



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΣΙΧΛΙΜΟΙΡΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ
ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2023



ΣΙΧΛΙΜΟΙΡΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5585

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Καθηγητής Υδρογεωλογίας Α.Π.Θ.

Συνεπικουρία στην Επίβλεψη:

Καζάκης Νεραντζής, Δρ. Υδρογεωλογίας Π.Δ./407



© Παρασκευή Χ. Σιχλιμοίρη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ – Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Sichlimoiri Paraskevi, School of Geology, Laboratory of Engineering Geology and Hydrogeology, 2023

VULNERABILITY ASSESSMENT OF ZOODOCHOS SPRING'S KARST AQUIFER, IN THE AREA OF KOZANI – Bachelor Thesis

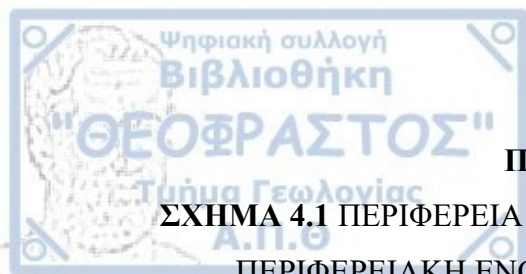
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται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

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



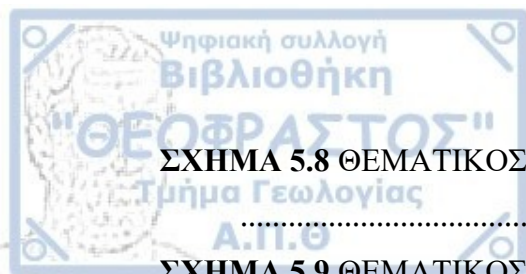
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΠΡΟΛΟΓΟΣ	8
2	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
4	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	14
4.1	ΠΕΡΙΟΧΗ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ	14
4.1.1	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ- ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	14
4.1.2	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	16
4.1.3	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	21
4.1.4	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	26
4.1.5	ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ	28
5	ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	30
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	30
5.1.1	ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	31
5.1.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ	33
5.1.3	ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ	33
5.1.4	Η ΜΕΘΟΔΟΣ PaPRIKa	33
5.2	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	
	ΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ PaPRIKa	36
5.2.1	P- ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	36
5.2.2	R-ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ	40
5.2.3	I- ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ	41
5.2.4	Ka- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ	43
5.2.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	44
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	46
6.1	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ	46
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΑ

ΣΧΗΜΑ 4.1 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ, ΟΠΟΥ ΕΝΤΟΠΙΖΕΤΑΙ Η ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΟΖΑΝΗΣ (ΠΗΓΗ: (PDM.GOV.GR 2022))..	14
ΣΧΗΜΑ 4.2 Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ (ΠΗΓΗ: GOOGLE EARTH PRO).....	15
ΣΧΗΜΑ 4.3 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ (ΠΗΓΗ: GOOGLE EARTH PRO).	15
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (ΦΥΛΛΟ ΒΕΛΕΒΝΤΟΣ, ΓΥΣ)	16
ΣΧΗΜΑ 4.5 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.	18
ΣΧΗΜΑ 4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2018 – ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2019.....	19
ΣΧΗΜΑ 4.7 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΜΗΝΙΑΙΟΥ ΥΨΟΥΣ ΒΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2018– ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2019.....	20
ΣΧΗΜΑ 4.8 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΤΗΣ ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ.	21
ΣΧΗΜΑ 4.9 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ.....	23
ΣΧΗΜΑ 4.10 ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΣΤΗ ΖΩΟΔΟΧΟ ΠΗΓΗ.....	25
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (COST ACTION 620, 2003) ΜΕ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, 2009.	32
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΥΠΟΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ CA.....	36
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΥΠΟΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ S.....	37
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΥΠΟΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ UZ.....	38
ΣΧΗΜΑ 5.5 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΥΠΟΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ E.....	39
ΣΧΗΜΑ 5.6 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ P.	40
ΣΧΗΜΑ 5.7 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ R.	41



ΣΧΗΜΑ 5.8 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Ι	
.....	42
ΣΧΗΜΑ 5.9 ΘΕΜΑΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	
ΚΑ.	43
ΣΧΗΜΑ 5.10 ΤΕΛΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ	
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΤΗ	
ΜΕΘΟΔΟ ΡΑΡΙΚΑ.....	44
ΣΧΗΜΑ 5.11 ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΤΑΣΗ (%) ΠΟΥ	
ΚΑΤΑΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ	
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ.....	45

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΥΨΟΥΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΓΙΑ	
ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2018- ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ 2019.	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΒΑΡΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΡΑΡΙΚΑ.	35



1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε από το εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθ. Κωνσταντίνου Βουδούρη και του Δρ. Νεραντζή Καζάκη, Διδάκτορα Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και Επικουρου Καθηγητή ΠΔ/407.

Για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών, επέλεξα να μελετήσω ένα θέμα, που αφορά στην υδρογεωλογία. Ο κλάδος αυτός ήρθε να τονώσει το ενδιαφέρον μου για το νερό και βοήθησε ώστε να συνειδητοποιήσω την αξία τόσο των επιφανειακών υδάτων, όσο και του υπόγειου νερού.

Η σημασία του νερού σε κάθε έκφανση της ζωής του ανθρώπου είναι τεράστια. Είναι στοιχείο ζωτικής σημασίας, που αποτελεί τη βάση για ανάπτυξη και διατήρηση κλάδων, όπως της γεωργίας, της βιομηχανίας, του τουρισμού κλπ. Η έλλειψή του φαντάζει και είναι καταστροφική, με πλήθος επιπτώσεων. Καλείται λοιπόν ο άνθρωπος, να γίνει καλός διαχειριστής και όχι ανεξέλεγκτος ιδιοκτήτης, όσων του προσφέρονται.

Το υπόγειο νερό είναι αυτό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και συνιστά μόλις το 0,61% των συνολικών αποθεμάτων νερού του πλανήτη. Τα αποθέματα υπόγειου γλυκού νερού αποτελούν περίπου το 30,1% των συνολικών αποθεμάτων γλυκού νερού στον πλανήτη μας (Βουδούρης, 2015). Αξίζει να σημειωθεί ότι το 65% των υδατικών αναγκών των κατοίκων της Ευρώπης στηρίζεται αποκλειστικά σε υπόγεια ύδατα. Ωστόσο, η έλλειψη γλυκού νερού, συνδυαστικά με τις αυξανόμενες υδατικές ανάγκες του ανθρώπινου πληθυσμού, καθιστούν τους υπόγειους υδροφορείς ιδιαίτερα ευάλωτους έναντι φαινομένων ποιοτικής υποβάθμισης, αλλά και ποσοτικής, που υποδηλώνονται με την μείωση του όγκου των αποθεμάτων τους.

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η *«Εκτίμηση της τρωτότητας του καρστικού υδροφορέα Ζωοδόχου Πηγής στην περιοχή της Κοζάνης»* και στοχεύει στην διερεύνηση του φαινομένου της τρωτότητας του συγκεκριμένου υδροφορέα, με την χρήση της μεθόδου PaPRIKa.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη που με ενέπνευσε να ασχοληθώ με την Υδρογεωλογία στο επίπεδο των



προπτυχιακών μου σπουδών και με ώθησε να ανακαλύψω και να αγαπήσω το αντικείμενο που με ενδιέφερε περισσότερο, στην επιστήμη της γεωλογίας.

Επιπρόσθετα, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς το ενδιαφέρον, την αμέριστη συμπαράσταση, την αρωγή, την επιστημονική υποστήριξη και την καθοδήγηση του μεταδιδάκτορα, του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, κ. Νεραντζή Καζάκη, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους καθηγητές του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ., καθώς μέσα από τη διδασκαλία, τόσο στα ακαδημαϊκά έδρανα, όσο και στις απέραντες τάξεις της υπαίθρου, μας έμαθαν να σεβόμαστε και να παρατηρούμε τον φυσικό πλούτο που υπάρχει γύρω μας, αλλά κυρίως να εμβαθύνουμε στην επιστημονική γνώση.

Ένα τελευταίο ευχαριστώ από καρδιάς στους γονείς μου, Χρύσανθο και Αφροδίτη, για τη στήριξη και την εμφύσηση του ενθουσιασμού τους για ζωή, προσπάθεια και αγώνα, όπως και στους αδελφικούς μου φίλους, που με συμβούλευαν και προσεύχονταν για εμένα, προς ολοκλήρωση των σπουδών μου. Θερμές ευχαριστίες στην Λεονταρίδου Κωνσταντίνα, για την πολύτιμη συμβολή της στις αγγλικές μεταφράσεις.

Εύχομαι η περάτωση των σπουδών μου, να δώσει χαρά στον λεβέντη Ηπειρώτη παππού μου Κώστα και την Ηπειρώτισσα γιαγιά Βούλα, που όσο ήταν κοντά μου, με έμαθαν να πιστεύω, να προσπαθώ και να αγαπώ σε κάθε περίπτωση της ζωής.

*«...διέρρηξε πέτρων ἐν ἐρήμῳ καὶ ἐπότισεν αὐτοὺς ὡς ἐν ἀβύσσῳ πολλῇ
καὶ ἐξήγαγεν ὕδωρ ἐκ πέτρας καὶ κατήγαγεν ὡς ποταμοὺς ὕδατα.»*

«...διέρρηξε βράχον εἰς ἐρημον καὶ ἀνυδρον τόπον καὶ τοὺς ἐπότιζεν ἀπὸ πηγῇ,
που ἀνέβλυζεν ἀφθονα ὕδατα ὡσάν μεγάλης θαλάσσης. Αὐτὸς ἔκαμε νὰ ἀναβλύσουν
πλούσια νερά ἀπὸ τὸν βράχον καὶ κατέβασε ποτάμια ὑδάτων ἀπὸ αὐτόν.»

