλαμβάνουν οι ασβεστόλιθοι των ενοτήτων Κερασιάς – Κεδρώνα στα δυτικά της λεκάνης, τα πλειστοκαινικά ιζήματα στο πεδινό – κεντρικό σημείο της λεκάνης, οι μαρμαροσχιστόλιθοι στα ανατολικά και τα ηφαιστειοϊζηματογενή της οφιολιθικής σειράς στα νότια της περιοχής.

3.2 Γεωτεκτονική

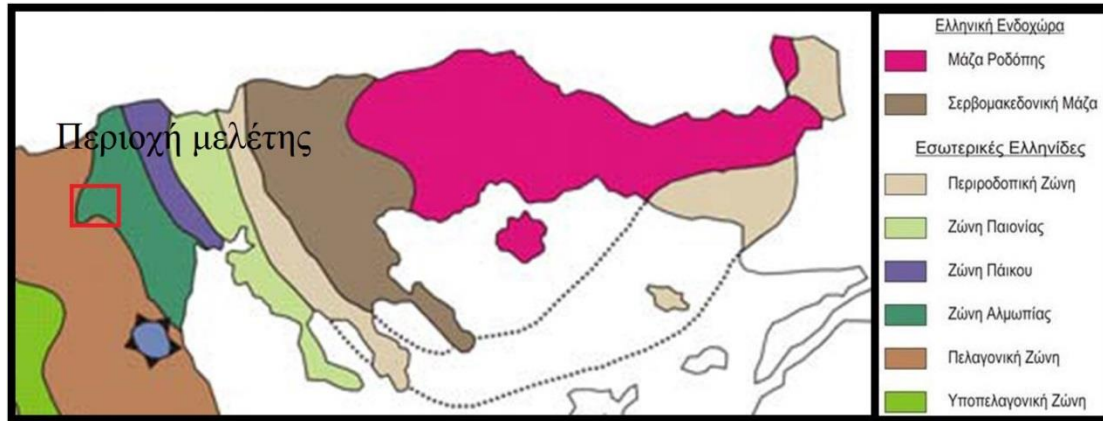
Γεωτεκτονικά, στην ευρύτερη περιοχή συναντώνται η ζώνη Αξιού (μέσω της υποζώνης της Αλμωπίας) με την Πελαγονική ζώνη (Σχ. 3.1). Η περιοχή έρευνας βρίσκεται κατά κύριο λόγο στη υποζώνη Αλμωπίας, ωστόσο στα δυτικά της λεκάνης εντοπίζονται και Πελαγονικοί σχηματισμοί. Η υποζώνη της Αλμωπίας σχηματίζει μαζί με τις αντίστοιχες υποζώνες Πάικου και Παιονίας την ευρύτερη ζώνη του Αξιού. Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί της υποζώνης Αλμωπίας είναι οι οφιόλιθοι με τα συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας, τα επικλυσιογενή ιζήματα του Άνω Κρητιδικού καθώς και μεταμορφωμένα πετρώματα που προηγούνται των οφιολίθων. Όλοι οι παραπάνω σχηματισμοί εντοπίζονται και στην περιοχή μελέτης και βρίσκονται με τη μορφή τεκτονικών λεπίων τα οποία εφιππεύονται ή επωθούνται μεταξύ τους και ως σύνολο επωθούνται δυτικά προς την Πελαγονική. Ως αποτέλεσμα της λεπιοειδούς τεκτονικής, τα πετρώματα της Αλμωπίας απαντώνται σε διαρκείς επαναλήψεις και σχηματίζουν λέπια έκτασης έως και χιλιομετρικής κλίμακας. Ως επακόλουθο των σχηματισμό μεγαλύτερων λεπίων, η υποζώνη Αλμωπίας διαιρείται περαιτέρω σε τέσσερις ενότητες, η καθεμία από τις οποίες αποτελείται από ένα τεκτονικό λέπι.

Οι ενότητες που βρίσκονται εντός της περιοχής έρευνας είναι:

Μεσαίες ενότητες: Λύκων, Μεσημερίου

Δυτικές ενότητες: Κερασιάς, Κεδρώνα

Οι δυτικές ενότητες θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν την κατωφέρεια του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχους προς την Αλμωπία και γι' αυτό το λόγο αναφέρονται και ως «Προαλμωπία».



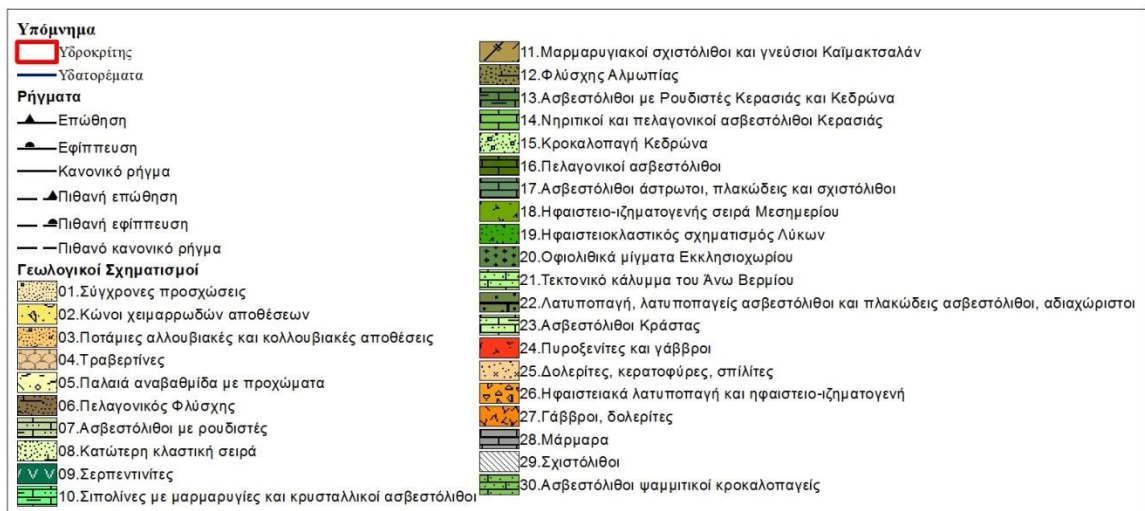
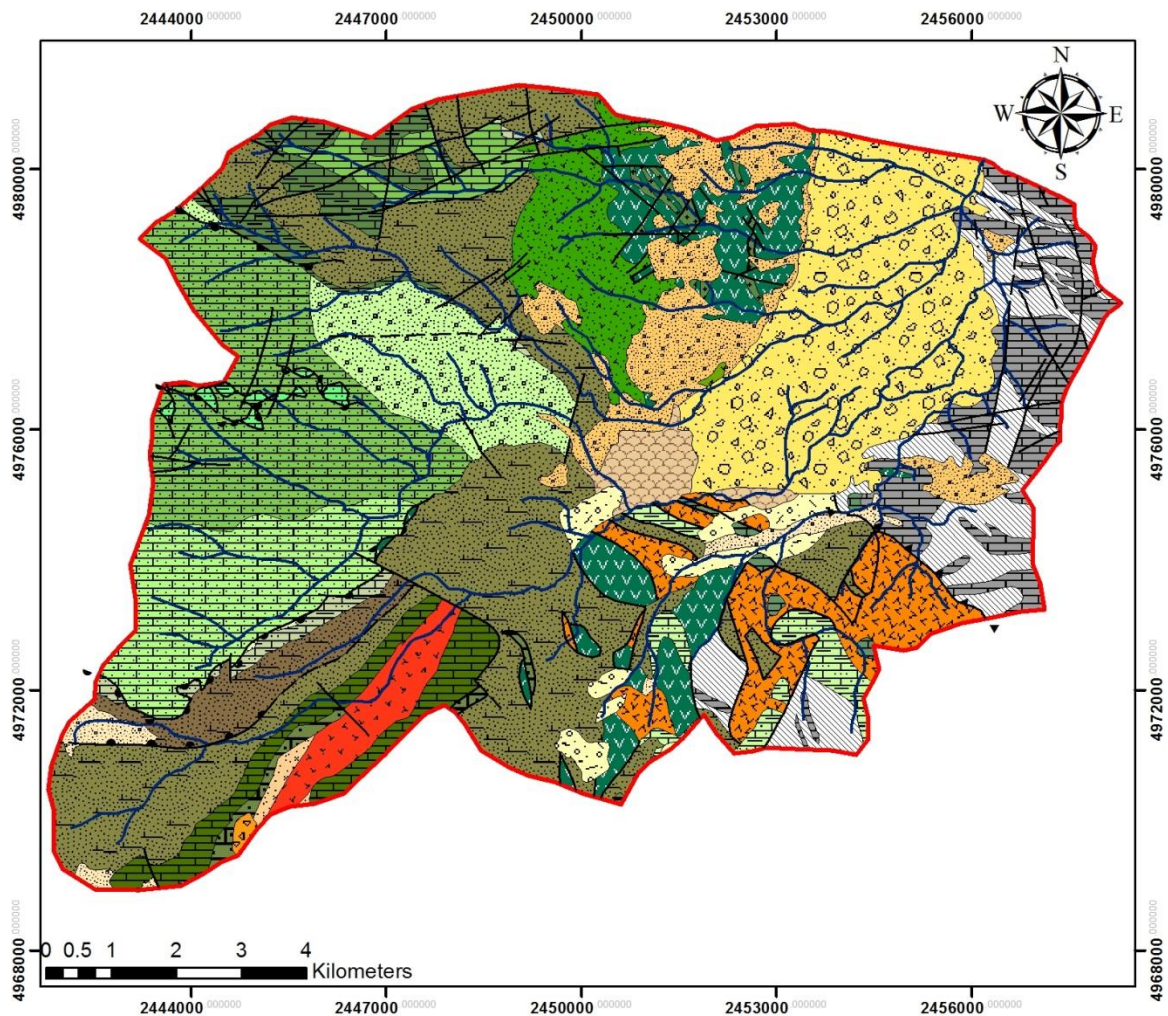
Σχήμα 3.1: Γεωτεκτονικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Μουντράκης 1985).

3.3 Γεωλογικοί σχηματισμοί

Ακολουθεί η περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης (με βάση τα φύλλα χάρτη ΙΓΜΕ 1:50.000 Άρνισσας, Έδεσσας, Βέροιας και Πύργων) από το νεότερο προς τον παλαιότερο (Σχ. 3.2):

- **Τεταρτογενές – Ολόκαινο**
 - i. Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις και κορήματα (al): Έκταση: 0,84 km².
- **Τεταρτογενές – Πλειστόκαινο**
 - i. Κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων (Cs4) (Βούρμιο): Έκταση: 9,57 km².
 - ii. Κολλουβιακές και αλλουβιακές ποτάμιες αποθέσεις (Co,al) (Βούρμιο): Έκταση: 4,34 km².
 - iii. Τραβερτίνης (tv): αναβαθμίδες Φλαμουριάς. Έκταση: 1,04 km².
 - iv. Παλαιά αναβαθμίδα με προχώματα (Pt I-II): εντοπίζονται σε διάφορα υψόμετρα, καλύπτονται από άργιλο που περιέχει χαλίκια, ή ερυθρές αργίλους και αποκολλημένα κροκαλοπαγή. Έκταση: 1.37 km².
- **Ζώνη Αλμωπίας**
 - i. Φλύσχης Αλμωπίας (fa): μαύρος σχιστόλιθος ελαφρώς ψαμμιτικός που βρίσκεται πάντα σε επαφή με τους σερπεντινίτες. Επικαλύπτονται από πράσινους σχιστόλιθους που συνοδεύονται από πολύ λεπτά ψαμμιτικά στρώματα. Έκταση: 15,4 km².

- ii. *Ασβεστόλιθοι με Ρουδιστές των ενοτήτων Κερασιάς και Κεδρώνα (Κ8-9.k1): το πάχος τους μειώνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, ενώ περιέχουν και πολλές Globotruncana. Έκταση: 1,89 km².*



Σχήμα 3.2: Γεωλογικός χάρτης περιοχής έρευνας (με βάση τα φύλλα Ι.Γ.Μ.Ε. Άρνισσας, Έδεσσας, Βέροιας και Πύργων, τροποποιημένα από τον συγγραφέα).

- iii. Νηριτικοί και πελαγικοί ασβεστόλιθοι της Κερασιάς (K5-8.k): από το νεότερο προς το παλαιότερο: α) πλακώδεις ασβεστόλιθοι που εναλλάσσονται με ψαμμίτες και μικροκροκαλοπαγή, β) μαύροι ασβεστόλιθοι, γ) κόκκινοι σχιστόλιθοι που εναλλάσσονται με ψαμμίτες, υπολιθογραφικούς ασβεστόλιθους και ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους, δ) σιδηρούχοι ασβεστόλιθοι, ε) σκουροκάστανι ασβεστόλιθοι με μεγάλα θραύσματα Ρουδιστών, στ) φαιότεφροι ασβεστόλιθοι με μικρά γαστερόποδα και τέλος ζ) κροκαλοπαγή με κροκάλες ασβεστολίθων, γάββρων και σερπεντινιτών που εναλλάσσονται με σχιστόλιθους, ψαμμίτες και κόκκινους ασβεστόλιθους. Έκταση: 1,19 km².
- iv. Ασβεστόλιθοι ψαμμιτικοί κροκαλοπαγείς (K7-8.k): Ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι και πελαγικοί ασβεστόλιθοι με Globotruncana. Έκταση: 7,38 km².
- v. Κροκαλοπαγή Κεδρώνια (K7-8.c): Παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ανάπτυξη και περιέχουν Ρουδιστές. Έκταση: 3,84 km².
- vi. Λατυποπαγή, λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι και πλακώδεις ασβεστόλιθοι αδιαχώριστοι (K4-6?br): είναι ανακατεμένα τυχαία με το φλύσχη λόγω των τεκτονικών μετατοπίσεων. Έκταση: 0,43 km².
- vii. Κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθοι του τεκτονικού καλύμματος του Άνω Βερμίου (Ks.c): Τα κροκαλοπαγή παρεμβάλλονται μέσα στους ασβεστόλιθους. Οι κροκάλες αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, λευκούς, τεφρούς, ροδόχρωμους ή μαύρους που προέρχονται από τα πελαγονικά μάρμαρα. Έκταση: 4,58 km².
- viii. Ασβεστόλιθοι Άνω Γραμματικού (Ks.k): λεπτόκοκκοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, καλά στρωμένοι, πελαγικής προέλευσης. Μικρολατυποπαγείς ορίζοντες διαβαθμισμένοι παρεμβάλλονται εντός των λεπτόκοκκων ασβεστολίθων, κυρίως προς τη βάση του σχηματισμού. Έκταση: 2,12 km².
- ix. Ασβεστόλιθοι Κράστας (Ks.k2): παχείς και συχνά άστρωτοι ή σε χοντρούς πάγκους. Έκταση: 1,2 km².
- x. Ασβεστόλιθοι άστρωτοι, πλακώδεις και σχιστόλιθοι (K?k): πρόκειται για σχιστολίθους και πλακώδεις ασβεστολίθους. Έκταση: 0,22 km².
- xi. Ηφαιστειο-ιζηματογενής σειρά Μεσημερίου ((Js-Ci)6): από το νεότερο στον παλαιότερο: α) ασβεστόλιθοι με θραύσματα γαλακτώδους χαλαζία με Cladocoropsis sp., Γαστερόποδα και Φύκη επανατοποθετημένα, ασβεστοσχιστόλιθοι και τοφφίτες, β) συμπαγείς τεφροί ασβεστόλιθοι, γ)

εναλλαγές ασβεστολίθων με διακλάσεις γεμισμένες με πυρίτιο και ηφαιστειοκλαστικών σχιστολίθων. Έκταση: 0,92 km².

- xii. Ηφαιστειο-κλαστικός σχηματισμός Λύκων ((Js-Ci)5): από το νεότερο στον παλαιότερο: α) λατυποπαγή, ηφαιστειακοί τόφοι και ηφαιστειοκλαστικά κροκαλοπαγή, β) ηφαιστειακές εκχύσεις και κροκαλοπαγή με τοφφίτικο συνδετικό υλικό, γ) εκχύσεις λαβών. Έκταση: 3,01 km².
- xiii. Οφιολιθικά μίγματα Εκκλησοχωρίου ((Js-Ci)2): χαοτικός σχηματισμός που αποτελείται από μεγάλου μεγέθους ογκολίθους μαρμάρων και σερπεντινίτη σε ετερογενές συνδετικό υλικό που αποτελείται από μια μάζα χαλαζία και χλωρίτη μέσα στην οποία βρίσκονται κλαστικά υλικά και μικρά γωνιώδη τεμάχια. Έκταση: 0,29 km².
- xiv. Μάρμαρα (mr): μάρμαρα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι καλοστρωμένοι, φυλλώδεις. Έκταση: 3,61 km².
- xv. Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και πυριτικοί σχιστόλιθοι με λευκό μαρμαρυγία που εναλλάσσονται με μάρμαρα (ph). Έκταση: 3,96 km²

- **Εκρηξιγενή πετρώματα**

- i. Πυροξενίτες και γάββροι (πρ,θ): οι πυροξενίτες αποτελούνται από κλινοπυρόξενους συχνά παραμορφωμένους. Οι γάββροι είναι συνήθως σε στρώσεις. Έκταση: 1,37 km².
- ii. Δολερίτες, κερατοφύρες, σπιλίτες (δο,σπ): Έκταση: 0,19 km².

- **Οφιολιθική σειρά**

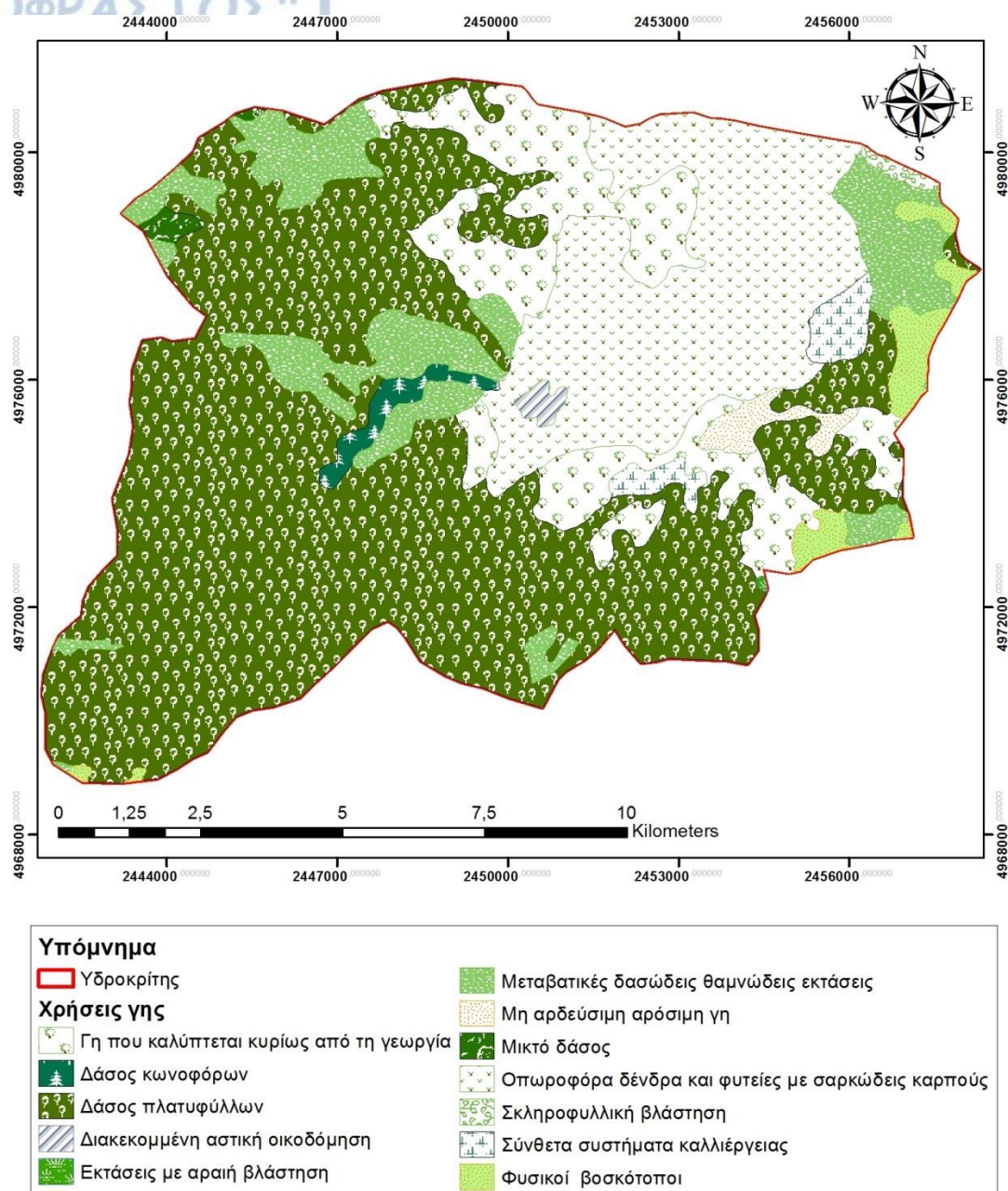
- i. Ηφαιστειακά λατυποπαγή και ηφαιστειο-ιζηματογενή (br): σχηματισμός διαφόρων πετρωμάτων με κοινή ηφαιστειογενή προέλευση και λατυποπαγή δομή. Έκταση: 0,09 km².
- ii. Γάββροι, δολερίτες και συνδεδεμένα ηφαιστειακά πετρώματα (θ,δο): λίγοι γάββροι αλλά άφθονοι δολερίτες, ενός τύπου που συνδέεται με οφιολιθικές ακολουθίες. Έκταση: 3,52 km².

3.4 Χρήσεις Γης

Η συντριπτική πλειοψηφία της λεκάνης της Φλαμουριάς καλύπτεται από δασικές εκτάσεις σε σύνολο 54,5%, ενώ ακολουθούν οι καλλιέργειες οπωροφόρων 18,24 % καθώς και γεωργικές εκτάσεις με φυσική βλάστηση 12,3% (Σχ. 3.3). Η αγροτική παραγωγή αποτελεί την κύρια απασχόληση των κατοίκων της περιοχής, με τη μερίδα του λέοντος να καταλαμβάνουν η παραγωγή κερασιών και ροδάκινων (σχεδόν 90% των καλλιεργήσιμων εκτάσεων), ενώ ακολουθούν τα μήλα, τα ακτινίδια, οι ελιές τα κάστανα και διάφορες μικροκαλλιέργειες. Με βάση τα δεδομένα κάλυψης γης για την Ελλάδα (σύμφωνα με το corine 2012), οι χρήσεις γης στην περιοχή έρευνας διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 3.1: Χρήσεις γης στην περιοχή έρευνας σύμφωνα με τα δεδομένα corine 2012.

Χρήσεις Γης	Έκταση (km ²)	Ποσοστό (%)
Διακεκομμένη αστική δόμηση	0,27	0,35
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0,02	0,03
Φυσικοί βοσκότοποι	1,52	1,95
Μη αρδεύσιμη αρώσιμη γη	0,77	0,99
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	1,15	1,48
Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	14,19	18,24
Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	9,57	12,30
Σκληροφυλλική βλάστηση	0,2	0,26
Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	7,71	9,91
Μικτό δάσος	0,29	0,37
Δάσος πλατυφύλλων	41,38	53,18
Δάσος κωνοφόρων	0,74	0,95
Σύνολο	77,81	100,00



Σχήμα 3.3: Χάρτης χρήσεων γης με βάση τα δεδομένα corine 2012, τροποποιημένα κατά τον συγγραφέα.

