



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΑΝΔΡΑΛΗ Δ. ΠΑΣΧΑΛΙΑ
Πτυχιούχος Δασολόγος - Περιβαλλοντολόγος

**«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ DRASTIC ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ
ΡΥΠΑΝΣΗ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2017



ΜΑΝΔΡΑΛΗ Δ. ΠΑΣΧΑΛΙΑ

Πτυχιούχος Δασολόγος - Περιβαλλοντολόγος

**«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ DRASTIC ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ
ΡΥΠΑΝΣΗ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ»**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών : «Εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική γεωλογία»,
Κλάδος : «Τεχνική Γεωλογία - Περιβαλλοντική υδρογεωλογία»
Τομέας Γεωλογίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Αν. Καθηγητής : Επιβλέπων καθηγητής

Θεοδοσίου Νικόλαος, Αν. Καθηγητής: Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Γεωργίου Πανταζής, Επ. Καθηγητής : Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Μανδραλή Δ. Πασχαλιά, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ DRASTIC ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ
ΡΥΠΑΝΣΗ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ
ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ

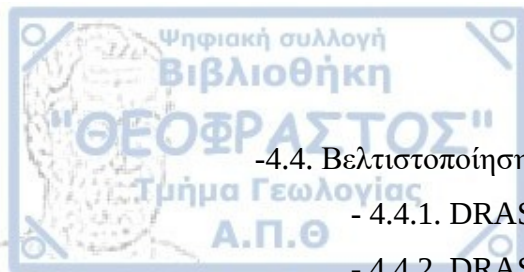
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται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



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
- ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
- 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
- 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	7
- 2.1. Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας.....	7
- 2.1.1. Γεωγραφία – Γεωμορφολογία.....	7
- 2.1.2. Κλίμα.....	8
- 2.1.3. Δημογραφικά χαρακτηριστικά.....	11
- 2.1.4. Γεωλογία.....	11
- 3. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	14
- 3.1. Υδρολιθολογία.....	14
- 3.2. Υδροφορείς.....	14
- 3.3. Μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού – πιεζομετρία.....	14
- 3.4. Υδροχημία.....	19
- 3.5. Καταλληλότητα νερού για άρδευση.....	26
- 4. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ 29	
- 4.1. Γενικά για την τρωτότητα.....	29
- 4.2 Μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας.....	30
- 4.2.1. Κυριότεροι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας.....	30
- 4.2.1.1. Η μέθοδος DRASTIC.....	32
- 4.3. Εκτίμηση της τρωτότητας του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης της Φώρινας.....	35
- 4.3.1. D – Βάθος του υπόγειου νερού.....	36
- 4.3.2. R – Τροφοδοσία του υδροφορέα, εμπλουτισμός.....	37
- 4.3.3. A – Υλικό υδροφορέα.....	39
- 4.3.4. S – Έδαφος	40
- 4.3.5. T – Κλίση αναγλύφου.....	41
- 4.3.6. I – Επίδραση της ακόρεστης ζώνης.....	42
- 4.3.7. C – Υδραυλική αγωγιμότητα.....	43
- 4.3.8. Τελικός χάρτης κατανομής της τρωτότητας με την μέθοδο DRASTIC.....	44



-4.4. Βελτιστοποίηση της μεθόδου DRASTIC.....	45
- 4.4.1. DRASTIC-N.....	47
- 4.4.2. DRASTIC-LN.....	47
-4.4.3. Χάρτες κατανομής DRASTIC-N και DRASTIC-LN.....	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	53
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	56

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Παρά το γεγονός ότι οι προπτυχιακές μου σπουδές δεν αφορούσαν στην επιστήμη της Γεωλογίας αλλά σε αυτήν της Δασολογίας, ο τομέας της υδρογεωλογίας κέρδισε το ενδιαφέρον και την προσοχή μου από την πρώτη στιγμή. Το νερό είναι ένας από τους πιο σημαντικούς μη ανανεώσιμους πόρους που υπάρχουν στον πλανήτη γι' αυτό η ορθολογική διαχείριση του και η προστασία του κρίνονται απαραίτητα.

Το υπόγειο νερό συμμετέχει σε ποσοστό μόλις 0,00325 % επί του συνολικού νερού που υπάρχει στον πλανήτη μας, παρόλα αυτά αποτελεί για πολλούς ανθρώπους τη μοναδική πηγή πόσιμου νερού. Είναι γνωστό πως το να υπάρχει προσβάσιμο πόσιμο νερό είναι ένα διεθνώς αποδεκτό δικαίωμα, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Subba Rao et al., 2012). Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων εξαρτάται από το φυσικό υπόβαθρο, την τοπογραφία, τη γεωλογία, το έδαφος, το κλίμα, τα κατακρημνίσματα, αλλά και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Επίσης μπορεί να επηρεαστεί από γεωχημικές διεργασίες που επηρεάζονται από την αποσάθρωση, τις καθιζήσεις, την ανταλλαγή ιόντων και διάφορες άλλες βιολογικές διεργασίες (Ravikumar et al., 2015).

Καθώς κατάγομαι από την περιοχή αυτή λοιπόν κι έχοντας όλα αυτά στο μυαλό μου σκέφτηκα ότι το πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών της υδρογεωλογίας περιβάλλοντος μπορεί να μου δώσει την δυνατότητα να φέρω εις πέρας μια εργασία σχετική με την ποιότητα του νερού, την ρύπανση και την άρδευση στην περιοχή της Φλώρινας.

Συγκεκριμένα η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στον κλάδο εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική γεωλογία, Υδρογεωλογία περιβάλλοντος. Ο τίτλος της διατριβής ειδίκευσης είναι: **«Βελτιστοποίηση του δείκτη DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας στην εξωτερική ρύπανση με στατιστικές μεθόδους. Εφαρμογή στον υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας».**

Η τριμελής συμβουλευτική επιτροπή αποτελείται από τον επίκουρο καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Βουδούρη, τον κύριο Νικόλαο Θεοδοσίου και τον κύριο Πανταζή Γεωργίου, με επιβλέποντα τον κύριο Κ. Βουδούρη.



Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν με το θέμα που μου ανέθεσαν, καθώς και για την υπομονή και βοήθεια τους κατά την διάρκεια τόσο του μέρους των μαθημάτων όσο και κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα πρώτα από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Βουδούρη για την εμπιστοσύνη, τις γνώσεις και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω σε αυτό.

Επίσης όλους τους καθηγητές οι οποίοι συμμετείχαν στο συγκεκριμένο ΠΜΣ για τον χρόνο και την όρεξη τους να μας μεταφέρουν τις γνώσεις τους και να δημιουργήσουν νέους επιστήμονες.

Ειδικά θέλω να τονίσω τις ευχαριστίες μου στον μεταδιδάκτορα του εργαστηρίου τεχνικής γεωλογίας και υδρογεωλογίας κύριο Καζάκη Νεραντζή. Η βοήθεια, η κατανόηση, η καθοδήγηση, ο χρόνος του, η εμπειρία του, το πλήθος των δεδομένων που μου παρείχε, είναι μόνο μερικά από αυτά που οδήγησαν αυτή την εργασία στην ολοκλήρωση της κάνοντας την διαδρομή πιο εύκολη και ευχάριστη.

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τους υπαλλήλους στην περιφερειακή ενότητα Φλωρίνης για την συνεργασία τους κατά την διάρκεια αναζήτησης δεδομένων για την περιοχή έρευνας, καθώς και τους γεωλόγους κύριο Γιαταγάνα Μάκη και Καρακατσάνη Στέλιο.

Από τις ευχαριστίες δεν θα μπορούσαν να λείπουν οι φίλοι μου και η οικογένεια μου, οι οποίοι έχουν κάνει μεγάλη υπομονή κι έχουν δείξει μεγάλη κατανόηση στο φορτωμένο πρόγραμμα και στις υποχρεώσεις μου και η στήριξη τους έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στην ψυχολογία μου, κομμάτι το οποίο είναι από τα πλέον σημαντικά.

Τελευταίο άφησα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου. Οι γνώσεις του πάνω στην περιοχή έρευνας και η διάθεση του για βοήθεια έκαναν την διαδικασία συλλογής δεδομένων αρκετά πιο εύκολη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε και επικαιροποιήθηκε το υδρογεωλογικό και υδροχημικό καθεστώς του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας. Επιπρόσθετα τροποποιήθηκε ο δείκτης DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας και τη διακινδύνευση του αλλουβιακού υδροφορέα στην εξωτερική ρύπανση. Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο της Ελλάδας, ανήκει γεωλογικά στην πελαγονική ζώνη και μορφολογικά περικλείεται από τρεις ορεινούς όγκους. Για τον σκοπό της εργασίας μετρήθηκε η στάθμη του υπόγειου νερού σε 59 γεωτρήσεις για δύο περιόδους (υγρή και ξηρή περίοδος 2016) και συλλέχθηκαν δείγματα νερού από 29 γεωτρήσεις. Σε αυτά πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των κύριων ιόντων. Παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές στην περιεκτικότητα των νιτρικών NO_3^- (έως 68 mg/L) και θειικών ιόντων SO_4^{2-} (έως 1020 mg/L), ως αποτέλεσμα της χρήσης λιπασμάτων στην περιοχή. Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων με το πρόγραμμα AquaChem ορίστηκε ο υδροχημικός τύπος του νερού ως ασβεστούχος οξυανθρακικός. Δείκτες ποιότητας νερού χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο της ποιοτικής του κατάστασης και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υπόγειο νερό είναι από αρκετά καλό έως μέτριο για άρδευση. Από την εκτίμηση της τρωτότητας με χρήση της μεθόδου Typical DRASTIC βρέθηκε υψηλή τρωτότητα στο νοτιοδυτικό και βορειοδυτικό άκρο της περιοχής όμως δεν παρουσιάζεται συσχέτιση με τα νιτρικά ιόντα. Κατά την βελτιστοποίηση του δείκτη DRASTIC λήφθηκαν υπόψη τόσο η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων όσο και οι χρήσεις γης και προέκυψαν οι δείκτες DRASTIC-N και DRASTIC-LN. Υψηλή τρωτότητα μέσω της DRASTIC-N εκδηλώνεται νοτιοδυτικά και βορειοδυτικά της λεκάνης ενώ χαμηλότερη κεντρικά και βορειοανατολικά. Παρουσιάζει όμως και αυτή πολλή μικρή συσχέτιση με τα νιτρικά ιόντα. Η DRASTIC-LN εκφράζει την διακινδύνευση και συνδυάζει την DRASTIC-N με τις χρήσεις γης. Ο συντελεστής συσχέτισης με τα νιτρικά ιόντα εδώ δίνει θετική συσχέτιση. Αυξημένες τιμές διακινδύνευσης εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα και νοτιοανατολικά της λεκάνης καθώς ανάλογα με την καλλιέργεια χρησιμοποιούνται και αντίστοιχες ποσότητες λιπασμάτων. Συμπερασματικά σε εφαρμογές της DRASTIC σε αλλουβιακούς υδροφορείς θα ήταν χρήσιμο να συνδυάζονται και οι χρήσεις γης για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

ABSTRACT

In this paper is presented the hydrogeological and hydrochemical regime in the alluvial aquifer of Florina basin, as well as the optimization of the DRASTIC index to estimate groundwater vulnerability and pollution risk to external pollution. The study area covers an area of XX and located in northern Greece. It belongs to the pelagonal zone and is surrounded by three mountains. The climate is characterized as continental. Groundwater level measurements were performed in 59 boreholes for two periods (wet and dry periods of 2016). Furthermore, 29 groundwater samples were collected and analyzed for the main ions. Increased concentrations of NO_3^- (up to 68 mg / L) and SO_4^{2-} (up to 1020 mg / L) were observed as a result of the overuse of fertilizers in the area. The dominant water type is Ca- HCO_3 . Water quality indices were used to determine the quality status of groundwater and the results have shown that groundwater is good enough for irrigation. From the estimation of vulnerability using the typical DRASTIC method, high vulnerability characterizes the southwestern and northwestern parts of the area, however, there is no correlation with nitrate concentrations. The original DRASTIC index was modified based on nitrate concentration and land uses and hence DRASTIC-N and DRASTIC-LN were created. According to DRASTIC-N high vulnerability is located in the southwest and northwest parts of the basin, while low vulnerability areas are located in the center and northeast part of the study area. DRASTIC-N has low correlation with nitrate ions. DRASTIC-LN was used for the assessment of groundwater pollution risk. The correlation coefficient with nitrate ions is positive in this case. High risk is observed in the central and southeast part of the basin. Corresponding amounts of fertilizer are used depending on the crop. To conclude, the modified vulnerability and pollution risk map of the alluvial aquifer can be used from stakeholders in order to prevent groundwater quality deterioration.



► συλλογή εργασιών και μελετών με αντικείμενο τόσο την εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών στην ρύπανση όσο και γενικότερα την υδροχημεία.

► συλλογή τοπογραφικών και γεωλογικών χαρτών, μετεωρολογικών δεδομένων, λιθολογικών τομών γεωτρήσεων που προϋπήρχαν, υδρολογικών δεδομένων, χαρτών χρήσης γης.

► απογραφή υδρογεωτρήσεων της υπό μελέτη περιοχής, λήψη φωτογραφιών, μέτρηση στάθμης του υπόγειου νερού, συλλογή δειγμάτων νερού στην περιοχή έρευνας.

► επιτόπου μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του pH, της θερμοκρασίας και των ολικών διαλυμένων στερεών με φορητό αγωγιμόμετρο του εργαστηρίου.

► μεταφορά των δειγμάτων από την περιοχή μελέτης στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι χημικές αναλύσεις στα κύρια ιόντα.

► ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν και των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με χρήση προγραμμάτων. Συγκεκριμένα τα μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα με την χρήση του Microsoft Excel για στατιστική επεξεργασία αυτών, τα υδροχημικά δεδομένα με την χρήση του προγράμματος Aquahem, και γενικά μέσω των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S, ArcMap 10.2) παράχθηκαν θεματικοί χάρτες.

► τέλος εκτός από την επιτόπου επίσκεψη στην περιοχή χρησιμοποιήθηκε και το Google earth για να κατασκευαστεί γενικευμένος χάρτης χρήσεων γης, καθώς επίσης και πολλές εικόνες επεξεργάστηκαν μέσω του προγράμματος Microsoft office picture manager.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας

2.1.1. Γεωγραφία - Γεωμορφολογία

Ο νομός της Φλώρινας (Σχήμα 1) βρίσκεται στο Βορειοδυτικό άκρο της Ελλάδας και συνορεύει με δύο χώρες (βορειοδυτικά με την Αλβανία και Βόρεια με την Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας), ενώ ενδοχώρια συνορεύει με τους Νομό Πέλλας, Νομό Κοζάνης και Νομό Καστοριάς.



Σχήμα 1. Χάρτης του Νομού Φλωρίνης.

Βρίσκεται σε υψόμετρο 650 m και μορφολογικά παρουσιάζει πλούσιες εναλλαγές τοπίων, καθώς έχει ορεινό, ημιορεινό και πεδινό χαρακτήρα. Περιβάλλεται από τρεις μεγάλους ορεινούς όγκους (Σχήμα 2):

- Βόρας (Καϊμακτσαλάν) 2.524 m, στα βορειοανατολικά
- Βαρνούντας (Περιστέρι) 2.334 m, στα δυτικά
- Βέρνον (Βίτσι) 2.128 m, στα νοτιοδυτικά



Σχήμα 2. Μορφολογικός χάρτης του νομού Φλώρινης.

Η περιοχή έρευνας συγκεκριμένα αποτελεί τον αλλουβιακό υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας και ανέρχεται σε μία έκταση των 187,2 Km² με περίμετρο 87,17 km. Το μέσο υψόμετρο αυτής είναι 622 m, το μέγιστο 660 m και το ελάχιστο που βρίσκεται στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης είναι 580 m. Η μέση κλίση είναι περίπου $P = 3,12^\circ$.

Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας καλύπτεται από αγροτικές καλλιέργειες. Τα προϊόντα της περιοχής που καλλιεργούνται κατά βάση είναι καλαμπόκι και σιτηρά. Όμως υπάρχουν εκτάσεις με μηλιές, αχλαδιές, φασόλια, πατάτες, μηδική, φράουλες, σταφύλια, κηπευτικά όπως ντομάτες, αγγούρια, πιπεριές, κρεμμύδια, λάχανα, μαρούλια, κ.ά. Μεγάλο μέρος των κατοίκων των οικισμών γύρω από τη Φλώρινα ασχολείται με την πώληση κηπευτικών προϊόντων.

2.1.2. Κλίμα

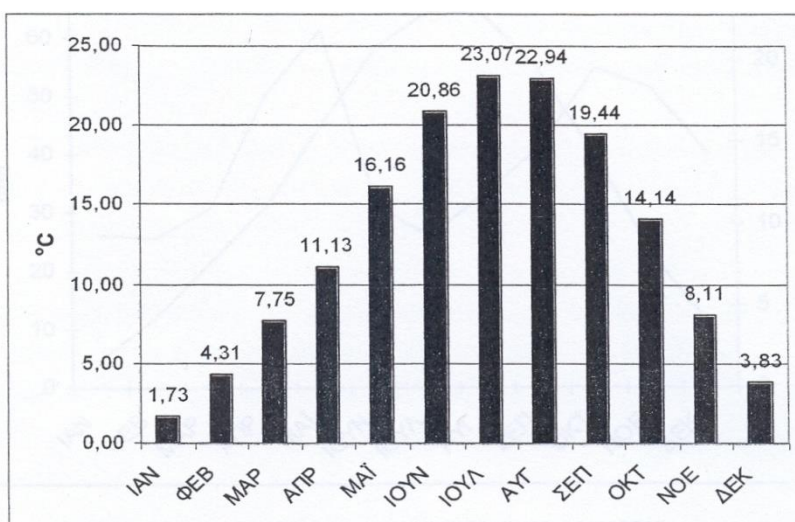
Το κλίμα στην περιοχή της Φλώρινας όπως και στις περισσότερες περιοχές της Μακεδονίας είναι ηπειρωτικό με ψυχρούς χειμώνες, πολλές βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Επηρεάζεται από την γεωγραφική θέση, το υψόμετρο, τους μεγάλους ορεινούς όγκους και την παρουσία λιμνών στην περιοχή του Αμυνταίου και των Πρεσπών. Χαρακτηρίζεται από μια ψυχρή – υγρή και μία θερμή – ξηρή περίοδο.

Η παρουσία των λιμνών επηρεάζει θετικά το μικροκλίμα των γειτονικών τους περιοχών, προσφέροντας ηπιότερες συνθήκες κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αν και κατά μεγάλες περιόδους ολικού παγετού οι μικρότερες από αυτές παγώνουν.

Στους παρακάτω Πίνακες 1 και 2 φαίνονται τα θερμοκρασιακά και βροχομετρικά δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή της Άνω Καλλινίκης για το χρονικό διάστημα 1974 έως και 2004. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά η μέση θερμοκρασία για τη διάρκεια των 30 αυτών ετών είναι 12,58 °C, ενώ ο μέσος όρος της ετήσιας βροχόπτωσης ανέρχεται σε 471,65 mm.

Πίνακας 1. Μηνιαίες θερμοκρασίες για την περίοδο 1974 – 2004.