Ψαλμός 77^{ος}

2 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο τη μελέτη και παρακολούθηση υπόγειου καρστικού υδροφορέα, αναφορικά με την τρωτότητα και τη διακινδύνευση που παρουσιάζει στην εξωτερική ρύπανση, συμπεριλαμβανομένων και των αναγκαίων μέτρων που πρέπει να παρθούν, για την προστασία των υδάτων των υδροληπτικών έργων. Η δραστηριοποίηση σε θέματα υπόγειων υδάτων (διαχείριση, προστασία, εξυγίανση) αποκτά καθημερινά σημαντική θέση στην οικονομική και κοινωνική συνείδηση του πλανήτη (Στίκα, 2020).

Η περιοχή που επιλέχθηκε προς εξέταση είναι αυτή της Ζωοδόχου Πηγής Κοζάνης. Ο καρστικός υδροφορέας βρίσκεται στη Δυτική Μακεδονία και καλύπτει έκταση 7,3 km². Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής για την διεξαγωγή έρευνας έχει μεγάλη σημασία, καθώς το καρστικό αυτό σύστημα, μαζί με τις πηγές της Ερμακιάς και της Γκιώνας, τροφοδοτούν τον Δήμο Κοζάνης με πόσιμο νερό. Εκτός των πηγών, γίνονται απολήψεις νερού από τους καρστικούς σχηματισμούς με υδρογεωτρήσεις.

Καθώς οι «υπηρεσίες» υδροδότησης, που παρέχει το καρστικό αυτό σύστημα στους ανθρώπους της περιοχής είναι ζωτικής σημασίας, ήταν αναμενόμενο να έρθει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος και της έρευνας τα τελευταία χρόνια. Οι, όλο αυξανόμενες, ανάγκες σε νερό επιβάλλουν την αξιοποίηση των καρστικών πηγών, οι οποίες εμφανίζουν ένα μειονέκτημα χρονικά, κατά τους θερινούς μήνες, εξ' αιτίας μείωσης της παροχής τους, με επακόλουθη ελάττωση της τροφοδοσίας των περιοχών που υδροδοτούν.

Ο οικισμός της Ζωοδόχου Πηγής υπήρξε κομβικό σημείο με μεγάλη διέλευση οχημάτων, λόγω λειτουργίας του παλαιού εθνικού οδικού δικτύου ως αποκλειστικού δικτύου, μέχρι το 2004, οπότε και εγκαινιάστηκε η Εγνατία Οδός. Έκτοτε η κυκλοφορία μειώθηκε κατακόρυφα, με βαρύτερες οικονομικές επιπτώσεις στις μικρές τοπικές επιχειρήσεις εστίασης, αλλά και στις πωλήσεις τοπικών προϊόντων.

Η γεωργική δραστηριότητα περιστρέφεται γύρω από την καλλιέργεια πατάτας (Πολύμυλος, Καστανιά), με ευνοϊκή συνεισφορά του καιρού και άλλων παραγόντων. Η γενική ανθρώπινη δραστηριότητα, με κύρια έμφαση στη γεωργική δραστηριότητα και ειδικότερα η υπέρμετρη χρήση λιπασμάτων και η μη ορθολογική διαχείριση του υπόγειου νερού, έχουν φέρει στην επιφάνεια το πρόβλημα της ποιοτικής υποβάθμισης



του υπόγειου υδροφορέα. Η περιοχή έρευνας εξάλλου εντάσσεται στην ευπρόσβλητη ζώνη της πεδιάδας Θεσσαλονίκης – Πέλλας – Ημαθίας.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate the groundwater aquifer's vulnerability and the risk of external environmental pollution, including the essential measures that should be taken, for the groundwater protection of works over water abstraction.

The research area is Zoodochos Spring, in Kozani. This karst aquifer is located in West Macedonia and occupies an area of 7, 3 km². The survey in this specific area is important, because of the karst system and the springs of Ermakia and Giona, which supply potable water to the locals. Also water is abstracted from the karst formations through drillings.

Because of the vital importance from these supplies, it was expected to come into attention for research purposes. The increasing need for water requires the exploitation of the karst springs, which show a disadvantage, mostly during summer, because of the reduction in the water quantity, having as a result the cosequent reduction of the water supply in the neighboring areas.

The settlement of Zoodochos Spring has been an important node with many vehicles passing through, because of the old National Road Network, that was used as the main road till 2004, when the new Egnatia Motorway was inaugurated. Since then, the traffic was reduced significantly, with deep economic impact in the local small enterprises, and the local products sellings as well.

The agricultural is mostly related with the potato cultivation (Polymilos, Kastania), with the contribution of the favorable weather and other factors. The general human activity, mostly in agriculture and especially the vast amounts of manure being used, and the non orthological handling of the groundwater, have bring into attention the problem of the qualitative degradation of the aquifer. The research area, after all, is part of the vulnerable zone of the valley Thessaloniki-Pella-Imathia.

3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από αρχαιοτάτων χρόνων έως και σήμερα, η παρουσία νερού σε μία περιοχή, αλλά και η εύκολη πρόσβαση σε πόσιμο νερό, ήταν το βασικό στοιχείο για την επιλογή μιας θέσης ως κατάλληλης, για τη δημιουργία οικισμών. Ο ανθρώπινος νους δεν παύει να μελετά και να μηχανεύεται τρόπους, για την αξιοποίηση επιφανειακών, πηγαίων και υπογείων υδάτων. Η κατασκευή και ο σχεδιασμός υδροληπτικών έργων, ξεκινώντας από τα αρχαία υδραγωγεία, τα πηγάδια, τις τάφρους και προχωρώντας στα έργα υδρομάστευσης πηγών, στα φράγματα, τις λιμνοδεξαμενές και τις υδρογεωτρήσεις φαίνεται να αποτελεί και θα αποτελεί πρώτιστη έγνοια του ανθρώπου.

Τέτοια, φυσική, υπόγεια, αποθηκευτική λειτουργία, επιτελούν οι υδροφορείς και δη, στον ελληνικό χώρο, οι καρστικοί υδροφορείς. Υδροφορέας εξ' άλλου, όπως προκύπτει από την ετυμολογία της λέξης (ὑδωρ και φέρω) είναι ένα μέσο που φέρει νερό. Ο όρος «υδροφορέας» (aquifer) δόθηκε από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (U.S.Geological Survey, Lohman et al., 1972) ως: ένας σχηματισμός, ομάδα σχηματισμών ή ένα μέρος σχηματισμού, ο οποίος περιέχει επαρκή ποσότητα κορεσμένου περατού υλικού, ώστε να αποδίδει ικανοποιητικές ποσότητες νερού από πηγάδια και πηγές

Με τον όρο **καρστικοί υδροφορείς** εννοούμε τους υδροφορείς αυτούς, που αναπτύσσονται σε ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζονται καρστικοποιημένα και αποτελούν σημαντικό υπόγειο υδατικό πόρο (Βουδούρης, 2009). Στην επικράτεια του Ελληνικού χώρου τα ανθρακικά πετρώματα καταλαμβάνουν το 35% και εντός τους σχηματίζονται καρστικά έγκοιλα. Σε αυτά αποθηκεύονται σημαντικότερα υπόγεια αποθέματα νερού, που κινούνται και εκφορτίζονται μέσω πηγών. Αυτές, τις λεγόμενες καρστικές πηγές, τις βρίσκουμε σε περιοχές όπου έχει αναπτυχθεί το καρστ. Από αυτές τις ποσότητες ύδατος δύνανται να καλυφθούν, τοπικά, οι υδατικές ανάγκες σε ύδρευση αλλά και μεγάλο ποσοστό των αναγκών σε άρδευση.

Αδιαμφισβήτητο είναι όμως το γεγονός, πως τα καρστικά υπόγεια συστήματα είναι ιδιαίτερα τρωτά στην εξωτερική ρύπανση, λόγω της δευτερογενούς περατότητάς τους και παρουσιάζουν υψηλή **τρωτότητα** ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα (Vulnerability) έναντι εξωτερικών ρύπων. Οι ρύποι που εισέρχονται στον υδροφορέα τον υποβαθμίζουν ποιοτικά. Ωστόσο η τρωτότητα, εκτός της ποιοτικής υποβάθμισης,

περικλείει και τις περιπτώσεις ποσοτικής ελάττωσης π.χ. από ακραία καιρικά φαινόμενα (Βουδούρης, 2009).

Ενδεικτική για την τρωτότητα είναι η ποιότητα του υπόγειου νερού, για την οποία λαμβάνουμε πληροφορίες από συλλογή δειγμάτων νερού, που διεξάγεται σε σταθμούς ελέγχου. Γνωρίζοντας πιθανές αιτίες και πηγές ρύπανσης, ενός υπόγειου συστήματος, είναι δυνατή, αλλά και απαραίτητη η σύνταξη χαρτών τρωτότητας, που εικονίζουν περιοχές με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Η συνεισφορά των χαρτών αυτών αποβλέπει στη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση και τη νομοθεσία σε όλα τα επίπεδα δημόσιας διοίκησης (Βουδούρης, 2009). Για την εκτίμηση της Τρωτότητας του υδροφορέα απαιτούνται οι εξής πληροφορίες: μορφολογία περιοχής, βλάστηση, κλιματολογία, εδάφη, υδρολογία, υδρογεωλογία, χρήσεις νερού, ποιότητα νερών, ανθρώπινες παρεμβάσεις στο περιβάλλον.