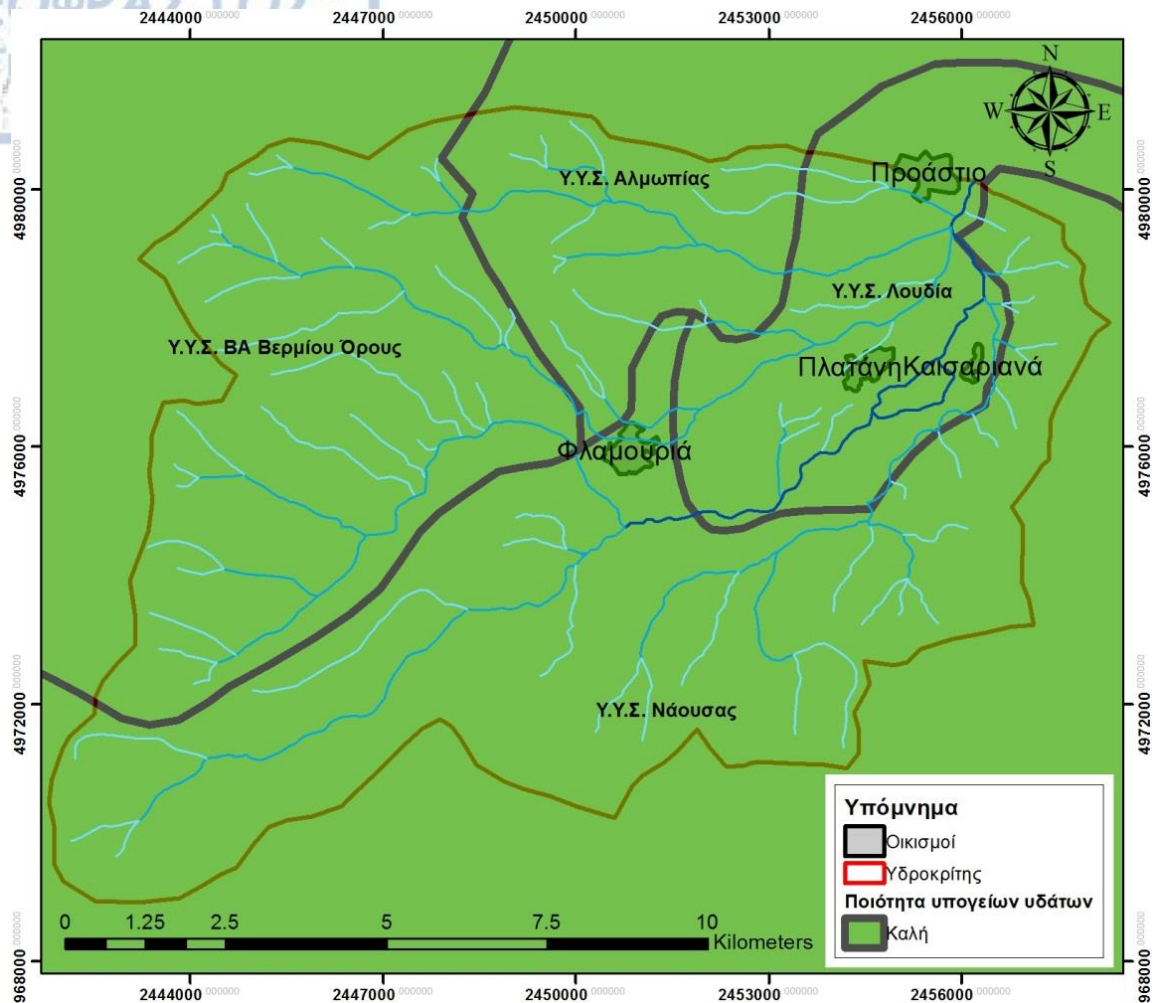
4 Υδρογεωλογία

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών ειδών υδροφορέων σε μια περιοχή αποτελεί καίριο αντικείμενο έρευνας στην υδρογεωλογία κατά τα τελευταία χρόνια, καθώς γίνεται προσπάθεια να αναλυθούν και να κατανοηθούν οι τρόποι με τους οποίους το υπόγειο νερό επηρεάζεται και μεταβάλλεται από τους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς που διαπερνά (Lindstrom et al., 1989, Islam et al., 2003, Kilchmann et al., 2004, Biddau et al., 2009, Hahn et al., 2009, Birkholzer et al., 2009). Στους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων η έρευνα επικεντρώνεται στις ρωγμώσεις τους, τόσο ως προς τον τρόπο δημιουργίας τους (Ramasamy et al., 2001, Marechal et al., 2004, Lachassagne et al., 2011), όσο και ως προς την αναζήτηση υδροφορίας στις ρωγμώσεις τους (Courtois et al., 2010, Thivya et al., 2014). Εν αντιθέσει, στους πορώδεις και στους καρστικούς υδροφορείς, η έρευνα επικεντρώνεται περισσότερο στην ποιότητα του υπόγειου νερού (Daskalaki et al., 2007, Hofmann et al., 2014) με τη μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στην τρωτότητά τους και στην προστασία τους από τυχόν ρυπαντές, ούτως ώστε να καταστεί ασφαλής και βιώσιμη η εκμετάλλευσή τους (Foster, 1998, Goldscheider, 2003, Leone et al., 2009, Mimi et al., 2009, Kazakis et al., 2015). Προαπαιτούμενο για την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων αποτελεί η σύνταξη του υδρολογικού ισοζυγίου της, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του υπογείου νερού διαμέσου των διάφορων γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής. Το τελευταίο αποτελεί σημείο αναφοράς για πληθώρα μελετών που επικεντρώνονται στην κίνηση του υπογείου νερού, κυρίως μέσω της ανάλυσης ισοτόπων (Andrews 1985, Guo, 1997, Maloszewski et al., 2002). Επιπρόσθετα, η στάθμη του υπόγειου νερού στους διάφορους υδροφόρους μιας περιοχής μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του τρόπου αναπλήρωσης των υδάτων τους (Healy et al., 2002, Rodhe et al., 2006). Η θεμελίωση της υδραυλικής σύνδεσης του υδροφορέα διερρηγμένων πετρωμάτων με τον πορώδη θα διευκολύνει περαιτέρω την ορθή διαχείριση των υπόγειων υδάτων της περιοχής έρευνας.

4.1 Γενικά

Η περιοχή έρευνας ανήκει στο 9^ο υδατικό διαμέρισμα (Δυτικής Μακεδονίας) και κατανέμεται με βάση την ειδική γραμματεία υδάτων και τα εγκεκριμένα σχέδια διαχείρισης Λεκανών Απορροής σε τέσσερα διαφορετικά υπόγεια υδατικά συστήματα

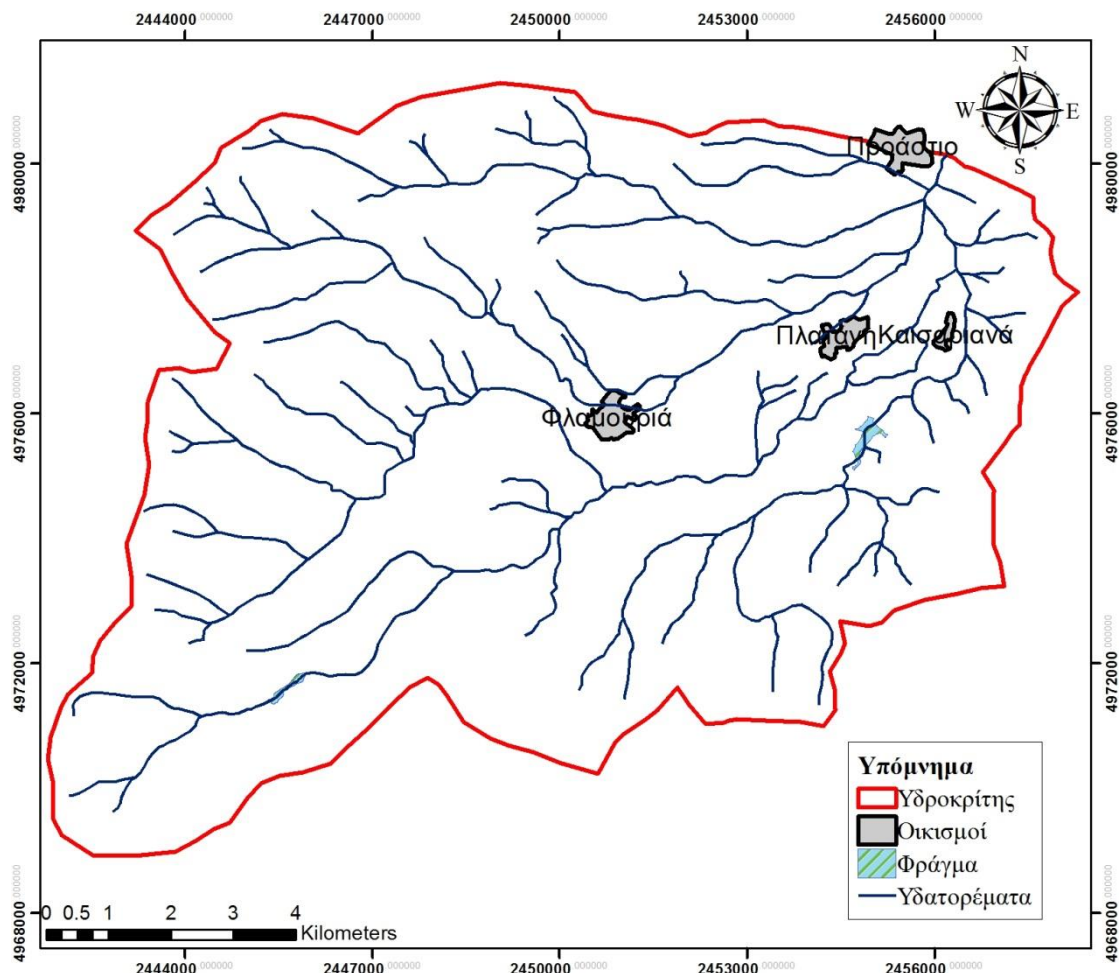
(Σχ. 4.1), συγκεκριμένα στα Υ.Υ.Σ. της Αλμωπίας (GR0900260), του Λουδία (GR100010), της Νάουσας (GR0900250) και του Βορειοανατολικού Βερμίου Όρους (GR090F090). Το Υ.Υ.Σ. της Αλμωπίας (GR0900260) χαρακτηρίζεται ως ρωγματικό καθώς αναπτύσσεται εντός διερρηγμένων βραχωδών πετρωμάτων (Ηφαιστειο-κλαστικοί και οφιολιθικοί σχηματισμοί) και ως εκ τούτου παρουσιάζουν μόνο δευτερογενές πορώδες στις διάφορες ζώνες ανοικτών διακλάσεων και διαρρήξεων που αποτελούν παράγωγα της τεκτονικής καταπόνησης των σχηματισμών. Η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των τοπικών υδροφοριών που αναπτύσσονται στις ζώνες διάρρηξης χαρακτηρίζεται ως «καλή». Το Υ.Υ.Σ. του Βορειοανατολικού Βερμίου Όρους (GR090F090) χαρακτηρίζεται ως καρστικό καθώς αποτελείται κυρίως από ασβεστολίθους και ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή. Τροφοδοτείται από τις λίμνες Βεγορίτιδας και Βρυτών (Άγρα) καθώς και από τον ποταμό Βόδα ενώ χαρακτηρίζεται από υψηλή τρωτότητα. Τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητα των υπογείων υδάτων κρίνεται ως «καλή». Το Υ.Υ.Σ. του Λουδία (GR100010) χαρακτηρίζεται ως κοκκώδες καθώς αποτελείται κυρίως από χαλαρούς ιζηματογενείς σχηματισμούς (άμμοι, κροκάλες, κ.α.). Τροφοδοτείται πλευρικά από τα γειτονικά Υ.Υ.Σ. Νάουσας, Β.Α. Βερμίου Όρους, Πάικου και κάτω ρου Αλιάκμονα. Η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων χαρακτηρίζεται ως «καλή». Το Υ.Υ.Σ. της Νάουσας (GR0900250) χαρακτηρίζεται ως ρωγματικό καθώς αναπτύσσεται κυρίως εντός διερρηγμένων βραχωδών πετρωμάτων (φλύσχης, σχιστόλιθοι, γάββροι, δολερίτες), με την εξαίρεση κάποιων εμφανίσεων καρστικών ασβεστολίθων. Ομοίως με το σύστημα της Αλμωπίας, η υδροφορία εντοπίζεται τοπικά σε ζώνες διαρρήξεων. Η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπογείων υδάτων κρίνεται ως «καλή».



Σχήμα 4.1: Χάρτης ποιότητας υπόγειων υδατικών συστημάτων με βάση δεδομένα του ΥΠΕΚΑ, τροποποιημένα κατά τον συγγραφέα.

Οι υδρευτικές ανάγκες της περιοχής καλύπτονται από τις γεωτρήσεις που ανήκουν στο δίκτυο του τοπικού οργανισμού εγγείων βελτιώσεων (ΤΟΕΒ) Εδέσσης, ενώ οι αρδευτικές ανάγκες καλύπτονται από τον ποταμό Εδεσσαίο (Βόδας) και τους παραποτάμους του, από το δίκτυο γεωτρήσεων του ΤΟΕΒ, ιδιωτικές γεωτρήσεις καθώς και από δυο φράγματα στα δημοτικά διαμερίσματα Φλαμουριάς και Πλατάνης (Σχ. 4.2). Το φράγμα της Φλαμουριάς κατασκευάστηκε νοτιοδυτικά του ομώνυμου οικισμού, σε τοποθεσία που βρίσκεται ανάντη της αρδευόμενης περιοχής, οπότε και δεν απαιτούνται αντλιοστάσια για την τροφοδοσία του δικτύου. Το φράγμα της Πλατάνης εγκαθιδρύθηκε νότιο του ομώνυμου οικισμού, ως απόρροια των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για αρδεύσιμο νερό. Το φράγμα ενισχύει τα υφιστάμενα δίκτυα άρδευσης καθώς τα τροφοδοτεί με ύδατα που συλλέγονται οργανωμένα, περιορίζοντας ταυτόχρονα σε σημαντικό βαθμό της ανεξέλεγκτες απολήψεις οι οποίες λειτουργούσαν σε συχνά καθεστώς υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων και είχαν ως

αποτέλεσμα σημαντικές καλλιεργήσιμες εκτάσεις να χαρακτηριστούν ως «ξηρικές» καθώς υπήρχε έλλειψη υπόγειων υδατικών πόρων που υπό κανονικές συνθήκες θα έπρεπε να ήταν διαθέσιμο.

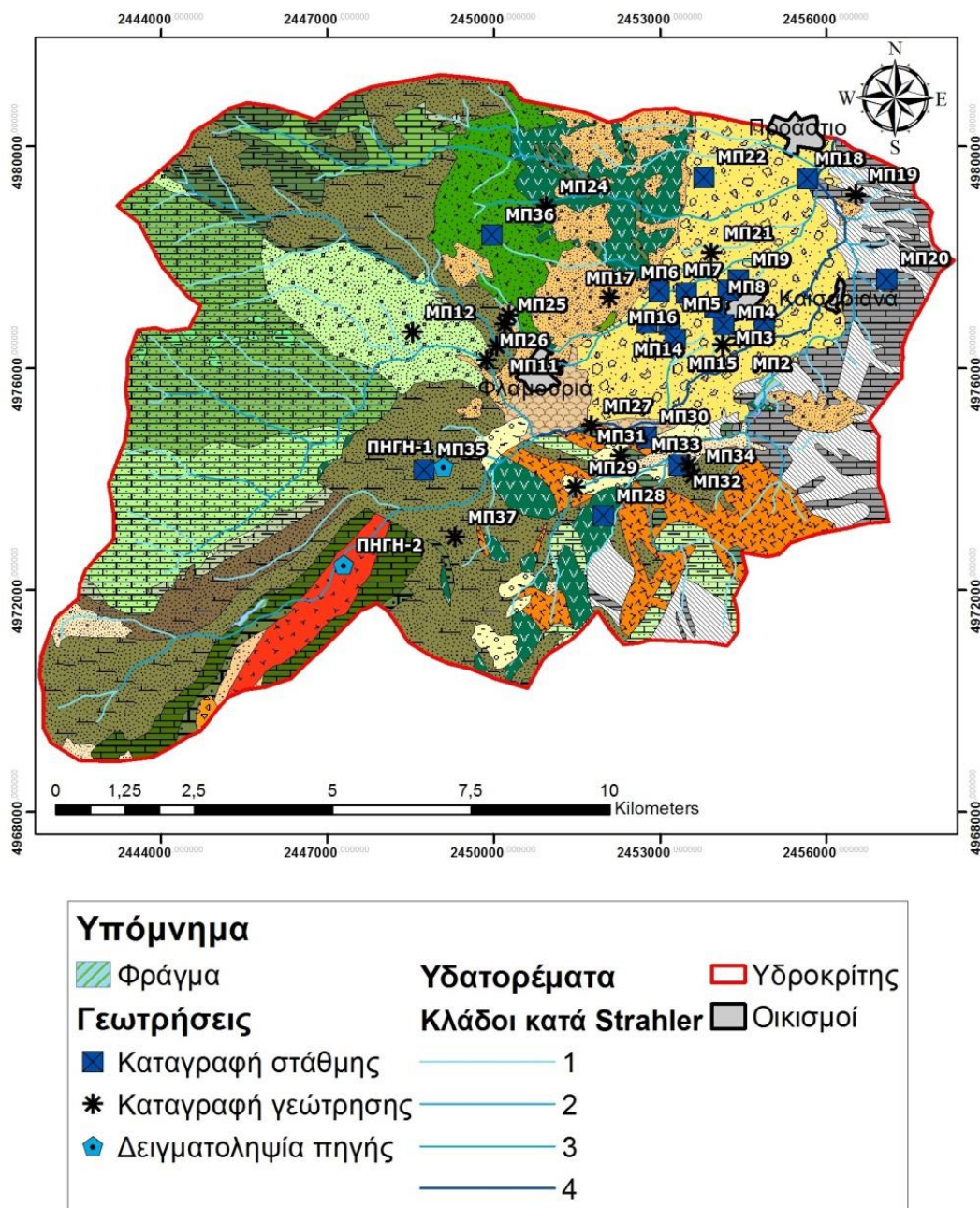


Σχήμα 4.2: Χάρτης απεικόνισης των φραγμάτων στην περιοχή έρευνας.

4.2 Απογραφή γεωτρήσεων

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε καταγραφή των γεωτρήσεων και μέτρηση της στάθμης τους στη λεκάνη της Φλαμουριάς κατά τις περιόδους Απριλίου – Μαΐου 2017 (υγρή περίοδος), Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2017 (ξηρή περίοδος) και Απριλίου–Μαΐου 2018 (υγρή περίοδος). Συνολικά καταγράφηκαν 37 αρδευτικές και υδρευτικές γεωτρήσεις ενώ μετρήθηκαν οι στάθμες σε 18 εξ' αυτών (Σχ. 4.3). Η συντριπτική τους πλειοψηφία έχει ανορυχθεί στις χειμαρρώδεις αποθέσεις της κοιλάδας της Φλαμουριάς, 10 εντοπίζονται πάνω σε φλυσχοειδείς σχηματισμούς, ενώ 2 βρίσκονται πάνω από οφιολιθικούς σχηματισμούς. Επιπρόσθετα,

πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία υπογείου νερού σε 7 γεωτρήσεις και 2 πηγές, με την πρώτη να εντοπίζεται μέσα σε φλύσχη ενώ η δεύτερη βρίσκεται σε περιβάλλον πυροξενιτών και γάββρων. Επιπλέον, λήφθηκε δείγμα επιφανειακού νερού στην έξοδο της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 4.3: Θέσεις καταγεγραμμένων γεωτρήσεων και σημείων δειγματοληψίας.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων περιοχής έρευνας.

Ονομασία	Υδροφορέας	Χρήση	Υψόμετρο (m)	Βάθος Υ.Σ. υγρής '17 (m)	Βάθος Υ.Σ. ξηρής '17 (m)	Βάθος Υ.Σ. υγρής '18 (m)
ΜΠ1	Πορώδης	άρδευση	164	0	2,2	0
ΜΠ2	Πορώδης	άρδευση	173	-	-	-
ΜΠ3	Πορώδης	άρδευση	183	-	-	-
ΜΠ4	Πορώδης	άρδευση	188	8,25	12,5	7,7
ΜΠ5	Πορώδης	άρδευση	211	28,31	34,3	-
ΜΠ6	Πορώδης	άρδευση	197	13,36	15,13	-
ΜΠ7	Πορώδης	άρδευση	177	10,51	14,2	10,2
ΜΠ8	Πορώδης	άρδευση	187	15,25	10,3	14,86
ΜΠ9	Πορώδης	άρδευση	170	5,46	8,36	4,93
ΜΠ10	Διερρηγμένος	άρδευση	401	-	-	-
ΜΠ11	Διερρηγμένος	άρδευση	373	-	-	-
ΜΠ12	Καρστικός	άρδευση	476	-	-	-
ΜΠ13	Πορώδης	άρδευση	224	-	-	-
ΜΠ14	Πορώδης	άρδευση	221	38,63	44,35	36,7
ΜΠ15	Πορώδης	ύδρευση	211	26,61	30,2	-
ΜΠ16	Πορώδης	άρδευση	196	24,35	29,9	-
ΜΠ17	Πορώδης	άρδευση	262	-	-	-
ΜΠ18	Πορώδης	άρδευση	120	-	8,82	8,9
ΜΠ19	Καρστικός	άρδευση	182	-	-	-
ΜΠ20	Καρστικός	άρδευση	184	91,36	94,1	85,2
ΜΠ21	Πορώδης	άρδευση	177	-	-	-
ΜΠ22	Πορώδης	άρδευση	192	49,28	49,62	47,8
ΜΠ24	Διερρηγμένος	άρδευση	453	-	-	-
ΜΠ25	Διερρηγμένος	άρδευση	394	-	-	-
ΜΠ26	Διερρηγμένος	άρδευση	389	-	-	-
ΜΠ27	Διερρηγμένος	άρδευση	293	-	-	-
ΜΠ28	Διερρηγμένος	άρδευση	347	22,43	40,77	31,1
ΜΠ29	Πορώδης	άρδευση	308	-	-	-
ΜΠ30	Πορώδης	άρδευση	245	27,13	31	-
ΜΠ31	Πορώδης	άρδευση	265	-	-	-
ΜΠ32	Πορώδης	άρδευση	238	5,93	-	-
ΜΠ33	Πορώδης	άρδευση	233	-	-	-
ΜΠ34	Διερρηγμένος	άρδευση	251	-	-	-
ΜΠ35	Διερρηγμένος	άρδευση	500	11,26	17,01	6,65
ΜΠ36	Διερρηγμένος	άρδευση	591	18,23	17,8	14
ΜΠ37	Διερρηγμένος	άρδευση	562	-	-	-



Σχήμα 4.4: καταγραφή στάθμης γεώτρησης πορώδους υδροφορέα.



Σχήμα 4.5: (αριστερά) προσπάθεια καταγραφής στάθμης γεώτρησης τύπου πομόνας, (δεξιά) δειγματοληψία νερού από το κεντρικό ρέμα της περιοχής (Μέγα Ρέμα).



Σχήμα 4.6: (αριστερά) Υδρομαστευμένη πηγή επαφής, (δεξιά) καταγραφή στάθμης γεώτρησης πορώδους υδροφορέα.



Σχήμα 4.7: Μηχανοκίνητες πομόνες που απαντώνται ευρέως στα ορεινότερα σημεία της περιοχής έρευνας.



Σχήμα 4.8: Αρτεσιανισμός σε γεώτρηση του πορώδους υδροφορέα.



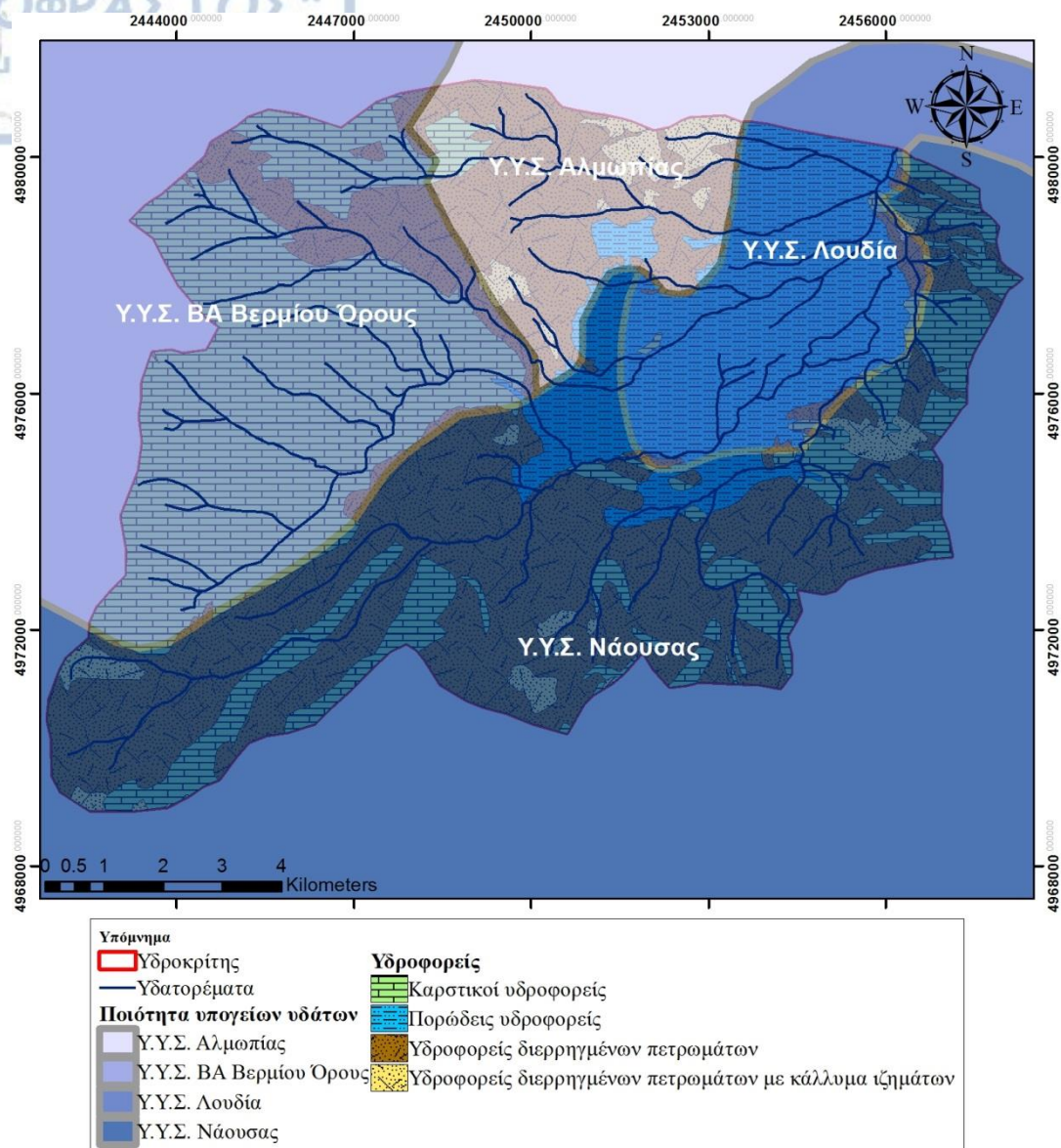
Σχήμα 4.9: (αριστερά) υδρευτική γεώτρηση της περιοχής, (δεξιά) εγκαταλειμμένη αρδευτική γεώτρηση μεγάλου βάθους, ανορυγμένη στον καρστικό υδροφόρα.

4.3 Υδροφορείς

Στην περιοχή έρευνας απαντώνται οι εξής τύποι υδροφορέων (Σχ. 4.10): πορώδεις υδροφορείς στην πεδιάδα της Φλαμουριάς εντός νεογενών και τεταρτογενών σχηματισμών, καρστικοί υδροφορείς τόσο εντός των μαρμάρων στα ανατολικά της λεκάνης, όσο και εντός ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών και ασβεστολίθων της Αλμωπίας στα νότια και δυτικά της λεκάνης και τέλος υδροφορείς διερρηγμένων σκληρών πετρωμάτων στα νότια, νοτιοδυτικά, βορειοδυτικά και βόρεια της λεκάνης οι οποίοι και αναπτύσσονται σε διάφορους βραχώδεις σχηματισμούς.