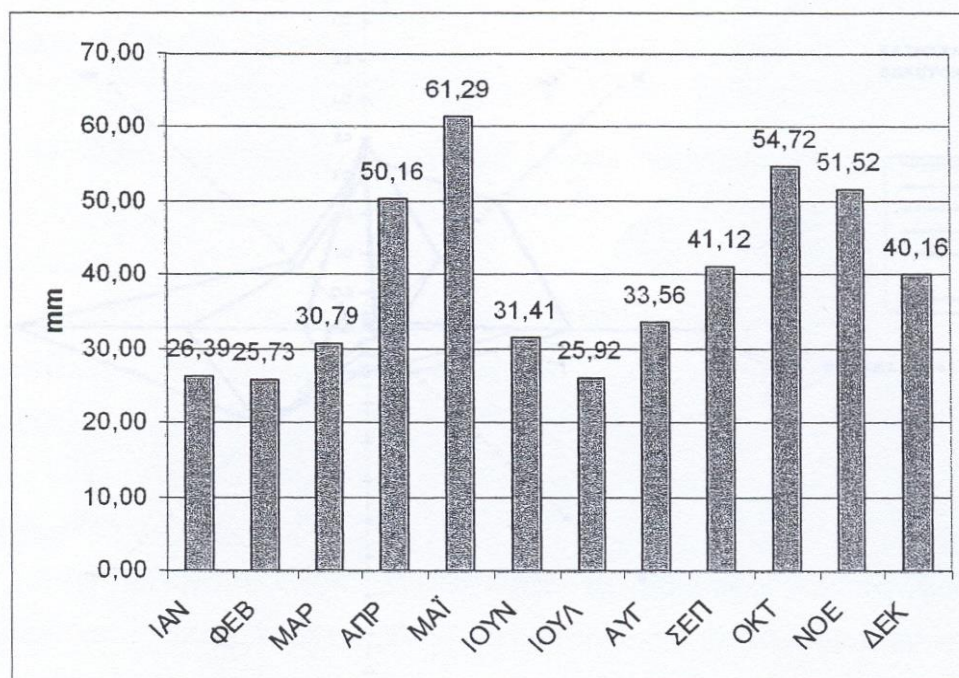
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ
1974	1,8	4,7	8,1	8,5	13,0	18,0	20,9	21,7	18,1	12,5	5,5	-0,9	10,99
1975	-7,4	-1,7	6,3	10,7	15,3	18,1	20,7	19,7	19,4	11,6	6,0	1,6	10,03
1976	1,1	3,0	8,1	11,4	16,0	19,4	22,5	21,7	20,4	14,7	6,4	4,2	12,41
1977	3,3	8,8	10,0	12,9	17,4	20,3	24,2	23,3	17,8	13,9	11,8	5,8	14,13
1978	5,7	9,9	9,6	11,8	16,0	20,5	23,1	22,9	20,2	14,7	8,3	4,3	13,92
1979	2,7	6,5	9,0	9,2	14,8	20,6	22,1	20,1	18,2	13,1	8,4	6,8	12,63
1980	0,9	5,1	7,1	9,9	13,7	18,8	22,9	23,1	20,2	18,1	10,7	5,7	13,02
1981	0,7	1,2	9,9	11,0	13,4	21,3	21,2	22,0	18,7	15,9	4,2	6,4	12,16
1982	4,0	2,6	7,0	9,6	14,6	20,5	21,4	22,1	20,0	15,2	7,7	6,5	12,60
1983	4,9	5,7	10,0	13,8	18,7	19,0	22,6	22,1	19,0	12,4	8,4	5,4	13,50
1984	6,2	6,9	6,9	9,9	17,7	21,0	24,0	22,2	20,4	18,3	10,3	5,4	14,10
1985	5,5	3,4	8,3	15,7	20,4	24,8	25,6	23,3	20,8	14,0	11,7	7,1	15,05
1986	5,2	5,2	8,1	15,2	18,5	20,7	23,8	24,8	22,7	16,8	8,3	6,5	14,65
1987	4,7	5,9	1,8	13,8	17,3	22,4	26,5	24,9	22,8	13,8	8,3	5,8	14,00
1988	3,9	4,9	7,9	11,9	18,3	22,3	26,0	26,8	27,9	12,4	8,0	3,3	14,47
1989	3,7	8,7	9,8	14,1	14,0	18,4	21,9	22,0	19,0	11,7	7,1	3,0	12,78
1990	-5,6	6,2	10,4	12,3	16,1	21,2	24,2	22,5	18,5	14,3	10,5	0,4	12,58
1991	-1,5	0,1	9,7	9,4	12,5	21,0	22,5	21,4	17,6	13,9	8,6	-2,2	11,08
1992	0,8	3,0	7,0	11,9	15,1	20,4	22,0	25,4	20,5	16,8	8,3	3,6	12,90
1993	-2,4	2,1	7,0	12,8	16,1	21,9	24,2	24,0	21,5	17,7	7,7	5,6	13,18
1994	4,5	4,0	10,2	12,9	18,1	21,8	24,1	25,2	23,5	14,9	8,4	3,9	14,29
1995	0,4	7,4	7,8	10,4	16,9	23,3	24,1	22,4	18,5	13,2	5,1	6,6	13,01
1996	3,1	2,6	3,7	10,5	17,7	21,7	22,7	22,7	15,6	11,1	8,6	3,3	11,94
1997	3,8	4,5	5,7	6,9	17,8	23,1	24,1	22,2	17,9	11,0	7,8	3,4	12,35
1998	2,9	4,4	4,8	13,7	15,7	22,5	25,3	25,0	18,1	14,5	6,5	-0,4	12,75
2002	-6,2	6,3	11,2	1,0					14,0	12,0	7,7	2,3	6,04
2003	2,9	-1,9	4,7	8,7	17,8	21,1	22,9	23,0	16,2	12,9	7,8	0,9	11,42
2004	-1,1	1,3	6,9	11,7	13,5	19,2	17,5		16,8	14,4	8,9	3,0	10,19
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	1,73	4,31	7,75	11,13	16,16	20,86	23,07	22,94	19,44	14,14	8,11	3,83	12,58



Σχήμα 4. Μέση μηνιαία θερμοκρασία για το διάστημα 1974 – 2004 από τον μετεωρολογικό σταθμό Άνω Καλλινίκης.

Πίνακας 2. Μηνιαία βροχόπτωση για την περίοδο 1974 – 2004.

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ 1974 - 2004 ΣΤΑΘΜΟΣ Α. ΚΑΛΛΙΝΙΚΗΣ													
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΣΥΝΟΛΟ ΕΤΟΥΣ
1974	32,3	22,8	35,8	91,4	92,8	72,2	0,7	41,4	87,0	60,2	101,4	3,0	641,0
1975	0,0	4,0	32,2	65,3	97,9	107,8	48,9	13,6	46,9	41,2	30,7	1,8	490,3
1976	29,8	44,0	13,0	77,8	143,3	62,0	85,5	33,2	6,8	58,6	80,8	17,7	652,5
1977	29,2	43,5	34,5	22,8	41,3	29,9	11,9	95,9	80,2	6,7	68,4	33,8	498,1
1978	45,1	24,5	78,5	48,5	35,0	3,8	1,3	3,4	50,9	61,8	14,3	45,0	412,1
1979	36,5	39,0	26,8	91,4	99,0	6,3	11,3	98,6	72,6	42,0	199,0	26,4	748,9
1980	28,0	51,5	46,2	38,9	178,4	53,0	11,1	43,0	22,0	142,0	23,8	76,0	713,9
1981	39,0	20,0	63,0	47,0	16,0	15,5	22,0	39,0	29,5	106,0	38,0	46,0	481,0
1982	5,0	16,5	69,8	85,0	57,1	15,8	6,0	38,0	48,0	71,0	88,0	65,0	565,2
1983	37,0	20,0	60,1	18,0	57,5	114,5	23,7	9,4	57,6	21,0	54,0	36,0	508,8
1984	53,0	46,0	27,1	51,7	4,2	8,0	7,0	61,1	15,5	2,0	35,0	4,0	314,6
1985	59,5	1,2	34,0	50,0	40,0	14,0	3,5	9,0	10,0	23,0	102,0	15,0	361,2
1986	23,5	61,0	19,0	8,0	6,2	3,0	41,0	14,0	6,0	31,5	11,2	6,8	231,2
1987	13,5	24,2	51,1	51,3	35,4	1,5	11,4	4,5	5,5	71,0	62,0	4,0	335,4
1988	4,5	10,2	20,5	34,5	4,0	17,0	20,0	4,0	29,5	16,0	51,1	14,0	225,3
1989	3,0	26,0	34,5	26,4	53,0	4,2	25,1	52,0	82,0	41,9	28,9	21,9	398,9
1990	4,7	60,0	11,3	33,2	41,1	1,2	18,5	38,1	19,8	97,0	41,5	89,0	455,4
1991	12,0	44,0	25,0	82,9	61,7	14,0	19,7	43,6	84,5	20,4	51,6	0,6	460,0
1992	2,0	1,8	11,0	94,0	72,8	61,6	32,5	5,0	8,5	68,5	24,4	61,5	441,6
1993	13,0	6,5	23,2	27,0	59,0	35,5	9,0	8,5	9,3	75,5	52,0	20,5	339,0
1994	90,0	21,5	15,0	79,7	3,7	22,3	69,0	25,5	8,0	48,8	29,5	52,0	465,0
1995	14,0	14,0	30,0	30,5	95,0	12,5	71,5	60,8	54,5	60,0	28,8	112,5	584,1
1996	67,8	42,0	32,1	35,3	30,1	6,9	33,9	24,0	71,9	28,6	46,1	68,4	487,1
1997	22,6	2,2	19,1	28,8	34,0	32,2	50,1	34,0	14,0	77,4	53,0	37,1	404,5
1998	18,0	53,1	11,0	21,2	105,8	7,6	12,2	34,2	63,2	51,0	90,9	43,1	511,3
2000	0,0	48,9	1,0	4,0	48,0	5,0	20,0	0,0	9,0	72,0	32,0	17,0	256,9
2001	16,0	8,0	10,0	90,0	85,0	6,0	17,0	21,0	9,0	0,0	17,9	97,0	376,9
2002	9,6	1,8	69,4	105,0	145,5	7,8	84,9	90,7	158,2	76,6	9,6	142,0	901,1
2003	58,4	12,4	9,6	16,6	61,0	95,8	8,8	27,8	23,6	121,2	37,2	23,6	496,0
2004	24,8	1,4	9,8	48,6	35,0	105,4	0,0		50,0	50,6	42,4	24,2	392,2
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	26,39	25,73	30,79	50,16	61,29	31,41	25,92	33,56	41,12	54,72	51,52	40,16	471,65



Σχήμα 5. Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής για το διάστημα 1974 – 2004 από τον Μετεωρολογικό σταθμό Άνω Καλλινίκης.

2.1.3. Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011 η περιφερειακή ενότητα Φλώρινης έχει πληθυσμό 51414 κατοίκους, (54751 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2001 και 53147 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 1991). Παρατηρείται ότι ενώ από το 1991 έως το 2001 υπάρχει μία αύξηση στον συνολικό πληθυσμό του νομού, από το έτος 2001 και μετά έως και την τελευταία απογραφή του 2011 είναι εμφανής μία πτώση της τάξεως του 6% κάτι που πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος ανθρώπων επιλέγει να ζήσει σε μεγαλύτερες πόλεις για πιο εύκολη εύρεση εργασίας.

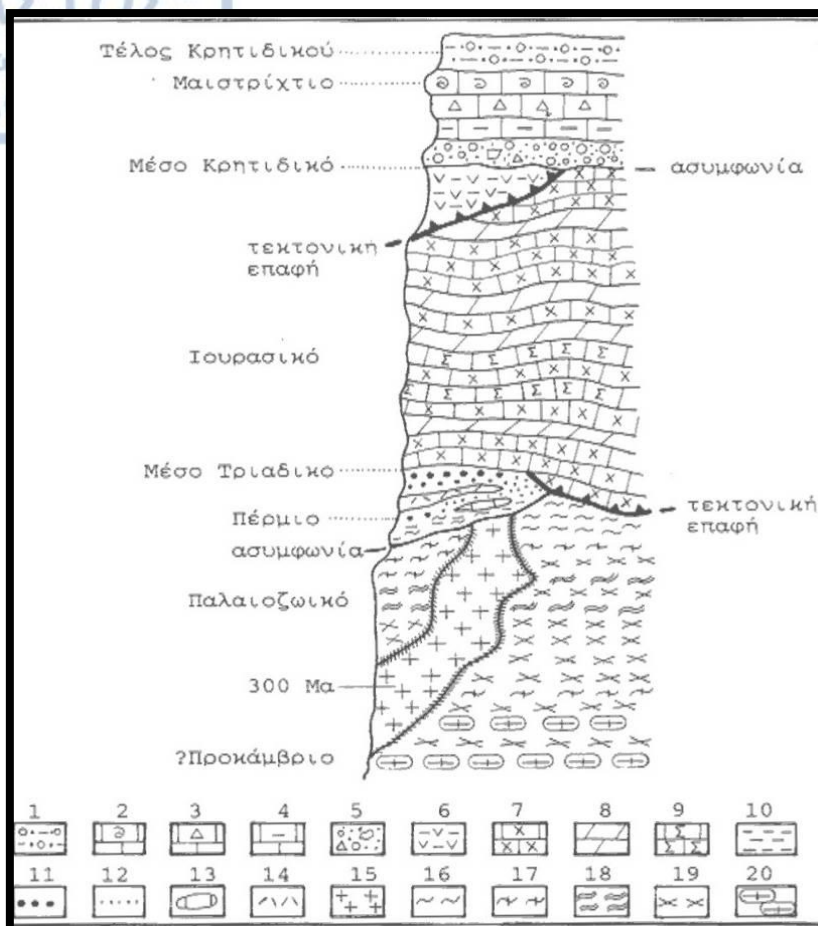
Στον Πίνακα 3 φαίνεται ο αριθμός των κατοίκων σε επίπεδο δήμου για την περιφερειακή ενότητα Φλώρινας.

Πίνακας 3. Δημογραφικά στοιχεία της περιοχής (Πηγή: ΕΣΥΕ).

Δήμος ή Κοινότητα	Σύνολο Πληθυσμού		
	2011	2001	1991
Σύνολο Χώρας	10.816.286	10.939.605	10.252.580
Περιφερειακή ενότητα Φλώρινας	51414	54751	53147
Δήμος Φλώρινας	17907	17069	14873
Δήμος Περάσματος	4234	5458	6904
Δήμος Μελίτης	5927	7090	7120
Δήμος Κάτω Κλεινών	2735	3899	4281
Δήμος Πρεσπών	1560	1856	1732
Δήμος Αμυνταίου	7612	8322	7838
Δήμος Φιλώτα	4524	4527	5025
Δήμος Αετού	2952	3734	3679
Κοιν. Βαρικού	638	699	809
Κοιν. Κρυσταλλοπηγής	359	458	313
Κοιν. Λεχόβου	1115	1224	1329
Κοιν. Νυμφαίου	132	415	244

2.1.4. Γεωλογία

Η περιοχή έρευνας αποτελεί το πεδινό τμήμα της λεκάνης της Φλώρινας και ανήκει στην Πελαγονική ζώνη. Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, τους γνευσιωμένους γρανίτες, ημιμεταμορφωμένα Περμο-Τριαδικά πετρώματα, δύο ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού - Ιουρασικού, οφειόλιθους και Άνωκρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα (Σχήμα 5).



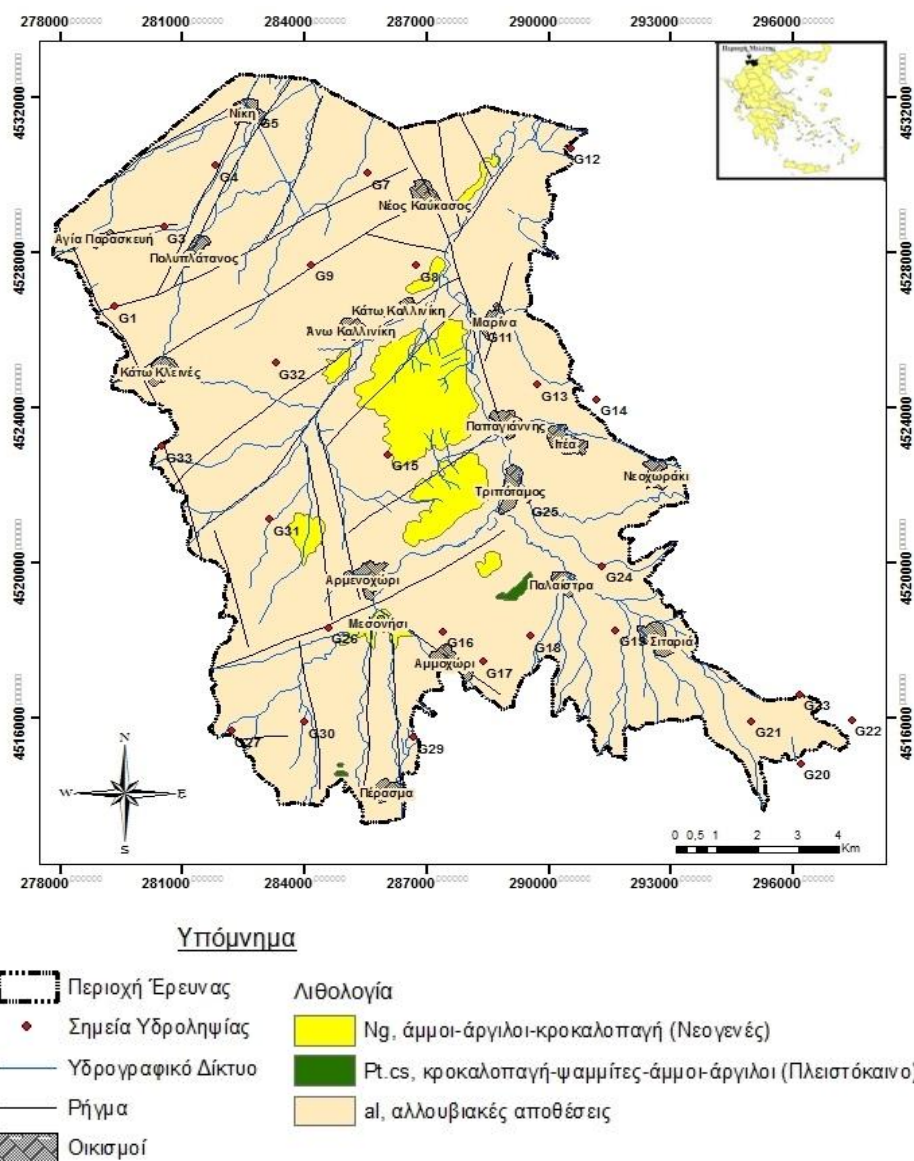
Σχήμα 5. Συνοπτική λιθοστρωματογραφική- τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ζώνης.

1 - 5: Επικλυσιογενή ιζήματα Μέσου - Άνω Κρητιδικού. 1: Φλύσχης Άνω Μαιστριχτίου- Κάτω Παλαιοκαίνου, 2: ασβεστόλιθος Μαιστριχτίου, 3: μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, 4: μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, 5: κροκαλο- λατυποπαγή της βάσης, 6: οφειόλιθοι και σινοδοά πελαγικά ιζήματα. 7-9: πετρώματα των δύο ανθρακικών καλυμμάτων Τριαδικού- Ιουρασικού, 7: κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα, 8: δολομίτες, 9: σιπολίνες, 10-14: πετρώματα της μετακλαστικής σειράς Περμίου- Κάτω Τριαδικού, 10: μετα-πελίτες, φυλλίτες, 11: χαλαζιακάμετα- κροκαλοπαγή, 12: μετα- ψαμμίτες, μετα- αρκόζες, 13: φακοί ασβεστολίθων, 14: μετα-ρυόλιθοι, μετα-τόφοι, 15: γνευσιωμένοι γρανίτες Άνω Λιθανθρακοφόρου, 16-20: πετρώματα του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου Παλαιοζωικής ή και προ. - Κάμβριας ηλικίας, 16: σχιστόλιθοι (χλωριτικοί, μαρμαρυγιακοί, αμφιβολιτικοί, επιδοιτικοί), 17: διμαρμαρυγιακοί- γρανατούχοι σχιστόλιθοι, 18: αμφιβολίτες, 19: γνεύσιοι, 20: οφθαλμογνεύσιοι (Μουντράκης, 1985).

Συγκεκριμένα, η πεδιάδα της Φλώρινας αποτελείται από Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι Νεογενείς αποθέσεις αποτελούνται από μάργες, ψαμμίτες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, άμμο και κροκαλοπαγή, ενώ τα Τεταρτογενή ιζήματα είναι αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από άμμους, χαλίκια, άργιλο και κροκάλες (Σχήμα 6).

Από τεκτονική άποψη στην ευρύτερη περιοχή εμφανίζονται τρία κύρια συστήματα ρηγμάτων με διευθύνσεις BA-ΝΔ, ΒΒΔ-ΝΝΑ, ΒΒΑ-ΝΝΔ που επηρέασαν το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, ενώ ένα τέταρτο νεότερο σύστημα ρηγμάτων με μέση

διεύθυνση περίπου Α-Δ έχει επηρεάσει κυρίως τα νεογενή και πλειστοκαινικά ιζήματα (Καζάκης 2008).



Σχήμα 6. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε. της πεδιάδας της Φλώρινας μαζί με τα σημεία δειγματοληψίας (φύλλο Φλώρινα – Βεύη).

3. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή αποτελείται από σχηματισμούς οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Όπως αναφέρθηκε αυτοί είναι οι Νεογενείς και οι Τεταρτογενείς αποθέσεις.

- Οι Νεογενείς αποθέσεις από λιθολογική άποψη αποτελούνται από αργιλομαργαϊκά ιζήματα που χαρακτηρίζονται από μικρή διαπερατότητα. Αυτά τοποθετούνται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας και τα διακρίνει μικρή υδροφορία. Συνίσταται από ψαμμίτες, μάργες, άμμους, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.

- Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις είναι αλλουβιακές αποθέσεις από ποταμολιμναία υλικά, κροκάλες, χαλίκια, άμμους κι άργιλους που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας.

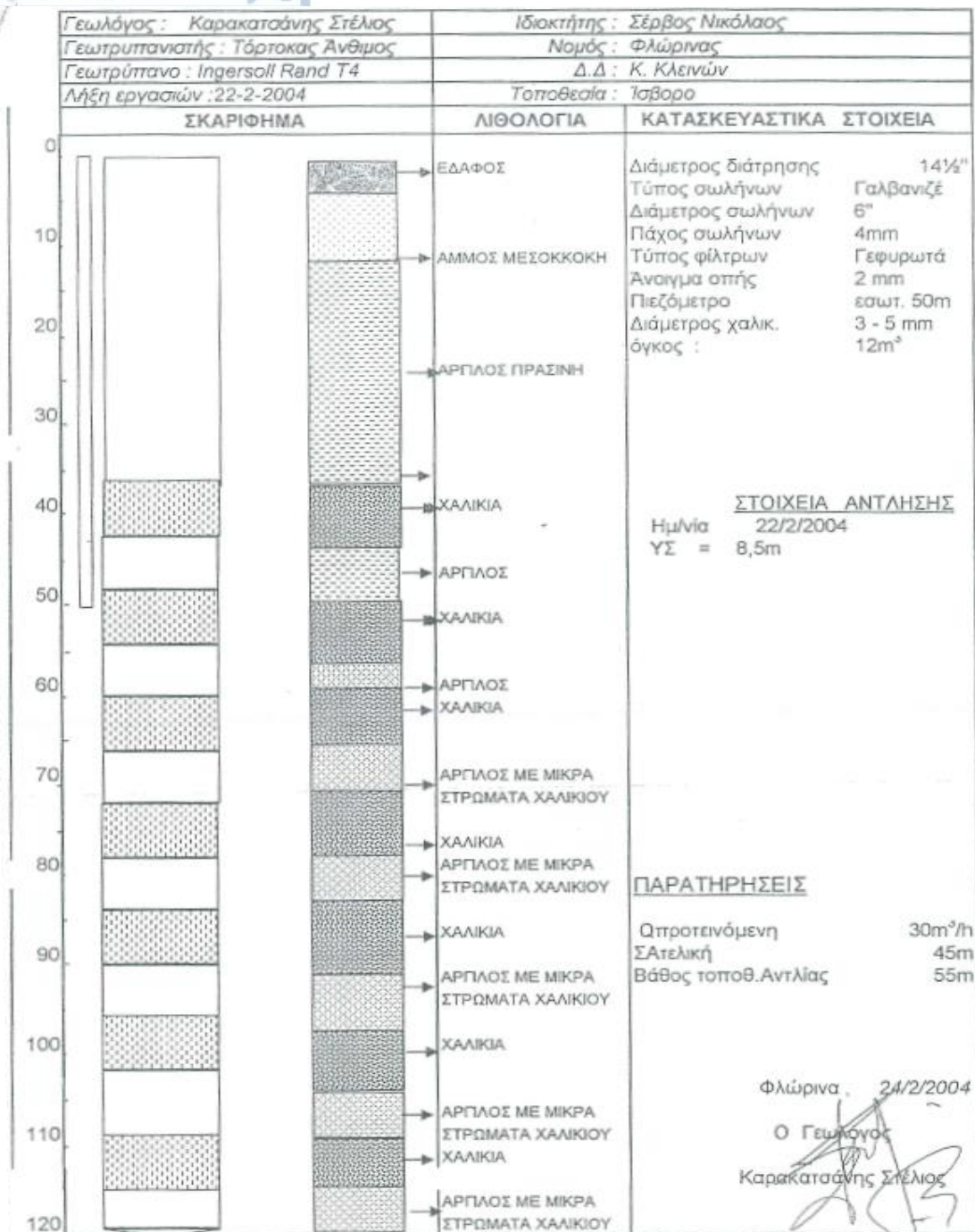
Εκεί που απαντώνται οι κροκάλες, χαλίκια και άμμοι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερες, ενώ μικρότερες τιμές συναντάμε στις περιοχές που υπάρχει άργιλος.