Αναγκαίος, για κάθε υδροληπτικό έργο, κρίνεται ο καθορισμός και η οριοθέτηση περιμέτρου προστασίας του, υπό εκμετάλλευση, υδροφορέα. Η περίμετρος αυτή χωρίζεται σε ζώνες ποιοτικής προστασίας, για αποφυγή της ρύπανσης, αλλά και για τη διαφύλαξη της ποιοτικής ακεραιότητας του υδροφορέα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η παρακολούθηση καρστικού υδροφορέα και η διερεύνηση για την τρωτότητα, ενός τέτοιου υδροφορέα, όπως αυτός της Ζωοδόχου Πηγής, στην περιοχή της Κοζάνης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση.
- Συλλογή Γεωλογικών και Τοπογραφικών χαρτών.
- Συλλογή κλιματολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων.
- Ψηφιοποίηση θεματικών χαρτών σε περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών.
- Επίσκεψη στην περιοχή έρευνας.
- Επεξεργασία των υδρογεωλογικών και υδρολογικών δεδομένων και εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

4 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής Κοζάνης.

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ

4.1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ- ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής ανήκει, διοικητικά, στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, συγκεκριμένα στην περιφερειακή ενότητα Κοζάνης (Σφάλμα! Το αρχείο π
ροέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.). Η Ζωοδόχος Πηγή βρίσκεται στο ανατολικό
τμήμα του νομού Κοζάνης, στα σύνορα με το νομό Ημαθίας (

Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.1 Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, όπου εντοπίζεται η Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης (Πηγή: (pdm.gov.gr 2022)).

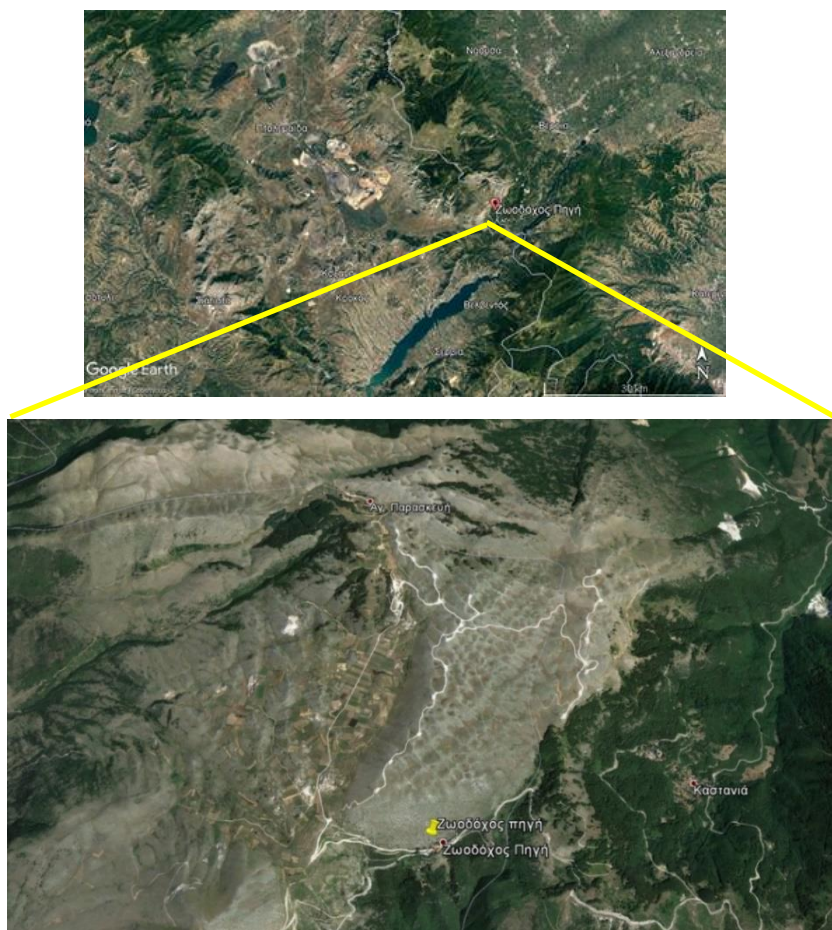
Ο Δήμος Κοζάνης χαρακτηρίζεται ως ένας νεοσύστατος Καλλικρατικός δήμος, που συνίσταται από τις Δημοτικές Ενότητες (Δ.Ε.) Αιανής, Ελίμειας, Κοζάνης, Δημητρίου Υψηλάντη και Ελλησπόντου, στην οποία συγκαταλέγεται και ο οικισμός της Ζωοδόχου Πηγής. Η ονομασία έχει δοθεί από την ομώνυμη εκκλησία, όπου βρίσκεται και το σύστημα πηγών.

Ανατολικά της Ζωοδόχου Πηγής είναι το χωριό Καστανιά, ενώ βόρεια εντοπίζεται ο οικισμός Αγίας Παρασκευής (

Σχήμα 4.3). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της απογραφής 2011 της ΕΛΣΤΑΤ, ο μόνιμος πληθυσμός του οικισμού της Ζωοδόχου Πηγής ήταν 3 κάτοικοι.



Σχήμα 4.2 Η θέση της Ζωοδόχου Πηγής στον Ελλαδικό χώρο (Πηγή: Google Earth Pro).

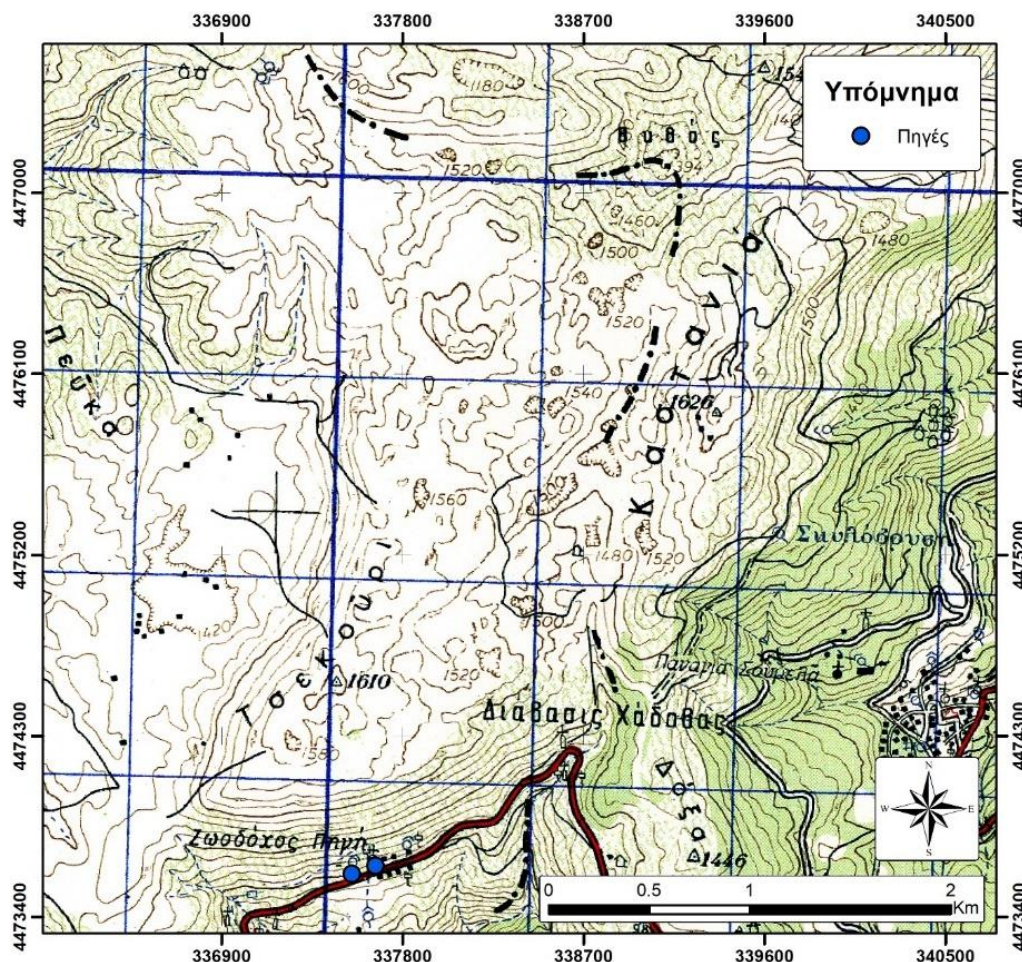


Σχήμα 4.3 Δορυφορική άποψη της περιοχής έρευνας (Πηγή: Google Earth Pro).

Υδατικά, η περιοχή υπάγεται στο Υδατικό Διαμέρισμα (Υ.Δ.) Δυτικής Μακεδονίας, το οποίο είναι το 9^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδος και αποτελεί τμήμα της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Αλιάκμονα. Συγκεκριμένα, το υπόγειο υδατικό υποσύστημα που επικεντρώνεται η παρούσα εργασία είναι αυτό του ΝΑ Βερμίου Όρους (Βέροια) (GR0900110).

4.1.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή έρευνας, εμφανίζει έντονο ορεινό ανάγλυφο, με το υψηλότερο υψόμετρο να αντιστοιχεί στα 1668 m κι εντοπίζεται βόρεια της Ζωοδόχου πηγής, ενώ μειώνεται κλιμακωτά προς τα νότια και ανατολικά της Ζωοδόχου Πηγής, όπου εντοπίζονται και τα χαμηλότερα υψόμετρα, σύμφωνα με τον ακόλουθο τοπογραφικό χάρτη της περιοχής (Σχήμα 4.4) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής έρευνας (Σχήμα 4.5). Το ανάγλυφο έχει μέση κλίση 29%, ενώ η μεγαλύτερη κλίση αντιστοιχεί σε 95% και η μικρότερη σε 0,01%.



Σχήμα 4.4 Τοπογραφικός χάρτης περιοχής (Φύλλο Βελεβντός, ΓΥΣ).