Πίνακας 4.2: Έκταση υδροφορέων της περιοχής.

Τύποι υδροφορέων	Έκταση (Km ²)	Έκταση (%)
Καρστικοί	27,36	35
Πορώδεις	14,34	18
Διερρηγμένων πετρωμάτων	36,38	47
	78,08	100



Σχήμα 4.10: κατανομή υδροφόρων συστημάτων της περιοχής έρευνας.

- Πορώδεις υδροφορείς: εμφανίζονται εντός των Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών στην κοιλάδα της Φλαμουριάς. Το υδροφόρο σύστημα αποτελείται από επάλληλα υδροφόρα στρώματα που διαχωρίζονται μεταξύ τους από αργίλους και μάργες. Βρίσκονται σχεδόν αποκλειστικά υπό πίεση, μέσα σε σχηματισμούς κροκαλών, λατυπών, αμμοχάλικων και τόφων. Το πάχος τους δεν είναι σταθερό και κυμαίνεται μεταξύ 5 και 35 μέτρων. Αποτελούν την κύρια πηγή κάλυψης των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών της περιοχής ενώ κατά την υγρή περίοδο παρουσιάζουν και αρτεσιανισμό. Η τροφοδοσία τους πραγματοποιείται μέσω κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων, διήθησης από τα ρέματα καθώς και από πλευρική τροφοδοσία από τους διερρηγμένους υδροφορείς.

• Καρστικοί υδροφορείς: εντοπίζονται δυτικά της λεκάνης εντός Τριαδικών – Ιουρασικών ασβεστολίθων, με μέρος τους να καλύπτεται από τα Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα της πεδιάδας, ενώ νότια και ανατολικά της λεκάνης εντοπίζονται σε ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και ασβεστολίθους της ζώνης της Αλμωπίας. Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό και παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό καρστικοποίησης, δημιουργώντας υπόγειους ταμιευτήρες, μικρούς και μεγάλους αγωγούς, δολίνες και ουβάλες με ικανοποιητικά ανανεώσιμα αποθέματα νερού. Στο δυτικό σύστημα η στάθμη του υπόγειου νερού κυμαίνεται στα 90 μέτρα ενώ εκφορτίζει εκτός της λεκάνης απορροής της Φλαμουριάς. Το πάχος της ζώνης του καρστ διαμορφώνεται στα 200 μέτρα και χαρακτηρίζεται ως υψηλής περατότητας, ενώ το πάχος της κορεσμένης ζώνης είναι στα 50 μέτρα, με την στάθμη να αυξομειώνεται ετησίως κατά λίγα μέτρα. Το νότιο και ανατολικό σύστημα αποθηκεύει πολύ μεγάλες ποσότητες υπόγειου νερού οι οποίες λόγω της ανατολικής κλίσης του υποκείμενου φλύσχη ρέουν προς τα ανατολικά και εκφορτίζονται στις πηγές του Αγίου Νικολάου στη Νάουσσα, εκτός της περιοχής μελέτης. Το πάχος της ζώνης του καρστ κυμαίνεται στα 300 μέτρα με τον υδροφορέα να χαρακτηρίζεται ως υψηλής περατότητας, ενώ το πάχος της κορεσμένης ζώνης είναι στα 80 μέτρα, με την στάθμη να μεταβάλλεται ετησίως κατά λίγα μέτρα. Όλα τα συστήματα χαρακτηρίζονται από υψηλή τρωτότητα. Τροφοδοτούνται από την κατείδσδυση των κατακρημνισμάτων καθώς και από τη διήθηση από τα ρέματα.

• Υδροφορείς διερρηγμένων σκληρών πετρωμάτων: εντοπίζονται στα διάφορα βραχώδη πετρώματα της περιοχής όπως το οφιολιθικό σύμπλεγμα, οι σχιστόλιθοι, οι φλύσχεις, γάββροι, δολερίτες, ηφαιστειο-ιζηματογενή και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα. Στα πετρώματα αυτά απουσιάζει το πρωτογενές πορώδες ωστόσο λόγω του έντονου τεκτονισμού της περιοχής εμφανίζουν δευτερογενές πορώδες στη μορφή τεκτονικών ασυνεχειών, διακλάσεων και διαρρήξεων. Στους οφιόλιθους τα υδροφόρα στρώματα που αναπτύσσονται είναι κατά κύριο λόγο μικρής υδροδυναμικότητας και εντοπίζονται στην επαφή εξαλλοίωσης, ενώ υπάρχουν και εξαιρέσεις με ρηγματογενείς πηγές και υδρογεωτρήσεις να αποδίδουν παροχή της τάξης των 50 m³/h. Οι υπόλοιποι σχηματισμοί παρουσιάζουν και αυτοί

αποκλειστικά δευτερογενές πορώδες λόγω τεκτονικής καταπόνησης και εξαλλοίωσης των πρώτων μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, ακόμα και όταν καλύπτονται από υπερκείμενους χαλαρούς σχηματισμούς και Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα. Παρόλο που οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για υδροφορία, υπάρχουν λιγοστές περιπτώσεις όπου οι σχηματισμοί αυτοί συμπεριφέρονται ως υδροπερατοί και μπορούν να αποδώσουν παροχές μέσω γεωτρήσεων της τάξης των 100 m³/h. Τροφοδοτούνται μέσω της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων και της διήθησης από τα ρέματα που τους διαπερνούν.

4.4 Υδρολογικό ισοζύγιο

Για τη βέλτιστη διαχείριση των υδάτινων πόρων μιας υδρολογικής λεκάνης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου της. Το υδρολογικό ισοζύγιο είναι απόρροια του νόμου της διατήρησης της μάζας. Δηλαδή, σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα οι συνολικές εισροές σε μια λεκάνη απορροής είναι ίσες με τις συνολικές εκροές και τη μεταβολή των αποθεμάτων. Οι εισροές μιας λεκάνης είναι:

- i. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- ii. Οι επιφανειακές και υπόγειες εισροές
- iii. Το νερό που εισέρχεται στο υδροφόρο σύστημα από άλλες τεχνητές πηγές π.χ. τεχνητός εμπλουτισμός

Οι εκροές είναι:

- i. Οι επιφανειακές και υπόγειες εκροές
- ii. Η εξάτμιση και η διαπνοή
- iii. Το νερό που εξάγεται σε άλλες λεκάνες

Οι αλλαγές στα αποθέματα είναι:

- i. Η αλλαγή στην αποθήκευση του υπόγειου νερού
- ii. Η αλλαγή στην αποθήκευση της υγρασίας του εδάφους
- iii. Η επιφανειακή αποθήκευση (ταμιευτήρες, κανάλια)

Συνοψίζοντας, το φαινόμενο της κυκλοφορίας του νερού σε μια λεκάνη απορροής μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$P = E + R + I$$

Όπου:

P = τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (precipitation)

E = η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration)

R = η επιφανειακή απορροή (runoff)

I = η κατείσδυση (infiltration).

4.4.1 Βροχόπτωση και Θερμοκρασία

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό, ο οποίος και εντοπίζεται στην Έδεσσα. Από τα στοιχεία του σταθμού (μετεωρολογικές καταγραφές 1982-2002) προκύπτει πως το μέσο ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων είναι 869,9 mm, η μέση μηνιαία βροχόπτωση κυμαίνεται από 22,9 mm τον Αύγουστο έως και 122,3 mm το Νοέμβριο, η μέση ετήσια θερμοκρασία διαμορφώνεται στους 14,1 °C με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία να κυμαίνεται από τους 3,5 °C τον Ιανουάριο έως και τους 24,6 °C τον Αύγουστο.

Πίνακας 4.3: Μέση θερμοκρασία σταθμού (°C).

Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Μ.Ο.
3,5	5,3	8,1	13,3	18,1	22,0	24,4	24,6	19,8	14,5	10,2	5,5	14,1



Σχήμα 4.11: Μέση ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας σταθμού Εδέσσης.

Πίνακας 4.4: Μέση ετήσια βροχόπτωση σταθμού (mm).

Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Σύνολο
78,4	56,1	101,0	83,9	76,5	45,4	41,5	22,9	49,2	90,9	122,3	101,8	869,9



Σχήμα 4.12: Μέση ετήσια διακύμανση κατακρημνισμάτων σταθμού Εδέσσης.

4.4.2 Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει ένα μέρος των κατακρημνισμάτων που μέσω των διαδικασιών της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thornthwaite – Mather (1957) (Σχέση 4.1), η οποία υπολογίζει τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm για ένα μήνα (διάρκειας 30 ημερών) με T τη μέση μηνιαία θερμοκρασία του ίδιου μήνα, ενώ οι συντελεστές I και a υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.2) και (4.3) αντίστοιχα.

$$E_{\Delta} = 1.6 * \left(10 * \frac{T}{I}\right)^a \quad (\text{σχέση 4.1})$$

Όπου:

E_{Δ} = η μέση μηνιαία τιμή της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής σε mm

T = η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C

a = ένας συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση (4.2)

$$a = 0.49239 + 1792 * 10^{-5} * I - 771 * I^2 + 675 * 10^{-9} * I^3 \quad (\text{σχέση 4.2})$$

Όπου:

I = ο ετήσιος θερμικός δείκτης ο οποίος δίνεται από το άθροισμα των 12 μηνιαίων θερμικών δεικτών μέσω της σχέσης (4.3)



$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (\text{σχέση 4.3})$$

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στο νερό που εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά όταν υπάρχουν οι ζητούμενες ποσότητες αυτού, ωστόσο καθώς κατά τη διάρκεια του χρόνου οι ποσότητες αυτές δεν καλύπτονται κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω ανομβρίας, υπολογίζεται και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_p . Χρησιμοποιώντας τον πίνακα υπολογισμού ο οποίος παρουσιάζεται στο παράρτημα (Πίνακας 9.1) η μέση τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή έρευνας υπολογίστηκε στα $E_r = 514,9 \text{ mm}$.

4.4.3 Κατείσδυση

Με βάση το γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Σχήμα 3.2), υπολογίστηκε ο συντελεστής κατείσδυσης, ανάλογα τον τύπο του γεωλογικού σχηματισμού. Η μεγαλύτερη έκταση της περιοχής έρευνας καλύπτεται από ασβεστολιθικά πετρώματα ($27,36 \text{ km}^2$), σχηματισμούς με μεγάλο συντελεστή περατότητας, ο οποίος βιβλιογραφικά κυμαίνεται μεταξύ 30 και 60% με μέσο όρο 45% (Βουδούρης, 2013), με τη τιμή αυτού να επηρεάζεται από το βαθμό καρστικοποίησης των διάφορων ασβεστολιθικών σχηματισμών. Ακολουθούν τα αλλούβια και οι σύγχρονες προσχώσεις ($17,16 \text{ km}^2$) με το συντελεστή κατείσδυσης να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25%, ενώ ο μέσος όρος διαμορφώνεται στο 18%. Τρίτοι στη σειρά είναι οι σχηματισμοί φλύσχη, φυλλιτών και μαργών ($17,04 \text{ km}^2$) με συντελεστή κατείσδυσης από 3 έως 10% και μέση τιμή 6%. Τέταρτοι σε έκταση είναι οι διάφοροι ηφαιστειακοί σχηματισμοί ($8,18 \text{ km}^2$), με συντελεστή κατείσδυσης μεταξύ 3 και 8 % με τη μέση τιμή του να διαμορφώνεται στο 6%. Συνέχεια έχουν οι οφιόλιθοι ($4,39 \text{ km}^2$) με συντελεστή κατείσδυσης από 4 έως 8 % και μέση τιμή το 6%. Οι γνευσιακοί και σχιστολιθικοί σχηματισμοί έπονται ($3,96 \text{ km}^2$) με συντελεστή κατείσδυσης 3 έως 7% και μέση τιμή 5%. Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας:

Πίνακας 4.5: χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή κατείδυσης ανά τύπο γεωλογικού σχηματισμού.

Συντελεστής κατείδυσης	%	Έκταση km ²	Έκταση %
Αλλούβια, σύγχρονες προσχώσεις	10 – 25 (18)	17,16	21,98
Ασβεστολιθικά πετρώματα	30 – 60 (45)	27,36	35,04
Φλύσχης - Φυλλίτες - Μάργες	3 – 10 (6)	17,04	21,82
Οφιόλιθοι	4-8 (6)	4,39	5,62
Ηφαιστειακά πετρώματα	3-8 (6)	8,18	10,47
Γνεύσιοι - Σχιστόλιθοι	3-7 (5)	3,96	5,07

Εφαρμόζοντας τη σχέση (4.4) με βάση τους συντελεστές κατείδυσης κάθε τύπου γεωλογικού σχηματισμού καθώς και την έκτασή τους προέκυψε πως ο μέσος συντελεστής κατείδυσης στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται στο 22% του ετήσιου όγκου των κατακρημνισμάτων:

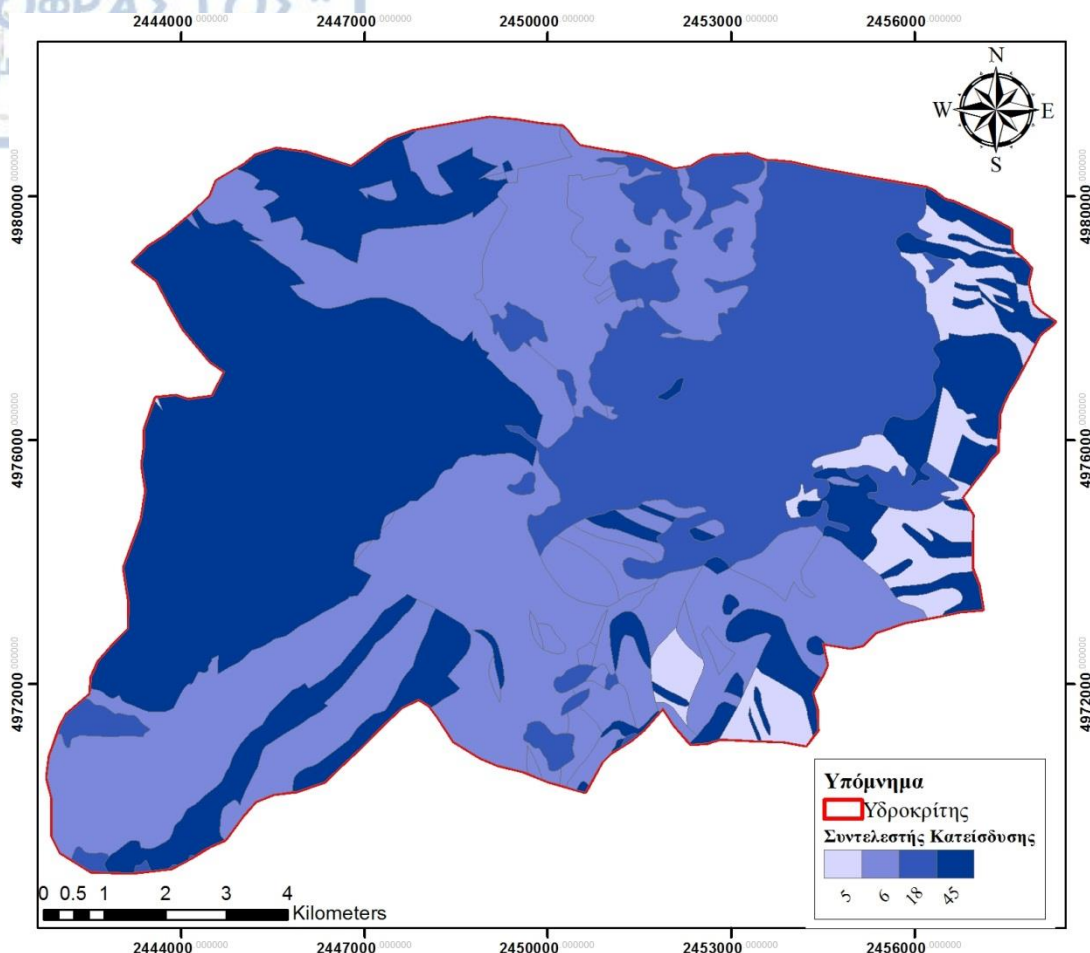
$$I = \frac{I_1 \cdot E_1 + I_2 \cdot E_2 + \dots + I_n \cdot E_n}{E_{ολ}} \quad (\text{σχέση 4.4})$$

Όπου:

I = ο μέσος συντελεστής κατείδυσης της περιοχής έρευνας

E₁, E₂, ..., E_n = το εμβαδόν της επιφάνειας του εκάστοτε γεωλογικού σχηματισμού (Σχ. 4.13).

E_{ολ} = το εμβαδόν της περιοχής έρευνας



Σχήμα 4.13: Χάρτης κατανομής συντελεστή κατείδουσης στην περιοχή έρευνας.

4.4.4 Υπολογισμός υδρολογικού ισοζυγίου

Ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου πραγματοποιήθηκε με βάση τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Εδέσσης (Πίνακες 4.1 και 4.2). Ο μέσος ετήσιος όρος κατακρημνισμάτων στην περιοχή έρευνας ανέρχεται σε $67,93 \times 10^6 \text{ m}^3$, με $40,21 \times 10^6 \text{ m}^3$ εξ' αυτών να αφαιρούνται μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Οι όγκοι αυτοί αντιστοιχούν σε 870 mm βροχόπτωσης και 515 mm εξατμισοδιαπνοής αντίστοιχα. Ο συντελεστής κατείδουσης στην περιοχή έρευνας διαμορφώθηκε σε 22% του ετήσιου όγκου των κατακρημνισμάτων, ήτοι $14,91 \times 10^6 \text{ m}^3$ και 191 mm αντίστοιχα. Τέλος, η απορροή κυμαίνεται στα $12,81 \times 10^6 \text{ m}^3$ ή 164 mm ανά έτος.

Πίνακας 4.6: μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής έρευνας.

Μονάδες μέτρησης	P	E	R	I	Q = I+R
mm	870	515	164	191	355
$\times 10^6 \text{ m}^3$	67,93	40,21	12,81	14,91	27,71
%	100	59	19	22	41

4.5 Πιεζομετρία

Οι πιεζομετρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την πηγή και τον τρόπο τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφορέων καθώς και για την κίνηση του υπόγειου νερού. Για τον καθορισμό των πιεζομετρικών περιοχών που επικρατούν στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης σε τρεις περιόδους από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Η πρώτη έγινε κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου (Απρίλιος-Μάιος) του 2017, η δεύτερη κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου του 2017 (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος) και η τρίτη και τελευταία κατά την υγρή περίοδο του 2018. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου παρατηρήθηκε αρτεσιανισμός σε μια γεώτρηση (ΜΠ1) εντός της λεκάνης της Φλαμουριάς, ενώ κατά τη ξηρή περίοδο η μεγαλύτερη στάθμη που μετρήθηκε ήταν στα 94,1 m (ΜΠ20) στον ορεινό όγκο ανατολικά της λεκάνης. Η διακύμανση της στάθμης στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνει μεγάλο εύρος τιμών, το οποίο οφείλεται στις υψομετρικές διαφορές των διαφόρων υδροφόρων συστημάτων. Στα σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9, αποτυπώνεται η χωρική κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου κατά τη διάρκεια των περιόδων μέτρησης, όπως καταγράφηκαν με το σταθμήμετρο του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Χαμηλότερα φορτία παρατηρήθηκαν εντός της λεκάνης καθώς και στο δυτικό ορεινό όγκο ενώ τα υψηλότερα φορτία καταγράφηκαν στον ανατολικό ορεινό όγκο. Για την καλύτερη κατανόηση της πιεζομετρίας της περιοχής, η ανάλυσή της θα διασπαστεί σε τμήματα.

Πίνακας 4.7: βάθη στάθμεων γεωτρήσεων και πιεζομετρικών φορτίου περιοχής έρευνας.

Ονομασία	Υψόμετρο (m)	Μάιος 2017		Σεπτέμβριος 2017		Μάιος 2018	
		Στάθμη (m)	Φορτίο (m)	Στάθμη (m)	Φορτίο (m)	Στάθμη (m)	Φορτίο (m)
ΜΠ1	164	0	164	2.2	161.8	0	164
ΜΠ2	173	-		-	-	-	-
ΜΠ3	183	-		-	-	-	-
ΜΠ4	188	8.25	179.75	12.5	175.5	7.7	180.3
ΜΠ5	211	28.31	182.69	34.3	176.7	-	-
ΜΠ6	197	13.36	183.64	15.13	181.87	-	-
ΜΠ7	177	10.51	166.49	14.2	162.8	10.2	166.8
ΜΠ8	187	15.25	171.75	10.3	176.7	14.86	172.14
ΜΠ9	170	5.46	164.54	8.36	161.64	4.93	165.07
ΜΠ10	401	-		-	-	-	-
ΜΠ11	373	-		-	-	-	-
ΜΠ12	476	-		-	-	-	-
ΜΠ13	224	-		-	-	-	-
ΜΠ14	221	38.63	182.37	44.35	176.65	36.7	184.3
ΜΠ15	211	26.61	184.39	30.2	180.8	-	-
ΜΠ16	196	24.35	171.65	29.9	166.1	-	-
ΜΠ17	262	-		-	-	-	-
ΜΠ18	120	-		8.82	111.18	8.9	111.1
ΜΠ19	182	-		-	-	-	-
ΜΠ20	184	91.36	92.64	94.1	89.9	85.2	98.8
ΜΠ21	177	-		-	-	-	-
ΜΠ22	192	49.28	142.72	49.62	142.38	47.8	144.2
ΜΠ24	453	-		-	-	-	-
ΜΠ25	394	-		-	-	-	-
ΜΠ26	389	-		-	-	-	-
ΜΠ27	293	-		-	-	-	-
ΜΠ28	347	22.43	324.57	40.77	306.23	31.1	315.9
ΜΠ29	308	-		-	-	-	-
ΜΠ30	245	27.13	217.87	31	214	-	-
ΜΠ31	265	-		-	-	-	-
ΜΠ32	238	5.93	232.07	-	-	-	-
ΜΠ33	233	-		-	-	-	0
ΜΠ34	251	-		-	-	-	-
ΜΠ35	500	11.26	488.74	17.01	482.99	6.65	493.35
ΜΠ36	591	18.23	572.77	17.8	573.2	14	577
ΜΠ37	562	-		-	-	-	-

4.5.1 Πεδιάδα της Φλαμουριάς

Οι στάθμες στη λεκάνη κυμαίνονται από 0 m στο ανατολικό της τμήμα, έως και 49,6 m στο βόρειο της τμήμα (Σχ. 4.14). Από τους πιεζομετρικούς χάρτες που συντάχθηκαν προκύπτει πως η ροή του υπόγειου νερού έχει διεύθυνση Δ – Α και τροφοδοτεί το Μέγα Ρέμα που αποτελεί και την κύρια δίοδο εκφόρτισης της λεκάνης.

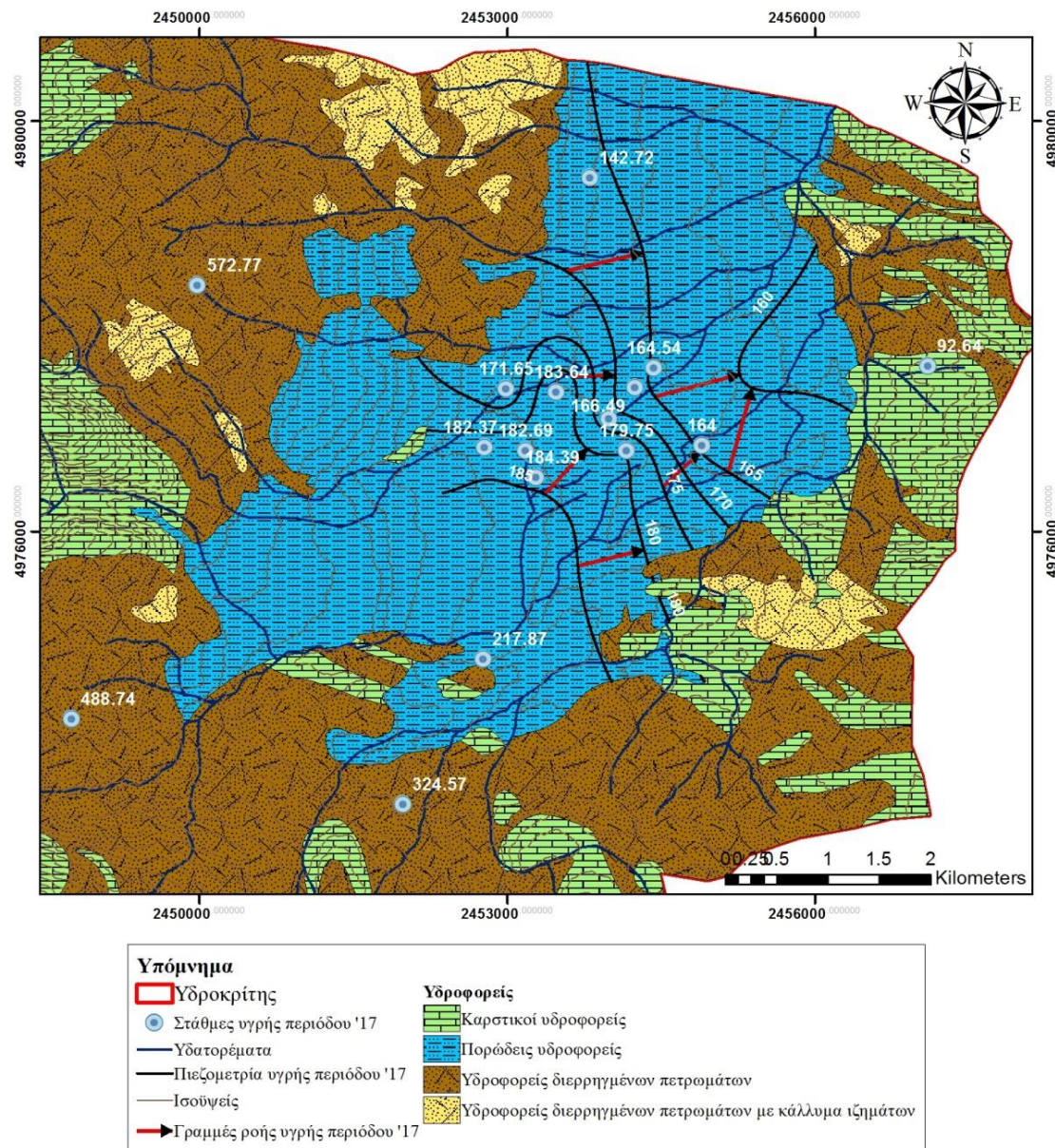
Από τη σύγκριση των χαρτών πιεζομετρίας δεν προκύπτει καμία μεταβολή στη ροή του υπόγειου νερού είτε σε εναλλαγές περιόδων, είτε σε εναλλαγές ετών, παρά τη μεγάλη μεταβολή της στάθμης από την υγρή στην ξηρή περίοδο που φτάνει έως και τα 19 m, ενώ κατά την εναλλαγή των ετών η στάθμη μεταβάλλεται περίπου κατά 1 m. Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως παρ' όλη τη ραγδαία αύξηση στην κατανάλωση που προκύπτει κατά τους θερινούς μήνες για την κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και κτηνοτροφικών αναγκών, τα υδατικά αποθέματα αναπληρώνονται επαρκώς κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου.