3.2. Υδροφορείς

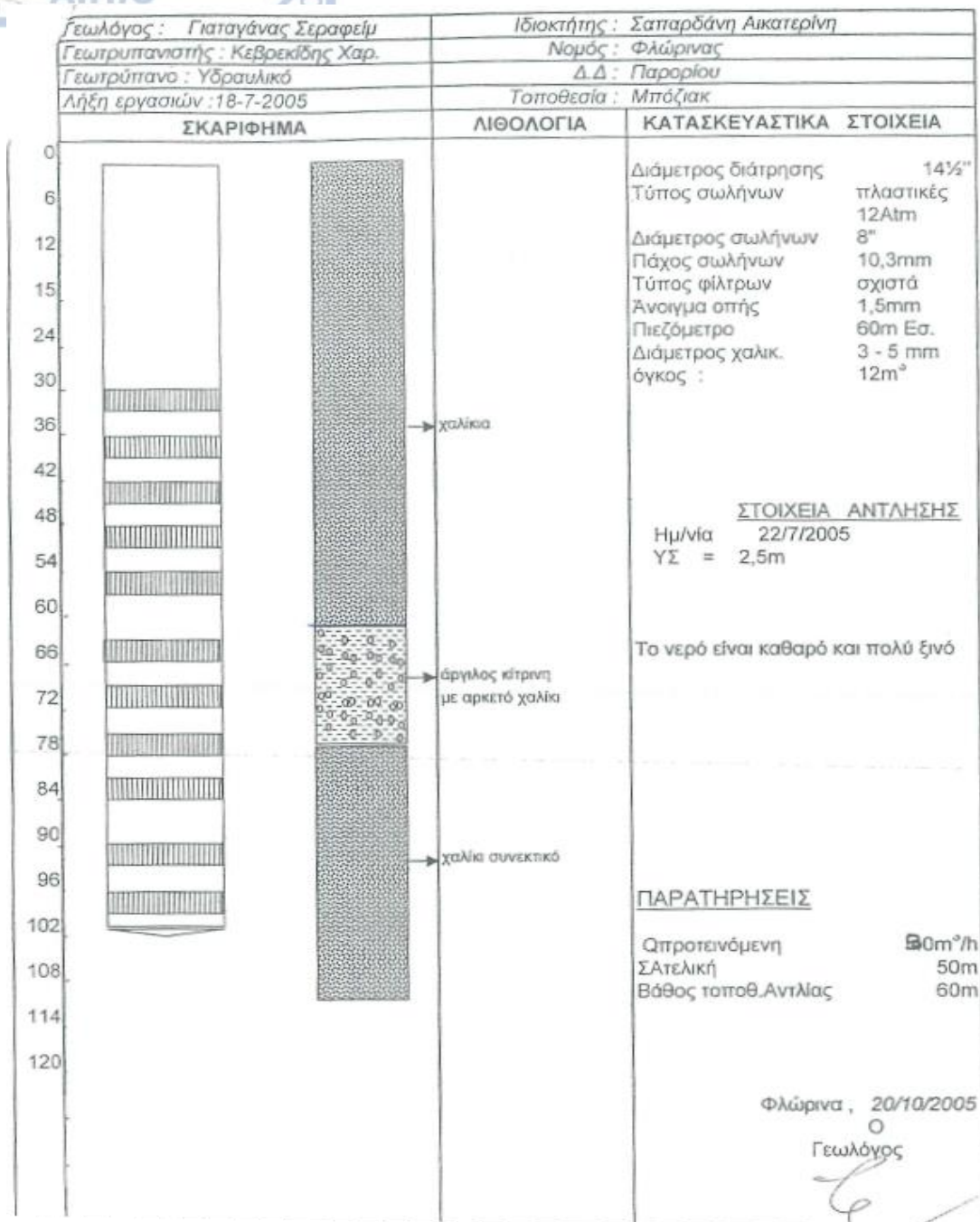
Στην περιοχή συναντούμε υδροφορείς τόσο ελεύθερους όσο και υπό πίεση, αναπτύσσονται κυρίως στις τεταρτογενείς αποθέσεις. Ακολουθούν λιθολογικές τομές από την περιοχή που δείχνουν τα είδη των υδροφορέων (Σχήματα 7 και 8).

3.3. Μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού – πιεζομετρία

Για την κατασκευή των πιεζομετρικών χαρτών μετρήθηκε το βάθος του υπόγειου νερού για τις περιόδους Μάιος 2016 – Σεπτέμβριος 2016 σε 59 γεωτρήσεις. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τιμές της στάθμης του υπόγειου νερού όπως αυτές μετρήθηκαν με σταθμήμετρο του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 7. Λιθολογική τομή όπου παρουσιάζονται αλληεπάλληλοι υπό πίεση υδροφορείς.



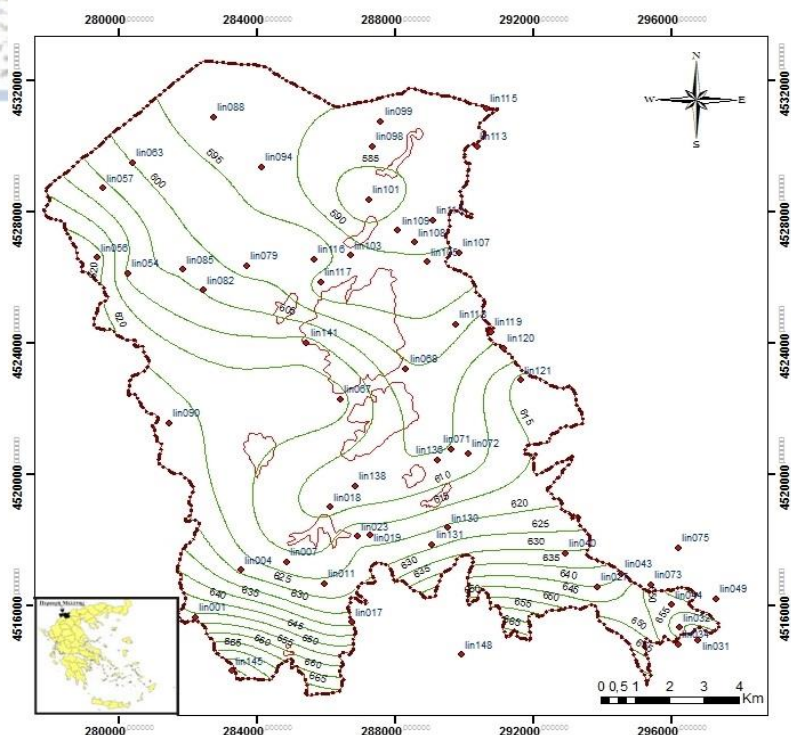
Σχήμα 8. Λιθολογική τομή όπου παρουσιάζεται ελεύθερος υδροφορέας.

Πίνακας 4. Τιμές βάθους υπόγειου νερού και πιεζομετρικού φορτίου.

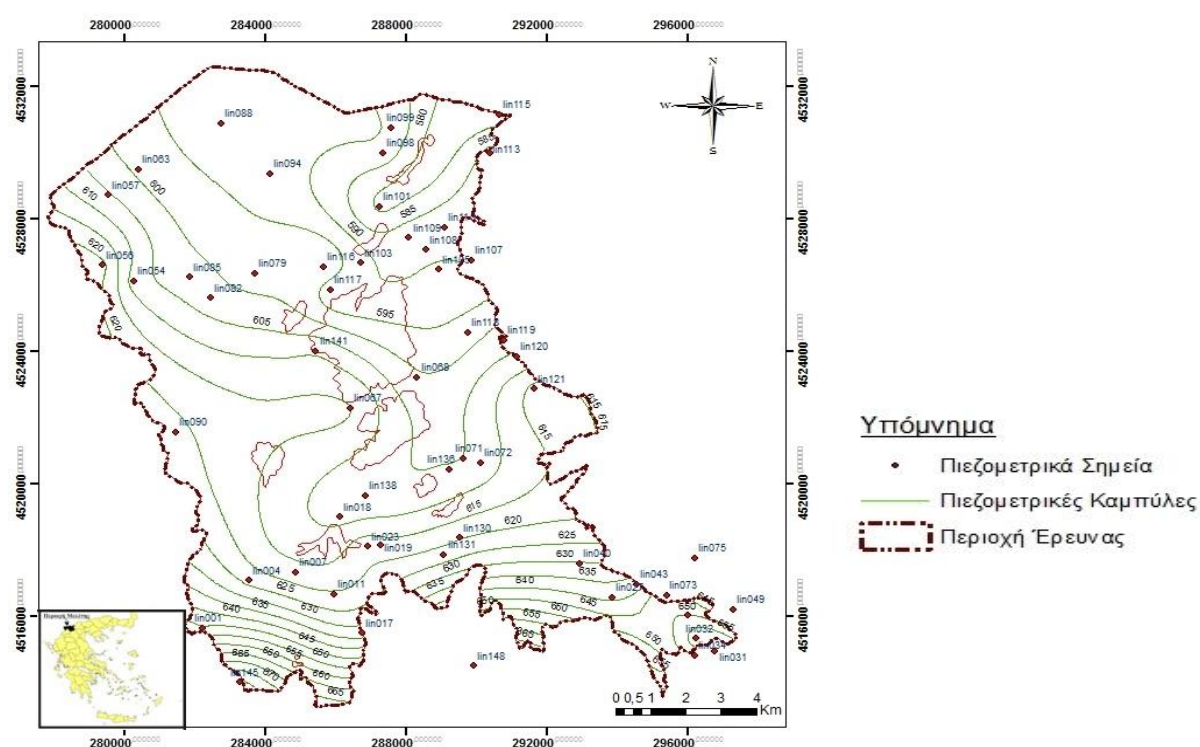
WELLS	Z dem (m)	Βάθος Μ (m)	Πιεζομετρικό φορτίο Μ (m)	Βάθος Σ (m)	Πιεζομετρικό φορτίο Σ (m)
LIN001	650,60	4,3	646,30	5	645,60
LIN004	625,71	1,6	624,11	2,1	623,61
LIN005	624,53	2,1	622,43	2,5	622,03
LIN007	619,18	2,1	617,08	2,1	617,08
LIN011	624,47	3	621,47	3,6	620,87
LIN013	704,84	0,6	704,24	0,6	704,24
LIN017	633,51	1,1	632,41	1,2	632,31
LIN018	610,72	2	608,72	2	608,72
LIN019	620,71	3,1	617,61	4	616,71
LIN023	620,58	2	618,58	2,8	617,78
LIN027	642,14	2	640,14	3,2	638,94
LIN031	677,09	14	663,09	16,2	660,89
LIN032	665,44	6	659,44	7	658,44
LIN034	675,58	25,7	649,88	26,5	649,08
LIN040	635,33	4,7	630,63	5,1	630,23
LIN043	644,43	5	639,43	6,6	637,83
LIN044	661,13	9	652,13	11,2	649,93
LIN049	682,08	44,7	637,38	50,7	631,38
LIN054	614,85	6,1	608,75	7,1	607,75
LIN056	623,34	1,13	622,21	2,25	621,09
LIN057	609,61	3,3	606,31	4,1	605,51
LIN063	604,18	4,3	599,88	5,1	599,08
LIN067	623,07	7	616,07	8,1	614,97
LIN068	608,58	7,8	600,78	7,9	600,68
LIN071	607,08	1,8	605,28	2	605,08
LIN072	609,46	2,3	607,16	2,3	607,16
LIN073	658,17	7,3	650,87	9	649,17
LIN075	682,34	64	618,34	66,7	615,64
LIN079	607,06	8,4	598,66	8,9	598,16
LIN082	609,40	4,8	604,60	6,8	602,60
LIN085	609,64	5,5	604,14	6,8	602,84
LIN088	595,83	2,5	593,33	3	592,83
LIN090	626,23	3,8	622,43	5	621,23
LIN094	597,51	4,6	592,91	4,9	592,61
LIN098	601,32	13	588,32	13,6	587,72
LIN099	601,27	12	589,27	12,2	589,07
LIN101	596,38	16	580,38	17,1	579,28
LIN103	593,70	1,4	592,30	1,6	592,10
LIN105	596,20	5,8	590,40	5,8	590,40
LIN107	608,70	18,3	590,40	18,8	589,90
LIN108	592,40	3	589,40	3,2	589,20
LIN109	591,57	2,8	588,77	3	588,57
LIN110	591,63	2,5	589,13	2,8	588,83
LIN113	601,22	14,5	586,72	14,8	586,42
LIN115	591,60	6	585,60	13,6	578,00
LIN116	602,49	3,5	598,99	3,1	599,39
LIN117	596,05	3,6	592,45	4	592,05
LIN118	604,18	6,28	597,90	6,6	597,58
LIN119	615,40	10,6	604,80	11,6	603,80
LIN120	615,22	9,8	605,42	9,6	605,62
LIN121	619,10	2,8	616,30	2,9	616,20
LIN125	671,71	50	621,71	52	619,71
LIN130	624,49	3,4	621,09	4,8	619,69
LIN131	631,51	8	623,51	9,4	622,11
LIN136	607,94	2,2	605,74	2,4	605,54
LIN138	609,39	2,5	606,89	3,2	606,19
LIN141	627,12	15,5	611,62	18	609,12
LIN145	676,24	0	676,24	0	676,24
LIN148	703,71	24	679,71	24,1	679,61

Ακολουθούν οι πιεζομετρικοί χάρτες για τις δύο περιόδους (Σχήματα 9 και 10).

Χάρτης κατανομής βάθους του υπόγειου νερού παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 9. Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου Μαΐου 2016.



Σχήμα 10. Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου Σεπτεμβρίου 2016.

Στη γεώτρηση Lin145 (νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής) παρατηρήθηκε το φαινόμενο του αρτεσιανισμού με ανθρακούχο νερό. Ο αρτεσιανισμός οφείλεται στην πίεση που ασκεί το CO₂ στα υδροφόρα στρώματα, ενώ στις διασταυρώσεις και συμβολές των ρηγμάτων παρατηρείται μεγάλη παρουσία αερίου (Βασιλειάδης, 2005). Από τους πιεζομετρικούς χάρτες παρατηρούμε ότι η διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού είναι N – B. Η πτώση της στάθμης ανάμεσα στην υγρή και ξηρή περίοδο του έτους 2016 κυμαίνεται από 0 έως 7,6 m, με εξαίρεση τις γεωτρήσεις Lin116 και Lin120 όπου η στάθμη κατά την ξηρή περίοδο μετρήθηκε κατά 0,4 και 0,2 m αντίστοιχα ψηλότερα από ότι είχε μετρηθεί την υγρή περίοδο.

3.4. Υδροχημεία

Κατά τον μήνα Ιούνιο της ίδιας χρονιάς, συλλέχθηκαν δείγματα υπόγειου νερού από 29 γεωτρήσεις και πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. Ο έλεγχος των χημικών αναλύσεων έγινε με το σφάλμα ισοζυγίου ιόντων, το οποίο υπολογίστηκε <5%.

Οι αναλύσεις αφορούσαν στα κύρια ιόντα και συγκεκριμένα τα νιτρικά ιόντα (NO₃⁻), τα ιόντα χλωρίου (Cl⁻) και τα θειικά ιόντα (SO₄²⁻) μετρήθηκαν με φασματοφωτόμετρο. Τα ιόντα των όξινων ανθρακικών (HCO₃⁻) και του ασβεστίου (Ca²⁺) με τη μέθοδο της τιτλοδότησης, ενώ τα ιόντα μαγνησίου (Mg²⁺) με τη μέθοδο ολικής σκληρότητας. Τέλος, με φλωγογωτόμετρο μετρήθηκαν τα ιόντα καλίου (K⁺) και νατρίου (Na⁺). Κατά τη διάρκεια συλλογής των δειγμάτων νερού μετρήθηκαν επί τόπου και οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού όπως το pH, η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC, μS/cm) και η θερμοκρασία (T °C) με φορητό αγωγιμόμετρο. Όλα τα δείγματα νερού λήφθηκαν σύμφωνα με τις πρότυπες μεθόδους για την ανάλυση του νερού και των λυμάτων (Clesceri et al., 1989).

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα γενικά στατιστικά χαρακτηριστικά (μέγιστες, ελάχιστες μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις) των στοιχείων που υπολογίστηκαν μέσω των υδροχημικών αναλύσεων.

Όσον αφορά το pH αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί από όξινο ως και αλκαλικό καθώς οι τιμές του κυμαίνονται από 5,56 έως 7,68. Στις γεωτρήσεις G4, G7, G13, G19 και G26 παρατηρήθηκαν τιμές μικρότερες του 6, πράγμα που οφείλεται στην παρουσία φυσικών οξυανθρακικών νερών στην λεκάνη της Φλώρινας. Οι τιμές της θερμοκρασίας όπως μετρήθηκαν έχουν εύρος από 15,6 έως 22,7 °C. Μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), εκφράζεται το σύνολο των διαλυμένων αλάτων στο νερό. Η παραμετρική τιμή της

αγωγιμότητας είναι 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ σε θερμοκρασία 20 °C. Στα δείγματα που συλλέχθηκαν οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μετρήθηκαν από 320 έως 1960 $\mu\text{S}/\text{cm}$ με τις τιμές των γεωτρήσεων G1, G5, G8, G22 και G31 να ξεπερνούν τα 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, αλλά όχι την παραμετρική τιμή αυτής. Από τις τιμές των Ολικών Διαλυμένων Στερεών (TDS) που το εύρος τους είναι από 160 μέχρι 990 mg/L, προκύπτει το συμπέρασμα ότι πρόκειται για γλυκό νερό (Βουδούρης Κ., 2009).

Πίνακας 5. Αποτελέσματα υδροχημικών αναλύσεων.

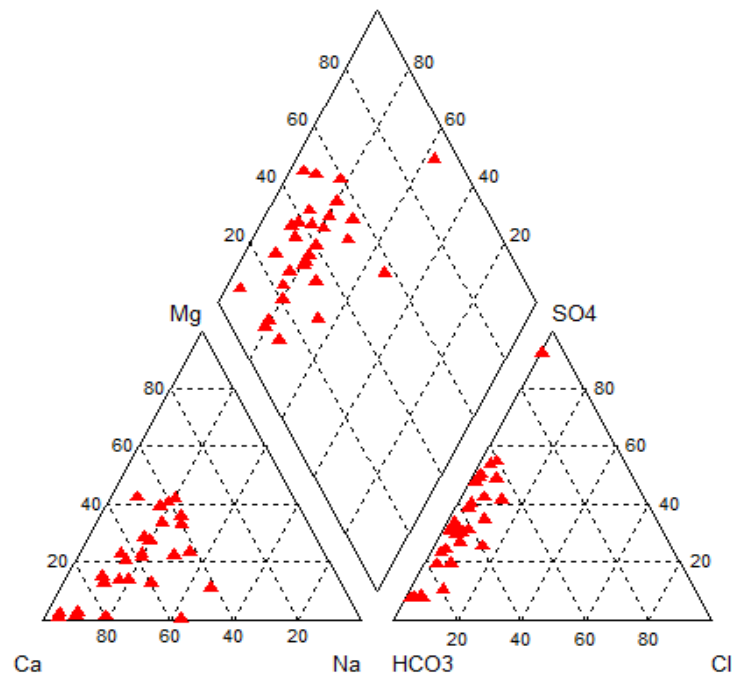
Παράμετροι	Μονάδες	Min	Max	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
pH	-	5,6	7,7	6,4	6,2
T	°C	15,6	22,7	18,6	1,8
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	320	1960	770	441,0
TDS	mg/L	160	990	388	222,9
Ca ²⁺	mg/L	27	252	89	55,6
Mg ²⁺	mg/L	1	74	17	15,1
Na ⁺	mg/L	7	209	39	49,6
K ⁺	mg/L	1	21	3	3,7
Cl ⁻	mg/L	2	46	11	10,4
NO ₃ ⁻	mg/L	2	68	25	21,8
SO ₄ ²⁻	mg/L	13	1020	130	190,3
HCO ₃ ⁻	mg/L	88	840	235	153,6

Οι περιεκτικότητες των ιόντων ασβεστίου (Ca²⁺) και μαγνησίου (Mg²⁺) κυμαίνονται από 27,4 έως 251,6mg/L και 0,73 έως 74,23 mg/L, αντίστοιχα. Οι τιμές των χλωριόντων για όλα τα δείγματα νερού βρέθηκαν σε χαμηλές τιμές, 1,8-46,4 mg/L, ενώ τα ιόντα νατρίου με τιμές από 6,94 έως 209 mg/L έχουν σχετικά αυξημένες τιμές σε κάποια δείγματα (G1, G31), ξεπερνώντας για λίγο την παραμετρική του τιμή σύμφωνα με την Οδηγία 98/83/EK, κάτι που πιθανόν οφείλεται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα. Οι συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών ιόντων βρέθηκαν σε ορισμένα δείγματα υψηλές (G5, G8, G22, G31), γεγονός που επιβεβαιώνει την παρουσία φυσικού ανθρακούχου νερού στην περιοχή της Φλώρινας.