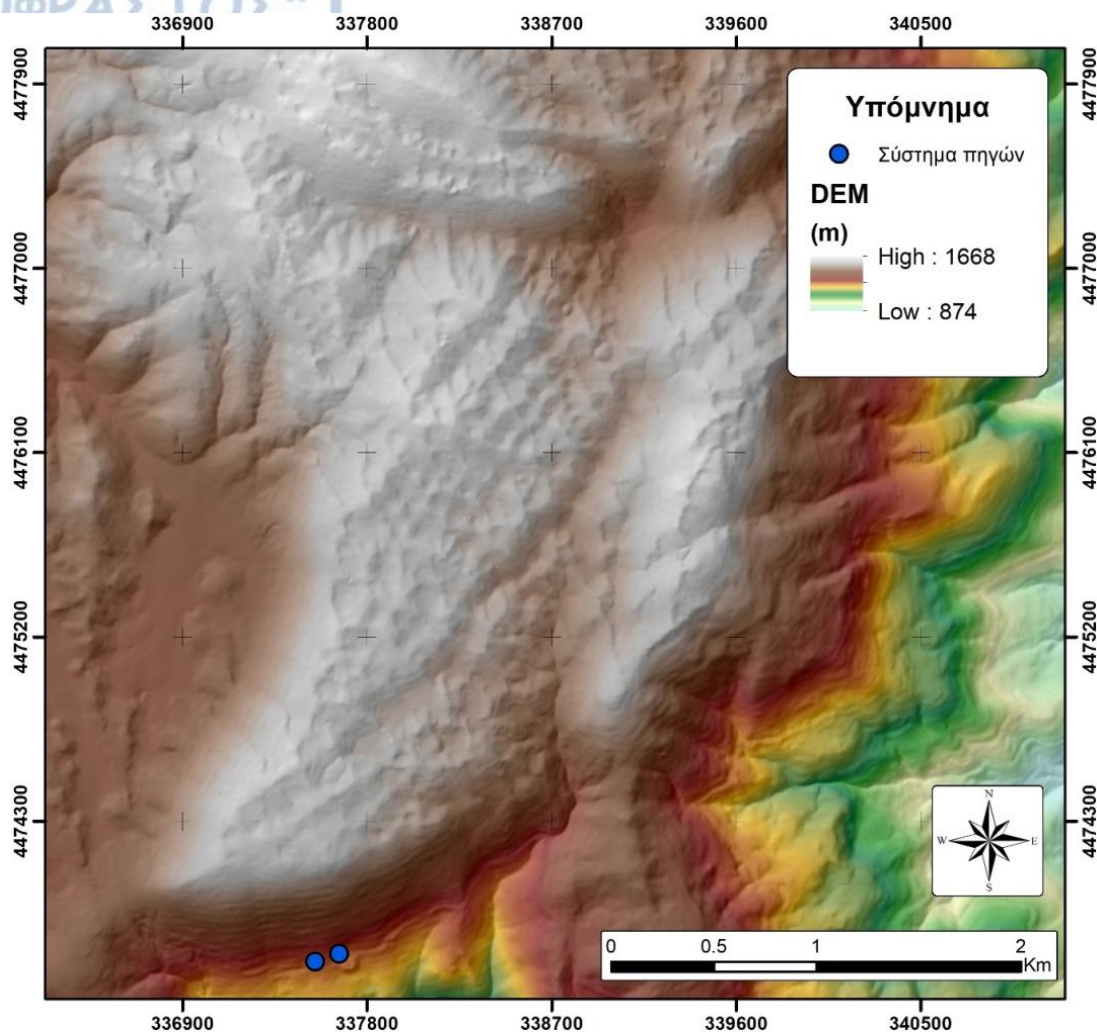
Τμήμα της γύρω περιοχής καλύπτεται από χαμηλή βλάστηση, θάμνους και πουρνάρια. Η γεωργική δραστηριότητα είναι περιορισμένη και όπου υπάρχει, επικεντρώνεται στην καλλιέργεια πατάτας. Η καλλιέργεια πατάτας είναι μία ψυχρή μεσογειακή καλλιέργεια, στην προκειμένη περίπτωση σε εύκρατο κλίμα, με τη θερμοκρασία ως βασικό παράγοντα, που καθορίζει την παραγωγή. Οι βέλτιστες αποδόσεις της καλλιέργειας λαμβάνονται όταν οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες είναι μεταξύ 18 και 20 °C.

Επιδράσεις του ανθρώπινου παράγοντα, όπως οι φωτιές, με πιο πρόσφατη αυτή στις αρχές Αυγούστου του 2021 στο όρος Βέρμιο, κοντά στις ανεμογεννήτριες που βρίσκονται εκεί συντέλεσαν στην οπισθοδρόμηση της κλιματικής βλάστησης. Όμως και άλλες, πιο πάγιες καταστάσεις, όπως η ελευθέρα βοσκή και οι εκχερσώσεις, ευθύνονται για αυτό το φαινόμενο.

Για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών και των βασικών αναγκών σε ύδρευση γίνεται υδρομάστευση των καρστικών πηγών της περιοχής και συνεπώς με αυτήν την επιλογή αξιοποίησης των πηγών, είναι μικρός ο αριθμός των υδρογεωτρήσεων που έχουν ανορυχθεί, ώστε να καλύψουν τη ζήτηση νερού για άρδευση.

Αξιοσημείωτη είναι η παρουσία λατομείων μαρμάρου στην Δ.Ε. Ελλησπόντου, απ' όπου εξορύσσονται τα λευκά μάρμαρα Βερμίου, καθώς και λατομεία βιομηχανικών ορυκτών. Απ' την περιοχή δεν λείπουν οι κτηνοτροφικές μονάδες και οι ανεμογεννήτριες που προαναφέρθηκαν. Το αιολικό πάρκο «Ζωοδόχος Πηγή», βρίσκεται στην κορυφογραμμή του Βερμίου Όρους, ΒΒΑ του οικισμού της Ζωοδόχου Πηγής. Η Δ.Ε. Ελλησπόντου μαζί με την Δ.Ε. Δημ. Υψηλάντη αποτελούν παραδοσιακά ενεργειακές περιοχές.

Καταλυτικός παράγοντας για τις τοπικές καλλιέργειες, όπως προαναφέρθηκε αναδεικνύεται το κλίμα της περιοχής. Δεδομένα για την βροχόπτωση και τη θερμοκρασία λαμβάνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του meteo.gr, οι οποίοι είναι οι εξής: κοιλάδα της Κοζάνης, Βελβεντός, Μεσόβουνο, Νότιο πεδίο και Σέλι. Αυτοί οι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή, περίξ της Ζωοδόχου Πηγής.

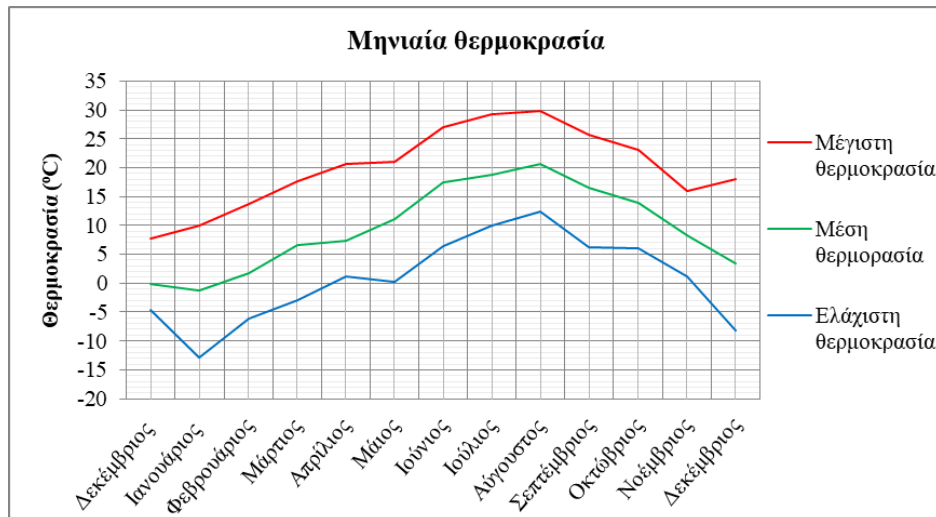


Σχήμα 4.5 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους στις περιοχές έρευνας.

Προκειμένου να είναι δυνατή η λήψη δεδομένων και πλησιέστερα της περιοχής έρευνας, στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας των (Καζάκης κ.ά., 2019), εδραιώθηκε νέος μετεωρολογικός σταθμός, στις 27 Δεκεμβρίου 2018. Από την έναρξη λειτουργίας του σταθμού Ζωοδόχου Πηγής συλλέγονται δεδομένα με μεγαλύτερη βαρύτητα, καθώς είναι ο εγγύτερος σταθμός στην περιοχή έρευνας και εξασφαλίζεται άμεση ανταπόκριση για τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

Ας σημειωθεί ότι η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη φυσική βλάστηση, αλλά και τις καλλιέργειες οι οποίες είναι απαραίτητες για την επιβίωση του ανθρώπου. Πέραν αυτών, οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν ακόμη τόσο το είδος και την έκταση του εδάφους, όσο και τη γενικότερη διαμόρφωση της γεωμορφολογίας μιας περιοχής (Βουβαλίδης, 2011).

Σύμφωνα με τα δεδομένα από τον σταθμό Ζωοδόχου Πηγής, για το διάστημα λειτουργίας Δεκέμβριος 2018- Δεκέμβριος 2019, οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας, σημειώθηκαν τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο 2019 και είναι αντίστοιχα -12.9°C και -8.2°C . Πρόκειται για αρκετά χαμηλές τιμές, οι οποίες υποστηρίζουν τη χιονόστρωση κατά το χειμερινό διάστημα. Θερμότερος μήνας στο διάστημα καταγραφής ήταν ο Αύγουστος με 29.8°C , όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.6).