4.5.2 Ορεινό τμήμα

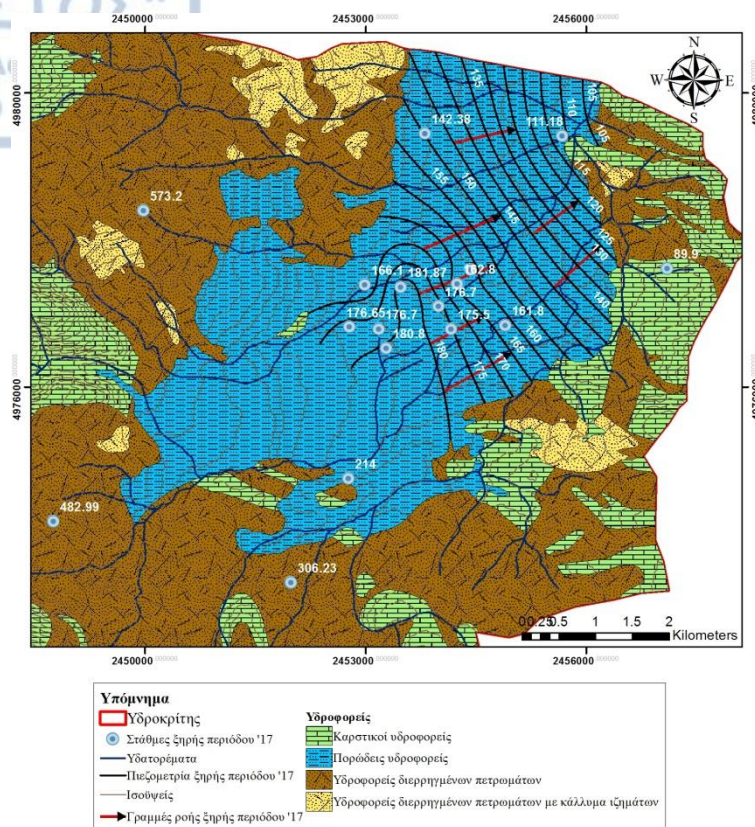
Οι στάθμες στο ορεινό τμήμα κυμαίνονται από 6 m στο δυτικό τμήμα έως και 94 m στο ανατολικό τμήμα. Αυτή η διαφορά προκύπτει από τους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους βρίσκονται ανορυγμένες οι γεωτρήσεις, καθώς όσες βρίσκονται σε διερρηγμένα πετρώματα χαρακτηρίζονται από υψηλή στάθμη έως και 20 m σε αντίθεση με αυτές που εντοπίζονται σε καρστικά πετρώματα και έχουν στάθμη 85 m. Παρόλο που κρίνεται δόκιμη η άποψη πως οι καρστικοί υδροφορείς τροφοδοτούν πλευρικά τους πορώδεις σχηματισμούς, δε μπορεί να ειπωθεί το ίδιο και για τους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων, καθώς τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου αυτής της διατριβής κρίνονται ως ανεπαρκή. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω μελέτη των υδροφόρων συστημάτων πέριξ της λεκάνης της Φλαμουριάς, ούτως ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη υδρογεωλογική σχέση των πορωδών υδροφορέων και των υδροφορέων διερρηγμένων πετρωμάτων.

Το ορεινό τμήμα της περιοχής, λόγω του αναγλύφου του, δεν προσφέρεται για αγροτικές δραστηριότητες με αποτέλεσμα πολύ μικρό ποσοστό του να καλύπτεται από καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Ως εκ τούτου, οι πιέσεις που δέχονται τα υδατικά αποθέματα της περιοχής από υδρευτικές, αρδευτικές και κτηνοτροφικές ανάγκες είναι πρακτικά μηδαμινές. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται μεταβολή στις στάθμες του τμήματος κατά την εναλλαγή των περιόδων, που φτάνει έως και τα 18 m σε περιοχές όπου εντοπίζονται καλλιέργειες και 3 m σε περιοχές χωρίς καλλιέργειες. Αντιθέτως, κατά τη μέτρηση των γεωτρήσεων την υγρή περίοδο του 2018 παρατηρήθηκε αύξηση της στάθμης έως και κατά 6 m σε σχέση με τις αντίστοιχες του 2017. Συνεπώς και σε αυτό το τμήμα της

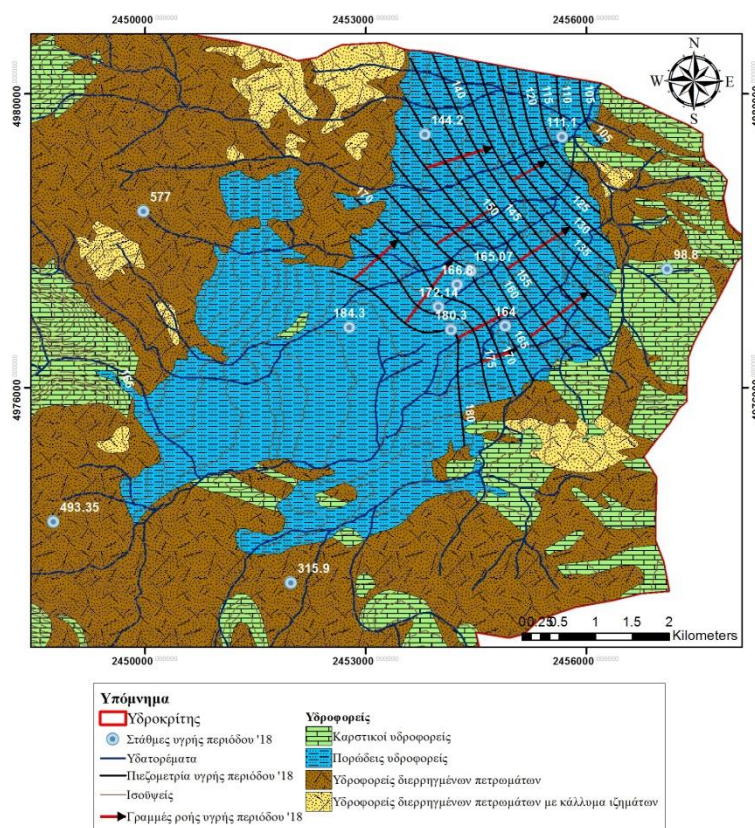
περιοχής μελέτης τα υδατικά αποθέματα αναπληρώνονται πλήρως κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου.



Σχήμα 4.14: Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου 2017.



Σχήμα 4.15: Πιεζομετρικός χάρτης ξηρής περιόδου 2017.



Σχήμα 4.16: Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου 2018.

4.6 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της υδρογεωλογικής έρευνας στη λεκάνη της Φλαμουριάς συνοψίζονται ως εξής:

- Στην περιοχή έρευνας απαντώνται τριών ειδών υδροφορείς: καρστικοί, πορώδεις και υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων.
- Κύρια πηγή ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής αποτελεί ο πορώδης υδροφορέας στο κέντρο της λεκάνης, με τον υδροφορέα διερρηγμένων πετρωμάτων να καλείται να υποστηρίξει τις αραιές καλλιεργήσιμες εκτάσεις που υπάρχουν στις γύρω λοφώδεις περιοχές.
- Στην περιοχή εντοπίζονται δυο φράγματα που καλούνται να καλύψουν την ανάγκη για αρδευτικό νερό κατά τους θερινούς μήνες.
- Η στάθμη του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 0 έως και 91 m σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το πιεζομετρικό φορτίο από +90 έως και +577 m από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Η κύρια διεύθυνση του νερού είναι Δυτικά – Ανατολικά, με τα υπόγεια ύδατα να συγκλίνουν προς το κύριο ρέμα της περιοχής (Μέγα Ρέμα).
- Οι σημαντικότερες μεταβολές στη στάθμη του υπόγειου νερού μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου παρατηρούνται στο νότιο τμήμα των υδροφορέων των διερρηγμένων πετρωμάτων.

5 Γεωφυσικές διασκοπήσεις

Λόγω της ραγδαίας αύξησης της χρήσης νερού για διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, κτηνοτροφία, άρδευση, ύδρευση) παρατηρείται μια σταδιακή μείωση στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων συστημάτων ανά τον κόσμο (Wada et al., 2010). Η έρευνα της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών είδους υδροφορέων μεταξύ τους αποτελεί ένα καίριο βήμα προς τη ορθολογική εκμετάλλευσή τους, ούτως ώστε η διαχείριση τους σε βάθος χρόνου να καταστεί βιώσιμη. Ένα πολύτιμο εργαλείο σε αυτήν την έρευνα αποτελούν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της υδρογεωλογικής έρευνας και χρησιμοποιούνται ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα για την εύρεση υδροφορέων, τον καθορισμό των γεωμετρικών και υδρογεωλογικών τους παραμέτρων, καθώς και των αποθεμάτων τους (Kosinski et al., 1981; Overmeeren et al., 1989; Mbonu et al., 1991; Sandberg et al., 1993; Yaramanci et al., 2002; Lashkaripour et al., 2003; Colangelo et al., 2006; Sinha et al., 2009; Batayneh et al., 2009; Alabi et al., 2010; Ibuot et al., 2013;). Μέσω των διαφόρων μεθόδων γεωφυσικών διασκοπήσεων μπορεί επίσης να ερευνηθεί η τρωτότητα των υδροφόρων συστημάτων (Casas et al., 2007), πιθανή θαλάσσια διείσδυση καθώς και η υφαλμύριση τους (Naijb et al., 2017).

Πιο εξειδικευμένα, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε περιοχές με διερρηγμένα πετρώματα για να εκτιμηθεί η γεωμετρία των ρωγμών και κατ' επέκταση να καθοριστεί η πιθανή υδροφορία (Olorunfemi et al., 1993), σε πορώδεις υδροφορείς για την εύρεση των υδραυλικών τους παραμέτρων (Kelly 1977) ενώ αποτελούν και σημαντικό εργαλείο για μελέτες διαχείρισης και προστασίας ρυπασμένων υδροφορέων (Mazac et al., 1987). Τέλος, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε καρστικούς υδροφορείς για την χαρτογράφηση του καρστ (El-Qady et al., 2005, Mitrofan et al., 2008, Abu – Shariah., 2009).

Στην περιοχή μελέτης οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εφαρμόστηκαν μέσω της μεθόδου των ηλεκτρικών τομογραφιών, στον πορώδη υδροφορέα της λεκάνης της Φλαμουριάς, για τον καθορισμό των υδροφόρων στρωμάτων καθώς και για την εύρεση υδροφόρων ρηγμάτων.

5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις αναφέρονται σε διάφορες μεθόδους οι οποίες εφαρμόζονται κατά περίπτωση και ως στόχο έχουν την μελέτη του εσωτερικού της γης βάσει της κατανομής των φυσικών ιδιοτήτων της. Μία από αυτές είναι η κατηγορία των γεωηλεκτρικών μεθόδων με τις οποίες η υπεδάφια έρευνα βασίζεται στον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Η πιο συνηθισμένη παράμετρος που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση, μέσω της οποίας μπορεί να καθοριστεί η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, ούτως ώστε να εξαχθεί μέσω της ανάλυσης των μετρήσεων η γεωηλεκτρική δομή μιας περιοχής. Ειδικότερα, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται ευρέως στην υδρογεωλογική έρευνα καθώς αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την μελέτη της στρωματογραφικής δομής σε ιζηματογενείς λεκάνες ενώ όταν εφαρμόζεται με δισδιάστατες διατάξεις μπορεί να αποδώσει με ικανοποιητική ακρίβεια την χαρτογράφηση ρηγμάτων και γενικότερα να συμβάλει αποτελεσματικά στον εντοπισμό υπόγειας υδροφορίας. Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελείται από μια διάταξη μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετούνται σε μια ευθεία ανά προκαθορισμένα διαστήματα μεταξύ τους. Το βάθος και η διακριτική ικανότητα της τομογραφίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το μήκος της και την απόσταση που έχουν τα ηλεκτρόδια μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόδια λειτουργούν είτε ως ηλεκτρόδια ρεύματος είτε ως ηλεκτρόδια δυναμικού, ανάλογα με την επιλογή της διάταξής τους και δε μετακινούνται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Είναι δυνατή η εφαρμογή πολλαπλών διατάξεων χωρίς να μετακινηθούν τα ηλεκτρόδια, γεγονός που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόστηκαν για την καταγραφή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης ήταν η διπόλου – διπόλου (dipole – dipole) και η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multigradient).

Μια άλλη παράμετρος που μετριέται μέσω των γεωφυσικών διασκοπήσεων είναι αυτή της φορτιστικότητας της Γης, η οποία μετριέται με τη μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης και εστιάζει στην ικανότητα του υπεδάφους να συσσωρεύει ηλεκτρικά φορτία κατά τη διάρκεια της διάδοσης ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό. Παρόμοια με τη μέθοδο ειδικού δυναμικού, έτσι και στην επαγόμενη πόλωση χρησιμοποιείται η διάταξη ηλεκτροδίων σε ευθεία για την πραγματοποίηση υπαίθριων

μετρήσεων. Μετά το πέρας των μετρήσεων, τα δεδομένα ερμηνεύονται μέσω της διαδικασίας της αντιστροφής, η οποία εξάγει την ειδική αντίσταση από τη φαινόμενη που κατέγραψαν οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να αντιστοιχεί στο πραγματικό, με το μικρότερο δυνατό σφάλμα (Φίκος 2010).

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τόσο η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όσο και η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, μέσω της εφαρμογής δισδιάστατων ηλεκτρικών τομογραφιών, οι οποίες και οδήγησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για:

- i. Τη λιθολογία της κορεσμένης και της ακόρεστης ζώνης
- ii. Τυχόν ζώνες διάρρηξης και ρηγμάτων
- iii. Τον καθορισμό των υδροφόρων στρωμάτων

Για τις μετρήσεις υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SyscalPro της εταιρίας Iris Instruments του τομέα Γεωφυσικής του τμήματος γεωλογίας του Α.Π.Θ., ενώ η επεξεργασία των δεδομένων των ηλεκτρικών τομογραφιών έγινε μέσω των προγραμμάτων Prosys II και DC_2DPRO.

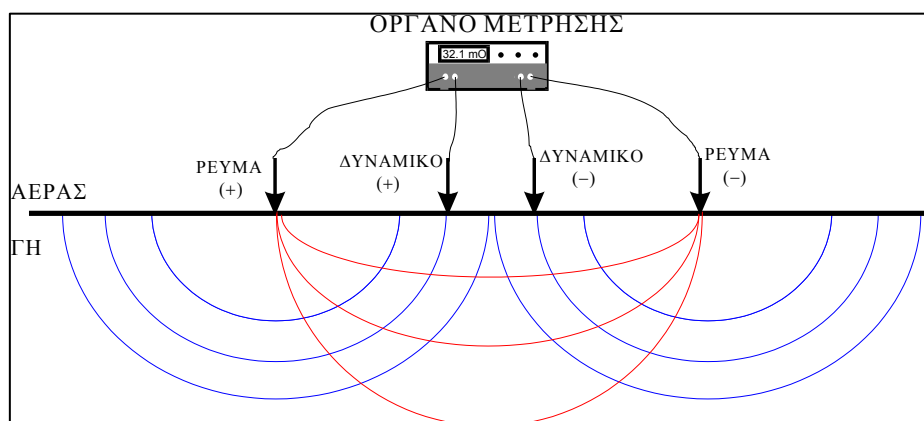
5.2 Γεωηλεκτρική διασκόπηση με τη μέθοδο της τομογραφίας

Με την εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων (Σχήμα 5.1). Σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων μετράται η πτώση τάσης που προκαλείται. Η ωμική αντίσταση που υπολογίζεται σαν το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία με τη σειρά της μας επιτρέπει τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην παρούσα έρευνα αξιοποιούνται οι διατάξεις τομογραφίας που μας επιτρέπουν τη μελέτη της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε δύο διαστάσεις (οριζόντια και κατακόρυφη).

Ταυτόχρονα, πραγματοποιούνται και μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης στις οποίες καταγράφεται ο χρόνος αποφόρτισης του υπεδάφους όταν υπάρχουν αργιλικά ή μεταλλικά ορυκτά που είναι σε θέση να φορτιστούν στην φάση της μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οποία προκαλείται διαφορά δυναμικού σε δύο ηλεκτρόδια. Η μέτρηση της επαγόμενης πόλωσης επιτρέπει την διάκριση αγωγίμων

σωμάτων σε πιθανά υδροφόρα (μηδενική φορτιστικότητα) ή αργιλικά/μεταλλοφορία (μετρήσιμη φορτιστικότητα).

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (HT) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.



Σχήμα 5.1 Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

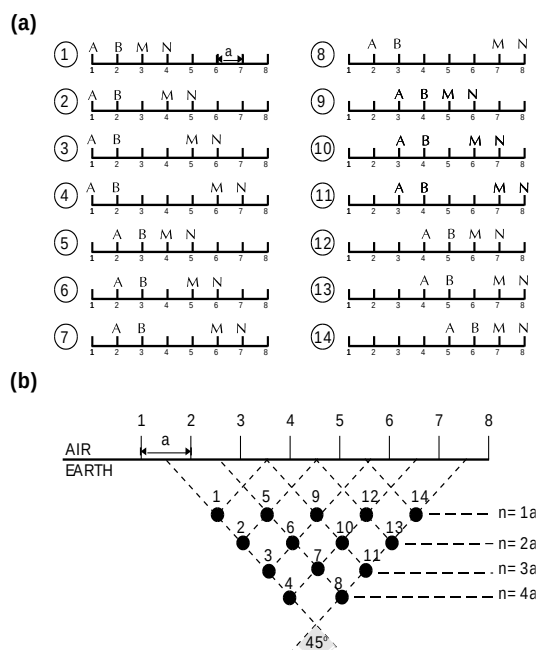
Πρόδρομος της HT είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (δίπολου-δίπολου, Wenner, πόλου-δίπολου). Η HT όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της HT είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων και γι’

αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών. Πολλά τέτοια εμπορικά συστήματα (τουλάχιστον έξι) έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν στην αγορά από το 1990 και μετά, γεγονός ενδεικτικό της ανάπτυξης της ΗΤ. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι χρήση αυτών των οργάνων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

5.2.1 Ερμηνεία με ψευδοτομή

Η ερμηνεία των μετρήσεων σε πρώτο στάδιο γίνεται με τη μέθοδο της ψευδοτομής. Αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των δίπολων ρεύματος και δυναμικού, η τιμή της διαφοράς δυναμικού που μετράται επηρεάζεται από βαθύτερα στρώματα. Έτσι, στην περίπτωση της διάταξης δίπολου-δίπολου κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποδίδεται, κατά προσέγγιση, στο σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45° από το μέσο της απόστασης AB και το μέσο της απόστασης MN. Η ερμηνεία όμως με τη μέθοδο της ψευδοτομής είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επισφαλής γιατί η εικόνα της κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 5.2. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου υλοποίησης των διαδοχικών μετρήσεων με τη μέθοδο διπόλου – διπόλου. Κάθε διαδοχική μέτρηση αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη θέση στο υπέδαφος και παράγεται η ψευδοτομή (κατά Barker R.D., 1992)

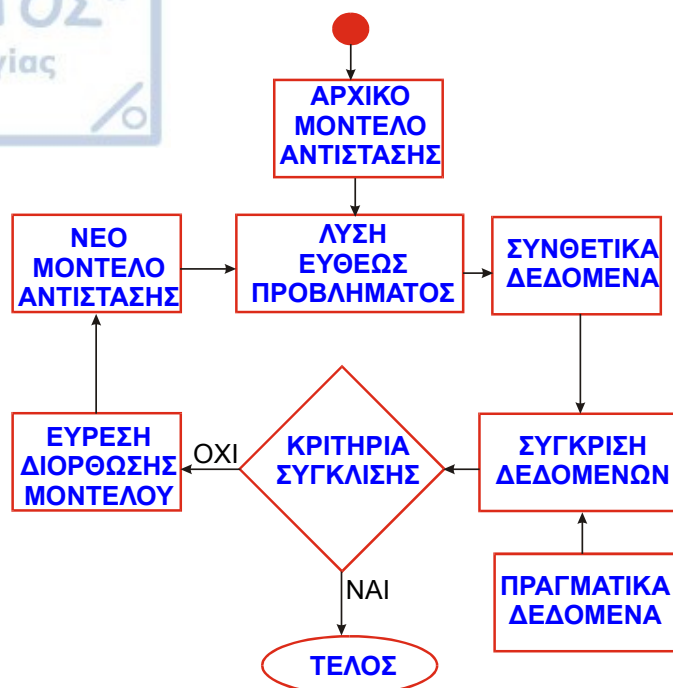
5.2.2 Ερμηνεία με αντιστροφή

Για αυτόν τον λόγο νέες τεχνικές ερμηνείας και επεξεργασίας έχουν προταθεί. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, (Barker 1992), μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp et al. 1992) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Shima 1990, Tsourlos et al. 1995).

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέος προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει δε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις.

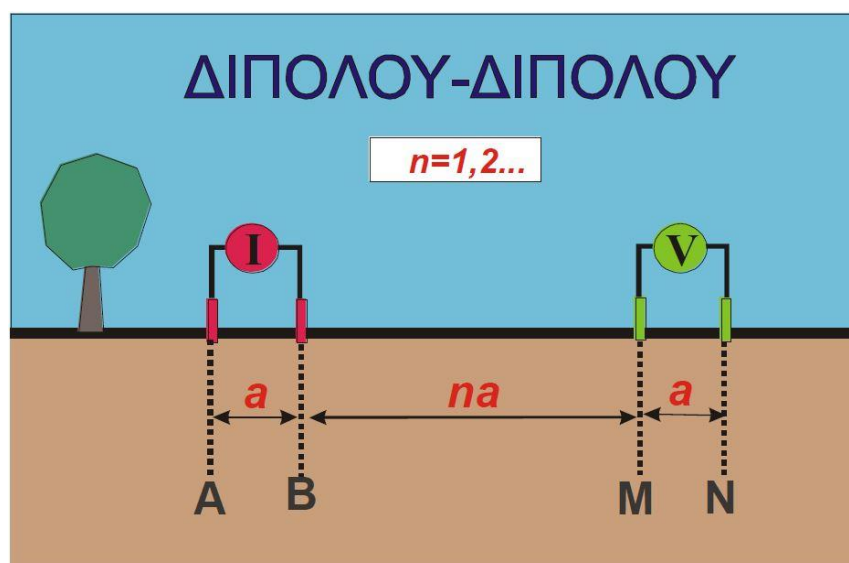
Στην γεωηλεκτρική μέθοδο λόγω της μη-γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία (Σχήμα 5.3). Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος dy μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων.



Σχήμα 5.3. Σχηματοποιημένη διαδικασία μη γραμμικής αντιστροφής. (μεταφρασμένο από Shima, H., 1990).

Κατά την λήψη των μετρήσεων η απόσταση, a , μεταξύ του δίπολου δυναμικού MN παραμένει σταθερή και η ίδια όδευση επαναλαμβάνεται αυξάνοντας κάθε φορά την απόσταση $n \cdot a$ μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος A και του ηλεκτροδίου δυναμικού M (ο n είναι ακέραιος). Η μέγιστη απόσταση $n_{\max} \cdot a$ εξαρτάται από τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δώσει η πηγή μας και από τη γεωλογία (γεωηλεκτρικές αντιστάσεις) της περιοχής σε συνάρτηση με το επιθυμητό βάθος έρευνας.



Σχήμα 5.4. Η διάταξη μέτρησης διπόλου διπόλου.