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τόσο οι τιμές των νιτρικών (NO₃⁻), όσο και των θεικών ιόντων (SO₄²⁻), καθώς βρέθηκαν αυξημένες και σε κάποια δείγματα υπερβαίνουν τις παραμετρικές τιμές των στοιχείων αυτών που είναι 50 mg/L για τα νιτρικά και 250

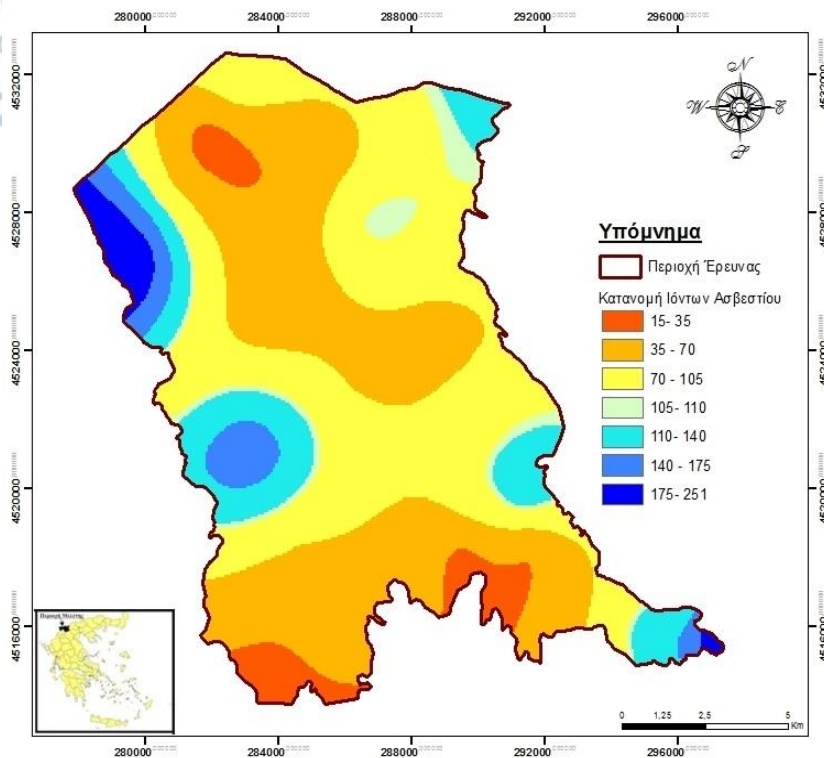
mg/L για τα θειικά. Συγκεκριμένα το εύρος των τιμών που μετρήθηκαν στα νιτρικά ιόντα είναι 1,76-67,9 mg/L και των θεικών ιόντων από 13 έως 1020 mg/L. Οι αυξημένες τιμές των νιτρικών οφείλονται σε χρήση αζωτούχων λιπασμάτων στις καλλιέργειες της περιοχής. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των μεγαλύτερων συγκεντρώσεων θεικών ιόντων, δηλαδή χρήση θεικών λιπασμάτων. Βέβαια στο δείγμα G1 έχουμε μια αρκετά υψηλή τιμή της τάξεως των 1020 mg/L. Ο αριθμός αυτός οφείλεται στην ύπαρξη κτηνοτροφικής μονάδας σε πολλή κοντινή απόσταση από τη συγκεκριμένη γεώτρηση.

Με τη χρήση του προγράμματος Aquahem δημιουργήθηκε το διάγραμμα Piperώστε να βρεθεί ο υδροχημικός τύπος του νερού στην περιοχή έρευνας. Αυτός ορίστηκε ως ασβεστούχος οξυανθρακικός (Ca-HCO₃).

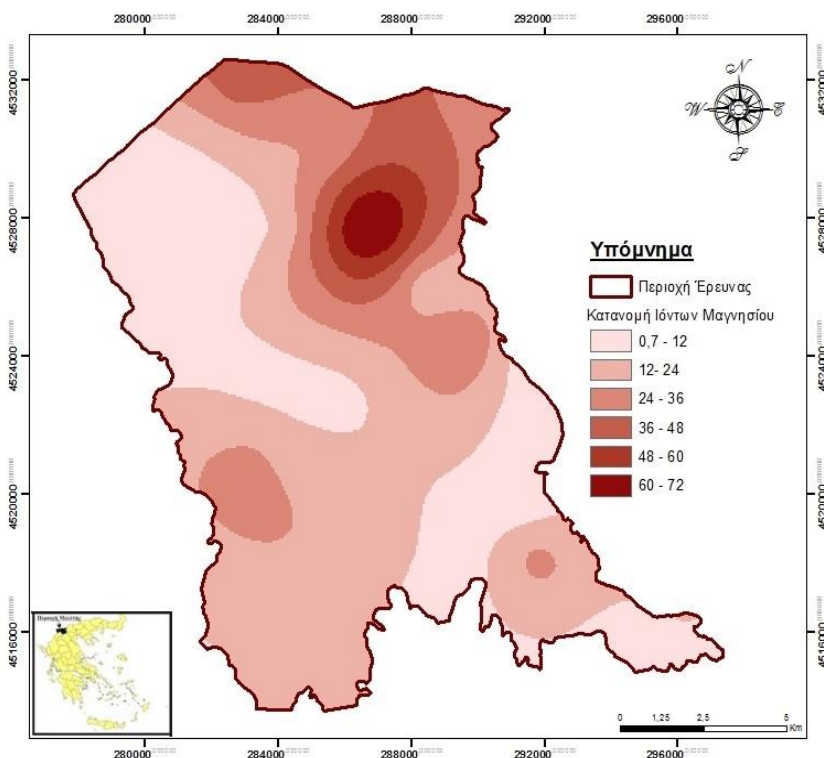


Σχήμα 11. Διάγραμμα Piper.

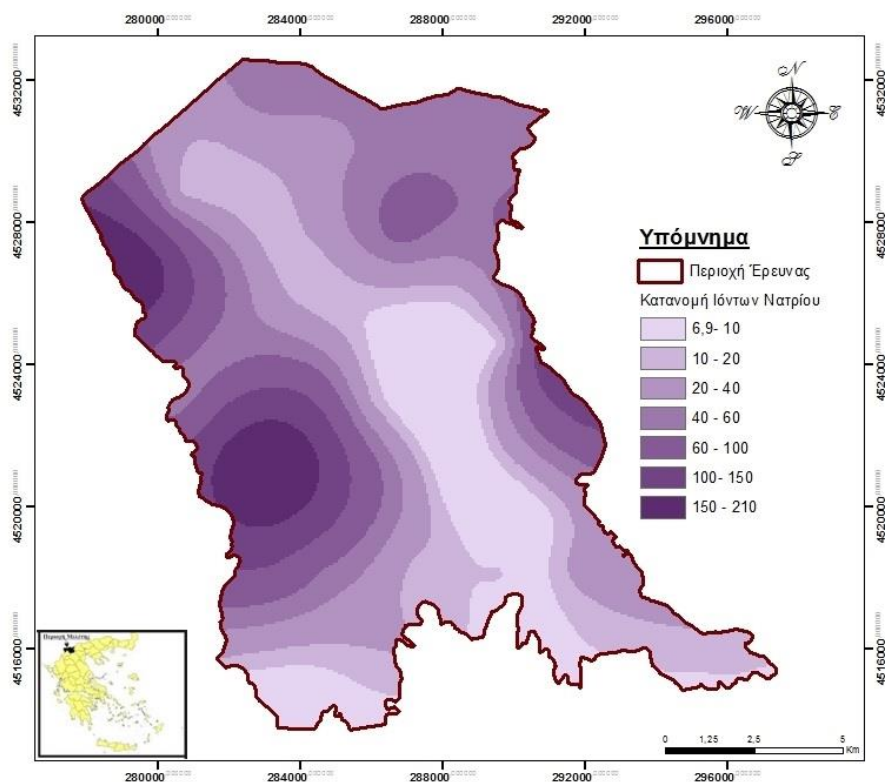
Με τη χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες κατανομής των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού.



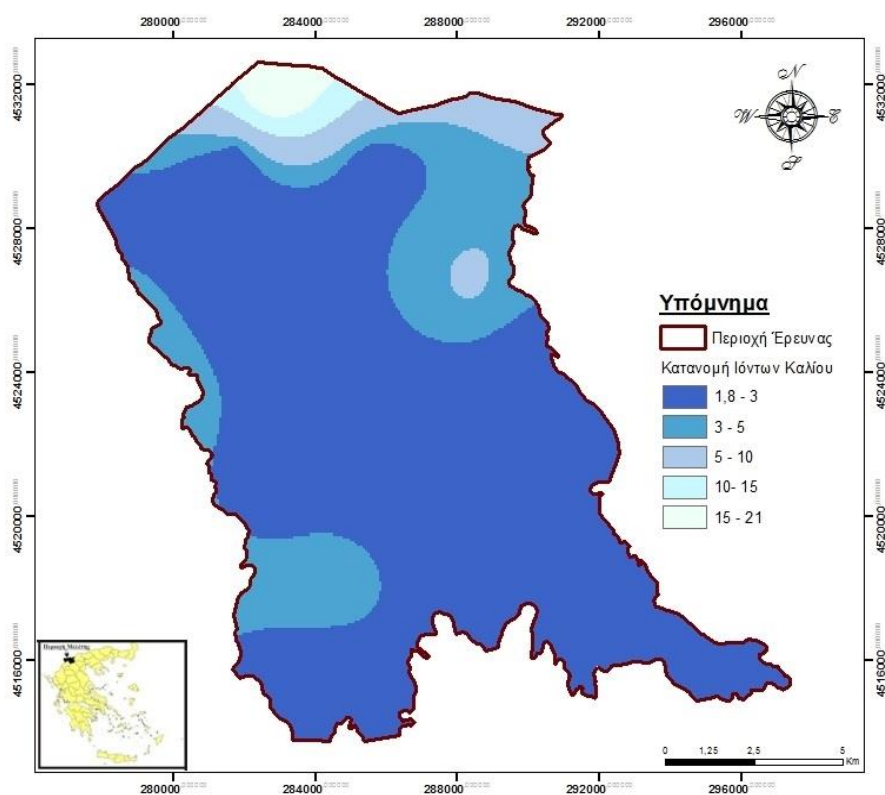
Σχήμα 12. Χάρτης κατανομής ιόντων Ασβεστίου



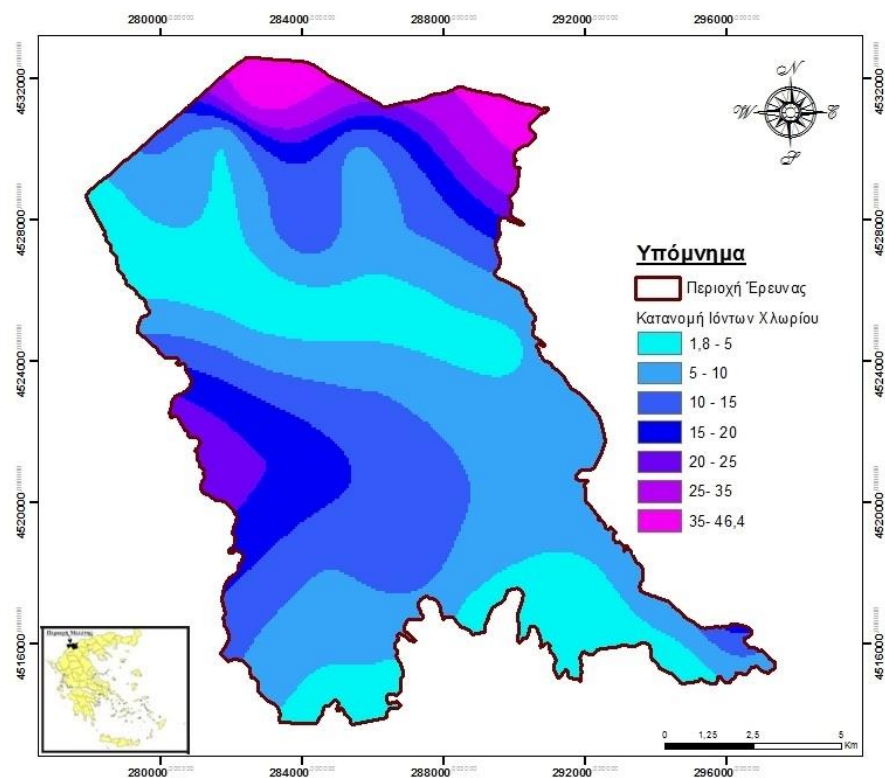
Σχήμα 13. Χάρτης κατανομής ιόντων Μαγνησίου



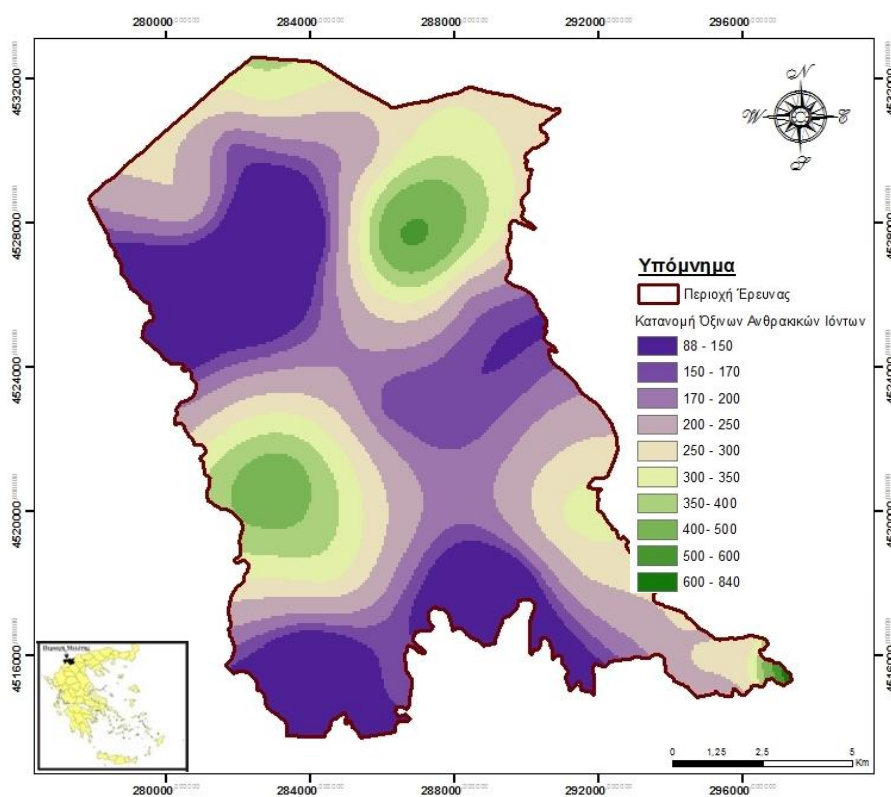
Σχήμα 14. Χάρτης κατανομής ιόντων Νατρίου



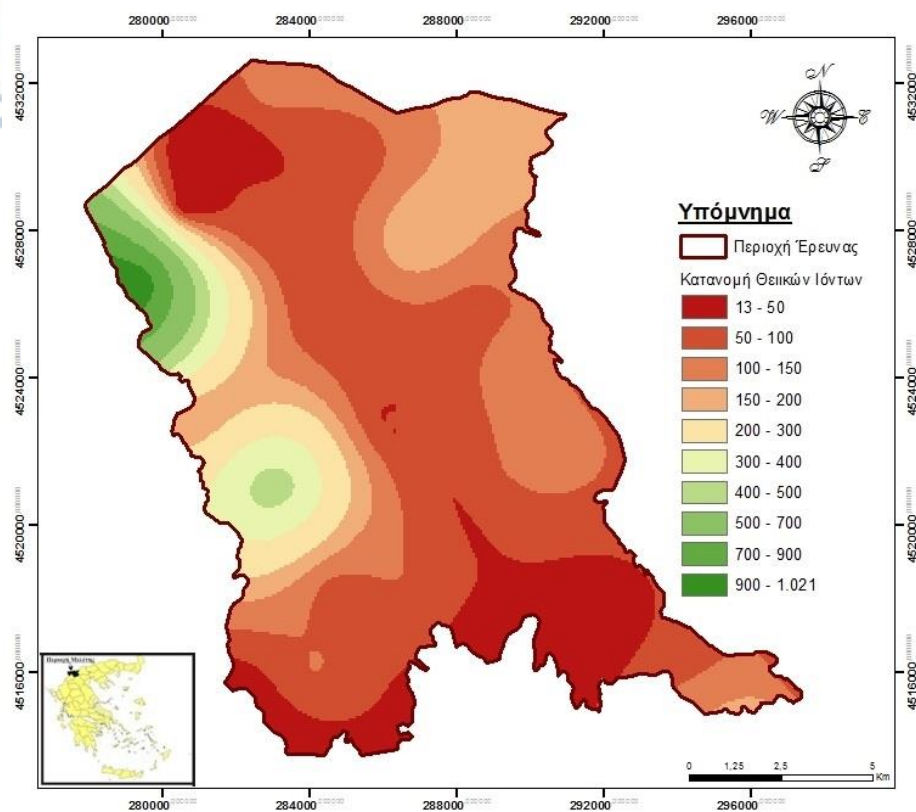
Σχήμα 15. Χάρτης κατανομής ιόντων Καλίου



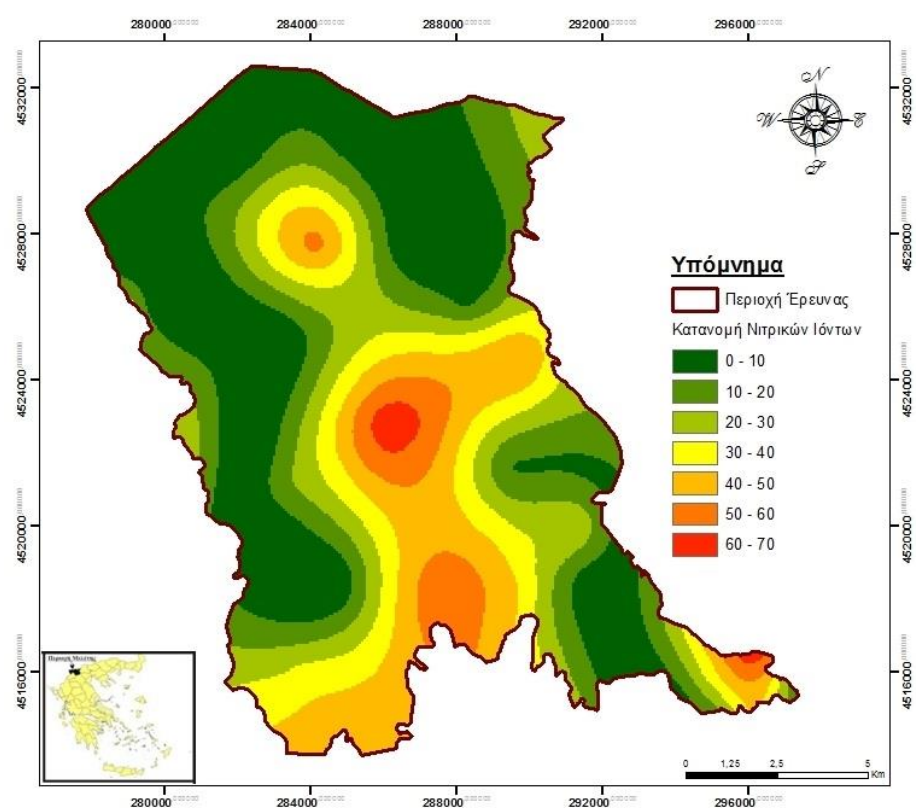
Σχήμα 16. Χάρτης κατανομής ιόντων Χλωρίου



Σχήμα 17. Χάρτης κατανομής όξινων ανθρακικών ιόντων.



Σχήμα 18. Χάρτης κατανομής θεικών ιόντων.



Σχήμα 19. Χάρτης κατανομής νιτρικών ιόντων.

3.5. Καταλληλότητα νερού για άρδευση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πεδινό τμήμα της λεκάνης της Φλώρινας δέχεται έντονη αγροτική δραστηριότητα γι' αυτό και κρίθηκε απαραίτητο να προσδιορισθεί το κατά πόσο το υπόγειο νερό στην περιοχή είναι κατάλληλο για άρδευση.

Ο προσδιορισμός της καταλληλότητας του νερού για άρδευση έγινε με την χρήση δεικτών ποιότητας (πίνακας 6). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ο δείκτης χλωριόντων (Chlorinity index), ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου ή κίνδυνος νατρίου (SAR), το ποσοστό νατρίου ή βαθμός αλκαλίωσης (Sodium percentage, Na%), ο λόγος Mg^{2+}/Ca^{2+} , το δυναμικό αλατότητας (Potential Salinity, PS) και ο δείκτης ή λόγος Kelly (Kelly's index).