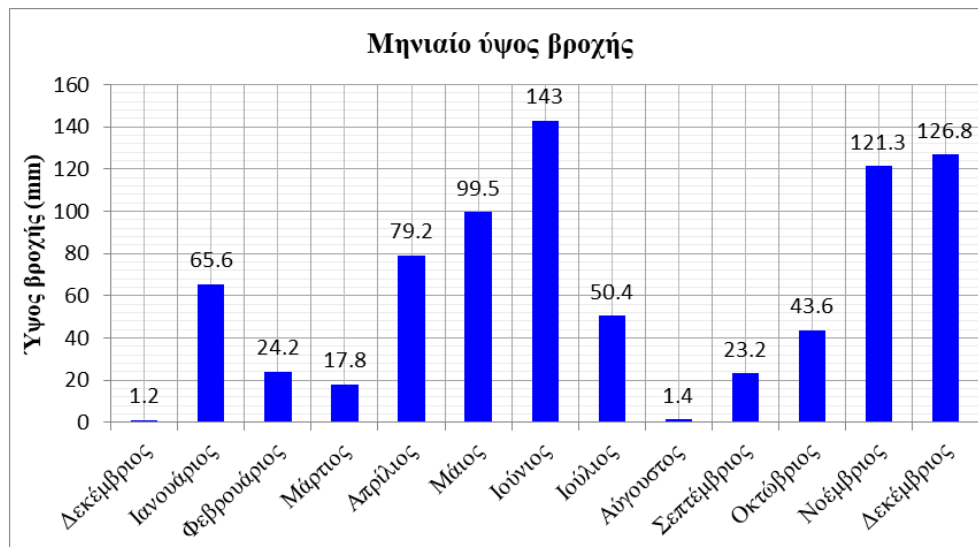
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα μεταβολής της μηνιαίας θερμοκρασίας για τους μήνες Δεκέμβριο 2018 – Δεκέμβριο 2019.

Όσων αφορούν τον παράγοντα της βροχόπτωσης (Σχήμα 4.7), ο μήνας με τη μεγαλύτερη μηνιαία βροχόπτωση, ήταν ο Ιούνιος για το έτος 2019, με συνολικό ύψος βροχής τα 143 mm ύψους βροχής, δηλώνοντας με την τιμή αυτή το καλοκαιρινό μέγιστο βροχόπτωσης και ακολουθούν ο Δεκέμβριος με 126.8 mm και ο Νοέμβριος με 121.3 mm, για το έτος 2019. Αντιθέτως, ο πιο ξηρός μήνας (με την ελάχιστη αθροιστική βροχόπτωση), κατά την περίοδο παρακολούθησης (έτος 2019), ήταν ο Αύγουστος, με τιμή 1.4 mm ύψους βροχής (Καζάκης κ.ά., 2019).

Σημαντική συνεισφορά στον φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων με ποσότητες νερού, είναι το χιόνι. Αυτό κατακάθεται στην επιφάνεια του εδάφους και κατεισδύει κατακόρυφα, μέσω της ακόρεστης ζώνης. Από τον ίδιο μετεωρολογικό σταθμό καταγράφηκαν και τα επεισόδια χιονόπτωσης με τη μεγαλύτερη μηνιαία τιμή ύψους χιονιού 40.7 cm τον Ιανουάριο (Πίνακας 4.1).

Ένα ακόμα στοιχείο με μεγάλη σημασία είναι η έκταση του υδροφορέα που καλύφθηκε από τη χιονόστρωση, καθώς και η πυκνότητα χιονιού. Όλα τα ανωτέρω είναι δεδομένα από τα οποία εξάγεται και υπολογίζεται η αντίστοιχη, ισοδύναμη

ποσότητα ύδατος, που θα εισέλθει στον υπόγειο υδροφορέα και είναι απαραίτητη για τη σύνταξη του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής.



Σχήμα 4.7 Ραβδόγραμμα μεταβολής του μηνιαίου ύψους βροχής για τους μήνες Δεκέμβριο 2018– Δεκέμβριο 2019.

Η σύνταξη του υδρολογικού ισοζυγίου (hydrologic balance) είναι αναπόσπαστη διαδικασία, σε επίπεδο λεκάνη απορροής, τόσο για το σχεδιασμό υδραυλικών έργων, όσο και για την μετέπειτα ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων (Βουδούρης, 2013).

Πίνακας 4.2 Πίνακας με τις μηνιαίες τιμές ύψους χιονιού για τους μήνες Δεκέμβριο 2018- Δεκέμβριο 2019.

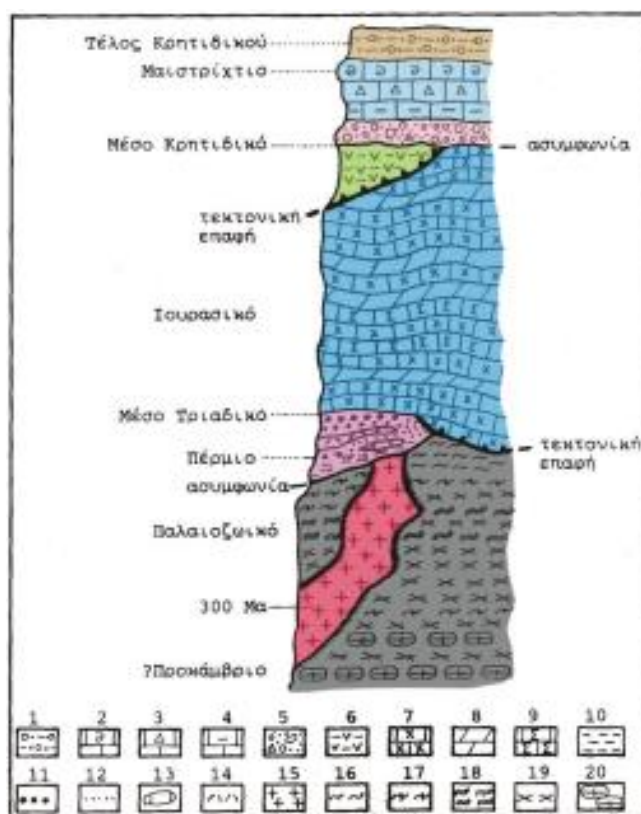
Μήνες	Χιονόπτωση (cm)	
	Επεισόδια	Υψος χιονιού
Δεκέμβριος	-	-
Ιανουάριος	4	40,7
Φεβρουάριος	3	25,2
Μάρτιος	1	8,9
Απρίλιος	-	-
Μάιος	-	-
Ιούνιος	-	-
Ιούλιος	-	-
Αύγουστος	-	-
Σεπτέμβριος	-	-
Οκτώβριος	-	-
Νοέμβριος	-	-
Δεκέμβριος	2	19
Σύνολο	11	93,8

4.1.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες, συγκεκριμένα στην Πελαγονική ζώνη, μία ζώνη που την χαρακτηρίζεται η καλυμματική τεκτονική.

Στην περιοχή έρευνας, από την τυπική λιθοστρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής (**Σχήμα 4.8**), εμφανίζονται μόνο το γεωλογικό υπόβαθρό της, που αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, όπως αμφιβολίτες, γνευσίους, οφθαλμογνευσίους, αλλά και το Μεσοζωϊκό κάλυμμα ανθρακικών σχηματισμών, το οποίο υπέρκειται του μεταμορφωμένου προαλπικού υποβάθρου (Μουντράκης, 1985).

Η ανθρακική ιζηματογένεση που έλαβε χώρα κατά το Τριαδικό-Ιουρασικό ήταν νηριτική, υποδηλώνοντας περιβάλλον ρηχής θάλασσας και έχει δημιουργήσει στα εκατέρωθεν περιθώρια της Πελαγονικής ένα δυτικό και ένα ανατολικό ανθρακικό κάλυμμα.



Σχήμα 4.8 Συνοπτική λιθοστρωματογραφική-τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ζώνης. (1-5): Επικλυσισγενή ιζήματα Μέσου- Άνω Κρητιδικού. 1: Φλύσχης Άνω Μαιστριχτίου- Κάτω Παλαιοκαίνου. 2: ασβεστόλιθος Μαιστριχτίου, 3: μικρο-λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, 4: μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, 5: κροκαλολατυποπαγή της

βάσης, **6:** οφειόλιθοι και συνοδά πελαγικά ιζήματα, **(7-9):** πετρώματα των δύο ανθρακικών καλυμμάτων Τριαδικού- Ιουρασικού, **7:** κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα, **8:** δολομίτες, **9:** σιπολίτες, **(10-14):** πετρώματα της μετακλαστικής σειράς Περμίου- Κάτω Τριαδικού, **10:** μετά- πελίτες, φυλλίτες, **11:** χαλαζιακά μετά- κροκαλοπαγή, **12:** μετά-ψαμμίτες, μετά-αρκόζες, **13:** φακοί ασβεστόλιθων, **14:** μετά- ρυόλιθοι, μετά-τόφοι, **15:** γενετισμένοι γρανίτες Άνω Λιθανθρακοφόρου, **(16-20):** πετρώματα του κρυσταλλοσχιτώδους υποβάθρου Παλαιοζωικής ή και προ Κάμβριας ηλικίας, **16:** σχιστόλιθοι (χλωριτικοί, μαρμαρυγικοί, αμφιβολιτικοί, επιδοιτικοί), **17:** διμαρμαρυγικοί - γρανατούχοι σχιστόλιθοι, **18:** αμφιβολίτες, **19:** γενέσιοι, **20:** οφθαλμογενέσιοι (Μουντράκης, 1985).

Το ανθρακικό κάλυμμα, που συναντάται στη Ζωοδόχο Πηγή αποτελείται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους (**Σχήμα 4.9**) και εντός αυτών αναπτύσσεται το υπόγειο υδατικό σύστημα (ΥΥΣ). Αυτοί εμφανίζονται παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, τοπικά μεσοστρωματώδεις, λευκότεφροι έως τεφροί, τοπικά δολομιτωμένοι, έντονα τεκτονισμένοι και καρστικοποιημένοι παρουσιάζοντας επιφανειακά γλυφές (Καζάκης κ.ά., 2019).