5.2.3 Επιλογή παραμέτρων μετρήσεων

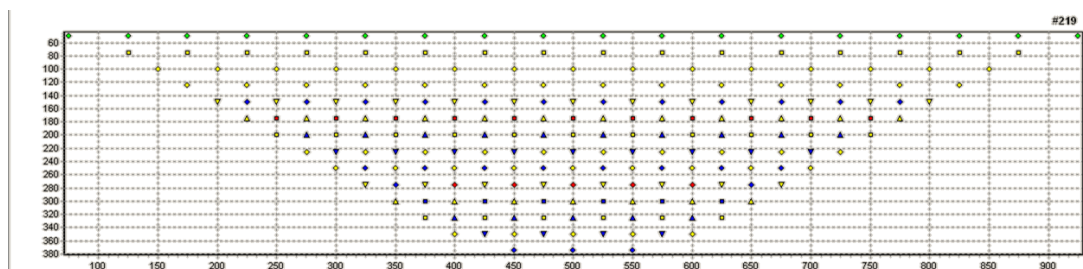
Ο σχεδιασμός των παραμέτρων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών καθορίστηκε από τις διαστάσεις του στόχου και από το επιθυμητό βάθος έρευνας. Συγκεκριμένα η διακριτική ικανότητα μπορεί να είναι τουλάχιστον των 50 μέτρων με δεδομένο ότι το βάθος διασκόπησης πρέπει να φτάνει τα 200 μέτρα. Βάσει των απαιτήσεων αυτών οι παράμετροι αποφασίστηκαν να είναι:

Πλήθος ηλεκτροδίων = 21

Απόσταση ηλεκτροδίων (α) = 50 μέτρα

Αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος – δίπολων μέτρησης δυναμικού ποικίλουν σε ($n \cdot \alpha$) ($2n \cdot \alpha$) και ($3n \cdot \alpha$) με τη μέγιστη τιμή του n ίση με 8.

Οι παραπάνω παράμετροι έχουν θεωρητικό αποτέλεσμα την κατασκευή μιας τραπεζοειδούς τομής γεωηλεκτρικών αντιστάσεων αποτελούμενη από 220 περίπου μετρήσεις, με συνολικό επιφανειακό μήκος 1000 μέτρα και μέγιστο βάθος διασκόπησης περίπου 200 μέτρα.



Σχήμα 5.5. Θεωρητική κατανομή των μετρήσεων βάσει του σχεδιασμού που επιλέχθηκε.

5.2.4 Γεωηλεκτρικές τομογραφίες

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκαν 3 ηλεκτρικές τομογραφίες στην Πεδιάδα της Φλαμουριάς όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2, με κωδικές ονομασίες ERT1, ERT2 και ERT3 αντίστοιχα. Οι τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν με το όργανο Syscal Pro της εταιρίας Iris Instruments που ανήκει στον τομέα Γεωφυσικής της Γεωλογικής σχολής του ΑΠΘ. Κάθε τομογραφία είχε μήκος 1000m με 21 ατσάλινα ηλεκτρόδια να τοποθετούνται και να συνδέονται ανά 50m. Πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις με διάταξη διπόλου – διπόλου (dipole – dipole), 3 μετρήσεις με διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multigradient) ενώ πάρθηκε και μια μέτρηση επαγόμενης πόλωσης (IP) στην τομογραφία ERT1. Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DC2DPRO (Kim, 2009) μέσω του οποίου

εξάχθηκαν οι δισδιάστατες εικόνες. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 4-7% συνεπώς οι μετρήσεις κρίνονται ως αντιπροσωπευτικές για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5.6: θέση των ηλεκτρικών τομογραφιών.

➤ Τομογραφία ERT1

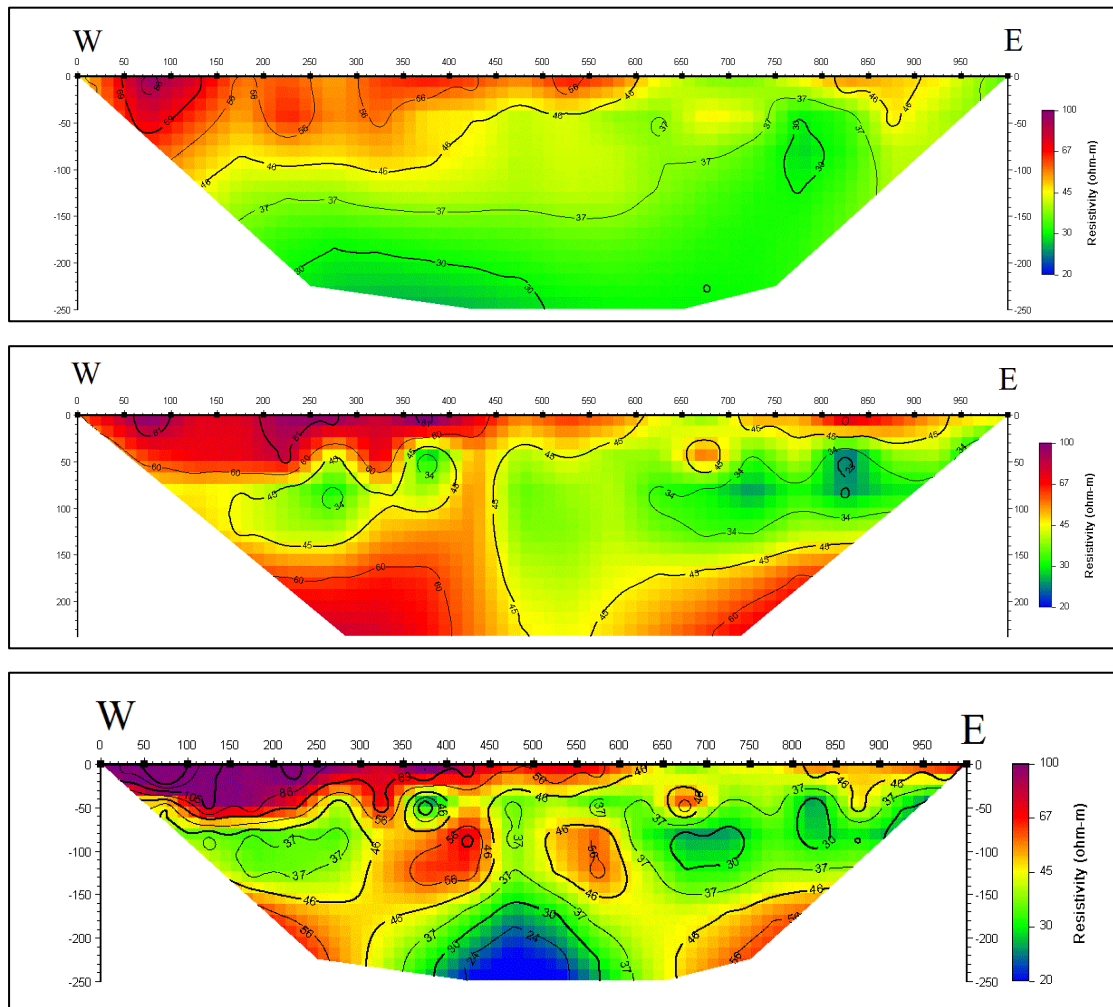
Η τομογραφία ERT1 πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη της Φλαμουριάς, δυτικά του οικισμού της Πλατάνης, με διεύθυνση δυτικά – ανατολικά και μήκος 1000 μέτρων, και απέδωσε την γεωηλεκτρική δομή μέχρι το βάθος των 250 μέτρων. Από τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην ERT1 παρουσιάζονται οι εικόνες που προέκυψαν από την αντιστροφή των διατάξεων dipole – dipole, multigradient καθώς και του συνόλου των δεδομένων και από τις δύο διατάξεις, ενώ αναλύονται περαιτέρω η μίξη των διατάξεων dipole – dipole και multigradient και η IP ως οι πιο αντιπροσωπευτικές.

Στη μικτή εικόνα παρατηρούνται δυο διαφορετικοί σχηματισμοί κοντά στην επιφάνεια, με το βάθος τους να φτάνει τα 50 m. Ο δυτικός αποτελείται από πολύ αδρομερή υλικά, όπως επιφανειακά κορήματα (κροκάλες, αμμοχάλικο), ενώ ο ανατολικός έχει περισσότερη αργιλική σύσταση. Ένας πρώτος αγωγίμος σχηματισμός (25 – 37 Ohm-m) με πάχος περί τα 100 m και βάθος από τα 65 m έως και τα 150 m, ο οποίος εντοπίζεται σχεδόν καθ' όλο το μήκος της τομογραφίας με εξαίρεση το σημείο 310 – 450 m από την έναρξη της τομογραφίας στο οποίο εντοπίζονται συγκεντρώσεις υψηλών αντιστάσεων (46 – 66 Ohm-m) οι οποίες οφείλονται στο ρήγμα που τέμνει τον αγωγίμο σχηματισμό. Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί έναν πορώδη υδροφορέα της λεκάνης της Φλαμουριάς ο οποίος εντοπίζεται εντός τοφικών ενστρώσεων. Ο

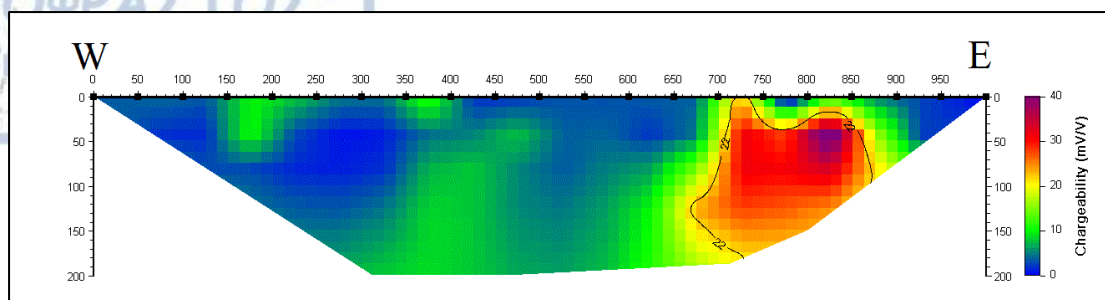
δεύτερος αγώγιμος σχηματισμός (20 – 37 Ohm-m) εντοπίζεται σε βάθος 150 m με άγνωστο πάχος σε απόσταση 350 – 600 μέτρων από την έναρξη της τομογραφίας.

Πρόκειται για έναν άλλον πορώδη υδροφορέα που εντοπίζεται μέσα σε σχηματισμό κροκαλών ο οποίος βρίσκεται σε εναλλαγή με αργιλικούς σχηματισμούς.

Στην εικόνα της IP εντοπίστηκε σφάλμα στο ανατολικό τμήμα της τομογραφίας και ειδικότερα μετά τα 650 m καθώς η μέτρηση επηρεάστηκε από υπόγειο ηλεκτρικό αγωγό που συνέδεε παρακείμενη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με το δίκτυο της ΔΕΗ. Στο υπόλοιπο τμήμα της τομογραφίας, επιβεβαιώνεται η υδροφορία στα 450 – 500 μέτρα σε αγώγιμο σχηματισμό (28 – 36 Ohm-m) ο οποίος εντοπίζεται σε βάθος 150 m. Μάλιστα, η χαμηλή αντίσταση υποδηλώνει παρουσία αργιλικών υλικών, κάτι που επιβεβαιώνει την ανάπτυξη υδροφόρου στρώματος εντός των κροκαλών σε εναλλαγές με αργίλους.



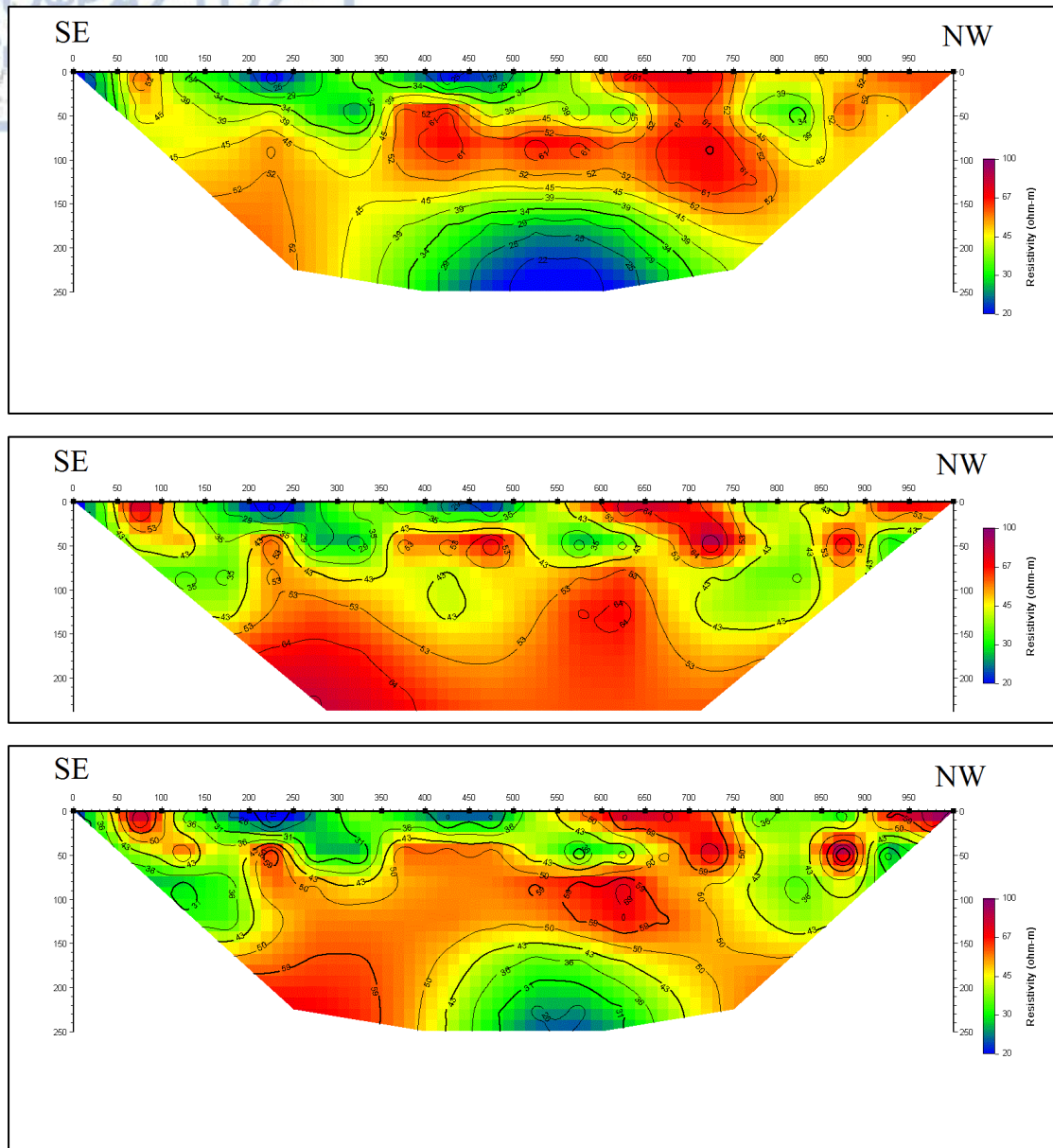
Σχήμα 5.7: Γεωηλεκτρική δομή της τομής ERT1, όπως προέκυψε από τη διαδικασία της αντιστροφής (Επάνω διάταξη διπόλου - διπόλου, στη μέση διάταξη πολλαπλής βαθμίδας και κάτω συμπερασματική εικόνα από τη μίξη των δυο διατάξεων).



Σχήμα 5.8: Κατανομή φορτιστικότητας της τομής ERT1 όπως προέκυψε από την διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων της μέτρησης της επαγόμενης πόλωσης.

➤ Τομογραφία ERT2

Η τομογραφία ERT2 πραγματοποιήθηκε κάθετα στην ERT1 και με διεύθυνση νοτιοανατολικά – βορειοδυτικά και μήκος 1000 μέτρων, φτάνοντας σε βάθος τα 250 μέτρα. Από τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην ERT2 παρουσιάζονται οι εικόνες dipole – dipole και multigradient ενώ ερμηνεύεται περαιτέρω το αποτέλεσμα μίξης τους ως πιο αντιπροσωπευτική των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Στη μικτή εικόνα παρατηρείται ένας πρώτος αγώγιμος σχηματισμός (20 – 36 Ohm-m) ο οποίος βρίσκεται επιφανειακά σε απόσταση 115 με 550 m από την έναρξη της τομογραφίας, ενώ ένας δεύτερος αγώγιμος σχηματισμός (26 – 36 Ohm-m) εντοπίζεται σε βάθος 160 m σε απόσταση 450 – 650 m από την αρχή της τομογραφίας. Ο πρώτος σχηματισμός πρόκειται για ελεύθερο πορώδη υδροφορέα που αναπτύσσεται σε περιβάλλον από κροκάλες, ενώ ο δεύτερος πρόκειται για τον καρστικό υδροφορέα εντός του ασβεστολίθου.

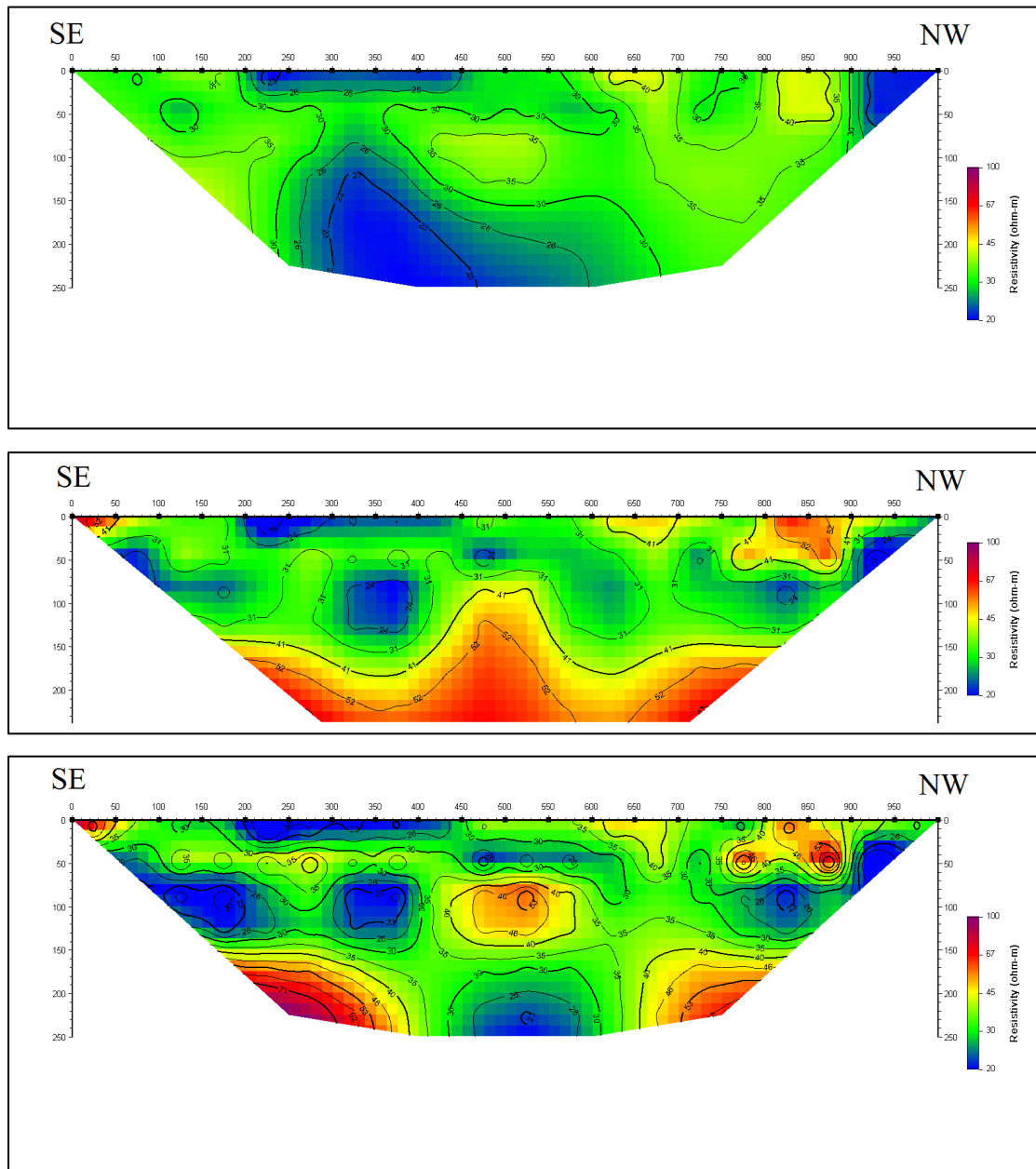


Σχήμα 5.9: Γεωηλεκτρική δομή της τομής ERT2, όπως προέκυψε από τη διαδικασία της αντιστροφής (Επάνω διάταξη διπόλου - διπόλου, στη μέση διάταξη πολλαπλής βαθμίδας και κάτω συμπερασματική εικόνα από τη μίξη των δυο διατάξεων).

➤ Τομογραφία ERT3

Η τομογραφία ERT3 πραγματοποιήθηκε κάθετα στην ERT1 και με διεύθυνση νοτιοανατολικά – βορειοδυτικά και μήκος 1000 μέτρων, φτάνοντας σε βάθος τα 250 μέτρα. Από τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην ERT3 παρουσιάζονται οι εικόνες dipole – dipole και multigradient ενώ ερμηνεύεται περαιτέρω το αποτέλεσμα μίξης τους ως πιο αντιπροσωπευτική των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Στη μικτή εικόνα παρατηρούνται πληθώρα αγωγίμων σχηματισμών (20 – 36 Ohm-m) οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ως εξής: ένας πρώτος επιφανειακός αγωγίμος σχηματισμός

μεταξύ 200 και 450 m, ο οποίος πρόκειται για πορώδη υδροφορέα, ελεύθερο, που εντοπίζεται εντός κροκαλών, βάθους έως και 30 m. Ένας δεύτερος αγωγίμος σχηματισμός που εκτείνεται καθ' όλη την έκταση της τομής σε βάθος 40 έως και 130 m και πρόκειται για πορώδη υδροφορέα που βρίσκεται υπό πίεση και εντοπίζεται εντός εναλλαγών άμμου και χαλικιών. Τέλος, ένας τρίτος αγωγίμος σχηματισμός εντοπίζεται σε βάθος 170 m και πρόκειται για καρστικό υδροφορέα, που βρίσκεται υπό πίεση και εντοπίζεται εντός του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου.



Σχήμα 5.10: Γεωηλεκτρική δομή της τομής ERT3, όπως προέκυψε από τη διαδικασία της αντιστροφής (Επάνω διάταξη διπόλου - διπόλου, στη μέση διάταξη πολλαπλής βαθμίδας και κάτω συμπερασματική εικόνα από τη μίξη των δυο διατάξεων).

5.3 Συμπεράσματα

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο στην υδρογεωλογική έρευνα καθώς με χαμηλό κόστος προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη δομή του υπεδάφους και την παρουσία υπόγειου νερού. Ωστόσο κρίνεται σκόπιμη η προσεκτική ανάλυση των δεδομένων καθώς επηρεάζονται εύκολα από εξωτερικούς θορύβους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη γεωφυσική έρευνα στη λεκάνη της Φλαμουριάς συνοψίζονται ως εξής:

- Εντοπίστηκε ζώνη διάρρηξης που τέμνει το πορώδες υδροφόρο στρώμα.
- Εντοπίστηκε αλληλουχία υδροφόρων στρωμάτων που αναπτύσσονται σε εναλλαγές κροκάλων, αργίλων και άμμων, ενώ καταγράφηκε και ο καρστικός υδροφορέας που εντοπίστηκε βαθύτερα.

6 Υδροχημεία

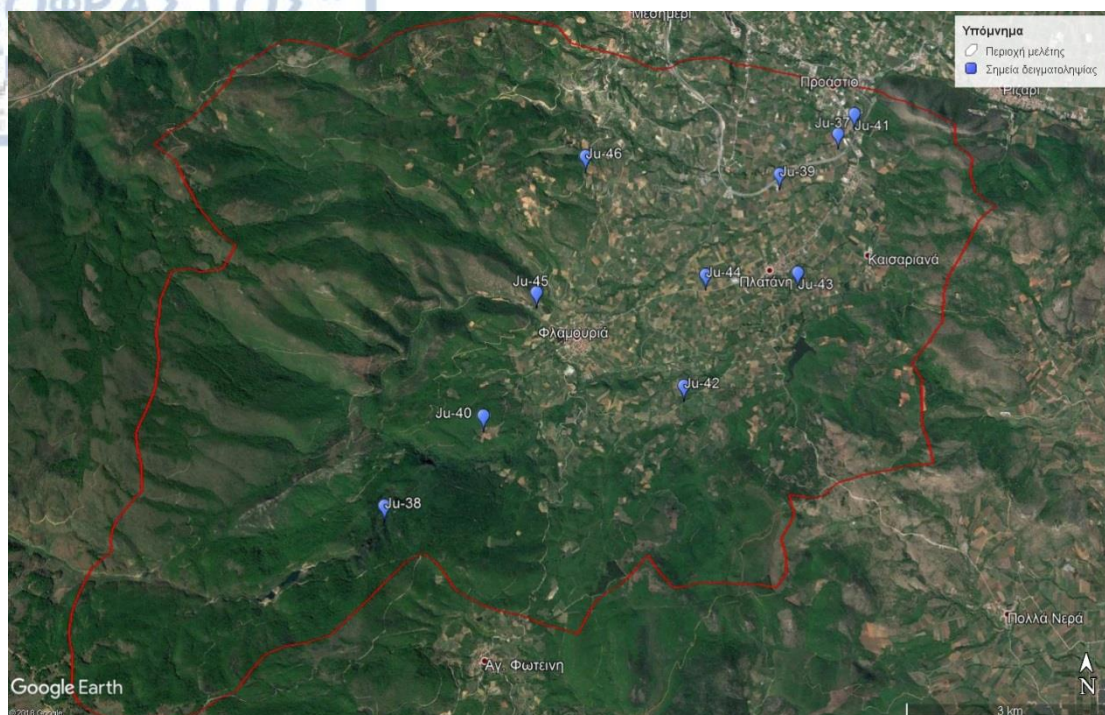
6.1 Εισαγωγή

Ο ποιοτικός έλεγχος των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων διαδραματίζει ζωτικό ρόλο για τη βέλτιστη προστασία και διαχείριση τους. Οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί (πυριγενείς, μεταμορφωμένοι, ιζηματογενείς) μέσω των οποίων διέρχονται τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, καθώς και ο χρόνος παραμονής τους σε αυτά, διαμορφώνουν τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, οι οποίες και πρέπει να ελέγχονται. Παρ' όλα αυτά, η δυναμική φύση της ανθρώπινης παρουσίας σε μια περιοχή και η ευκολία με την οποία τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα επηρεάζονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες καθιστούν υποχρεωτική τη συνεχή και τακτική μελέτη των παραμέτρων των υδάτων ως προς την καταλληλότητα τους σε διάφορες χρήσεις (ύδρευση, άρδευση, βιομηχανία). Με βάση το σκεπτικό αυτό πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία υπόγειου και επιφανειακού νερού την περίοδο του Ιουνίου 2017 σε σύνολο 10 δειγμάτων νερού (Σχήμα 5.1).