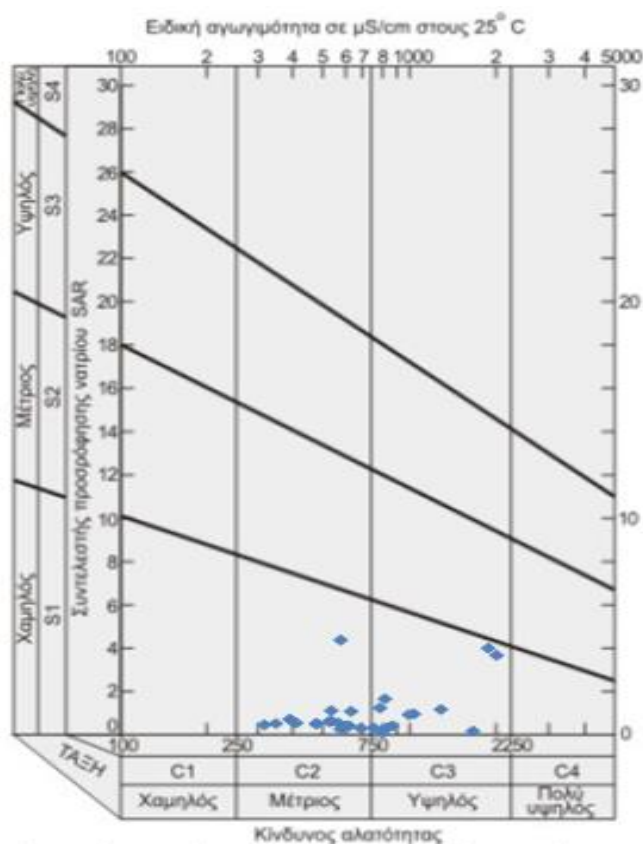
Πίνακας 6. Δείκτες ποιότητας νερού για αρδευτική χρήση που εφαρμόστηκαν.

Κωδικός δείγματος	SAR	Na%	Δυναμικό Αλατότητας (PS)	Δείκτης Kelly	Δείκτης χλωριόντων	Mg^{2+}/Ca^{2+}
G1	3,70	43,19	10,67	0,75	1,80	0,01
G3	0,70	19,72	0,40	0,23	8,46	0,01
G4	0,80	26,95	0,27	0,34	4,93	0,93
G5	1,00	24,75	2,43	0,26	46,40	0,73
G7	1,10	27,45	1,10	0,37	9,60	0,84
G8	1,20	20,83	2,24	0,26	9,37	1,13
G9	0,70	21,71	0,98	0,25	13,63	0,52
G11	0,50	14,68	1,07	0,15	7,06	0,36
G12	1,00	20,57	3,15	0,24	43,40	0,4
G13	0,30	8,89	1,41	0,09	4,20	0,86
G14	4,40	59,24	1,22	1,45	7,10	0,17
G15	0,60	17,26	0,68	0,20	11,00	0,2
G16	0,50	13,69	1,32	0,15	11,93	0,53
G17	0,60	21,01	0,48	0,25	6,07	0,21
G18	0,50	21,29	0,49	0,25	5,27	0,37
G19	0,70	19,84	0,30	0,23	4,47	1,01
G20	0,20	4,16	2,02	0,04	5,00	0,03
G21	0,40	10,12	1,30	0,11	5,60	0,02
G22	0,20	4,61	0,82	0,05	9,30	0,01
G23	0,50	11,51	1,52	0,13	17,83	0,2
G24	0,40	9,75	1,04	0,11	7,97	0,03
G25	0,40	10,74	1,33	0,11	8,03	0,32
G26	1,70	35,13	1,18	0,52	10,56	0,56
G27	0,60	20,97	0,44	0,24	10,43	0,51
G29	0,60	17,86	0,47	0,21	4,87	0,53
G30	0,60	17,96	1,19	0,21	6,50	0,91
G31	4,00	47,26	5,10	0,89	19,70	0,26
G32	1,20	30,07	1,28	0,42	3,30	0,47
G33	1,30	28,75	2,35	0,38	19,93	0,21

Από τον δείκτη χλωριόντων (Chlorinity index), ο οποίος είναι ένας πιο απλός δείκτης καταλληλότητας νερού για άρδευση βρέθηκαν όλα τα δείγματα κατάλληλα καθώς οι τιμές των χλωριόντων είναι μικρότερες των 350 mg/L. Βέβαια απόλυτα ασφαλές για άρδευση είναι το νερό με τιμές $Cl^{-} < 70$ mg/L, ενώ για τιμές μεταξύ 70-350 mg/L πρέπει η άρδευση να γίνεται με προσοχή, ανάλογα με την ευαισθησία της καλλιέργειας (Βουδούρης, 2009). Στη συγκεκριμένη περίπτωση όλες οι τιμές είναι κάτω των 70 mg/L. Με βάση τον δείκτη PS (δυναμικό αλατότητας, Potential Salinity), τα περισσότερα δείγματα έχουν δείκτη

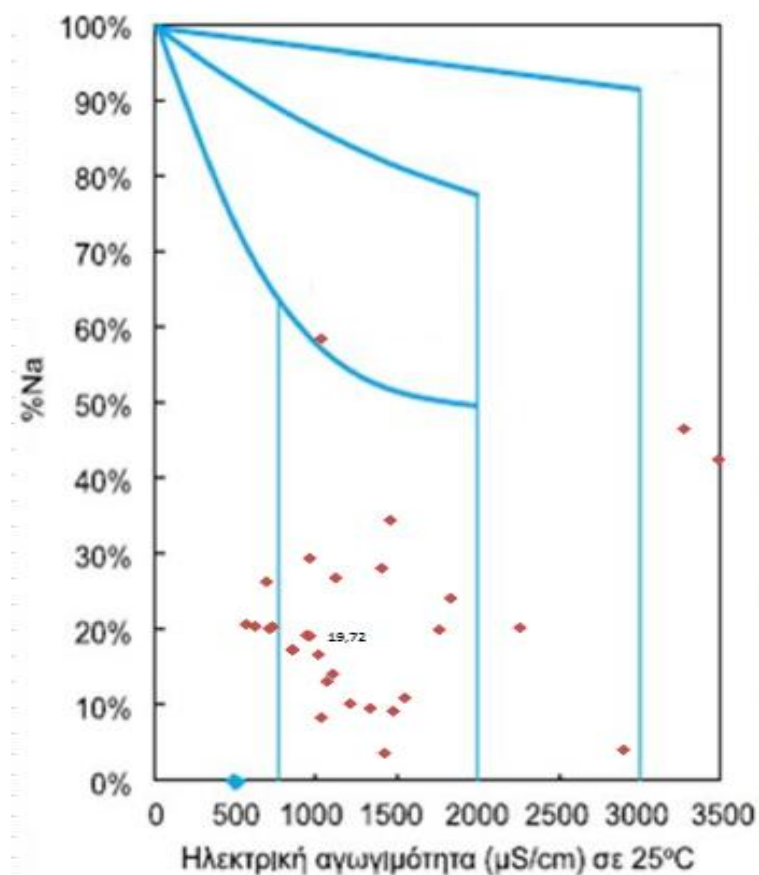
μικρότερο του 3, που υποδηλώνει νερά κατάλληλα για άρδευση. Στα δείγματα G1 και G31 όμως ο δείκτης PS είναι μεγαλύτερος του 5 που σημαίνει πως το νερό είναι επιβλαβές έως ακατάλληλο. Ένας άλλος πιο απλοποιημένος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο δείκτης ή λόγος Kelly, από τον οποίο προέκυψε ότι όλα τα δείγματα είναι κατάλληλα για άρδευση εφόσον οι τιμές του δείκτη για όλα ήταν μικρότερη του 1. Και σε αυτή την περίπτωση όμως τα δείγματα G1 και G31 πλησιάζουν την τιμή 1 χωρίς να την υπερβαίνουν. Ως δείκτης καταλληλότητας άρδευσης χρησιμοποιήθηκε και ο ιοντικός λόγος Mg^{2+}/Ca^{2+} (σε meq/L) όπου ο λόγος για κάθε δείγμα βρέθηκε μικρότερος του 1,5 άρα και το νερό είναι ασφαλές για άρδευση.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα Richards (Σχήμα 20) με βάση τον δείκτη ποιότητας SAR(συντελεστής προσρόφησης νατρίου) τα περισσότερα δείγματα νερού βρίσκονται στην κατηγορία C2 – S1. Η ποιότητα αυτών χαρακτηρίζεται καλή ως μέτρια και χρησιμοποιείται με προφύλαξη σε εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά. Τα υπόλοιπα δείγματα ανήκουν στην κατηγορία C3 – S1 με ποιότητα μέτρια μέχρι πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται για άρδευση αλλά με μέτρα προφύλαξης.



Σχήμα 20. Διάγραμμα Richards.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 21) δύο δείγματα κρίνονται ακατάλληλα για άρδευση (G1, G31), 2 δείγματα χαρακτηρίζονται από αμφιβόλου ποιότητας έως ακατάλληλα (G8, G22), ενώ η καταλληλότητα των υπολοίπων κυμαίνεται από εξαιρετική έως καλή, μέχρι καλή ως αποδεκτή.



Σχήμα 21. Διάγραμμα Wilcox.

4. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

4.1. Γενικά για την τρωτότητα

Τρωτότητα ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευάλωσιμότητα (vulnerability) ενός υδροφορέα είναι η ευαισθησία ή η επιδεκτικότητα που παρουσιάζει απέναντι στους ρύπους. Η έννοια της τρωτότητας βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο ποσοστό το υπόγειο νερό. Άρα κάποιες περιοχές είναι περισσότερο ευάλωτες από κάποιες άλλες.

Μία έννοια που σχετίζεται με την τρωτότητα είναι η ευαισθησία ενός υδροφορέα, δεν πρέπει όμως να ταυτίζεται με αυτήν καθώς :

- **ευαισθησία** ενός υδροφορέα (aquifer sensitivity) είναι η ευκολία με την οποία ένας ρύπος περνάει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα και είναι χαρακτηριστικό των γεωλογικών συνθηκών, της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης και ανεξάρτητη των χρήσεων γης και των χαρακτηριστικών του ρύπου, ενώ:

- **η τρωτότητα** σχετίζεται με την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφορέα κάτω από συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης σε μια περιοχή, με καθορισμένα χαρακτηριστικά του ρύπου και της ευαισθησίας του υδροφορέα.

Διακρίνεται σε: **ειδική** (specific) τρωτότητα, η οποία αφορά σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών καθώς και σε **γενική τρωτότητα** ή αλλιώς **ιδιοτρωτότητα** (intrinsic) που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο συγκεκριμένο ρυπαντή.

Φαίνεται λοιπόν ότι η τρωτότητα δεν ταυτίζεται με την ευαισθησία. Σύμφωνα με τους Rao & Alley (1996) η ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) όμως ταυτίζεται με τη γενική τρωτότητα (intrinsic vulnerability).

Πρέπει να τονισθεί ότι η έννοια της τρωτότητας δεν συνδέεται αποκλειστικά μόνο με τη ρύπανση ή τη μόλυνση των υπόγειων νερών, αλλά και με την ποσότητα αυτών, καθώς και με την επίδραση ακραίων καιρικών φαινομένων π.χ. ξηρασιών στη δίαιτα των υδροφορέων (Βουδούρης Κ., 2008).

Η έννοια της τρωτότητας πρέπει να αντιμετωπίζεται σε τρία στάδια:

1) Το στάδιο της δυνητικής εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα, που συνδέεται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη συμπεριφορά του ρύπου.

2) Το στάδιο της παραμονής του ρύπου στο υδατικό σύστημα που συνδέεται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.

3) Το στάδιο της άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο, αν γίνεται εκμετάλλευση του υδροφορέα.

Οι χάρτες τρωτότητας συνδυάζονται με χάρτες χρήσεων γης, ποιότητας νερού, πυκνότητας πληθυσμού κ.ά. και αποτελούν πολύτιμα εργαλεία στη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση και τη νομοθεσία σε όλα τα επίπεδα της δημόσιας διοίκησης. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται τελευταία με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και του διεθνούς κώδικα χρωμάτων, όπου οι επιμέρους χάρτες είναι τα θεματικά επίπεδα. Η συλλογή δεδομένων τροφοδοτεί τη βάση και η επεξεργασία γίνεται με τα λογισμικά Arc/Info, Map/Info κ.ά. (Kazakis et al., 2008). Οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακα 7):

4.2. Μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε (Βουδούρης 2008):

- ▶ Μέθοδοι βαθμονόμησης (rating methods).
- ▶ Στατιστικές μέθοδοι (statistical methods).
- ▶ Μέθοδοι προσομοίωσης (simulating models).

4.2.1. Κυριότεροι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας

Οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές βαθμονόμησης της τρωτότητας είναι οι παρακάτω:

- **DRASTIC** (Aller et al., 1987),

- **GOD** (Foster, 1987),

- AVI (Van Stempvoort et al., 1992),

- SINTACS (Civita, 1994),

- ISIS (Civita & Regibus, 1995),

- DASTI (Ben Kabbour et al., 2004).

Πίνακας 7. Πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών (Καλλέρης, 2000).

ΠΕΔΙΑ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	ΤΥΠΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ	Υψόμετρα, μεταβολές μορφολογικών κλίσεων, πυκνότητα και κατανομή υδρογραφικού δικτύου.
ΒΛΑΣΤΗΣΗ	Χρήσεις γης, διαδρομές υπεδαφικού νερού, περιοχές τροφοδοσίας και εκφόρτισης, ιχνογράφηση ασυνεχειών και γραμμικών στοιχείων, ρυπογόνα δυναμικά.
ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	Βροχομετρικά δεδομένα, μέση θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, εξατμισοδιαπνοή, εκτίμηση της ενεργής βροχόπτωσης.
ΕΔΑΦΗ	Πάχη, ιστός, δομή, ορυκτολογική σύσταση, χημικές και φυσικές ιδιότητες, πορώδες, διαπερατότητα, υγρασία, ικανότητα κατείσδυσης.
ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	Παροχές υδρορευμάτων, ανάλυση υδρογραφημάτων, βασική ροή, λόγος ροής, ανταλλαγές νερού με υποκείμενα υδροφόρα συστήματα.
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ i) Ακόρεστη ζώνη ii) Κορεσμένη ζώνη	Βάθος υπόγειου νερού, πάχος, λιθοστρωματογραφία, κοκκομετρία, ορυκτολογία, γεωμετρία, δείκτης ρωγμών, δείκτης ανάπτυξης καρστ, ενεργό πορώδες και βαθμός κορεσμού, ρυθμός κατείσδυσης, τροφοδοσία. Λιθοστρωματογραφία, γεωλογική δομή, γεωμετρία υδροφορέα, ενεργό πορώδες, τύπος διαπερατότητας (πρωτογενές ή δευτερογενές πορώδες), μεταβιβαστικότητα, αποθηκευτικότητα και υδραυλική αγωγιμότητα των υδροφορέων, τύπος υδροφορέα (ελεύθερος, υπό πίεση), μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού, υδραυλική κλίση, κατεύθυνση ροής, ενεργή ταχύτητα ροής και εκφόρτιση, τύποι υπόγειου νερού, ανταλλαγές με επιφανειακά σώματα νερού ή άλλα υδροφόρα συστήματα.
ΧΡΗΣΕΙΣ ΝΕΡΟΥ	Σημεία υδροληψίας (πηγές, γεωτρήσεις) και θέσεις υδροληπτικών έργων, επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι, κατανομή τους και χρήση, παροχή και πτώσεις στάθμης των υδροφόρων πεδίων, θέση και ρυθμοί τροφοδοσίας των διαφόρων συστημάτων.
ΧΗΜΕΙΑ i) Υδροχημεία ii) Χαρακτηριστικά ρύπων	Φυσικές και χημικές ιδιότητες επιφανειακών και υπόγειων νερών, χημικοί δείκτες, ισότοπα, ηλικία υπόγειου νερού και χρόνος παραμονής του στα υδροφόρα στρώματα, χαρακτηριστικοί λόγοι, κατανομή ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων νερών. Αλλαγές στην ποιότητα του υπόγειου νερού, παρουσία ρύπων, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά ρύπων, συγκέντρωση, ημιζωή, κινητικότητα, ικανότητα ιοντοανταλλαγής, προσρόφησης, βιοαποδόμησης κ.ά.
ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	Έκταση αστικών περιοχών, θέση και τύπος των βιομηχανιών, παρουσία και δυναμικότητα ρυπογόνων πηγών, δυνητικοί είσοδοι ρύπων.

4.2.1.1. Η μέθοδος DRASTIC

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος DRASTIC. Η μεθοδολογία **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1987) ανήκει στις μεθόδους δεικτών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών με βάση υδρογεωλογικές παραμέτρους. Το μοντέλο DRASTIC θεωρεί ότι:

1) κάθε ρύπος εισάγεται από την επιφάνεια του εδάφους, 2) ο ρύπος εισάγεται στο υπόγειο νερό από την κατείσδυση του νερού της βροχόπτωσης και 3) ο ρύπος έχει την ταχύτητα του νερού.

Η λέξη **DRASTIC** προκύπτει από τα ακρωνύμια των: D (**Depth**) βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, R (**Recharge**) ενεργή κατείσδυση, A (**Aquifer**) υδροφορέας, S (**Soil**) έδαφος, T (**Topography**) κλίση αναγλύφου, I (**Impact of the vadose zone**) επίδραση της ακόρεστης ζώνης, C (**Hydraulic Conductivity of the aquifer**) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή υδροπερατότητας.

Ο δείκτης **DRASTIC** (DI) υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

Όπου ο δείκτης **r** εκφράζει την τιμή της παραμέτρου και ο δείκτης **w** τη βαρύτητα καθεμιάς. Για κάθε παράμετρο υπάρχουν δύο τιμές βαρύτητας. Η πρώτη είναι για την εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση οικιακών και βιομηχανικών ρύπων (γενική, Typical DRASTIC) και η δεύτερη είναι για τη χρήση φυτοφαρμάκων σε αρδευόμενες περιοχές (ειδική, Pesticide DRASTIC).

Η βαρύτητα κάθε παραμέτρου φαίνεται στον κάτωθι πίνακα 8, απ' όπου προκύπτει ότι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα (5) είναι το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, η επίδραση της ακόρεστης ζώνης και το έδαφος (στην ειδική περίπτωση των φυτοφαρμάκων), γιατί θεωρούνται οι πλέον σημαντικοί.

Οι τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται από 1 (ελάχιστο δυναμικό ρύπανσης) έως 10 (μέγιστο δυναμικό ρύπανσης). Η τεχνική DRASTIC είναι ευέλικτη και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να την τροποποιήσει προσθέτοντας παραμέτρους ή αλλάζοντας τις τιμές βαρύτητας (Al-Adamat *et al.*, 2003).

Ο δείκτης DRASTIC για τη γενική βαρύτητα κυμαίνεται από 23 έως 230, ενώ για την ειδική Βαρύτητα κυμαίνεται από 25 έως 250. Οι Aller *et al.* (1987), πρότειναν την

παρακάτω κατηγοριοποίηση (Πίνακας 9) για τις επιμέρους τιμές της τρωτότητας, αν και αυτές δεν ορίζονται ως πρότυπες.

Πίνακας 8. Βαρύτητα κάθε παραμέτρου στη μεθοδολογία DRASTIC.

Παράμετρος	Βαρύτητα (Γενική)	Βαρύτητα (Ειδική)
D Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού	5	5
R Ενεργή κατείσδυση	4	4
A Υδροφορέας	3	3
S Έδαφος	2	5
T Κλίση αναγλύφου	1	3
I Επίδραση της ακόρεστης ζώνης	5	3
C Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	3	2

Πίνακας 9. Κατηγοριοποίηση της τρωτότητας για την τυπική μέθοδο DRASTIC.

Τιμή δείκτη DRASTIC	Χρώμα	Τρωτότητα
<79	Βιολετί	Πολύ χαμηλή
80-99	Λουλακί	Χαμηλή
100-119	Μπλέ	
120-139	Σκούρο Πράσινο	Ενδιάμεση
140-159	Ανοιχτό Πράσινο	
160-179	Κίτρινο	Υψηλή
180-199	Πορτοκαλί	
>200	Κόκκινο	Πολύ υψηλή

Οι Aller et al. (1987), τόνισαν τα παρακάτω σημεία που αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC και τα οποία πρέπει κάθε μελετητής να λαμβάνει υπόψη:

► Η μεθοδολογία που ακολουθείται δεν έχει ως σκοπό, ούτε σχεδιάστηκε να αντικαταστήσει την έρευνα πεδίου.

► Η DRASTIC δίνει στο χρήστη ένα μέτρο σχετικής τρωτότητας ενός υδροφορέα στη ρύπανση και κατά συνέπεια πρέπει να αποτελεί ένα από τα πολλά κριτήρια για τη λήψη περαιτέρω αποφάσεων ή ακόμη προστατευτικών μέτρων, αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αποτελεί το μοναδικό.

► Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προληπτικούς σκοπούς, για την κατηγοριοποίηση περιοχών, όπου η προστασία των υπόγειων νερών και η διασφάλιση των υπόγειων νερών είναι μείζονος σημασίας. Επίσης, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό περιοχών στις οποίες απαιτούνται άμεσα προστατευτικά μέτρα. Όταν συνδυαστεί και με άλλους παράγοντες, όπως π. χ. τις εφαρμοζόμενες μεθόδους καλλιέργειας σε μια περιοχή, μπορεί να διαχωρίσει τις περιοχές όπου η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων αποτελούν άμεση απειλή για το υπόγειο νερό.