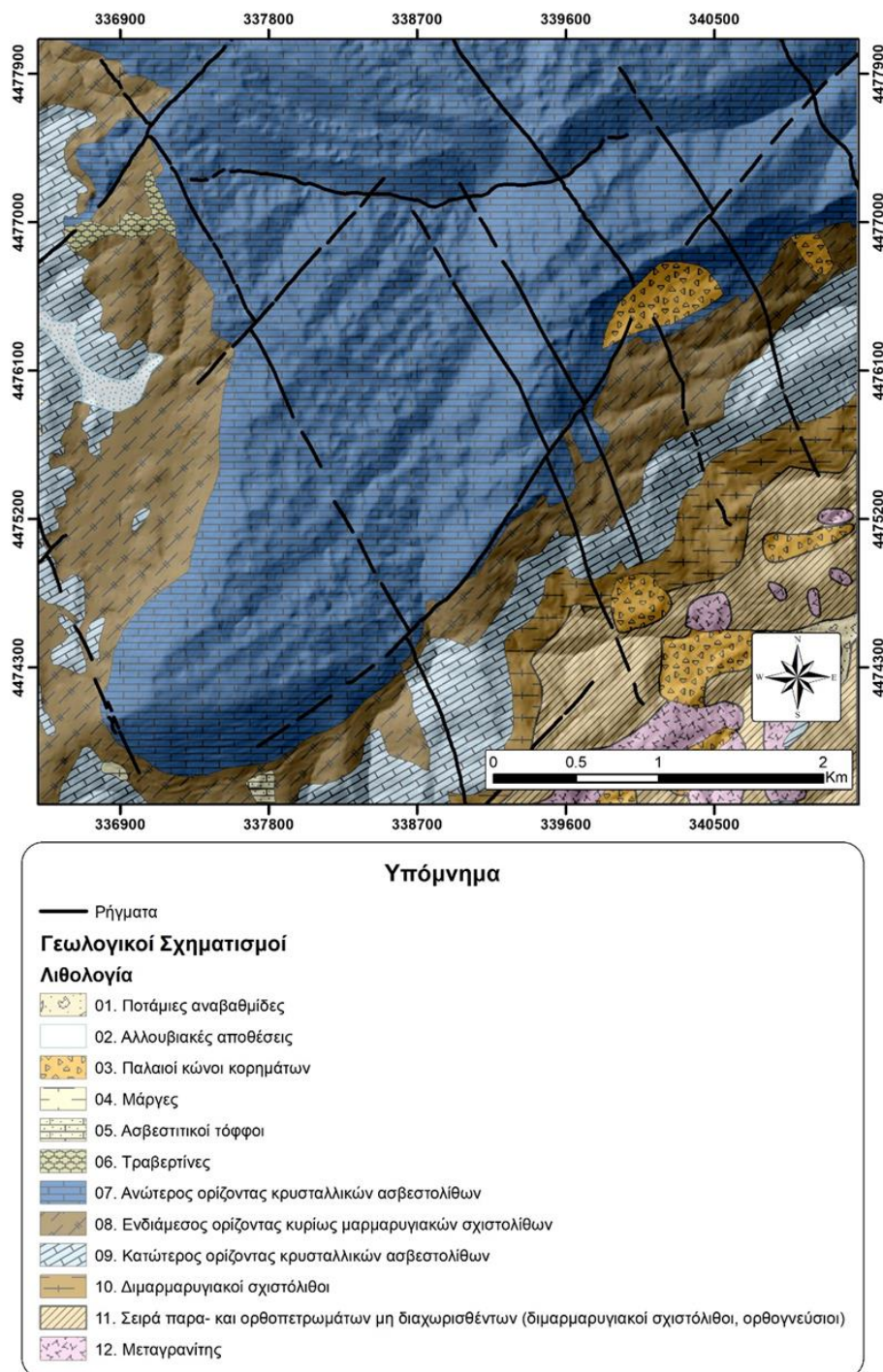
Απ' το γεωλογικό χάρτη (**Σχήμα 4.9**) παρατηρείται και ένας ακόμα ορίζοντας του μεσοζωϊκού καλύμματος, που απαρτίζεται από μαρμαρυγικούς σχιστολίθους, ενώ ο κατώτερος ορίζοντας αποτελείται από συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, που επικάθονται επικλυσιογενώς πάνω στο προαλπικό υπόβαθρο. Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι συνυπάρχουν με ενστρώσεις μαρμαρυγικών σχιστολίθων. Σε όλους τους ορίζοντες παρατηρείται μεταμόρφωση μέσης πρασινοσχιστολιθικής φάσης.

Το κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο είναι σύνθετο και περιλαμβάνει ενότητες μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Καζάκης κ.ά., 2019). Στη Ζωοδόχο Πηγή από αυτές τις ενότητες του ανομοιογενούς υποβάθρου, παρουσιάζονται μόνο οι διμαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι με παρεμβολές χαλαζιτών και διαφόρων τύπων σχιστολίθων (διμαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, ορθογενέσιοι, γλαυκοφανιτικοί- χλωριτικοί σχιστόλιθοι), αλλά και μια σειρά παρά- και ορθο-πετρωμάτων.

Η γεωλογική χαρτογράφηση, με όλες τις συνοδές εργασίες, καθορίζει και αναδεικνύει την καταλληλότητα ή μη της περιοχής έρευνας, για εκμετάλλευση υδρογεωλογικής φύσεως.

Η ύπαρξη ανθρακικών πετρωμάτων σε μία έκταση, που εδώ εκπροσωπείται από τους ορίζοντες των κρυσταλλικών ασβεστολίθων, προϋδεάζει για ύπαρξη καρστικού

υδροφορέα (karst aquifer). Το καρστ είναι αποτέλεσμα των διαλυτικών διεργασιών που υφίστανται τα ανθρακικά πετρώματα (Βουδούρης, 2013), από νερό εμπλουτισμένο με CO_2 , λόγω του όξινου χαρακτήρα του.



Σχήμα 4.9 Γεωλογικός χάρτης Ζωοδόχου Πηγής.

Οι καρστικοί υδροφορείς εμπλουτίζονται σχετικά πιο εύκολα από τους πορώδεις υδροφορείς, κυρίως από τα κατακρημνίσματα, που κατεισδύουν εμμέσως από σημεία θραύσης του επικάρστ (ρωγμές, διακλάσεις κλπ.), εναλλακτικά με άμεσο

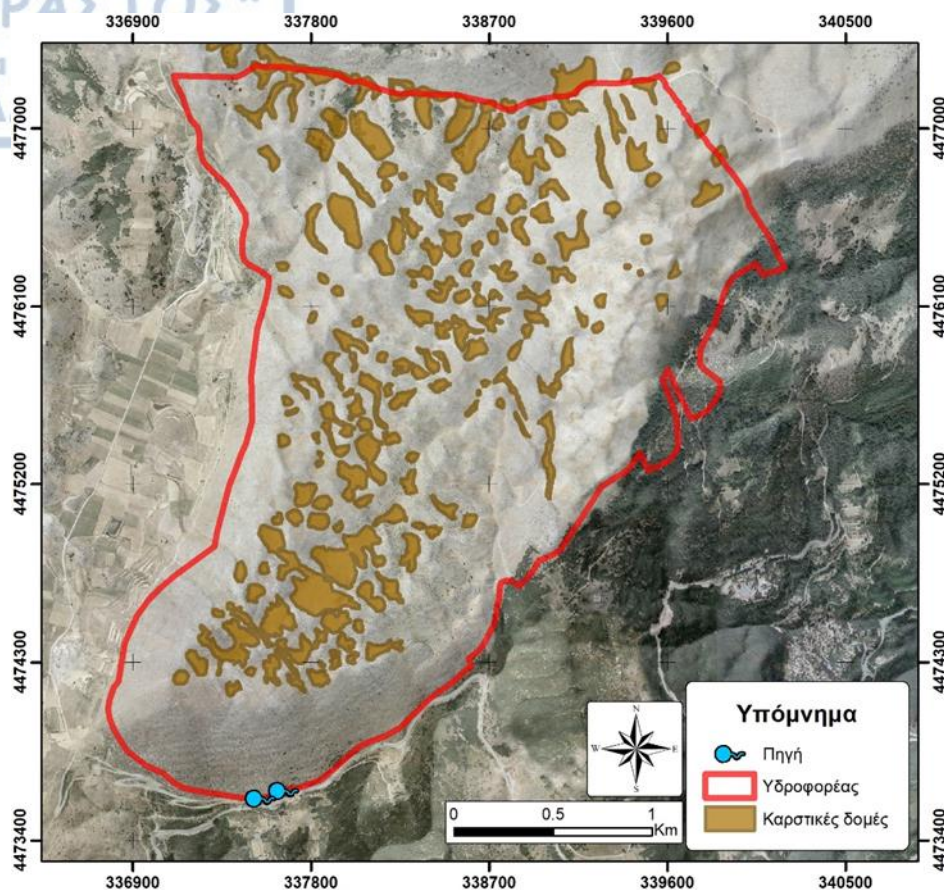
εμπλουτισμό στις καρστικές δομές (δολίνες και καταβόθρες) (**Σχήμα 4.10**). Εντός αυτών των δομών σχηματίζονται αξιόλογες υδροφορίες, όπως συμβαίνει και στην περιοχή μελέτης, βοηθώντας στην κάλυψη των τοπικών υδατικών αναγκών. Δευτερευόντως οι καρστικοί υδροφορείς μπορεί να τροφοδοτούνται από διήθηση επιφανειακών νερών ποταμών και λιμνών.