Στη συνέχεια αναλύθηκαν τα κύρια ιόντα στο εργαστήριο αναλυτικής χημείας του τμήματος χημικών μηχανικών του Α.Π.Θ.. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν μέσω του προγράμματος Aquachem όπου και έγινε ο έλεγχος σφάλματος ισοζυγίου ιόντων (σχέση 5.1).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC $\mu\text{S}/\text{cm}$), η θερμοκρασία (T $^{\circ}\text{C}$) και το pH μετρήθηκαν επιτόπου με φορητό αγωγιμόμετρο, ενώ όλες οι αναλύσεις ακολούθησαν τις πρότυπες μεθόδους χημικής ανάλυσης (Lenore et al., 1998).

$$\text{Σφάλμα ισοζυγίου} = \frac{\Sigma \text{κατιόντων} - \Sigma \text{ανιόντων}}{\Sigma \text{κατιόντων} + \Sigma \text{ανιόντων}} \% \text{ (σχέση 5.1)}$$



Σχήμα 6.1: θέσεις δειγματοληψίας περιόδου Ιουνίου 2017.

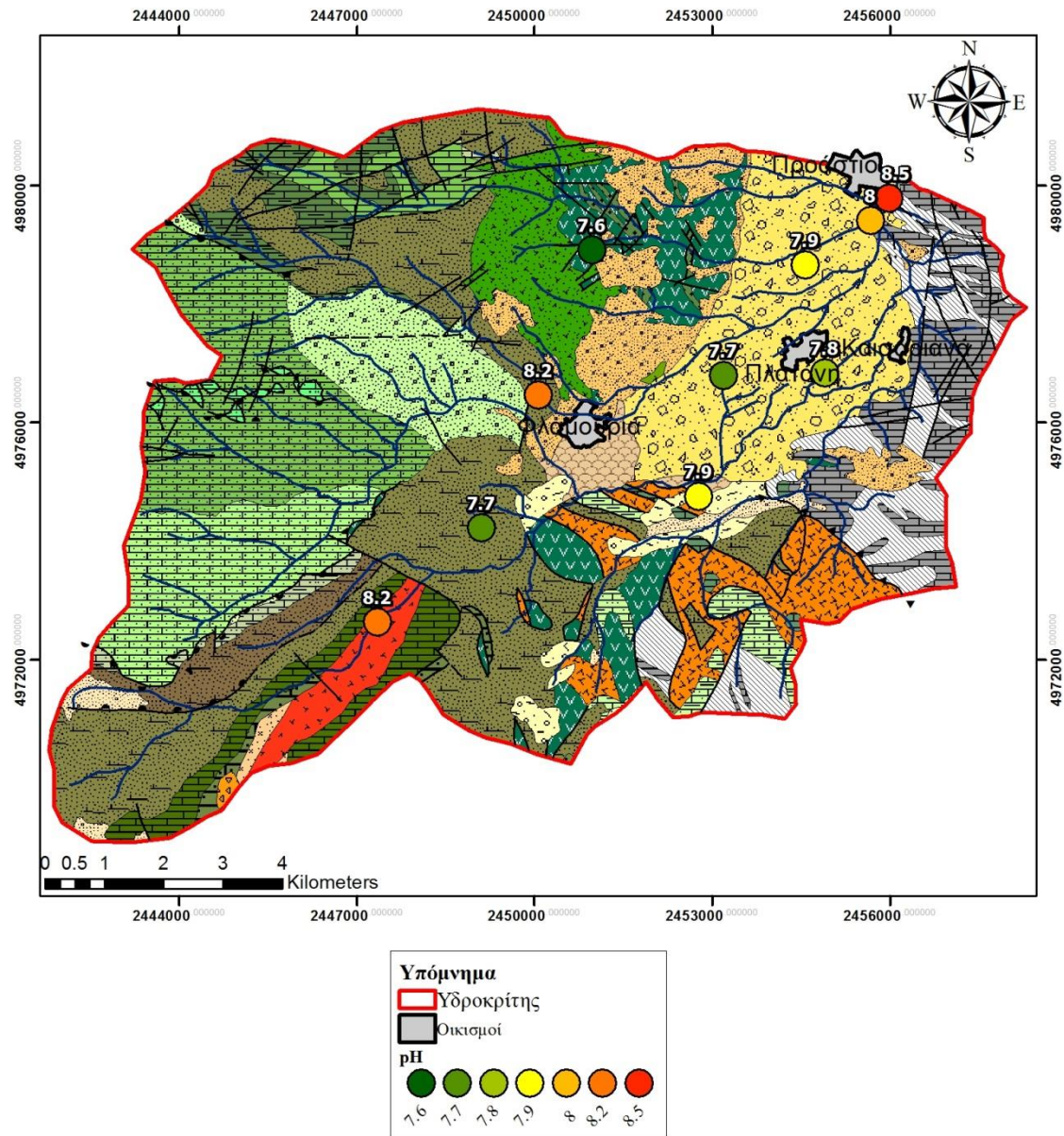
Πίνακας 6.1: αποτελέσματα χημικών αναλύσεων κυρίων ιόντων περιόδου Ιουνίου 2017.

α/α	pH	EC	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Na	K	Ca	Mg	NH ₄ ⁺
	-	μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
ΜΠ18	8.0	566	329	ND	5	16	0.02	32	0.02	6	2	70	30	0.2
ΜΠΠ2	8.2	363	226	ND	ND	13	0.025	ND	ND	2	0.3	45	19	0.15
ΜΠ40	7.9	585	372	ND	3	11	ND	9	0.08	8	2	70	31	0.25
ΜΠΠ1	7.7	432	268	ND	ND	13	ND	ND	0.04	3	1	78	6	0.25
ΜΠ41	8.5	526	287	12	5	31	0.09	10	0.2	5	2	67	25	0.4
ΜΠ30	7.9	709	433	ND	6	36	0.23	ND	0.02	7	0	79	44	ND
ΜΠ1	7.8	621	387	ND	7	11	ND	23	0.05	9	2	70	37	ND
ΜΠ5	7.7	716	329	ND	8	56	ND	53	ND	4	1	5	27	0.1
ΜΠ11	8.2	458	281	12	ND	8	ND	4	ND	2	1	55	24	0.2
ΜΠ24	7.6	755	451	ND	4	40	ND	ND	ND	4	3	4	22	ND

6.2 Ενεργός οξύτητα (pH)

Το pH είναι ο πιο σύνηθες τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων του υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα. Ανάλογα με την τιμή που παίρνει, κατηγοριοποιείται και το υδατικό διάλυμα ως προς την οξύτητά του. Έτσι, για pH <7 το διάλυμα κρίνεται ως όξινο, για pH=7 ως ουδέτερο, ενώ για pH>7 ως βασικό. Από την τιμή του pH μπορεί να γίνει κατανοητός το είδος των πετρωμάτων που φιλοξενούν το νερό, για παράδειγμα όξινα pH καταγράφονται σε υδροφορείς που αναπτύσσονται εντός ασβεστολίθων και αλλουβιακών αποθέσεων, ενώ βασικά σε υδροφορείς

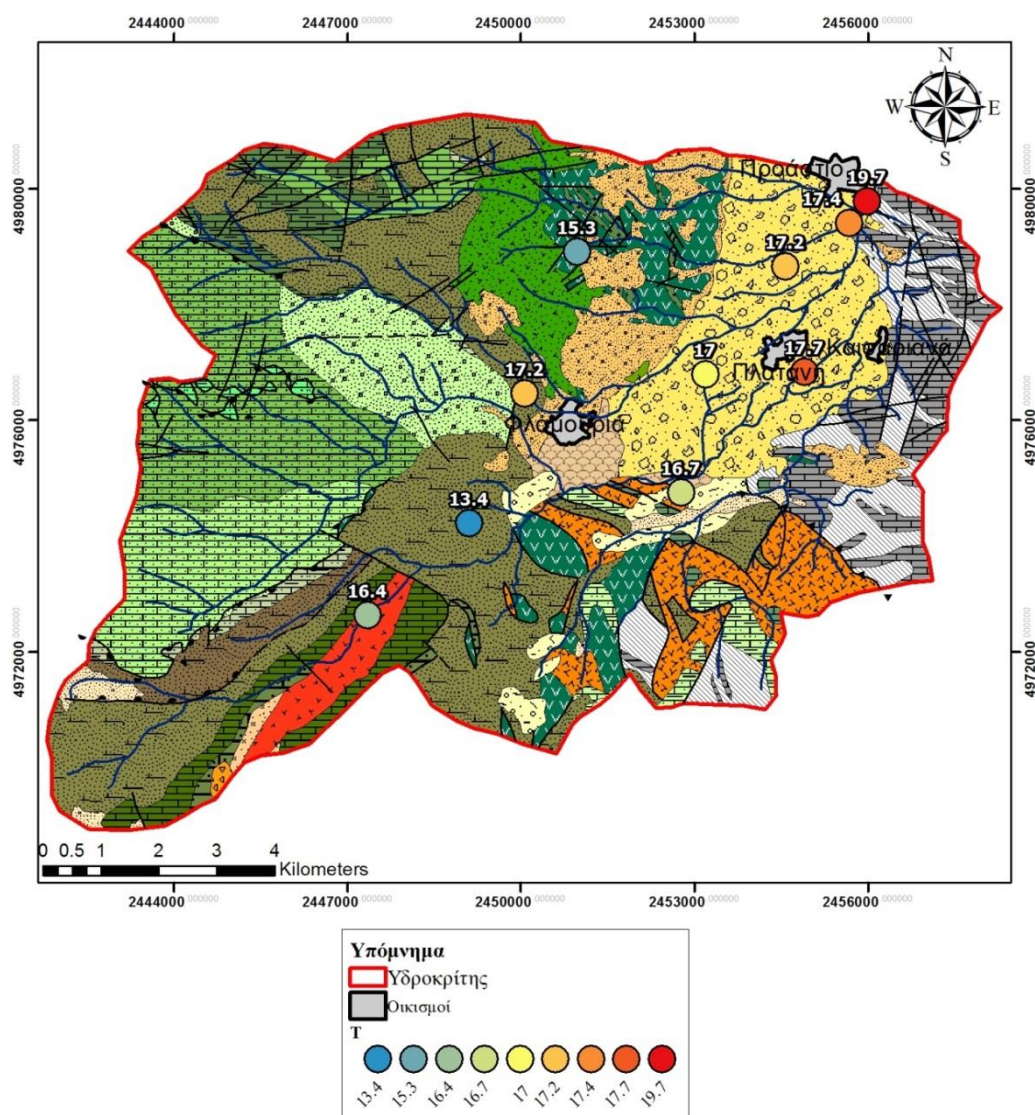
διεργηγμένων πετρωμάτων εντός ασβεστολίθων. Στην περιοχή μελέτης καταγράφηκαν τιμές pH από 7.6 έως και 8.5 pH με τη μέση τιμή pH να διαμορφώνεται στο 7.9 χαρακτηρίζοντας τα νερά της περιοχής ως βασικά. Η χωρική κατανομή του pH ακολουθεί στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Χωρική κατανομή της τιμής του pH την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.3 Θερμοκρασία (T)

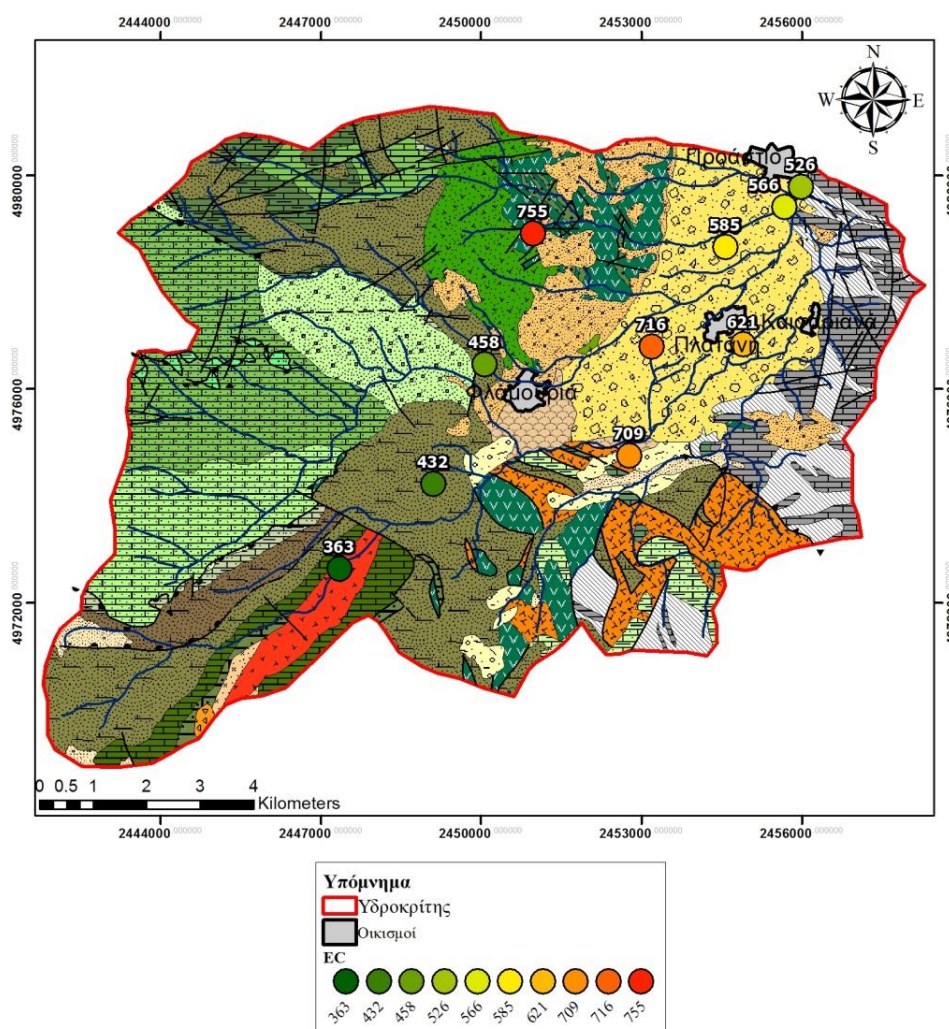
Η συνηθισμένη θερμοκρασία του υπόγειου νερού κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 °C (Σούλιος 2006) ανάλογα με το βάθος του υδροφορέα, ενώ επηρεάζεται και σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία των πετρωμάτων που διαπερνά (Βουδούρης 2009), με εξαίρεση τις περιοχές που εμφανίζουν γεωθερμία. Στην περιοχή έρευνας οι τιμές της θερμοκρασίας κυμάνθηκαν από 13.4 °C έως και 19.7 °C με μέση τιμή τους 16.8 °C, δηλαδή δεν εντοπίστηκε κάποιο υποψήφιο γεωθερμικό πεδίο. Οι χαμηλότερες τιμές εντοπίστηκαν σε πηγές στους ορεινούς όγκους στα νοτιοδυτικά της λεκάνης και σε γεώτρηση στα βορειοδυτικά της, ενώ οι μεγαλύτερες εντοπίστηκαν εντός της λεκάνης της Φλαμουριάς. Η χωρική κατανομή της θερμοκρασίας ακολουθεί στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Χωρική κατανομή της Θερμοκρασίας την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.4 Συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

Ο συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) αναφέρεται στην ιδιότητα του νερού να μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα και διαμορφώνεται από το σύνολο των συνδυασμένων αλάτων (TDS) σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία (T). Αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορούν να υποδηλώνουν μεγάλες ποσότητες διαλυμένων στερεών στο νερό, δηλαδή το νερό να επηρεάζεται από κάποιον ρυπαντή, ή υψηλή θερμοκρασία. Ανάλογα την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορούμε να κρίνουμε την ποσιμότητα ενός δείγματος νερού. Για τιμές $EC < 50 \mu S/cm$ το νερό χαρακτηρίζεται ως βρόχινο, για τιμές $50 - 2500 \mu S/cm$ ως αποδεκτό για πόση, για τιμές $2500 - 3000 \mu S/cm$ ως αποδεκτό για άρδευση, για τιμές $>3000 \mu S/cm$ θεωρείται ακατάλληλο για άρδευση, ενώ για τιμές $>30000 \mu S/cm$ το νερό θεωρείται θαλασσινό.

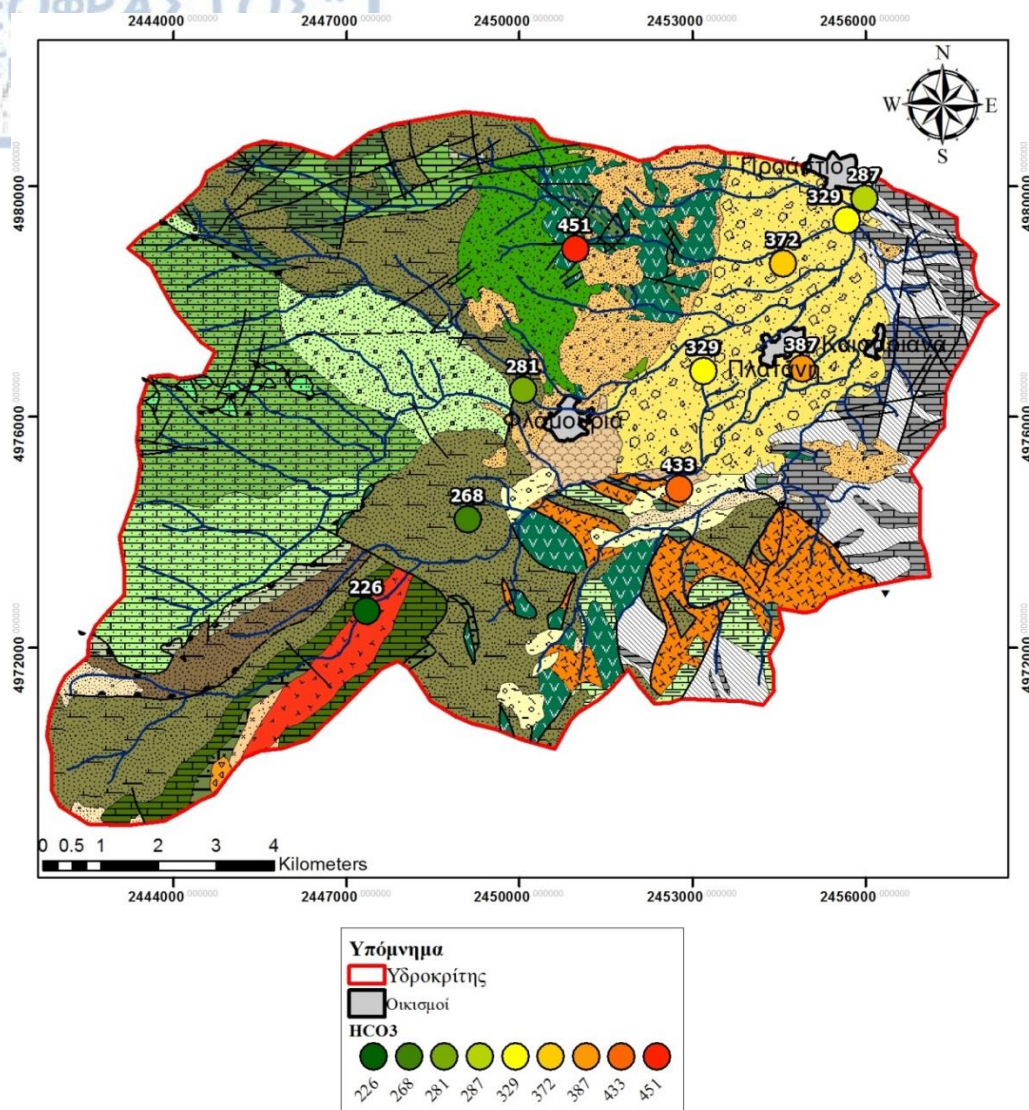


Σχήμα 6.4: Χωρική κατανομή της Ηλεκτρικής αγωγιμότητας την περίοδο Ιουνίου 2017.

Στην περιοχή μελέτης, οι τιμές του συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας κυμαίνονται από 363 έως και 755 $\mu\text{S}/\text{cm}$, με μέση τιμή τα 573 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται εντός των πορώδων υδροφορέων της λεκάνης της Φλαμουριάς όπου παρατηρείται και εντονότερη γεωργική δραστηριότητα, ενώ οι χαμηλότερες στους υδροφορείς διερχομένων πετρωμάτων στα νοτιοδυτικά της λεκάνης. Η χωρική κατανομή του συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ακολουθεί στο Σχήμα 6.4.

6.5 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-)

Τα όξινα ανθρακικά είναι τα επικρατέστερα ανιόντα στα υπόγεια νερά. Η προέλευση τους μπορεί να είναι είτε από την απελευθέρωση CO_2 από την αποσύνθεση οργανικών υλικών υπέδαφος, είτε από το υπάρχον CO_2 της ατμόσφαιρας, είτε από τη διάλυση ανθρακικών πετρωμάτων στο νερό (CaCO_3 , MgCO_3). Στην περιοχή έρευνας μετρήθηκαν συγκεντρώσεις όξινων ανθρακικών από 226 έως και 451 mg/l , με τη μέση τιμή να διαμορφώνεται στα 336 mg/l . Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις καταμετρήθηκαν νοτιοανατολικά και βορειοδυτικά της λεκάνης όπου και απαντώνται ανθρακικοί σχηματισμοί. Η χωρική κατανομή των όξινων ανθρακικών ακολουθεί στο Σχήμα 6.5.

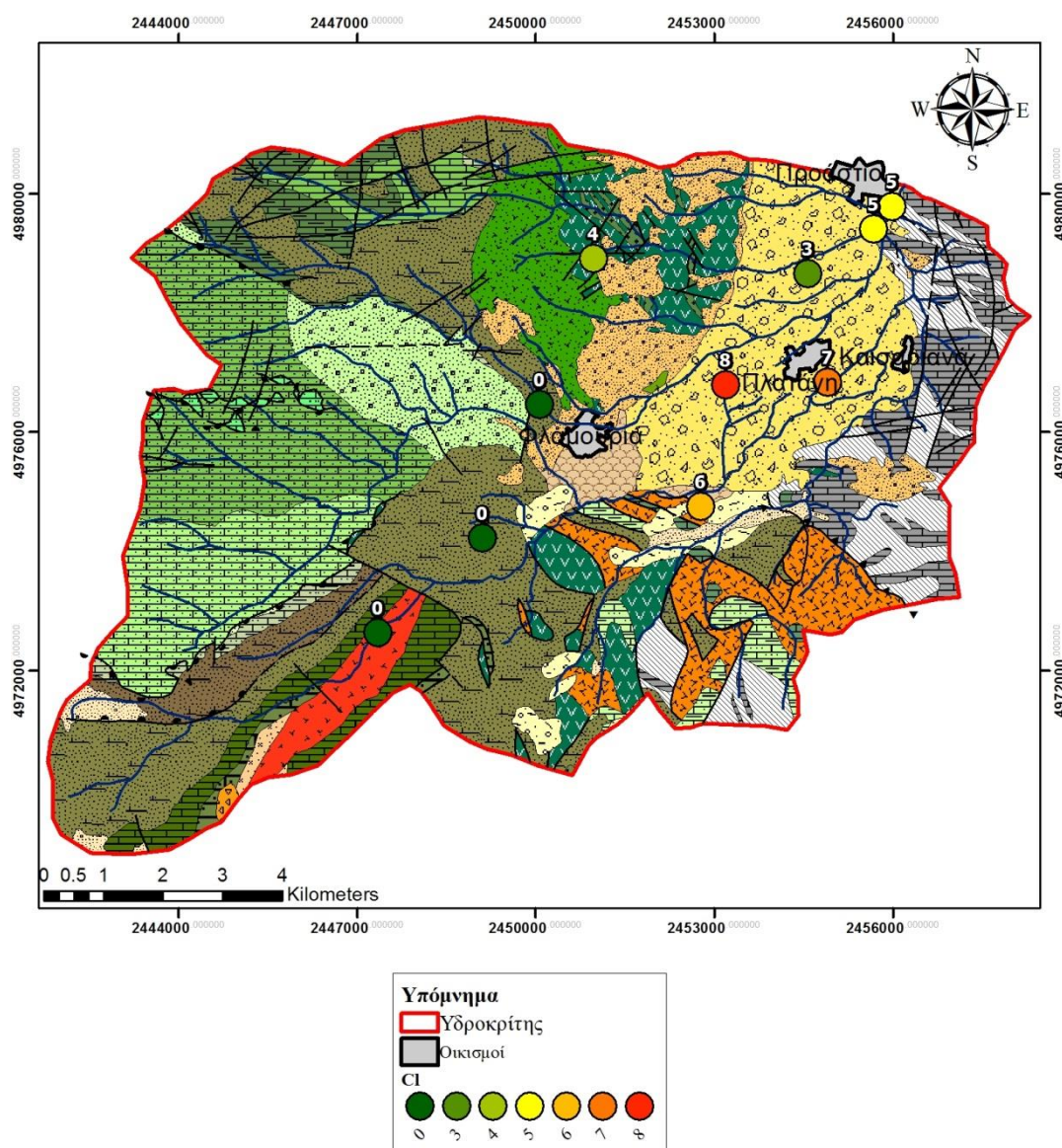


Σχήμα 6.5: Χωρική κατανομή των όξινων ανθρακικών την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.6 Ιόντα Χλωρίου (Cl⁻)

Οι συνηθισμένες συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου κυμαίνονται <10 mg/l και προέρχονται από μαγματικά πετρώματα και εβαπορίτες (Καλλέργης 2000), με αυξημένες συγκεντρώσεις να προκύπτουν είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η χρήση αλατιού για την απομάκρυνση χιονιού και πάγου, είτε από μίξη με γεωθερμικά ρευστά. Στην περιοχή μελέτης οι τιμές χλωρίου μετρήθηκαν μεταξύ 0 και 8 mg/l με το μέσο όρο να διαμορφώνεται στα 3.8 mg/l. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίστηκαν στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου εντοπίζονται τοφφικοί σχηματισμοί στη λεκάνη της Φλαμουριάς και γαββικοί και δολεριτικοί σχηματισμοί

στους ανατολικό ορεινό τμήμα. Η χωρική κατανομή του χλωρίου ακολουθεί στο Σχήμα 6.6.