► Η μέθοδος DRASTIC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση περιοχών στις οποίες υπάρχουν ελλιπή δεδομένα, οπότε και επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα της εκτίμησης της τρωτότητας. Για παράδειγμα, η προσπάθεια αιτιολόγησης των αποτελεσμάτων, από την εφαρμογή της μεθόδου και οι κατά θέσεις πιθανή αδυναμία ασφαλούς αιτιολόγησης, μπορεί να οδηγήσει τον ερευνητή στον προσδιορισμό περιοχών, στις οποίες οφείλουν να γίνουν περισσότερες έρευνες για την αποσαφήνισή των επικρατούντων υδρογεωλογικών και γεωλογικών συνθηκών. Καθ' αυτόν τον τρόπο θα δημιουργηθεί μια πληρέστερη βάση δεδομένων, η οποία επακόλουθα θα οδηγήσει στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

► Όπως συμβαίνει με κάθε μοντέλο και κάθε μέθοδο βαθμονόμησης, είναι πιθανή η εισαγωγή εσφαλμένων δεδομένων, τα οποία θα επηρεάσουν αρνητικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Εσφαλμένα συμπεράσματα εξάγονται και με την εφαρμογή της μεθόδου σε περιπτώσεις για τις οποίες δεν έχει σχεδιαστεί. Για παράδειγμα, η χρήση της μεθόδου για τον υπολογισμό της τρωτότητας του υπόγειου νερού στη ρύπανση, η οποία προκαλείται από την άμεση έγχυση ρυπασμένου νερού διαμέσου μιας γεώτρησης, δεν είναι αποδεκτή. Με την άμεση εισαγωγή ενός ρυπαντή στον υδροφορέα, αναιρούνται αυτόματα όλοι εκείνοι οι φυσικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη από τη μέθοδο DRASTIC.

► Η μέθοδος δίνει την ευχέρεια στον υδρογεωλόγο να λάβει υπόψη του συγκεκριμένους παράγοντες και να εκτιμήσει τη σημαντικότητα κάποιων άλλων. Για την εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων, θα πρέπει να συνυπολογιστούν τόσο οι ιδιαίτεροι

παράμετροι που ανταποκρίνονται στο φυσικό σύστημα του υδροφορέα, όσο και οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στην κάθε περιοχή (λόγω ανθρωπίνων παρεμβάσεων και δραστηριοτήτων).

► Η μέθοδος έχει χαμηλό κόστος εφαρμογής και μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλης έκτασης περιοχές.

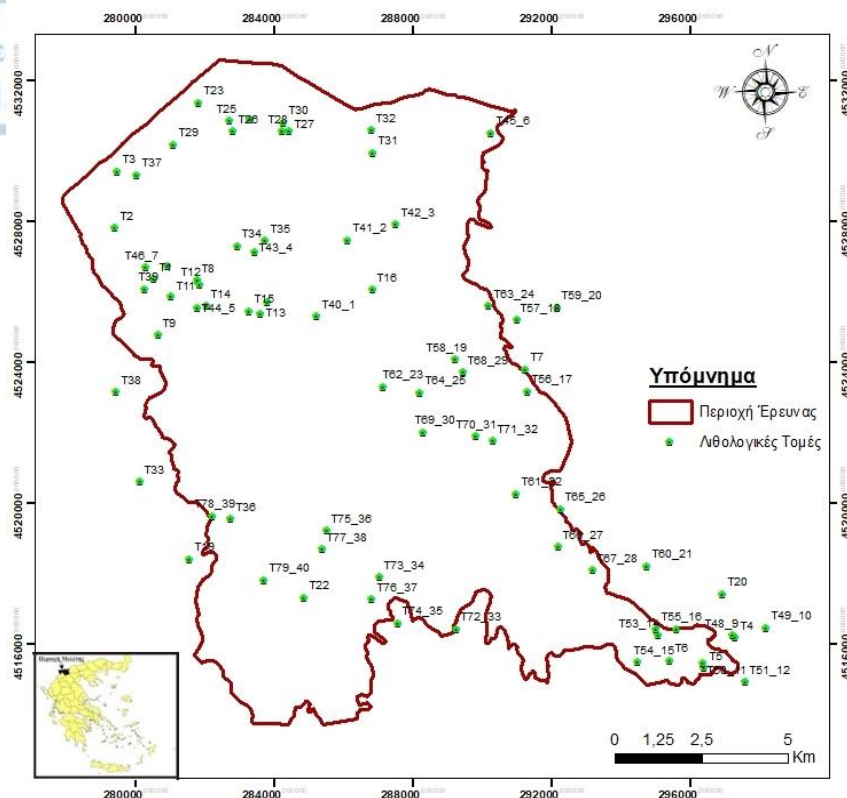
4.3. Εκτίμηση της τρωτότητας του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας με την μέθοδο DRASTIC.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC στον αλλουβιακό υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας για τον υπολογισμό της τρωτότητας στην εξωτερική ρύπανση και γίνεται μία συσχέτιση με τα νιτρικά ιόντα. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιήθηκαν υδρογεωλογικά δεδομένα από μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού και γεωλογικά δεδομένα από λιθολογικές τομές γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας για να προσδιορισθεί το υλικό του υδροφορέα και το πάχος της ακόρεστης ζώνης. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της περιοχής χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν τα μορφολογικά δεδομένα. Επίσης αξιοποιήθηκαν εδαφολογικά, μετεωρολογικά και δεδομένα αντλητικών δοκιμών για τον προσδιορισμό του εδαφικού υλικού, της τροφοδοσίας του υδροφορέα και της υδραυλικής αγωγιμότητας αντίστοιχα από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες που έχουν εκπονηθεί στο εργαστήριο τεχνικής γεωλογίας και υδρογεωλογίας.

Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου DRASTIC κατασκευάστηκε ο τελικός χάρτης τρωτότητας. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων που αφορούν στα νιτρικά ιόντα σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης ώστε να κατασκευαστεί ένας τελικός χάρτης διακινδύνευσης ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων (risk map).

Οι χάρτες κατανομής της κάθε παραμέτρου κατασκευάστηκαν με την χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS, ArcMap) και την μέθοδο χωρικής παρεμβολής (Interpolation). Τα δεδομένα τοποθετήθηκαν σε βάση δεδομένων και γεωαναφέρθηκαν.

Για την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 79 λιθολογικές τομές όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 22.



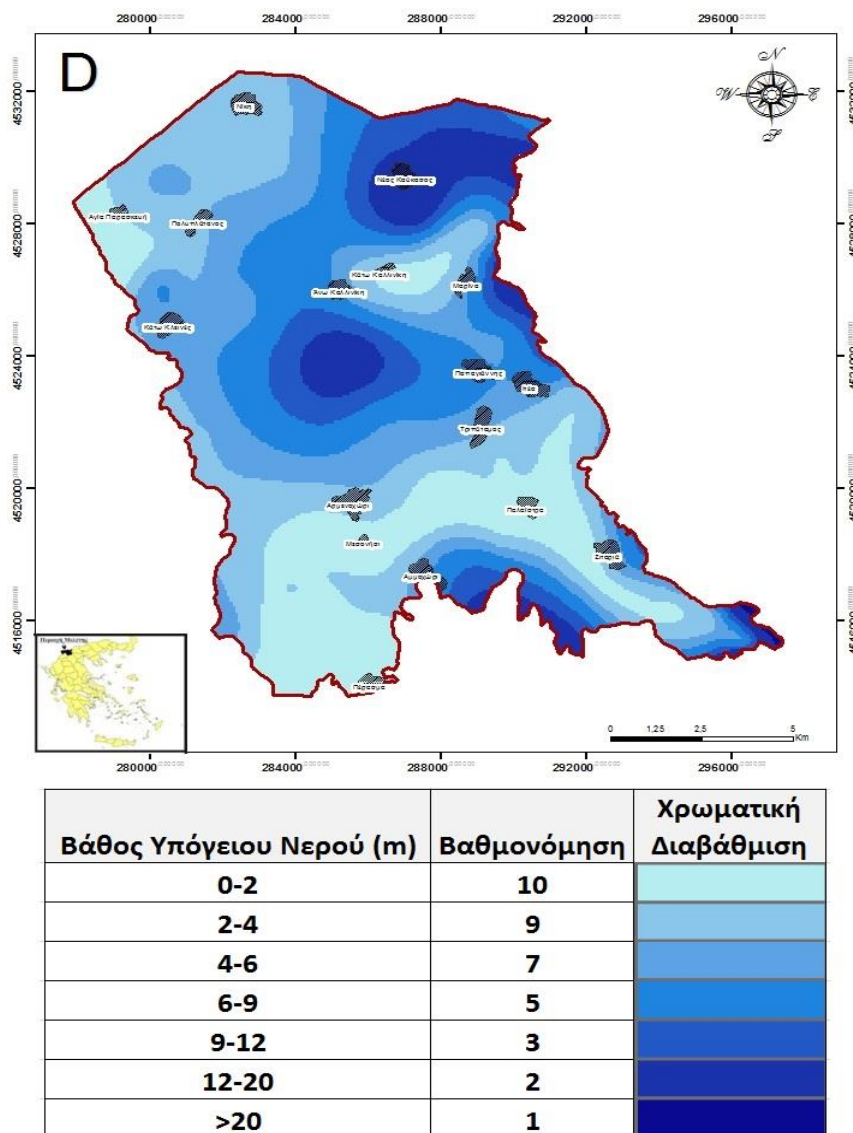
Σχήμα 22. Σημειακή απεικόνιση των λιθολογικών τομών που χρησιμοποιήθηκαν.

4.3.1. D – Βάθος του υπόγειου νερού

Για την επίδραση της παραμέτρου του βάθους του υπόγειου νερού χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της στάθμης 59 υδρογεωτρήσεων όπως αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 9 και 10 στο Κεφάλαιο 4.3. Από τις μετρήσεις του Μαΐου 2016 παρατηρούμε ότι οι τιμές της στάθμης κυμαίνονται από 0 έως και 64 m. Οι μεγαλύτερες τιμές μετρήθηκαν προς τα ανατολικά της λεκάνης.

Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος εμφάνισης του υπόγειου νερού τόσο μεγαλύτερη είναι η προστασία του υδροφορέα. Η παράμετρος του βάθους είναι υψηλής σημασίας γι' αυτό και η βαρύτητα αυτού ορίζεται με 5. Συνεπώς μικρές τιμές βάθους παίρνουν μεγάλη τιμή βαθμονόμησης ενώ αντίθετα μεγάλες τιμές βάθους παίρνουν μικρή τιμή βαθμονόμησης.

Στο Σχήμα 23 φαίνονται η κατανομή του βάθους του υπόγειου νερού μαζί με την βαθμονόμηση.

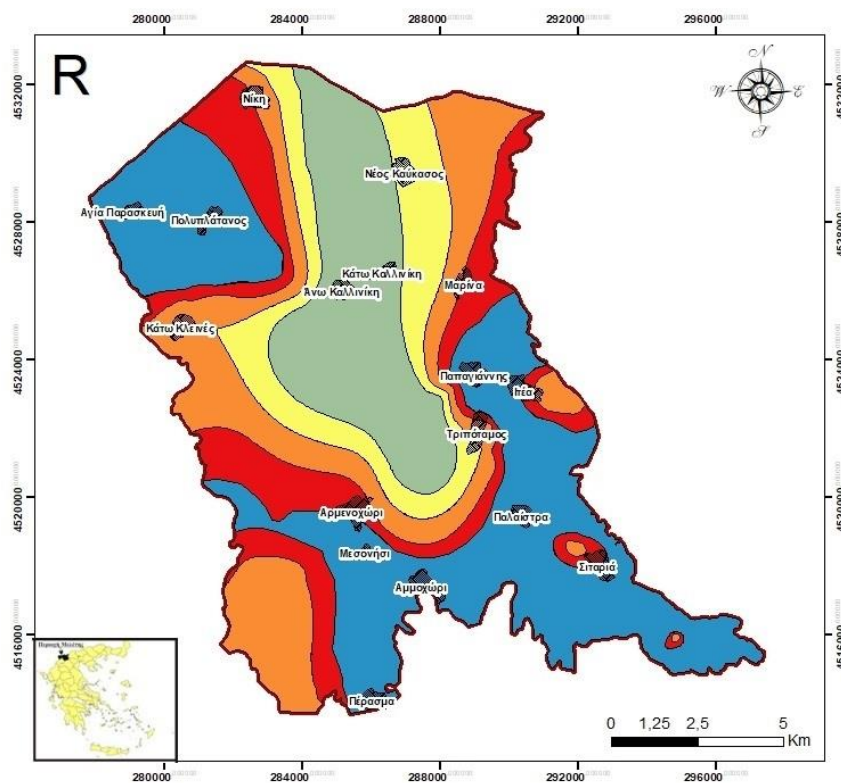


Σχήμα 23. Θεματικός χάρτης κατανομής του βάθους του υπόγειου νερού στον για την περίοδο Μάιος 2016 (παράμετρος D).

4.3.2. R – Τροφοδοσία του υδροφορέα, εμπλουτισμός

Τροφοδοσία ενός υδροφορέα ή εμπλουτισμός αυτού είναι το τα mm του νερού που κατεισδύουν σε αυτόν από την επιφάνεια του εδάφους. Οι ρύποι που μεταφέρονται στην ακόρεστη ζώνη μέσω της βροχής παίζουν σημαντικό ρόλο στο ποσοστό ρύπανσης των υπόγειων νερών. Σε προγενέστερη διπλωματική εργασία (Καζάκης, 2008) η βροχοβαθμίδα της συγκεκριμένης λεκάνης υπολογίστηκε $P=1.53h - 510$ και η παράμετρος του εμπλουτισμού υπολογίστηκε με βάση τον συντελεστή κατείσδυσης των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής και τα δεδομένα βροχόπτωσης, ενώ η βαρύτητα ορίστηκε με την τιμή 4. Όσον αφορά την βαθμονόμηση μεγαλύτερες τιμές δόθηκαν σε περιοχές με μεγαλύτερο ποσοστό κατείσδυσης καθώς όσο περισσότερο νερό κατεισδύει στους

υπογείου υδροφορείς τόσο μεγαλύτερο είναι και το ποσοστό των ρύπων που εισέρχεται σε αυτούς. Η ίδια βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την εργασία για την κατασκευή του θεματικού χάρτη εμπλουτισμού (Σχήμα 24).



Εμπλουτισμός (mm/year)	Βαθμονόμηση	Χρωματική Διαβάθμιση
60 - 80	5	Blue
50 - 60	4	Green
40 - 50	3	Yellow
30 - 40	2	Orange
< 30	1	Red

Σχήμα 24. Θεματικός χάρτης της βαθμονόμησης της παραμέτρου R.

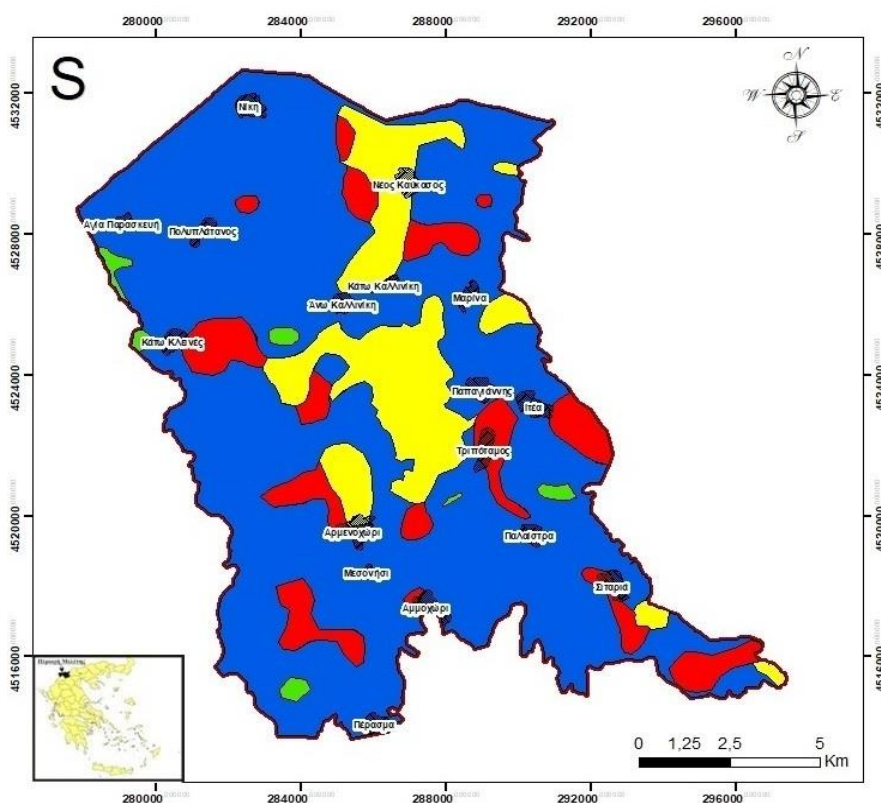
Υλικό Υδροφορέα	Βαθμονόμηση	Χρωματική Διαβάθμιση
Κροκάλες - Χαλίκια	7	
Χαλίκια	6	
Χαλίκια - Άμμος	4	
Χαλίκια - Άργιλος	3	
Άμμος - Χαλίκια - Άργιλος	2	

- 39 -

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

4.3.4. S – Έδαφος

Για τον προσδιορισμό του εδαφικού υλικού λόγω έλλειψης χρημάτων αλλά και χρόνου χρησιμοποιήθηκαν ήδη υπάρχοντα δεδομένα από προηγούμενη διπλωματική εργασία που έχει εκπονηθεί στο εργαστήριο. Σύμφωνα με αυτά στην παράμετρο του εδάφους δίνεται η βαρύτητα 2 και η κατηγοριοποίηση και βαθμονόμηση φαίνονται στον θεματικό χάρτη (Σχήμα 26). Στα λεπτόκοκκα υλικά δόθηκε μικρή τιμή καθώς το ρυπαντικό φορτίο εξασθενεί σε μεγαλύτερο βαθμό, ενώ τα πιο χονδρόκοκκα βαθμονομήθηκαν με μεγαλύτερη τιμή καθώς συμβάλουν σε μικρότερο βαθμό στην εξασθένηση των ρύπων.



Έδαφος	Βαθμονόμηση	Χρωματική Διαβάθμιση
Αμμώδης	8	Yellow
Αμμοπηλώδης	6	Red
Ιλυοπηλώδης	4	Blue
Αργιλώδης	2	Green

Σχήμα 26. Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του εδάφους (τροποποιημένος από χάρτη κατανομής μηχανικής σύστασης κατά U.S.D.A. (στοιχεία από Κ.Τ.Ε.).