Καρστικές δομές (δολίνες) και επιφανειακά έγκοιλα βρίσκονται διάσπαρτα στο χώρο, πληρωμένα με αργιλικό υλικό και παράλληλα εντοπίζονται γλυφές στους ασβεστολίθους, ενώ δεν αποκλείεται και η ύπαρξη σπηλαίων στη γύρω περιοχή.

Είναι γεγονός, πως όσο αυξάνει το βάθος, οι διακλάσεις και η στρώση τείνουν να γίνουν ολοένα και πιο κλειστές (Goldscheider & Drew, 2007) και σχηματισμοί, οι οποίοι στην επιφάνεια φαίνονται πολύ ασθενείς, σε βαθύτερους ορίζοντες είναι ποιοτικά καλύτεροι, αφού το δίκτυο ρωγμών δεν είναι τόσο πυκνό όσο επιφανειακά. Όμως, η παρουσία ανοιχτών διαρρήξεων είναι πιθανόν να υπάρξει και σε μεγάλα βάθη. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες ευνοούν την ανάπτυξη των υπόγειων καρστικών συστημάτων σε βάθος (Van Der Pluijm & Marshak, 2003) και προσδιορίζουν την ανισοτροπία και την υψηλή ετερογένεια των καρστικών συστημάτων (Goldscheider & Drew, 2007).

Η έντονη καρστικοποίηση των ανώτερων κρυσταλλικών ασβεστολίθων υδρογεωλογικά συμφέρει, καθώς καθιστά στους σχηματισμούς αυτούς εκμεταλλεύσιμους. Η εκμετάλλευση στηρίζεται στην ποιότητα των γειτονικών σχηματισμών και στην ύπαρξη λεπτόκοκκου αργιλικού υλικού, που λειτουργεί ως εμπόδιο στη διαρροή νερού από τον υδροφορέα, περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο, τις διαφυγές ποσοτήτων νερού.

Στο **Σχήμα 4.10** φαίνεται και το σημείο εκφόρτισης του καρστικού υδροφορέα, μέσω συστήματος των πηγών της Ζωοδόχου Πηγής, με τις πηγές να βρίσκονται σε υψόμετρο 1300 m έως και 1302 m.



Σχήμα 4.10 Καρστικές δομές στη Ζωοδόχο Πηγή.

Ως πηγή χαρακτηρίζεται μία συγκεντρωμένη εκροή υπόγειου νερού, που εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, ως ένα ρεύμα νερού που ρέει ελεύθερα. Κάθε πηγή έχει μια ορισμένη περιοχή τροφοδοσίας, από την οποία τα υπόγεια νερά καταλήγουν στην πηγή αυτή (Βουδούρης, 2013).

Κατηγοριοποίηση των πηγών μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια και σύμφωνα με τους Springer & Stevens (2009), ανάλογα με:

- Τη **λιθολογία** του πετρώματος του υδροφορέα που φιλοξενεί την πηγή απ' όπου και προκύπτουν διάφορα είδη πηγών π.χ. καρστικές, οφιολιθικές, πηγές σε φλύσχη κλπ.
- Τη **θερμοκρασία** του νερού που αναβλύζει απ' όπου και προκύπτουν οι θερμές και οι ψυχρές πηγές.
- Την **περιοδικότητα της παροχής** πηγής, όπου μπορεί να έχουμε περιοδικές ή μη περιοδικές πηγές.
- Τη **θέση σημείου ανάβλυσης**, απ' όπου προκύπτουν οι παράκτιες, υποθαλάσσιες και ενδοχώριες πηγές.

•Την **παροχή της πηγής (Q)**, δηλαδή τον όγκο του νερού V που εκρέει σε χρόνο t , προς το χρόνο t .

Οι πηγές στη Ζωοδόχο Πηγή από λιθολογικής άποψης είναι καρστικές, καθώς εκφορτίζουν το καρστικό σύστημα και όσων αφορούν το σημείο ανάβλυσης είναι ενδοχώριες. Η παροχή των καρστικών πηγών συσχετίζεται άμεσα με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

4.1.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Τα ρήγματα αποτελούν στοιχεία μεγάλης βαρύτητας και υψίστης σημασίας για την καρστική υδρογεωλογία. Ρήγματα μεγάλης μετατόπισης είναι ικανά να καθορίσουν τα εξωτερικά όρια και την εσωτερική γεωμετρία του καρστικού συστήματος (Audra, 1994, Häuselmann et al, 1999, Toussaint, 1971).

Στην τεκτονική γεωλογία, τα ρήγματα, περιγράφονται ως διαρρήξεις στα πετρώματα του φλοιού της Γης και χαρακτηρίζονται από κινηματική (Davis et al., 1996). Κάθε τρισδιάστατη τεκτονική δομή, επιτελεί και υδρολογική λειτουργία, που εξαρτάται από: τον προσανατολισμό στον χώρο και την έκταση των επιπέδων διαχωρισμού, την πυκνότητά τους, το βαθμό της διασύνδεσης μεταξύ γειτονικών διαρρήξεων, το πλάτος του ανοίγματος, την τραχύτητα και την παρουσία υλικού πληρώσεως (Witthüser, 2002).

Η Πελαγονική ζώνη έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την καλυμματική τεκτονική. Μολονότι στην καλυμματική τεκτονική κυριαρχούν συνήθως οι ανάστροφες τεκτονικές δομές, τα ρήγματα που αφορούν άμεσα και συγκεκριμένα τη Ζωοδόχο Πηγή είναι κανονικά και εννέα (9) στον αριθμό. Ιδιαίτερης προσοχής χρήζουν τρία (3) πιθανά ρήγματα, δύο (2) εκ των οποίων εντοπίστηκαν ύστερα από υπαίθρια παρατήρηση, για το ερευνητικό πρόγραμμα των Καζάκης κ.ά. (2019) και ένα (1) ήδη καταγεγραμμένο, πιθανό ρήγμα. Οι διευθύνσεις των παραπάνω πιθανών ρηγμάτων είναι περίπου Α-Δ στο βόρειο κομμάτι, ενώ τα πιθανά ρήγματα που έχουν καταγραφεί, με διεύθυνση περίπου ΒΑ-ΝΔ, δείχνουν να οριοθετούν την περιοχή έρευνας (**Σχήμα 4.9**).

Σύμφωνα με τον Ambraseys (1978) (Παυλίδης & Μουντράκης, 1994), πιθανά ενεργά ρήγματα χαρακτηρίζονται εκείνα, που συνδέονται με μικρό βαθμό συσχέτισης με μεγάλους σεισμούς ή συνηθέστερα μόνο με μικροσεισμούς, δεν υπάρχουν ιστορικές πληροφορίες για σεισμούς και εδαφικές μετακινήσεις, επηρεάζουν νέα ιζήματα, αλλά δεν φαίνεται να έχουν επαναδραστηριοποιηθεί στο πολύ πρόσφατο

παρελθόν. Επίσης είναι εκείνα τα ρήγματα, όπου τα νέα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά με τα οποία συνδέονται έχουν διαβρωθεί ή δε διακρίνονται ευκρινώς.

Ο ανώτερος ορίζοντας του ανθρακικού καλύμματος με τους κρυσταλλικούς ασβεστολίθους έχει μεγαλύτερη εμφάνιση. Κύριο χαρακτηριστικό της δομής των κρυσταλλικών ασβεστολίθων αποτελεί η στρώση (bedding). Η παρουσία τεκτονικού και στρωματογραφικού διαχωρισμού των επιφανειών είναι καταλυτική για τη διευκόλυνση της υπόγειας ροής και την ανάπτυξη του καρστ στα ανθρακικά πετρώματα.

Όσο για τα μεταμορφωμένα πετρώματα, δηλαδή τους μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους του μεσαίου ορίζοντα και το υπόβαθρο, βασικό χαρακτηριστικό τους, εκ φύσεως, είναι η σχιστότητα.

Άλλες δομές των ανθρακικών κυρίως σχηματισμών, που εντοπίζονται στην περιοχή έρευνας είναι οι διακλάσεις. Θεωρούνται ως διακλάσεις, οι ρηξιγενείς επιφάνειες, εκατέρωθεν των οποίων παρατηρούνται πολύ μικρής κλίμακας μετατοπίσεις (Παυλίδης & Μουντράκης, 1994). Στην περιοχή έρευνας, διακρίνονται 2 συστήματα διακλάσεων με επικρατέστερη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ (Καζάκης κ.ά., 2019).

Η ταξινόμηση-αξιολόγηση της βραχομάζας επιτεύχθηκε με το εργαλείο GSI- Geological Strength Index, ελληνιστί Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς, εκφράζοντας τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας βραχομάζας (Marinos & Hoek 2000). Το GSI λαμβάνει υπ' όψιν του 2 παραμέτρους – χαρακτηριστικά της βραχομάζας: α) τη δομή της βραχομάζας και β) την κατάσταση των ασυνεχειών αυτής.

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί σε τμήματα της περιοχής, είναι ισχυρά καρστικοποιημένοι, με ένα εσωτερικό αποδιοργανωμένο-κατακερματισμένο και γεμάτο αργιλικό υλικό. Το υλικό πλήρωσης έχει προέλθει από τον μανδύα αποσάρθρωσης. Ο μανδύας αυτός δημιουργείται από προϊόντα αποσάρθρωσης, όταν αυτά παραμένουν στη θέση τους και δεν μετακινούνται προς τα κατάντη, καλύπτοντας έτσι το υγιές πέτρωμα, αν το πάχος μανδύα είναι αρκετό.