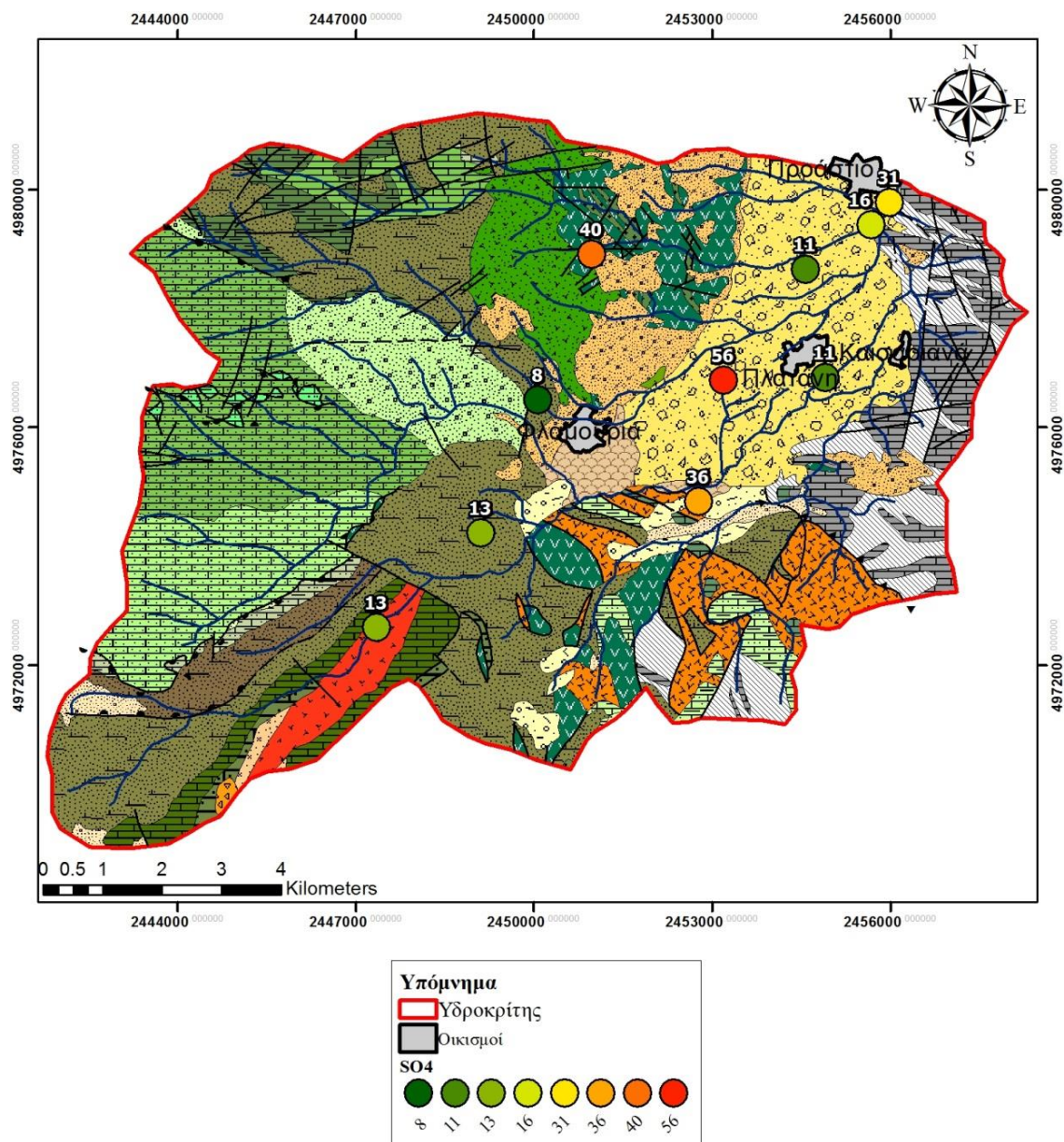


Σχήμα 6.6: Χωρική κατανομή των ιόντων χλωρίου την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.7 Θεϊκά ανιόντα (SO_4^{2-})

Βασική προέλευση των θεϊκών ανιόντων αποτελεί η διάλυση της γύψου και του ανυδρίτη, η οξείδωση θειούχων ενώσεων καθώς και η χρήση θεϊκών λιπασμάτων (Βουδούρης 2009). Υψηλές συγκεντρώσεις θεϊκών σε νερό καταγράφονται σε οφιολιθικό περιβάλλον (Σούλιος 2006), ενώ όξινα απόβλητα μεταλλείων μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις (Καλλέργης 2000). Στην περιοχή έρευνας

οι συγκεντρώσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 8 και 56 mg/l με τη μέση τιμή να κυμαίνεται στα 23.5 mg/l. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις θειϊκών ανιόντων εντοπίστηκαν τόσο εντός της λεκάνης, οι οποίες οφείλονται στη χρήση λιπασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, όσο και στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας όπου απαντώνται οφιολιθικοί σχηματισμοί. Η χωρική κατανομή των θειϊκών ανιόντων ακολουθεί στο Σχήμα 6.7.

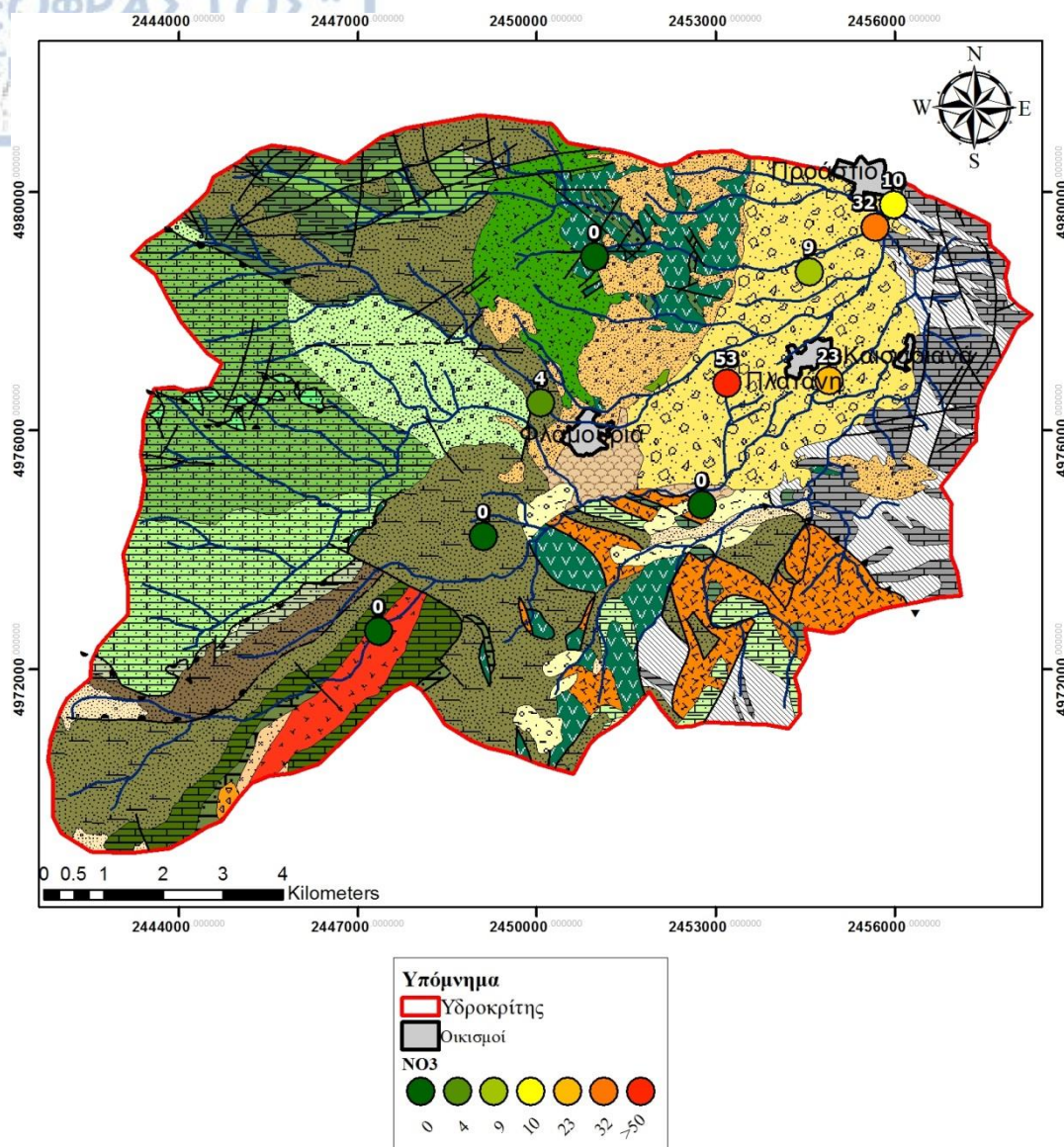


Σχήμα 6.7: Χωρική κατανομή των Θειϊκών ανιόντων την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.8 Νιτρικά ιόντα (NO_3^-)

Τα νιτρικά ιόντα δημιουργούνται από βακτήρια σε αερόβιες συνθήκες, μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης η οποία αποτελεί μέρος του κύκλου του αζώτου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η παρουσία νιτρικών στα επιφανειακά νερά είναι $<1 \text{ mg/l}$, ενώ στα υπόγειο $<10 \text{ mg/l}$ (Καλλέργης 2010). Με την παρεμβολή της ανθρώπινης παρουσίας και τις διάφορες δραστηριότητες που αναπτύσσονται κοντά σε μια κατοικημένη περιοχή όπως η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων σε αγροτικές εκτάσεις, η απόθεση οικιακών λυμάτων, οι διαφυγές βόθρων και ΧΥΤΑ, αυξάνεται η παρουσία νιτρικών ιόντων τόσο στα υπόγεια όσο και στα επιφανειακά ύδατα, γεγονός που συχνά προκαλεί πρόβλημα στην ποιοτική κατάσταση τους. Η αδυναμία αφομοίωσης των μεγάλων ποσοτήτων νιτρικών από τα φυτά καθώς και η δυσκολία δέσμευσής τους από τα μόρια της αργίλου λόγω του αρνητικού τους φορτίου διογκώνει το πρόβλημα της νιτρορύπανσης.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται σε αβαθείς υδροφορείς ενώ μικρότερες συγκεντρώσεις μπορούν να καταμετρηθούν σε υδροφορείς που υπόκεινται αργιλούχων στρωμάτων. Στην περιοχή έρευνας καταγράφηκαν τιμές από 0 έως και 53 mg/l , με τη μέση τιμή να διαμορφώνεται στα 13.1 mg/l . Οι υψηλότερες τιμές καταμετρήθηκαν στο κέντρο της λεκάνης της Φλαμουριάς, όπου και παρατηρείται η υψηλότερη γεωργική δραστηριότητα και γίνεται εκτεταμένη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, ενώ οι μικρότερες τιμές καταγράφηκαν στο δυτικό ορεινό τμήμα. Η χωρική κατανομή των νιτρικών ακολουθεί στο Σχήμα 6.8.

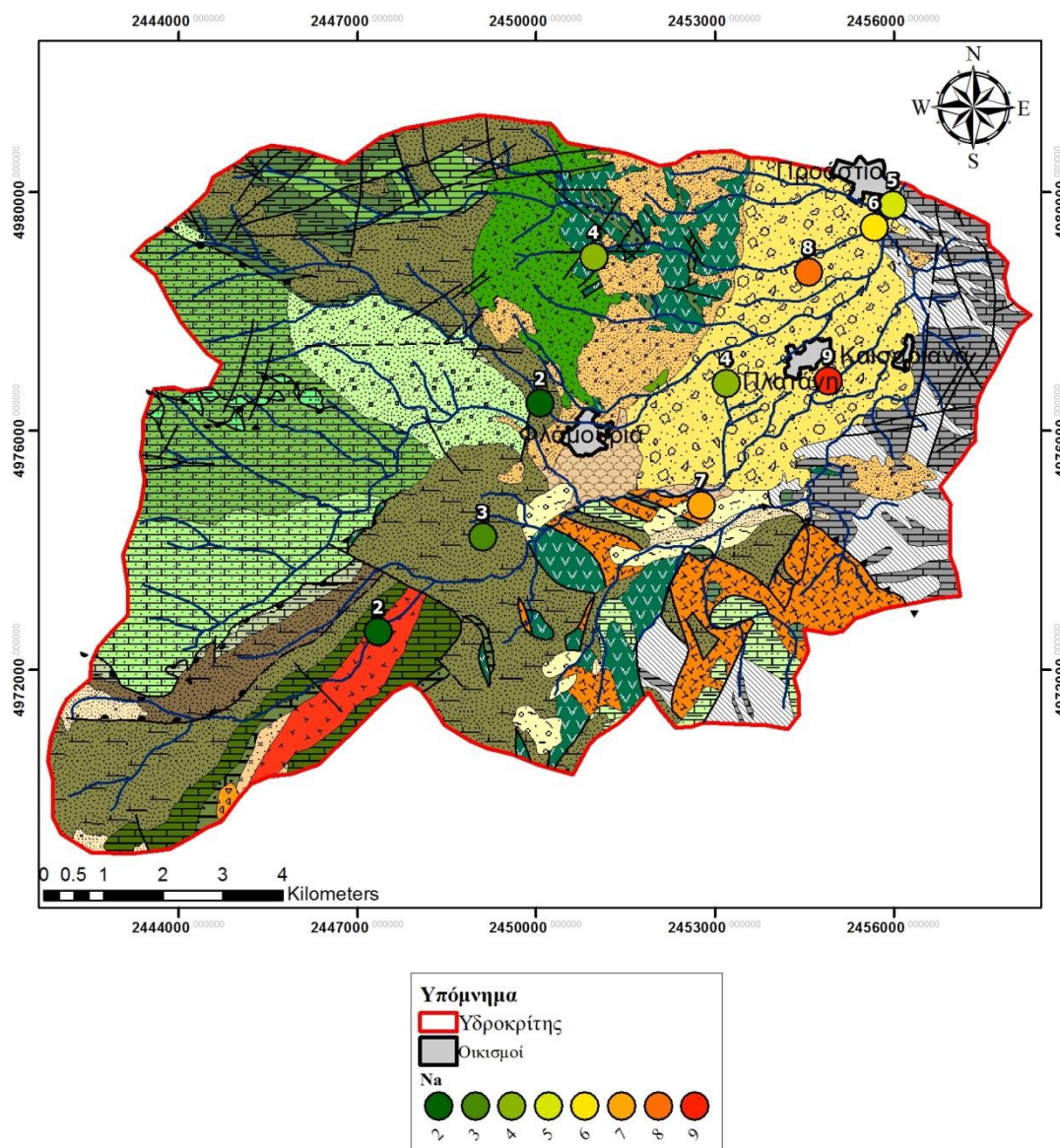


Σχήμα 6.8: Χωρική κατανομή των Νιτρικών ιόντων την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.9 Ιόντα Νατρίου (Na^+)

Η παρουσία του νατρίου στα υπόγεια νερά προέρχεται κυρίως από τη διάλυση ορυκτών όπως τα αργιλικά ορυκτά, οι νατριούχοι αμφίβολοι, οι εβαπορίτες και οι άστριοι (Καλλέργης 2000, Βουδούρης 2009). Άλλες πηγές προέλευσης νατρίου μπορούν να είναι τα γεωθερμικά ρευστά ή κατάλοιπα ανθρωπογενούς δραστηριότητας όπως διάφορα βιομηχανικά απόβλητα. Οι καταγραφείσες τιμές ιόντων νατρίου στην περιοχή μελέτης κυμάνθηκαν μεταξύ 2 και 9 mg/l με τη μέση τιμή να κυμαίνεται στα 5 mg/l. Οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές του νατρίου στην περιοχή μελέτης έχουν να

κάνουν με την απουσία γεωθερμικού πεδίου και βιομηχανικής περιοχής που θα μπορούσε να δυσχεραίνει το ποιοτικό επίπεδο των υδροφορέων. Η χωρική κατανομή του νατρίου ακολουθεί στο Σχήμα 6.9.

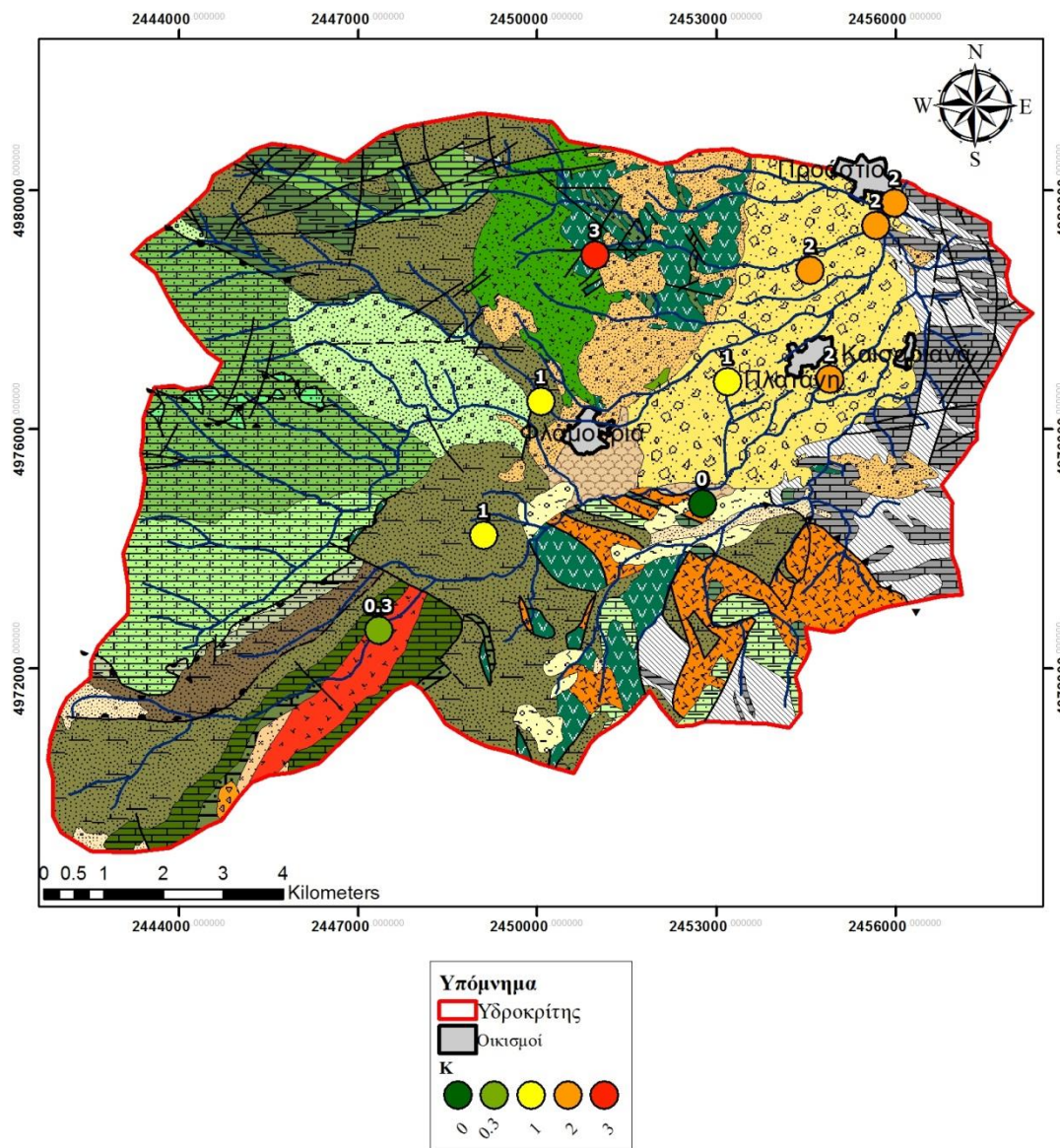


Σχήμα 6.9: Χωρική κατανομή των ιόντων Νατρίου την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.10 Ιόντα Καλίου (K)

Κύρια πηγή προέλευσης των κατιόντων του καλίου είναι οι καλιούχοι άστριοι, τα αργίλικα ορυκτά και οι μαρμαρυγίες (Καλλέργης 2000). Η συνηθισμένη τους συγκέντρωση είναι <10 mg/l, ενώ μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 100 mg/l σε

περιβάλλον θερμών πηγών. Στην περιοχή μελέτης οι συγκεντρώσεις καλίου κυμαίνονται μεταξύ 0 και 3 mg/l με τη μέση τιμή να διαμορφώνεται στο 1 mg/l. Η χωρική κατανομή του καλίου ακολουθεί στο Σχήμα 6.10.

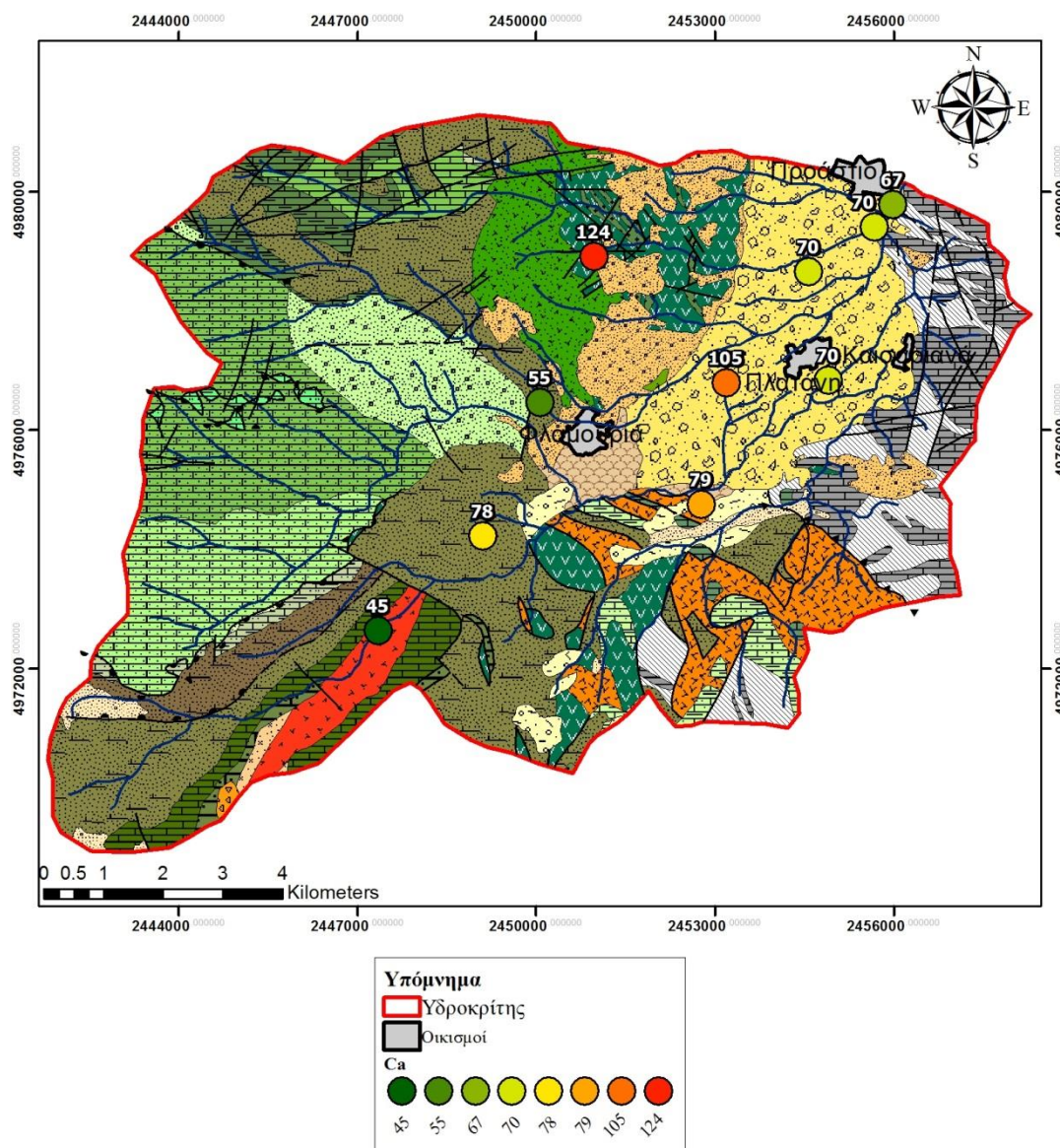


Σχήμα 6.10: Χωρική κατανομή των ιόντων Καλίου την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.11 Ιόντα Ασβεστίου (Ca^{2+})

Το ασβέστιο είναι ένα κύριο κατιόν στο υπόγειο νερό, η παρουσία του οποίου υποδηλώνει την ύπαρξη ανθρακικών σχηματισμών (μάρμαρα, ασβεστόλιθοι, δολομίτες) στην ευρύτερη περιοχή. Στην περιοχή μελέτης καταγράφηκαν

συγκεντρώσεις κατιόντων ασβεστίου από 45 έως και 124 mg/l με μέση τιμή τα 76 mg/l και με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να εμφανίζονται στους ορεινούς όγκους βορειοδυτικά της λεκάνης της Φλαμουριάς, όπου και εντοπίζονται ανθρακικοί σχηματισμοί. Η χωρική κατανομή του ασβεστίου ακολουθεί στο Σχήμα 6.11.