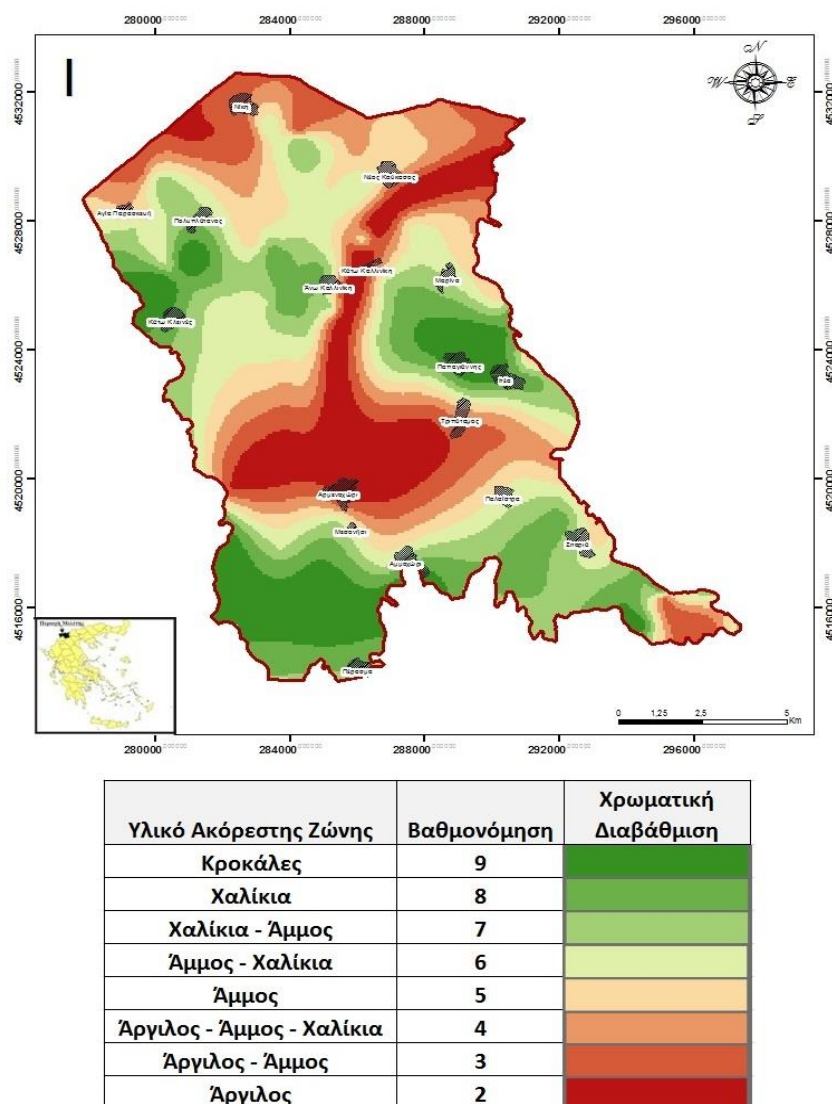
[illegible]

Κλίση %	Βαθμονόμηση	Χρωματική Διαβάθμιση
0 - 2	10	
2 - 6	9	
6 - 12	5	
12 - 20	3	
>20	1	

- 41 -

4.3.6. I – Επίδραση της ακόρεστης ζώνης

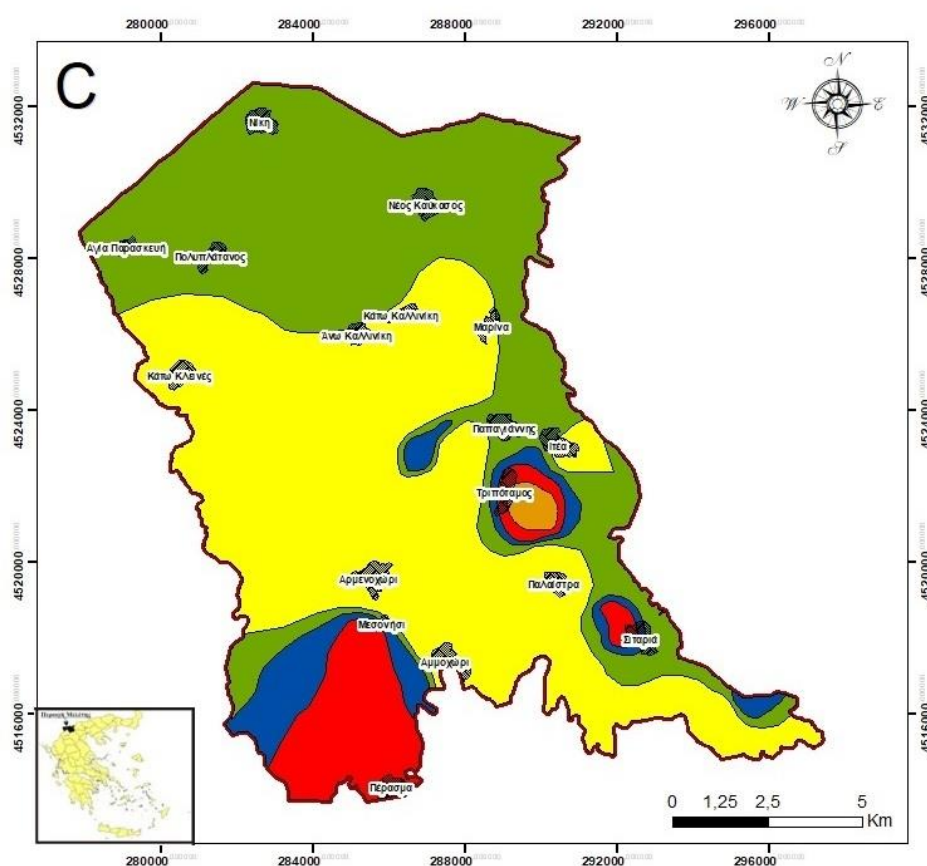
Με τον όρο ακόρεστη ζώνη εννοούμε το υλικό που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπόγειου νερού και κάτω από το έδαφος. Η επίδραση της ακόρεστης ζώνης είναι αρκετά σημαντική ως προς την συγκέντρωση και απορρόφηση του ρυπαντικού φορτίου γιατί σε αυτή λαμβάνουν χώρα διαδικασίες όπως ιοντο-ανταλλαγή, προσρόφηση, βιολογικές αντιδράσεις κ.ά. Μεγάλο πάχος ακόρεστης ζώνης σε συνδυασμό με την παρουσία αργίλου συμβάλλει σε καλύτερη απορρόφηση των ρύπων. Η βαρύτητα της παραμέτρου έχει εκτιμηθεί ίση με 5 ενώ οι κατηγορίες στις οποίες στις οποίες κατανομήθηκε το υλικό της ακόρεστης ζώνης σύμφωνα με τις λιθολογικές τομές της περιοχής μαζί με την βαθμονόμηση αυτών φαίνονται στον θεματικό χάρτη (Σχήμα 28).



Σχήμα 28. Θεματικός χάρτης της βαθμονόμησης της παραμέτρου I.

4.3.7. C – Υδραυλική αγωγιμότητα

Για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν υπήρχαν νέα δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων οπότε και χρησιμοποιήθηκαν ήδη υπάρχοντα δεδομένα (Καζάκης, 2008). Σε περιοχές με μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα οι ρύποι κινούνται γρηγορότερα άρα και η τρωτότητα του υδροφορέα αυξάνεται. Οπότε οι υψηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας πήραν μεγαλύτερη τιμή στην βαθμονόμηση και το αντίστροφο. Η βαρύτητα της παραμέτρου είχε εκτιμηθεί ίση με 3. Η κατανομή της βαθμονομημένης παραμέτρου φαίνεται στο Σχήμα 29.

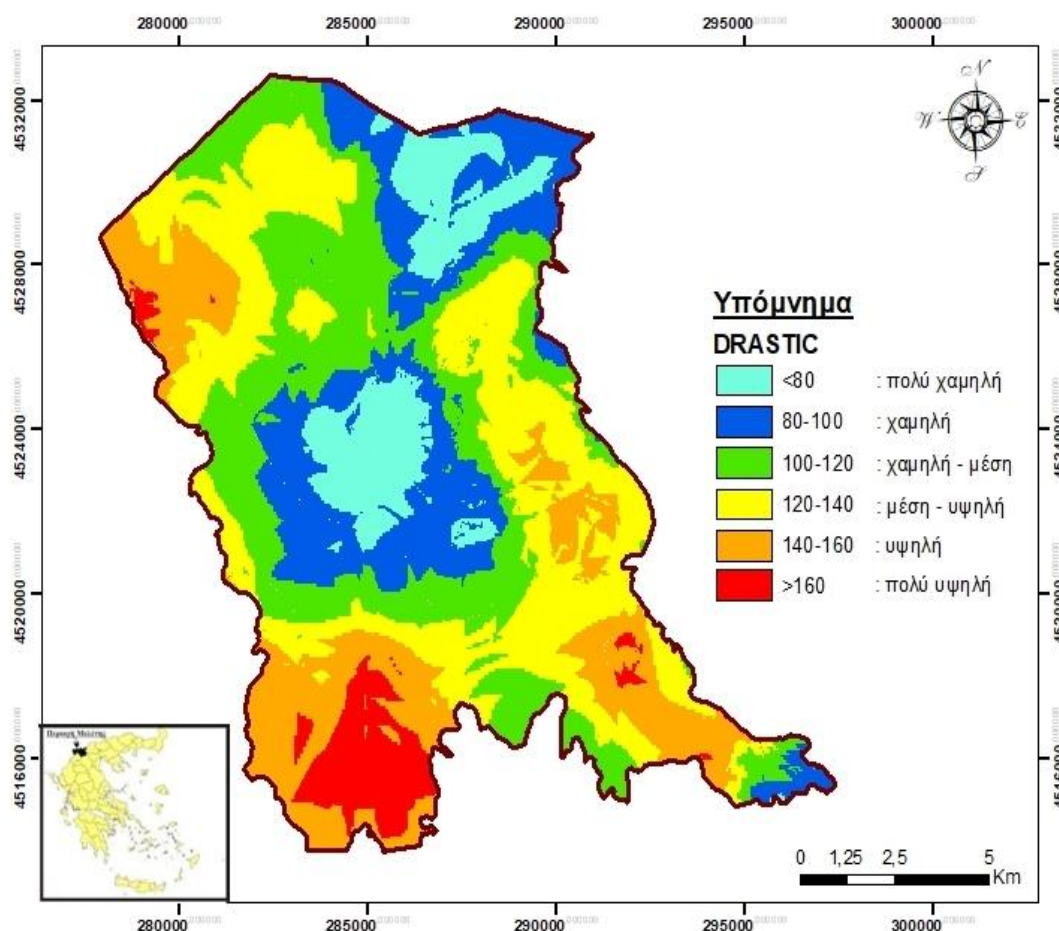


Συντελεστής Υδραυλικής Αγωγιμότητας (m/day)	Βαθμονόμηση	Χρωματική Διαβάθμιση
>10	7	Orange
4 - 10	6	Red
2 - 4	4	Blue
1 - 2	3	Green
<1	2	Yellow

Σχήμα 29. Θεματικός χάρτης κατανομής της βαθμονόμησης της παραμέτρου C.

4.3.8. Τελικός χάρτης κατανομής της τρωτότητας με την μέθοδο DRASTIC

Από την εφαρμογή της μεθόδου με την χρήση του ArcMap κατασκευάστηκε ο τελικός θεματικός χάρτης κατανομής της τρωτότητας για την περιοχή έρευνας (Σχήμα 30). Παρατηρείται ότι στο κεντρικό και βορειοανατολικό τμήμα η τρωτότητα χαρακτηρίζεται ως χαμηλή ενώ αυξάνεται αρκετά νοτιοδυτικά όπου υπολογίσθηκε πολύ υψηλή τρωτότητα. Η τρωτότητα αυξάνεται γενικά από το κέντρο προς το βορειοδυτικό και νοτιοανατολικό άκρο της λεκάνης. Αν παρατηρηθούν οι χάρτες κατανομής των παραμέτρων (Κεφάλαια 5.3.1 – 5.3.7) φαίνεται ότι η υψηλή τρωτότητα αρχικά σχετίζεται με τμήματα της λεκάνης που έχουν μικρό βάθος υπόγειου νερού, κροκάλες και χαλίκια ως υλικό υδροφορέα, μικρές κλίσεις εδάφους (0-2%) και ιλυοπηλώδες ή αργιλώδες εδαφικό υλικό. Χαμηλότερη τρωτότητα αντίστοιχα εμφανίζουν τμήματα με αμμώδες και αμμοπηλώδες έδαφος, μεγαλύτερα βάθη υπόγειου νερού, άμμο, άργιλο και χαλίκια ως υλικό υδροφορέα και ακόρεστης ζώνης.



Σχήμα 30. Τελικός χάρτης κατανομής της τρωτότητας του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας με την μέθοδο DRASTIC

Από τη σύγκριση των τιμών της DRASTIC με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων για κάθε σημείο παρατηρείται ότι ο συντελεστής συσχέτισης ανέρχεται σε 0,0735. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα μικρή και υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει ουσιαστικά συσχέτιση της DRASTIC με τα νιτρικά ιόντα.

4.4. Βελτιστοποίηση της μεθόδου DRASTIC

Τα νιτρικά είναι ένας ευκίνητος ρύπος που δεν εξασθενεί κατά τις διαδικασίες προσρόφησης και απορρόφησης που λαμβάνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη αλλά εξασθενεί μόνο με διαδικασίες απονιτροποίησης. Επίσης η συγκέντρωση νιτρικών στα υπόγεια ύδατα θεωρείται δείκτης της υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων (*US Environmental Protection Agency, 1996*) και η αντιμετώπιση της ρύπανσης από τα νιτρικά απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση.

Όπως ήδη αναφέρθηκε και εφαρμόστηκε παραπάνω η πλέον διαδεδομένη μέθοδος είναι η DRASTIC αν και στην εφαρμογή της υπάρχουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Αυτά περιλαμβάνουν κυρίως την χρήση ποιοτικών παραμέτρων, την υπερεκτίμηση της ευπάθειας στους πορώδεις υδροφορείς και την περιορισμένη περιγραφή της τρωτότητας για συγκεκριμένους τύπους υδροφόρου.

Συγκριτικές μέθοδοι με διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία του χάρτη τρωτότητας (*Kazakis & Voudouris, 2015*) και χρησιμοποιώντας ποσοτικές παραμέτρους να τροποποιήσουν την μέθοδο DRASTIC με βάση την συγκέντρωση των νιτρικών. Συνδυασμός στατιστικών μεθόδων με μεθόδους δεικτών όπως η DRASTIC έχει χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία υβριδικών μεθόδων από πολλούς ερευνητές (*Panagopoulos et al. 2006; Antonakos & Lambrakis 2007; Huan et al., 2012*) χρησιμοποιώντας την συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων ως δείκτη ρύπανσης. Αυτή η πρακτική είναι αποτελεσματική για την επικύρωση και την αύξηση της αξιοπιστίας των μεθόδων (*Antonakos & Lambrakis, 2007*). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό παραμέτρων είναι και πιο αξιόπιστες στην αξιολόγηση της τρωτότητας των υπόγειων υδάτων Έτσι η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων και οι χρήσεις γης αποτελούν απαραίτητες πληροφορίες για την εκτίμηση της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση (*Kazakis et al., 2015*). Ως κίνδυνος ρύπανσης ορίζεται μια πιθανή πηγή ρύπανσης που προκύπτει από την ανθρώπινη δραστηριότητα, λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να μειώσει την ποιότητα του υπόγειου νερού (*Babiker et al., 2005; Zwahlen, 2004*).

Στην συγκεκριμένη εργασία εκτός από την εφαρμογή της Typical DRASTIC δημιουργήθηκε η DRASTIC-N ως υβριδική μέθοδος εκτίμησης της τρωτότητας, ενώ με την DRASTIC-LN ελέγχεται η επικινδυνότητα ρύπανσης ανάλογα με τις χρήσεις γης. Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 10) φαίνονται οι τιμές από την εφαρμογή της Typical DRASTIC, DRASTIC-N και DRASTIC-LN στον αλλουβιακό υδροφόρο της λεκάνης της Φλώρινας.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα Typical DRASTIC, DRASTIC – N, DRASTIC – LN.

Κωδικός δείγματος	NO ₃ ⁻ (mg/l)	D	R	A	S	T	I	C	L	DRASTIC	DRASTIC-N	DRASTIC-LN
G1	9,24	10	5	7	6	10	8	2	1	159	72	74
G3	5,72	9	5	3	6	10	7	3	1	140	58	61
G4	0,00	9	4	6	6	10	3	3	1	125	59	62
G5	4,40	9	5	4	6	10	4	3	1	128	57	59
G7	4,11	3	1	6	2	10	5	3	1	85	36	38
G8	0,00	3	1	7	2	10	2	3	1	73	34	37
G9	51,92	5	2	3	6	10	6	3	10	103	44	71
G11	8,36	9	3	6	6	10	7	2	1	138	63	66
G12	26,40	3	4	4	6	10	2	3	3	84	40	48
G13	49,86	5	5	3	6	10	9	3	10	130	52	79
G14	28,01	3	5	4	6	9	5	3	10	102	45	72
G15	64,83	3	1	4	6	10	3	2	10	74	37	64
G16	55,88	9	5	4	6	10	5	2	7	130	58	76
G17	52,80	5	5	3	6	10	8	2	7	122	51	69
G18	42,68	7	5	3	6	10	7	2	7	127	54	72
G19	2,64	10	4	6	6	10	8	4	5	158	68	81
G20	40,48	2	5	3	6	10	3	2	10	82	38	64
G21	35,20	9	4	3	4	10	4	2	10	114	48	74
G22	0,00	1	5	4	2	10	6	2	3	87	33	41
G23	67,91	1	5	6	6	10	7	4	10	112	49	76
G24	26,40	10	5	3	6	10	6	3	5	140	59	72
G25	10,56	9	3	4	4	10	3	7	5	123	48	62
G26	0,00	10	4	6	6	10	7	4	1	153	67	69
G27	30,06	7	3	7	6	10	9	4	7	147	65	83
G29	46,64	10	5	3	6	10	9	6	7	164	63	82
G30	34,03	10	3	6	6	10	9	6	7	165	68	87
G31	15,40	7	4	2	6	10	2	2	1	95	43	46
G32	1,76	5	2	3	8	10	7	2	1	109	50	53
G33	22,88	9	3	3	6	9	7	2	7	128	55	74
p		2.08	1.33	2.66	2.42	0.03	1.33	0.16	2,66			

4.4.1. DRASTIC-N

Η DRASTIC-N αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου DRASTIC όπως προέκυψε από τη συσχέτιση κάθε παραμέτρου της DRASTIC (βάθος, τροφοδοσία υδροφορέα, υλικό υδροφορέα, εδαφικό υλικό, ανάγλυφο, επίδραση της ακόρεστης ζώνης, υδραυλική αγωγιμότητα) με την συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων. Αρχικά έγινε συσχέτιση της βαθμονόμησης κάθε παραμέτρου ξεχωριστά για κάθε σημείο με την συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων για το σημείο αυτό και υπολογίσθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης r . Οι υπολογισθέντες συντελεστές αθροίσθηκαν και στην συνέχεια έγινε διαίρεση του κάθε ένα από αυτούς με το άθροισμα τους. Το κάθε πηλίκο που βρέθηκε ανάχθηκε στο 10 (p_i). Η τιμή αυτή ουσιαστικά μας δείχνει την επικινδυνότητα ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα από τα νιτρικά ιόντα για την κάθε παράμετρο. Η τιμή της DRASTIC-N για κάθε σημείο υπολογίσθηκε πολλαπλασιάζοντας την τιμή της βαθμονόμησης κάθε παραμέτρου με το αντίστοιχο υπολογισθέν πηλίκο p της κάθε παραμέτρου.

$$\text{DRASTIC-N} = Dr \cdot p_D + Rr \cdot p_R + Ar \cdot p_A + Sr \cdot p_S + Tr \cdot p_T + Ir \cdot p_I + Cr \cdot p_C$$

Όπου r : η τιμή βαθμονόμησης της κάθε παραμέτρου.

4.4.2. DRASTIC-LN

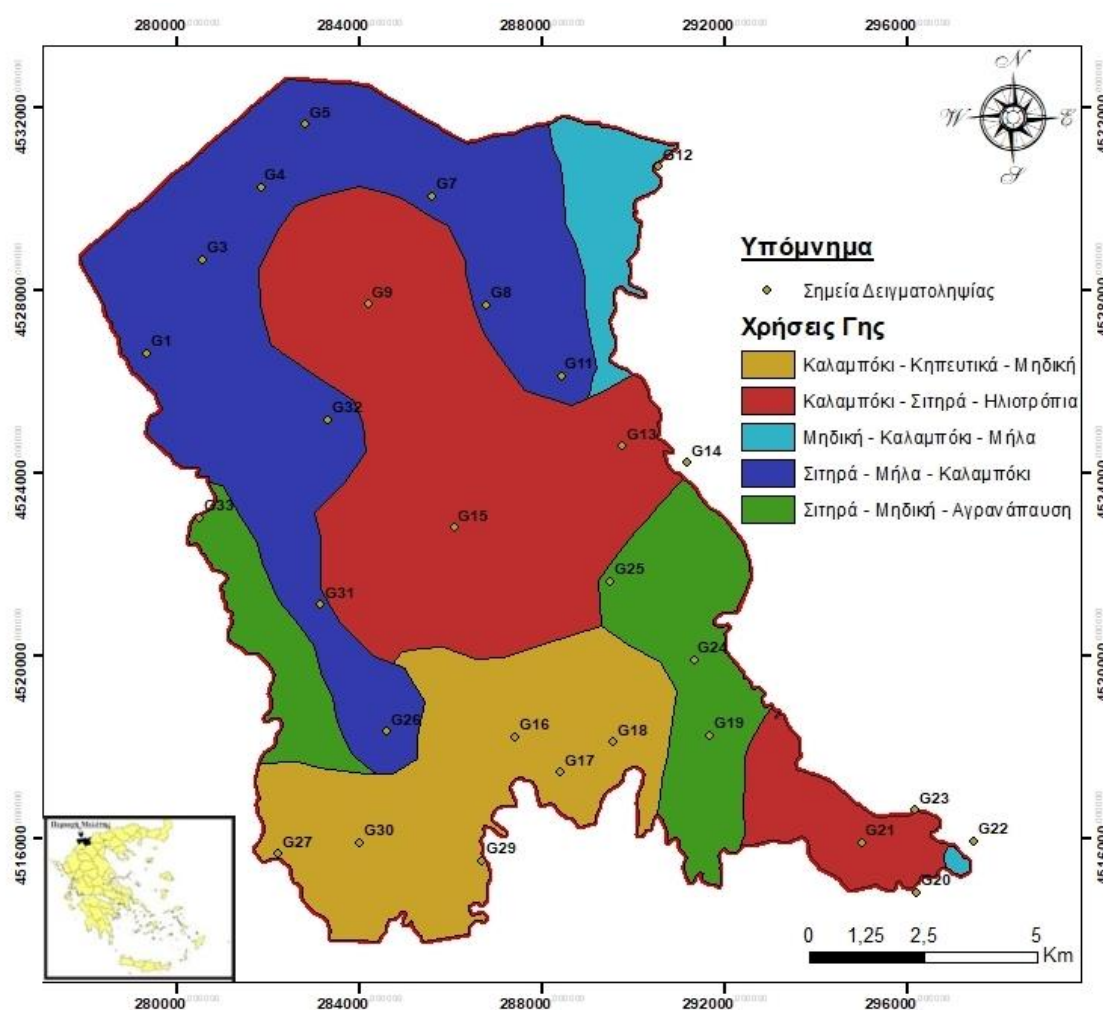
Η DRASTIC-LN αποτελεί τον συνδυασμό της DRASTIC-N με τις χρήσεις γης L της περιοχής για την εκτίμηση της διακινδύνευσης, ώστε να επιτευχθεί μια πιο ισχυρή και λεπτομερής περιγραφή της αντίδρασης όλων των υδρογεωλογικών συστημάτων στην ρύπανση (Busico et al., 2017).

Για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης με στατιστικές μεθόδους έχει χρησιμοποιηθεί η πιθανότητα εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης ως ξεχωριστή παράμετρος της μεθόδου DRASTIC από διάφορους ερευνητές (Secund et al., 1998; Panagopoulos et al., 2006; Antonakos & Lambrakis, 2007; Huan et al., 2012; Kazakis and Voudouris, 2015). Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Βουδούρη (2009), η πιθανότητα εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης σχετίζεται με τις πηγές ρύπανσης και τις χρήσεις γης.

Στον χάρτη που ακολουθεί φαίνονται οι χρήσεις γης στον αλλουβιακό υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας κατά προσέγγιση έπειτα από επί τόπου παρατήρηση αλλά και την βοήθεια του Google Earth.

Σε πολλές καλλιέργειες της περιοχής γίνεται χρήση λιπασμάτων (κατά βάση αζωτούχα λιπάσματα) για καλύτερη απόδοση, κάτι που πιθανόν επιβαρύνει τους υδροφορείς και υποβαθμίζει την ποιότητα των υπόγειων υδάτων.

Στα Σχήματα 32 και 33 φαίνεται η χωρική κατανομή των τιμών της DRASTIC-N και DRASTIC-LN. Για την παράμετρο των χρήσεων γης ως επικινδυνότητα ορίστηκε η τιμή 2,66, η οποία ήταν η μεγαλύτερη που υπολογίστηκε για τους άλλους παράγοντες και αφορούσε στο υλικό του υδροφορέα (A).



Σχήμα 31. Προσεγγιστικός απλοποιημένος χάρτης ομαδοποιημένων καλλιεργειών του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας.

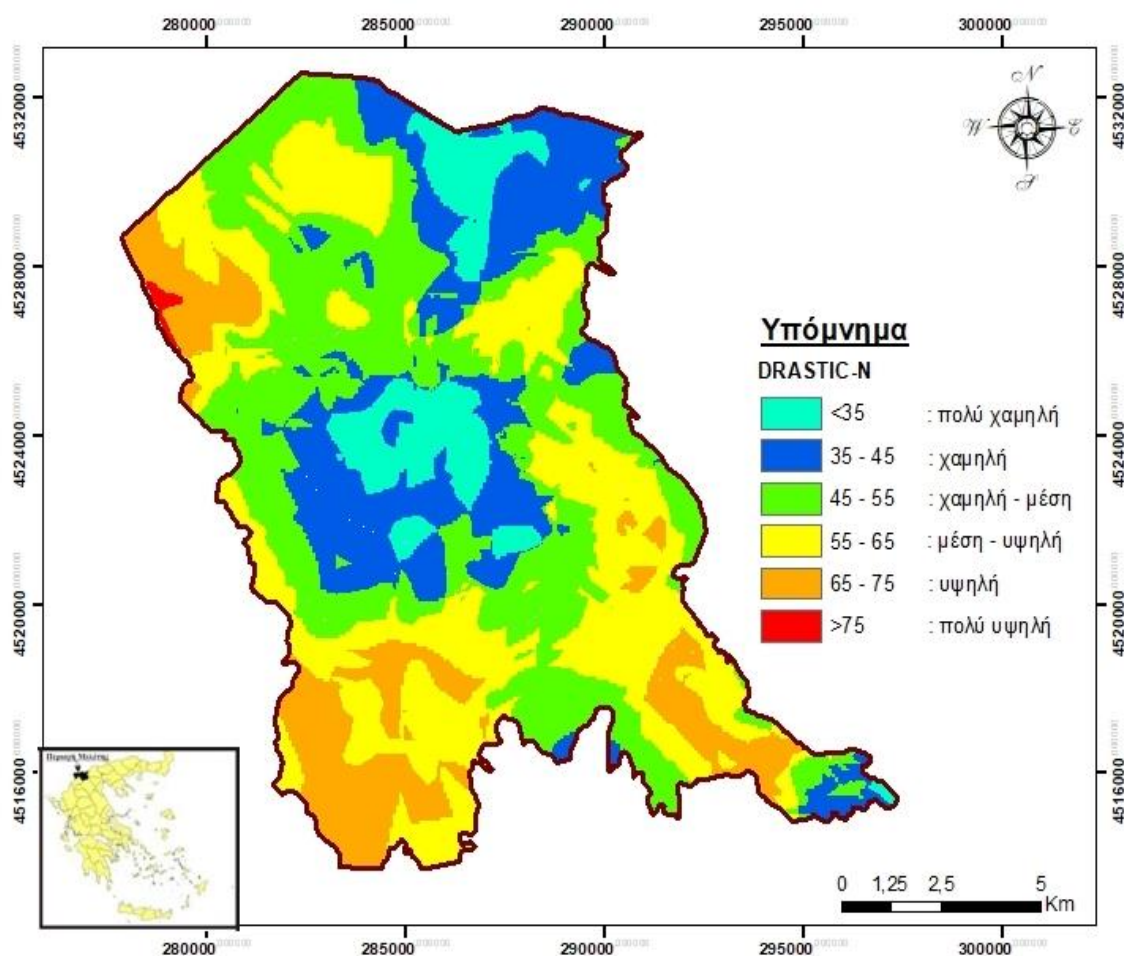
4.4.3. Χάρτες κατανομής DRASTIC-N και DRASTIC-LN

Οι υπολογισθείσες τιμές της DRASTIC-N χωρίστηκαν και αυτές σε 6 κατηγορίες ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τιμές στο κεντρικό, βορειοανατολικό άκρο της λεκάνης. Η τρωτότητα και σε αυτή την περίπτωση όπως και στην Typical DRASTIC αυξάνεται

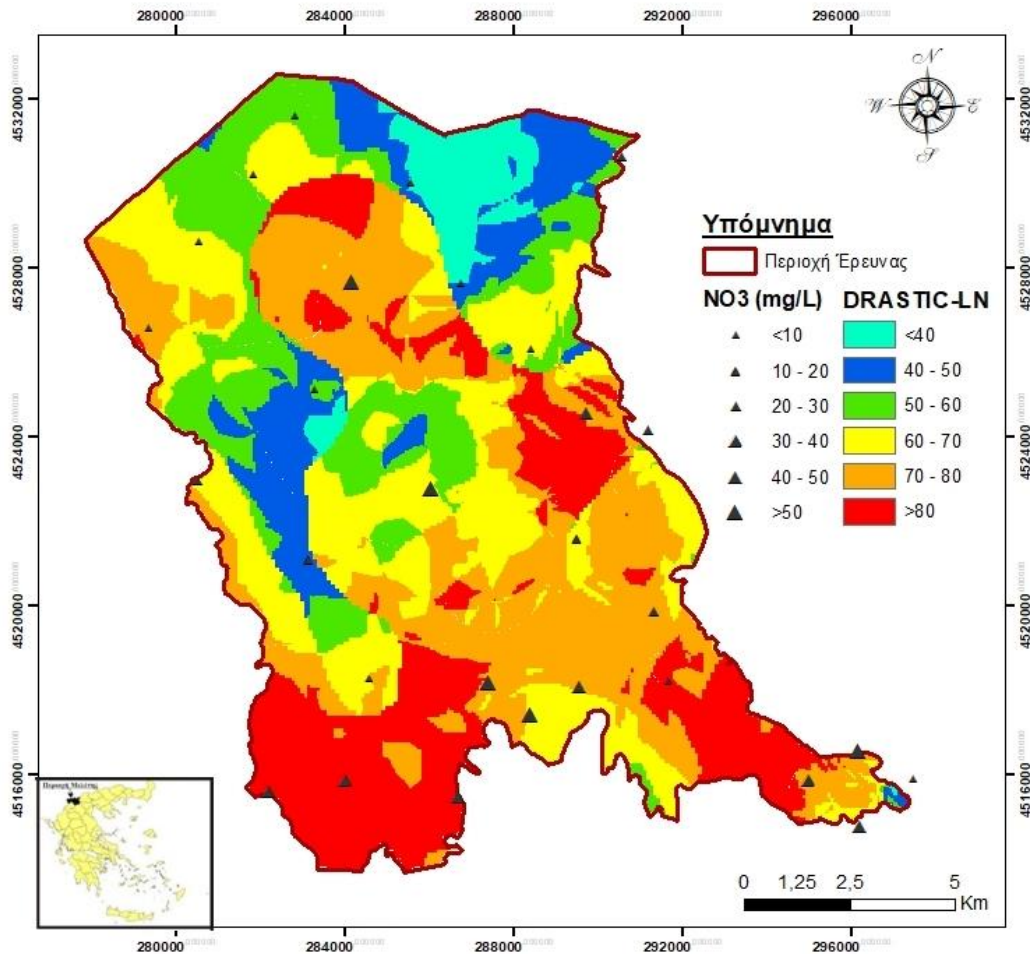
προχωρώντας από το κέντρο προς τα άκρα της λεκάνης όμως μόνο σε λίγα τμήματα χαρακτηρίζεται ως πολύ υψηλή. Συγκεκριμένα βορειοδυτικά και νοτιοδυτικά παρουσιάζεται υψηλότερη τρωτότητα πιθανόν λόγω παρουσίας επιφανειακών νερών.

Σε σύγκριση των τιμών της DRASTIC-N με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων υπολογίστηκε συντελεστής συσχέτισης ίσος με 0,111. Η τιμή αυτή είναι επίσης μικρή και δεν δείχνει να υπάρχει μεγάλη συσχέτιση.

Διακινδύνευση (pollution risk) ενός υδροφορέα στην εξωτερική ρύπανση είναι η συνάρτηση της τρωτότητας (vulnerability) και της πιθανότητας εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης (hazard) σε μια περιοχή (Βουδούρης, 2009). Η σχέση με την οποία ορίζεται η διακινδύνευση είναι $R = V * H$ (Varnes 1984; Uricchio et al., 2004; Βουδούρης 2009). Ο χάρτης κατανομής των τιμών της διακινδύνευσης δημιουργήθηκε από τον χάρτη τρωτότητας DRASTIC-N σε συνδυασμό με τον χάρτη κατανομής χρήσεων γης μέσω της εντολής Raster Calculator του GIS.



Σχήμα 32. Τελικός χάρτης κατανομής της τρωτότητας που υπολογίστηκε με την DRASTIC – N.



Σχήμα 33. Τελικός χάρτης κατανομής της διακινδύνευσης DRASTIC – LN.

Και σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές που υπολογίσθηκαν ταξινομήθηκαν σε έξι κατηγορίες από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή. Στον θεματικό χάρτη κατανομής των τιμών (Σχήμα 33) παρουσιάζεται υψηλότερη διακινδύνευση στην ρύπανση στο κεντρικό και στα δύο νότια άκρα της λεκάνης. Στις περιοχές αυτές βασική καλλιέργεια είναι το καλαμπόκι όπου και γίνεται χρήση λιπασμάτων αυξάνοντας την επικινδυνότητα ρύπανσης των υπόγειων νερών. Στον χάρτη παρουσιάζονται και οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων.

Ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών της DRASTIC-LN με τις τιμές συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων υπολογίσθηκε ίσος με 0,545. Η συσχέτιση είναι εμφανώς μεγαλύτερη και μας δείχνει ότι οι χρήσεις γης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας στην ρύπανση που θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και να συνδυάζονται με τις μεθόδους υπολογισμού της τρωτότητας ώστε να παράγονται πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την υδρογεωλογική και υδροχημική έρευνα της λεκάνης της Φλώρινας προέκυψαν τα παρακάτω συνοπτικά αποτελέσματα:

► Το πεδινό τμήμα της λεκάνης της Φλώρινας καλύπτεται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις. Σε αυτό λαμβάνουν χώρα έντονες αγροτικές δραστηριότητες με κύρια προϊόντα παραγωγής καλαμπόκι, σιτηρά, μηδική, κηπευτικά και ηλιοτρόπια.

► Η διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού έπειτα από κατασκευή πιεζομετρικών χαρτών φαίνεται να είναι από το Νότο προς τον Βορρά.

► Στο κεντρικό και νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης υπολογίσθηκαν, έπειτα από υδροχημικές αναλύσεις σε 29 δείγματα νερού, αυξημένες τιμές νιτρικών ιόντων με την μέγιστη τιμή να φτάνει τα 68 mg/L. Οι τιμές αυτές αποδίδονται κυρίως σε χρήση αζωτούχων λιπασμάτων.

► Ο υδροχημικός τύπος του υπόγειου νερού χαρακτηρίστηκε ως ασβεστούχος – οξυανθρακικός (Ca-HCO_3).

► Από την εφαρμογή δεικτών ποιότητας νερού προέκυψε ότι η ποιότητα του υπόγειου νερού βρέθηκε από αρκετά καλή έως μέτρια για αρδευτική χρήση.

► Για τον υπολογισμό της τρωτότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Typical DRASTIC. Στον θεματικό χάρτη κατανομής των τιμών της παρουσιάζεται υψηλότερη τρωτότητα στο νοτιοδυτικό άκρο της λεκάνης. Μέση προς υψηλή τρωτότητα στο βορειοδυτικό και νοτιοανατολικό άκρο, ενώ βορειοανατολικά και κεντρικά παρουσιάζεται χαμηλότερη τρωτότητα. Η υψηλή τρωτότητα αρχικά σχετίζεται με τμήματα της λεκάνης που έχουν μικρά βάθη υπόγειου νερού, κροκάλες και χαλίκια ως υλικό υδροφορέα, μικρές κλίσεις εδάφους (0-2%) και ιλυοπηλώδες ή αργιλώδες εδαφικό υλικό. Χαμηλότερη τρωτότητα αντιστοιχεί σε τμήματα με αμμώδες και αμμοπηλώδες έδαφος, μεγαλύτερα βάθη υπόγειου νερού, άμμο, άργιλο και χαλίκια ως υλικό υδροφορέα καθώς και ακόρεστης ζώνης.

► Η γραμμική συσχέτιση των τιμών της Typical DRASTIC με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων έδωσε πολύ μικρό συντελεστή συσχέτισης (0.073). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι η DRASTIC δεν λαμβάνει υπόψη από μόνη της τις χρήσεις γης που σύμφωνα με αυτές γίνεται και η αντίστοιχη χρήση λιπασμάτων. Επιπρόσθετα δεν λαμβάνει υπόψη πιθανές διεργασίες απονιτροποίησης που λαμβάνουν χώρα στην εδαφική ζώνη.

► Για τη βελτιστοποίηση του δείκτη DRASTIC χρησιμοποιήθηκαν η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων και οι χρήσεις γης ως επιπλέον παράμετροι για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και δημιουργήθηκαν οι τροποποιημένοι δείκτες DRASTIC-N και DRASTIC-LN.

► Από τη γραμμική συσχέτιση της DRASTIC-N με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων υπολογίσθηκε ο συντελεστής συσχέτισης r ίσος με 0.11. Παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι μεγαλύτερη από αυτόν που υπολογίσθηκε για την Typical DRASTIC, όμως και πάλι η τιμή του παραμένει χαμηλή.

► Από την DRASTIC-LN φαίνεται η διακινδύνευση του υδροφορέα στην εξωτερική ρύπανση. Ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών της με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων έδειξε μεγαλύτερη συσχέτιση. Συγκεκριμένα βρέθηκε ίσος με 0,545. Η τιμή αυτή μας δείχνει την ύπαρξη θετικής συσχέτισης, καθιστώντας τον χάρτη που προέκυψε από τον δείκτη DRASTIC-LN ως τον καταλληλότερο για τη χρήση του ως διαχειριστικό εργαλείο για την προστασία του υπόγειου νερού.

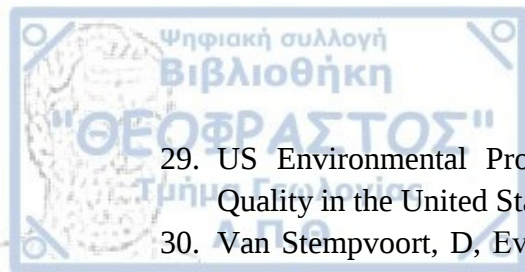
► Η DRASTIC-LN συνδυάζει τιμές τρωτότητας με τις χρήσεις γης οπότε και δίνει μεγαλύτερη συσχέτιση και καλύτερα αποτελέσματα όταν έχουμε ως συγκεκριμένο ρυπαντή τα αζωτούχα λιπάσματα, καθώς ανάλογα με την καλλιέργεια αλλάζει το είδος και η ποσότητα αυτών.

► Γενικά οι χάρτες τρωτότητας, πόσο μάλλον όταν αυτοί συνδυάζονται με χάρτες διακινδύνευσης είναι απαραίτητα εργαλεία όσον αφορά τη διαχείριση των υδατικών πόρων αλλά και τον σχεδιασμό των χρήσεων γης ή την χάραξη ζωνών προστασίας. Όπως είναι φυσικό όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αντικαταστήσει την έρευνα πεδίου.

Τέλος, η ορθολογική χρήση των λιπασμάτων, οι αλλαγές στις χρήσεις γης και η συστηματική και συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας του υπόγειου νερού αποτελούν ορισμένες από τις δράσεις που προτείνονται να υιοθετηθούν για τον περιορισμό της περαιτέρω υποβάθμισης στη λεκάνη της Φλώρινας.

1. Al-Adamat, R.A.N., I.D.L. Foster, S.M.J. Baban (2003) 'Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC'. Applied Geography 23: 303-324.
2. Aller, L., T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty, G. Hackett (1987) 'DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting'. EPA/600/2-87/035.
3. Antonakos, A.K., Lambrakis, N.J., (2007), Development and testing of three hybrid methods for the assessment of groundwater vulnerability to nitrates, based on the drastic method, an example from N.E. Korinthia, Greece. Journal of Hydrology 333 (2-4): 288-304.
4. Βασιλειάδης, Ι. (2005) 'Γεωλογική – Υδρογεωλογική μελέτη της Βορειοανατολικής λεκάνης του νομού Φλώρινας', Αδημοσίευτη Τεχνική Έκθεση, Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, pp. 22
5. Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T., Katok, K., (2005), A GIS-based drastic model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Sci. Total Environ. 345: 127-140
6. Βουδούρης, Κ. (2008) 'Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος'. Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Εκδόσεων ΑΠΘ, σελ. 248
7. Βουδούρης Κ., (2009) 'Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον', Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
8. Busico, G., Kazakis, N., Colombani, N., Mastrocicco, M., Voudouris, K., Tedesco, D., (2017), A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations. Science of the Total Environment 609: 1512-1523.
9. Civita, M. (1994): Le carte della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento. Teoria & practica. (Aquifer vulnerability maps to pollution). Pitarora Ed., Bologna (in Italian).
10. Civita, M. , Regibus, C. (1995) 'Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilita degli acquiferi'. Quaderni di Geologia Applicata, Pitarora Ed., Bologna (in Italian).
11. Clesceri, L., A. Greenberg, A., Trussell, R. (1989) 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater', 17th edition, APHA- AWWA - WEF, Washington D.C.
12. Ι.Γ.Μ.Ε. (1987) «Γεωλογικός χάρτης, φύλλο Φλώρινας», κλίμακας 1: 50.000.
13. Ι.Γ.Μ.Ε. (1981) «Γεωλογικός χάρτης, φύλλο Βεύη», κλίμακας 1: 50.000.
14. Huan, H., Jinsheng W., Yanguo T., (2012) 'Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin city of northeast China'. Science of the total Environment, Vol. 440: 14-23.
15. Καλλέργης, Γ., (2000). Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2^η έκδοση, τόμος Β, Τ.Ε.Ε., Αθήνα

16. Καζάκης, Ν., Βουδούρης, Κ., Παύλου, Α., Πατρικάκη, Ο. (2008) 'Εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας με τη μέθοδο DRASTIC και τη χρήση GIS', Πρακτικά, 3^ο Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, 14-17 Μαρτίου 2008, Θεσσαλονίκη.
17. Καζάκης, Ν., (2008), Εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών στην εξωτερική ρύπανση. Εφαρμογή στη λεκάνη της Φλώρινας. Διατριβή Ειδίκευσης. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
18. Καζάκης Ν., (2013). Εκτίμηση της διακινδύνευσης της εξωτερικής ρύπανσης των υπόγειων νερών: εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
19. Kazakis, N., Voudouris, K., (2015), Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the drastic method using quantitative parameters. J. Hydrol. 525: 12-25.
20. Μουντράκης, Δ., (1985): Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio Press, σελ. 204.
21. Panagopoulos, G., Antonakos, A., Lambrakis, N., (2006): Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. Hydrogeology Journal 14, 894-911
22. Ravikumar, P., Somashekar, R.K and Prakash, K.L.(2015) 'A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India', Elixir Earth Sci. 80: 31073-31077.
23. Secunda, S., Collin, M.L., Melloul, A., (1998) 'Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region'. Περιοδικό Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (1998) 54, 39-57
24. Subba Rao, N., Surya Rao, P., Reddy, G.V. et al. (2012): Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha river basin, Visakhapatnam district, Andhra Pradesh, India, Environmental Monitoring Assessment 184, 5189-5214.
25. Suthar, N., Bishnoi, P., Singh, S., Mutiyar, P.K., Nema, A.K., Patil, N.S. (2009) 'Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan Indian', Journal of Hazard Materials 171, 189-199.
26. Filintas, AG., Dioudis, P., Koutseris, E. and Papadopoulos, A. (2007) 'Soils Nitrates GIS mapping, Irrigation Water and Applied N-fertilizer effects in soils nitrogen depletion in a drip irrigated experimental field in Thessaly basin', 3rd IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, Agios Nikolaos, Greece, pp. 487-492.
27. Foster, S.S.D. (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W., Weageningh, H.G. (Eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proc. Inf. 38, 69-86.
28. Uricchio, V.F., Giordano, R., Lopez, N., (2004): A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution and risk evaluation. Journal of Environmental Management 73: 189-197.



29. US Environmental Protection Agency, 1996. Environmental Indicators of Water Quality in the United States: Washington D.C., Office of water, EPA 841-R-96-002.
30. Van Stempvoort, D, Evert, L, Wassenaar, L. (1992) 'Aquifer Vulnerability Index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping'. Canadian Water Resources Journal, 18: 25-37.
31. Varnes, D.J. (1984) 'Commission on Landslides and other Mass –Movements – IAEG Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practices'. The UNESCO Press, Paris
32. Zwahlen, F. (2004) 'Vulnerability and risk assessment mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission Directorate XII Science, Research and Development, Report EUR 20912, Brussels (297 p).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Φωτογραφίες περιοχής έρευνας και γεωτρήσεων