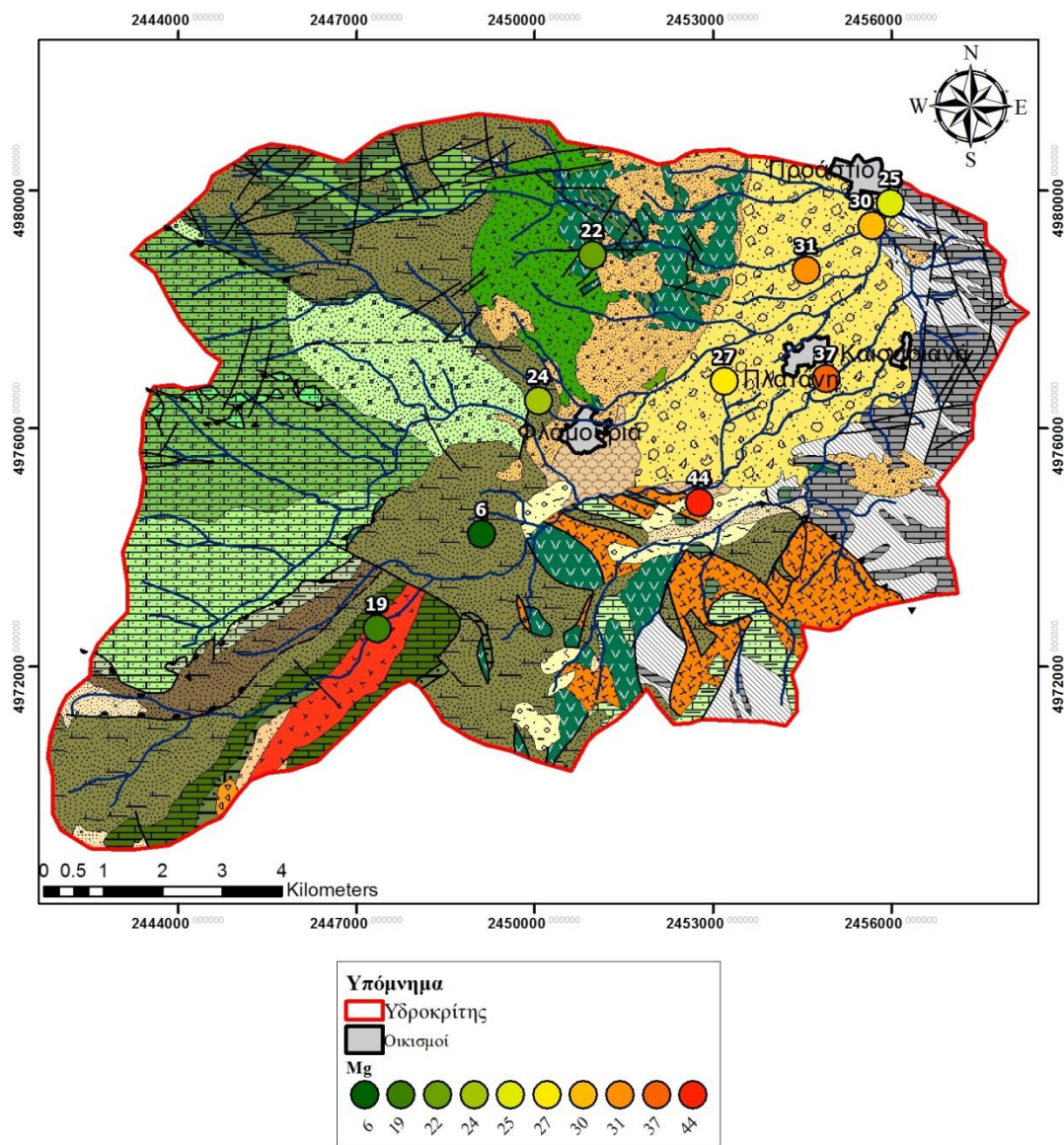


Σχήμα 6.11: Χωρική κατανομή των ιόντων Ασβεστίου την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.12 Ιόντα Μαγνησίου (Mg)

Οι πηγές προέλευσης των ιόντων του Μαγνησίου είναι τα αργίλικα ορυκτά, τα ανθρακικά πετρώματα πλούσια σε δολομίτη και μαγνησίτη, ο ολιβίνης, οι αμφίβολοι και οι πυρόξενοι (Καλλέργης 2000). Στην περιοχή έρευνας οι συγκεντρώσεις των

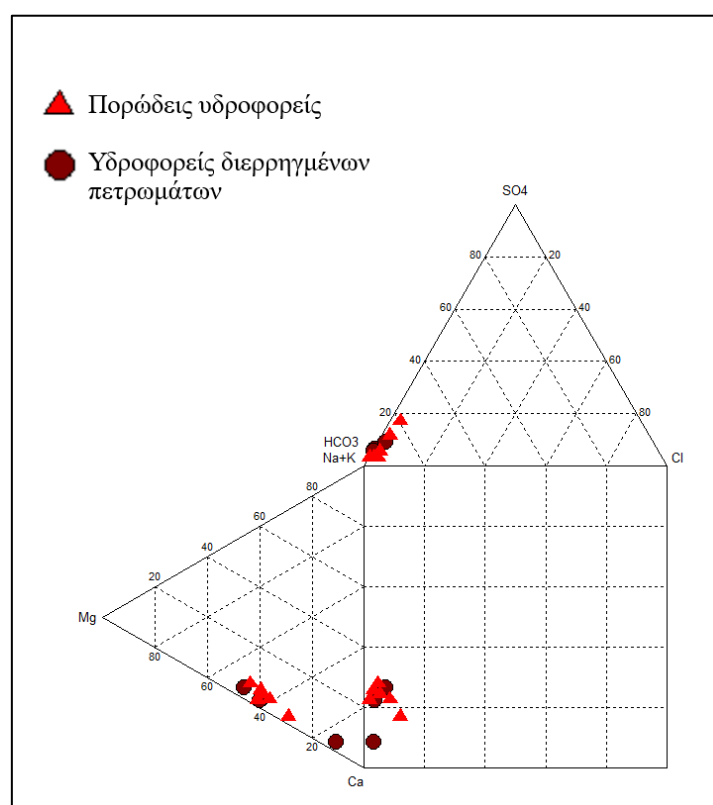
ιόντων του μαγνησίου κυμαίνονται από 6 έως και 44 mg/l με τη μέση τιμή να διαμορφώνεται στα 26 mg/l. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ιόντων μαγνησίου εντοπίζονται στα νοτιοανατολικά της λεκάνης της Φλαμουριάς όπου και παρατηρούνται εμφανίσεις δολομιτικών μαρμάρων και οφιολίθων. Η χωρική κατανομή του μαγνησίου ακολουθεί στο Σχήμα 6.12.



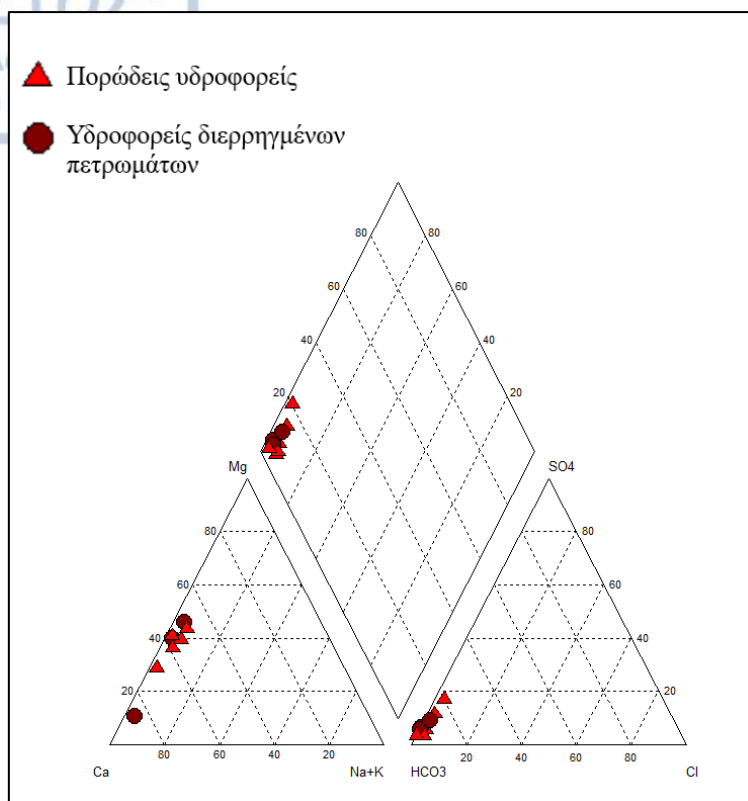
Σχήμα 6.12: Χωρική κατανομή των ιόντων Μαγνησίου την περίοδο Ιουνίου 2017.

6.13 Υδροχημικός τύπος νερού

Στην περιοχή έρευνας αναπτύσσονται τρεις διαφορετικοί υδροφορείς, ωστόσο δεν κατέστη δυνατή η δειγματοληψία νερού από τους καρστικούς υδροφορείς. Συνεπώς ο διαχωρισμός των δειγμάτων έγινε μεταξύ αυτών που λήφθηκαν από πορώδεις υδροφορείς και από τους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων. Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων αλλά και τα διαγράμματα Piper και Durov (Piper, 1944, Durov 1948) (Σχήμα 5.17) στην περιοχή μελέτης, τα υπόγεια ύδατα που προέρχονται τόσο από τους πορώδεις υδροφορείς όσο και από τους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων χαρακτηρίζονται ως ασβεστούχα – οξυανθρακικά ($\text{Ca} - \text{HCO}_3$). Οι υδροχημικοί τύποι των υπόγειων υδάτων τόσο των πορώδων όσο και των διερρηγμένων υδροφορέων οδηγούν στο συμπέρασμα πως πρόκειται για το ίδιο νερό και κατ' επέκταση πως οι πορώδεις υδροφορείς τροφοδοτούνται πλευρικώς από τους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων.



Σχήμα 6.13: διάγραμμα Durov περιόδου Ιουνίου 2017.



Σχήμα 6.14: διάγραμμα Piper περιόδου Ιουνίου 2017.

6.14 Συμπεράσματα

Από την υδροχημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε τόσο τοπικά όσο και σε εργαστηριακό περιβάλλον, για την περιοχή έρευνας προκύπτουν τα εξής:

- Τα υπόγεια νερά στην περιοχή έρευνας χαρακτηρίζονται ως ασβεστούχα – οξυανθρακικά ($\text{Ca} - \text{HCO}_3$), τόσο στους πορώδεις υδροφορείς, όσο και στους υδροφορείς των διερρηγμένων πετρωμάτων.
- Οι υψηλότερες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, των νιτρικών και θειικών ανιόντων παρατηρούνται στην πεδιάδα της Φλαμουριάς όπου και εντοπίζεται η πλειοψηφία των γεωργικών δραστηριοτήτων της περιοχής.
- Η ποιότητα του υπόγειου νερού στους υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων είναι καλύτερη από την αντίστοιχη στους πορώδεις υδροφορείς, καθώς απουσιάζει η ρύπανση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες με κύρια προέλευση τη γεωργία.

7 Συμπεράσματα – Συζήτηση

Από την ανάλυση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωφυσικών και υδροχημικών δεδομένων προέκυψαν τα επακόλουθα συμπεράσματα:

- Το πάχος της ακόρεστης ζώνης στον πορώδη υδροφορέα κυμαίνεται από 0 έως 65 m.
- Οι υδροφορείς της περιοχής τροφοδοτούνται κυρίως από την κατείσδυση των κατακρημνισμάτων, ενώ ο πορώδης υδροφορέας τροφοδοτείται και από το διερρηγμένο.
- Από τα 791 mm μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, το 22% των κατακρημνισμάτων κατείσδυσε (174 mm), ενώ η απορροή κυμαίνεται στο 13% (102 mm), με την εξατμισοδιαπνοή να καλύπτει το υπόλοιπο 65% (515 mm).
- Οι υδροχημικές αναλύσεις υπέδειξαν πως η αγροτική παραγωγή θα πρέπει να χρησιμοποιεί πιο συνετά τα λιπάσματα καθώς οι υψηλότερες συγκεντρώσεις νιτρικών και θειικών εμφανίζονται στο κέντρο της λεκάνης της Φλαμουριάς, απ' όπου και πραγματοποιείται η άντληση νερού για την ύδρευση των κατοίκων της περιοχής.
- Η πραγματοποίηση και επεξεργασία των δεδομένων των ηλεκτρικών τομογραφιών υπέδειξε περιοχές υδροφορίας καθώς και πιθανά ρήγματα της περιοχής, που μπορούν να εξηγήσουν το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης.
- Προτείνεται η ανόρυξη υδρευτικών γεωτρήσεων στο ορεινό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου το νερό δεν παρουσιάζει καμία ποιοτική παραφωνία.

Για τη βέλτιστη διαχείριση του υπόγειου νερού της περιοχής καθώς και για την προστασία του δύναται να πραγματοποιηθούν οι παρακάτω μελλοντικές εργασίες:

- ✓ Εκτίμηση της τρωτότητας στους πορώδεις, καρστικούς και διερρηγμένους υδροφορείς.
- ✓ Μοντελοποίηση του υδροφορέα.
- ✓ Συνεχής παρακολούθηση του συστήματος, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά.
- ✓ Καθορισμός ζωνών προστασίας των υδρευτικών γεωτρήσεων για αποφυγή μελλοντικής ρύπανσης του υδροφορέα.

8 Βιβλιογραφία

- Abu-Shariah, M.I.I., (2009):** Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model.
- Alabi, A., Bello, R., Ogungbe, A.s., Oyerinde, H.O., (2010):** Determination of groundwater potential in lagos state university, ojo using geoelectric methods (vertical electrical sounding and horizontal profiling).
- Andrews, J.N., (1985):** The isotopic composition of radiogenic helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers.
- Barker, R.D. (1992):** A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break, 10, 53-63.
- Batayneh, A.T., (2009):** A hydrogeophysical model of the relationship between Geoelectric and Hydraulic Parameters, Central Jordan.
- Biddau, R., Bensimon, M., Ciudu, R., Parriaux, A., (2009):** Rare earth elements in groundwater from different Alpine aquifers.
- Birkholzer, J.T., Zhou, Q., Tsang, C., (2009):** Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems.
- Casas, A., Himi, M., Diaz, Y., Pinto, V., Font, X., Tapias, J.C., (2007):** Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain.
- Chandrasekar, T., Sabarathinam, C., Rajendiran, T., Nepolian, M., Adintya, V.S., (2014):** Evaluation of drinking water quality index (DWQI) and its seasonal variations in hard rock aquifers of Madurai District, Tamilnadu
- Colangelo, G., Lapenna, V., Perrone, A., Piscitelli, S., Telesca, L., (2006):** 2D self-potential tomographies for studying groundwater flows in the Varco d'Izzo landslide (Basilicata, Southern Italy).
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougaire, F., Some, S., Tapsoba, A., (2010):** Large-scale mapping of Hard-Rock aquifer properties applied to Burkina Faso.
- Daskalaki, P., Voudouris, K., (2007):** Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review.

Dikau, R. (1989): The application of digital relief model to landform analysis. In: Paper, J.F. (ed): Three dimensional applications in Geographical Information Systems. Taylor and Francis, London, pp 51-77.

Durov, S.A., (1948): Natural water and graphical representation of their composition. Dokl. Akad. Nauk. U.S.S.R., V.59, p. 87 – 90.

El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M.A., Ushijima, K., (2005): Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar.

Guo, W., (1997): Transient groundwater flow between reservoirs and water-table aquifers.

Hahn, H.J., Fuchs, A., (2009): Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in south-western Germany.

Healy, R.W., Cook, P.G., (2002): Using groundwater levels to estimate recharge.

Ibuot, J.C., Akpabio, G.T., George, N.J., (2013): A survey of the repository of groundwater potential and distribution using geoelectrical resistivity method in Itu Local Government Area (L.G.A.), Akwa Ibom State, southern Nigeria.

Islam, M.J., Uddin, S.M.H., Zaman, M.W., Mahmood, R.I., Rahman, M.S., (2003): Toxicity assessment of ground water in different aquifers of Khagrachari in Bangladesh.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., (2013): Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method.

Kazakis, N., Voudouris, K., (2015): Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters.

Kelly, W.E., (1977): Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity.

Kilchmann, S., Waber, H.N., (2004): Natural tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers.

Kim, J.H. (2009): DC2DPro – 2D Interpretation System of DC Resistivity Tomography. User's Manual and Theory. KIGAM, S. Korea.

Koppen, W., - Geiger, R., (1936): Handbuch der klimatologie. Berlin.

Kosinski, W.K., Kelly, W.E., (1981): Geoelectric soundings for predicting aquifer properties.

Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., (2011): The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes.

Lashkaripour, G.R. (2003): An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in Korin aquifer, southeast Iran.

Lenore, S., Clesceri, Arnold, E., Greenberg, Andrew, D., Easton, (1998): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition.

Leone, A., Ripa, M.N., Uricchio V., Deak, J., Vargay, Z., (2009): Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models.

Lindstrom, F.T., Boersma, L., (1989): Analytical solutions for convective-dispersive transport in confined aquifers with different initial and boundary conditions.

Maloszewski, P., Stichler, W., Zuber, A., Rank, D., (2002): Identifying the flow systems in karstic-fissured-porous aquifer. The Schneealpe, Austria, by modeling of environmental ¹⁸O and ³H isotopes.

Marechal, J.C., Dewandel, B., (2004): Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer.

Mazac, O., Kelly., W.E., Landa, I., (1987): Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies.

Mbonu, P.D.C., Ebeniro, J.O., Ofoegbu, C.O., Ekine, A.S. (1991): Geoelectric sounding for the determination of aquifer characteristics in parts of the Umuahia area of Nigeria.

Mimi, Z.A., Assi, A., (2009): Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study.

Mitrofan, H., Povara, I., Mafteiu, M., (2007): Geoelectrical investigations by means of resistivity methods in karst areas in Romania.

Najib, S., Fadili, A., Mehdi, K., Riss, J., Makan, A., (2017): Contribution of hydrochemical and geoelectrical approaches to investigate salinization process and seawater intrusion in the coastal aquifers of Chaouia, Morocco.

Olorunfemi, M.O., Fasuyi, S.A. (1993): Aquifer types and the geoelectric/hydrogeologic characteristics of part of the central basement terrain of Nigeria (Niger State).

Piper, A.M., (1944): Agraphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American Geophysical union, Transactions, v.25, p. 914 – 923.

Ramasamy, SM., Nagappan, N., Selvakumar, R., (2005): Fracture pattern modeling and groundwater hydrology in hard rock aquifer system, central Tamil Nadu, India.

Rhode, A., Bockgard, N., (2006): Groundwater recharge in a hard rock aquifer: A conceptual model including surface-loading effects.

Sandberg, S.K., (1993): Examples of resolution improvement in geoelectrical soundings applied to groundwater investigations.

Shima, H. (1990): 2-D automatic resistivity inversion technique using alpha centers. Geophysics, 55, 682-694.

Sinha, R., Israil, M., Singhal, D.C., (2009): A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters of anisotropic aquifers.

Strahler, A.N. (1957): Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Amer. Geophys. Union 38, 913-20.

Thorntwaite, C., Matter, J. (1957): Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Publication in Climatology, Vol. 10, No 3, New Jersey.

Tripp, A., Hohmann, G. and Swift, C. (1992): 2-D resistivity inversion. Geophysics, 57, 1004-1013.

Tsourlos, P., Szymanski, J., Dittmer, J. and Tsokas, G. (1993): The use of backprojection for fast inversion of 2-D resistivity data. Proceedings of the 2nd congress of the Greek Geophysical Union, Florina Greece, 5-7 May, Vol. 1, 71-81.

Tsourlos, P., Dittmer, J. and Szymanski, J. (1995): A study of non-linear techniques for the 2-D inversion of earth resistivity data. Expanded abstracts of the 57th meeting of the EAEG: Glasgow, Scotland, 29 May-2 June, 1995, P031.

Van Overmeeren, R.A., (1989): Aquifer boundaries explored by geoelectrical measurements in the coastal plain of Yemen: A case of equivalence.

Yaramanci, U., Lange, G., Hertrich, M., (2002): Aquifer characteristics using surface NMR jointly with other geophysical techniques at the Nauen/Berlin test site.

Βουδούρης, Κ. (2009): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ 460.

Βουδούρης, Κ. (2013): Τεχνική Υδρογεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ 429.

Ι.Γ.Μ.Ε. (1988): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000 φύλλο Άρνισσα υπό Mercier, J., Vergely, P., Γαλέο, Α., Sauvage, J., Durand-Delga, M., Sigal, J., Χωριανοπούλου, Π., Παπαζέτη, Ε., Αθήνα.

Ι.Γ.Μ.Ε. (1982): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000 φύλλο Βέροια υπό Brunn, J.H., Αθήνα.

Ι.Γ.Μ.Ε. (1984): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000 φύλλο Έδεσσα υπό Mercier, J.L., Vergely, P., Bijon, J., Sauvage, J., Durand-Delga, M., Sigal, J., Αθήνα.

Ι.Γ.Μ.Ε. (1982): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000 φύλλο Πύργοι υπό Brunn, J.H., Αθήνα.

Ι.Γ.Μ.Ε. (2010): Υδρογεωλογική μελέτη υδροφόρου συστήματος Λουδία, υπό Βεράνης, Ν., Πρατανόπουλος, Α., Θεσσαλονίκη.

Ι.Γ.Μ.Ε. (2010): Υδρογεωλογική μελέτη υδατικού διαμερίσματος Δ. Μακεδονίας, υπό Στάμος, Α., Ματθαίουπουλος, Δ., Κοζάνη.

Καλλέργης, Γ. (2000): Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2^η έκδοση, τόμος Β, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.

Καλλέργης, Γ. (2001): Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2^η έκδοση, τόμος Γ, Τ.Ε.Ε., Αθήνα

Μουντράκης, Δ. (2010): Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ 90.

Σούλιος, Γ. (1986): Γενική Υδρογεωλογία, Πρώτος & Δεύτερος Τόμος. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Σούλιος, Γ. (2006): Γενική Υδρογεωλογία, Τρίτος Τόμος. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Φίκος, Η. (2010): Αντιστροφή γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων: Εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., σελ 218.

Χατζής, Κ. (2003): Γεώφραγμα στο Δ.Δ. Πλατάνης Δήμου Έδεσσας Νομού Πέλλας, γεωλογική – γεωτεχνική μελέτη, σεισμολογική μελέτη, μελέτη στατικής ευστάθειας, Θεσσαλονίκη.

Χατζής, Κ. (2003): Γεώφραγμα στο Δ.Δ. Φλαμουριάς Δήμου Έδεσσας Νομού Πέλλας, γεωλογική – γεωτεχνική μελέτη, σεισμολογική μελέτη, μελέτη στατικής ευστάθειας, Θεσσαλονίκη.

9 Παράρτημα

Πίνακας 9.1: πίνακας υπολογισμού πραγματικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite – Matter.

Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite					S ₁₀ =	100	α =	1.499	Συντ. Πρ. εξατμισ. κατά Thornthwaite				59.2%
	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	Σ/Μ.Ο.
T °C	3.50	5.30	8.10	13.30	18.10	22.00	24.40	24.60	19.80	14.50	10.20	5.50	14.11
i	0.58	1.09	2.08	4.40	7.01	9.42	11.02	11.16	8.03	5.01	2.94	1.16	63.91
E _a	6.49	12.09	22.82	48.00	76.17	102.05	119.19	120.66	87.15	54.63	32.24	12.78	
n	0.84	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.83	0.81	
E _a	5.5	10.0	23.5	53.3	95.2	128.6	151.4	143.6	90.6	52.4	26.8	10.3	791.21
P (mm)	78.40	56.10	101.00	83.90	76.50	45.40	41.50	22.90	49.20	90.90	122.30	101.80	869.9
Έλλειμα	0.0	0.0	0.0	0.0	18.7	83.2	109.9	120.7	41.4	0.0	0.0	0.0	
Πλεον.	72.9	46.1	77.5	30.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	95.5	91.5	
APWL	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.7	-101.9	-211.8	-332.5	-373.9	0.0	0.0	0.0	
St	100.0	100.0	100.0	100.0	82.9	36.1	12.0	3.6	2.4	40.8	100.0	100.0	
ΔSt	0.0	0.0	0.0	0.0	-17.1	-46.8	-24.1	-8.4	-1.2	38.5	59.2	0.0	
Er	5.5	10.0	23.5	53.3	93.6	92.2	65.6	31.3	50.4	52.4	26.8	10.3	514.9
Έλλ. νερού	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	36.4	85.8	112.3	40.2	0.0	0.0	0.0	
Ολ. Απορροή	72.9	46.1	77.5	30.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.4	91.5	355.0



Εικόνα 9.1: Τύλιγμα σταθμήμετρου.



Εικόνα 9.2: Άνοιγμα πιεζομέτρου για μέτρηση στάθμης.



Εικόνα 9.3: Περιφραγμένη γεώτρηση.



Εικόνα 9.4: Επιτόπου διήθηση δείγματος νερού.



Εικόνα 9.5: Δειγματοληψία νερού πηγής.



Εικόνα 9.6: Φράγμα Πλατάνης (πράσινο λόφος).



Εικόνα 9.7: Προεργασίες για εκτέλεση γεωφυσικής διασκόπησης.