Η ποιοτική κατάσταση που βρίσκονται οι κρυσταλλικοί ασβεστολίθοι του ανώτερου ορίζοντα είναι αυτή που προαναφέρθηκε κι έτσι τιμολογούνται χαμηλά στον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI). Αντιθέτως, ο ενδιάμεσος και ο κατώτερος ορίζοντας, δηλαδή οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και οι συμπαγείς κρυσταλλικοί

ασβεστόλιθοι, λόγω της απουσίας ή της περιορισμένης εμφάνισης των καρστικών δομών και φαινομένων, παίρνουν ψηλές τιμές στο Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI).

4.1.5 ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

Χημικά, η κατάσταση του υπόγειου νερού εξαρτάται κυρίως από τους σχηματισμούς εντός των οποίων κυκλοφορεί, το χρονικό διάστημα που παραμένει εντός του υδροφορέα, καθώς και τις ανθρώπινες δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στην περιοχή. Προσδιορίζοντας τους παράγοντες αυτούς και μελετώντας τους εκτενέστερα, μιας και επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των περιεχομένων υδάτων, μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα. Αυτά σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, την προέλευση του νερού και την καταλληλότητα του, ως προς την κατανάλωση και τη χρήση του.

Στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου υδατικού υποσυστήματος ΝΑ Βερμίου (0900110), εντοπίζεται ρύπανση, με σημειακές πηγές ρύπανσης τα λατομεία της περιοχής, τις κτηνοτροφικές μονάδες και μια βιομηχανική μονάδα. Ωστόσο υπάρχουν και διάχυτες πηγές ρύπανσης, λόγω γεωργικής δραστηριότητας.

Συγκεκριμένα όμως στη Ζωοδόχο Πηγή, απ' την πρόσφατη έρευνα των Καζάκης κ.ά. (2019), που είχε σκοπό και την αξιολόγηση της υδροχημικής κατάστασης του υδροφορέα, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες στην κύρια πηγή εκφόρτισης του υδροφορέα, τόσο σε υγρή (Σεπτέμβριος του 2018), όσο και σε ξηρή περίοδο (Ιούνιος 2019). Τα δείγματα υπογείου νερού, από χημικές αναλύσεις και με την αρωγή των υδροχημικών διαγραμμάτων (Piper, Durov, Schoeller, Wilcox, Richards), χαρακτηρίζονται ως ασβεστούχου οξυανθρακικού τύπου (Ca-HCO_3) και έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε ιόντα Χλωρίου.

Παράλληλα, η συγκέντρωση των Νιτρικών ιόντων (NO_3^-) είναι κάτω απ' το όριο ανίχνευσης, θετικό στοιχείο για την ποιότητα του νερού, αφού υποδηλώνει την ελάχιστη παρουσία βιολογικών ρύπων, τη μη εμφάνιση νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης ή τη μη ανάμειξη με νερά άρδευσης από λιπαινόμενες γαίες.

Σημαντικότερη πτυχή της συνεισφοράς της χημείας είναι η δυνατότητα εκτίμησης του υψομέτρου τροφοδοσίας του υδροφορέα, με την βοήθεια των ισοτόπων. Τα σταθερά ισότοπα και όχι μόνο, χρησιμοποιούνται ευρέως στην ισοτοπική υδρολογία. Η ισοτοπική σύνθεση των σταθερών ισοτόπων $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ στα υπόγεια νερά επηρεάζεται βασικά από το υψόμετρο τροφοδοσίας, την αλληλεπίδραση νερού-πετρώματος και την ανάμειξη διαφορετικών ρευστών (Ντότσικα κ.ά., 2008).

Κατά την ίδια περίοδο, πραγματοποιήθηκαν ισοτοπικές αναλύσεις στο υπόγειο νερό των γεωτρήσεων (εντός καρστικών σχηματισμών) της γύρω περιοχής και στις πηγές της Ζωοδόχου Πηγής. Οι αναλύσεις ανέδειξαν την μετεωρική προέλευση του υπόγειου νερού, τονίζοντας έτσι την άμεση τροφοδοσία του υδροφορέα από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα κι ακόμη πως δεν είχε υποστεί σημαντική δευτερογενή εξάτμιση.

Η χρήση του Τριτίου (^3H ή T), ενός ισοτόπου του Υδρογόνου, επικεντρώνεται στον προσδιορισμό του χρόνου παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος. Οι αναλύσεις Τριτίου προσέδωσαν μικρή ηλικία στο νερό του καρστικού υδροφορέα, γεγονός που αποδεικνύει τη μεγάλη ταχύτητα ροής εντός του υδροφορέα, αλλά και τη συνεχή και άμεση τροφοδοσία και ανανέωση από κατακρημνίσματα. Γενικά, τα ισότοπα του υδρογόνου (^1H , ^2H ή D , ^3H ή T), μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις φάσεις του κύκλου του νερού, καθώς αποτελούν συστατικά του μορίου του νερού και άρα συμπεριφέρονται ως ιχνηθέτες (Βουδούρης, 2009).

Ως προς το φλέγον θέμα της κατανάλωσης, το υπόγειο νερό είναι ποιοτικά καλό έως εξαιρετικό, πόσιμο, αλκαλικό, με pH 8.1 και ποιοτικά μέτριο για άρδευση. Εμφανίζει χαμηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ($305 \mu\text{S}/\text{cm}$). Το ενδεικτικό επίπεδο αγωγιμότητας στο πόσιμο νερό είναι $400 \mu\text{S}/\text{cm}$. Αυξημένη αγωγιμότητα, υποδηλώνει αυξημένες ποσότητες αλάτων, που ανάλογα με τη φύση τους και τη συγκέντρωσή τους, μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα υγείας (Βουδούρης, 2009).

Ως προς τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας, δεδομένου ότι ο υδροφορέας της Ζωοδόχου Πηγής, τροφοδοτεί το υδραγωγείο του Δήμου Κοζάνης με νερό, αποτελεί στοιχείο υψίστης σημασίας το γεγονός, ότι τα βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή, όπως Βόριο, Υδράργυρος, Μολυβδαίνιο, Σίδηρος, Μαγγάνιο κ.ά., που είναι τοξικά για τον άνθρωπο, είναι κάτω από τα όρια ανιχνευσιμότητας.

5 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος τρωτότητα, του υπόγειου νερού, εισήχθη από τον MARGAT, το 1968. Με τον όρο Τρωτότητα ή αλλιώς ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα (Vulnerability) των υπόγειων νερών ή υδροφορέων εννοούμε την ευαισθησία ή την επιδεκτικότητα έναντι των εξωτερικών ρύπων. Εξωτερικός ρύπος ή ρυπαντής ή ρυπαντική ουσία θεωρείται κάθε διαλυτή ή αδιάλυτη στο νερό ουσία, η οποία όταν εισάγεται στο περιβάλλον από ανθρώπινες δραστηριότητες, προκαλεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Βουδούρης, 2009). Τέτοιοι υποψήφιοι ρυπαντές μπορεί να είναι βαρέα μέταλλα, τοξικά στοιχεία (επικίνδυνα και για τον άνθρωπο), ανόργανες και οργανικές ενώσεις, ραδιενεργές ουσίες, αλλά και παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Ειδικότερα, η τρωτότητα υποδηλώνει το πόσο εύκολα μπορεί ένας ρύπος, που έχει εισέλθει στον υπόγειο υδροφορέα, να υποβαθμίσει επαγωγικά την ποιότητα του υδάτινου περιεχομένου του. Ένας άλλος όρος είναι η ευαισθησία του υδροφορέα. Η συγκεκριμένη έννοια έγκειται στην ευκολία με την οποία ένας ρύπος μετακινείται από την επιφάνεια στον υδροφορέα, σε συνάρτηση με την κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη, καθώς και τις γεωλογικές συνθήκες. Θα πρέπει όμως, να αποφεύγεται η σύγχυση των δύο αυτών όρων.

Η είσοδος ρυπαντή στον υπόγειο υδροφορέα επιτυγχάνεται είτε με απ' ευθείας κατείσδυση, είτε με διήθηση ρύπων που έχουν απορριφθεί σε επιφανειακά ύδατα και ύστερα ξεκινάει η ρυπαντική πορεία τους με τη βοήθεια της υδραυλικής κλίσης (i) συν τη συνεισφορά της υδροδυναμικής διασποράς (hydrodynamic dispersion). Η υδροδυναμική διασπορά είναι διεργασία που πραγματοποιείται στην ακόρεστη ζώνη (Unsaturated Zone). Η ακόρεστη ζώνη είναι η καίρια ζώνη για την εξασθένηση του ρυπαντικού φορτίου. Λειτουργεί ως φίλτρο των κατερχόμενων, προς τον υδροφορέα, ρύπων. Οι μηχανισμοί «φιλτραρίσματος» είναι οι κάτωθι: προσρόφηση, διήθηση, αραίωση, βιολογικές, χημικές και φωτοχημικές αντιδράσεις.

Η τρωτότητα ενός υδροφορέα εξαρτάται και διαμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά αυτού, την απόστασή του από την πηγή ρύπανσης, η οποία μπορεί να είναι σημειακή (π.χ. βιομηχανικά λύματα) ή διάχυτη (απορροή και κυκλοφορία φυτοφαρμάκων και νιτρικών από γεωργικές εκτάσεις, η λεγόμενη και νιτρορύπανση)

ή γραμμική (π.χ. δρόμος). Ακόμη, επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του ρύπου και από άλλους παράγοντες, οι οποίοι δύνανται να τονώσουν το ρυπαντικό φορτίο του ρυπαντή.

Κατά τον Βουδούρη, η τρωτότητα διακρίνεται σε ειδική (specific vulnerability) και γενική τρωτότητα ή ιδιοτρωτότητα (intrinsic vulnerability) (Βουδούρης, 2009). Η ειδική αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών, ενώ η γενική εναπόκειται αποκλειστικά στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους και δεν εξειδικεύεται σε κάποιο ρυπαντή.

5.1.1 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

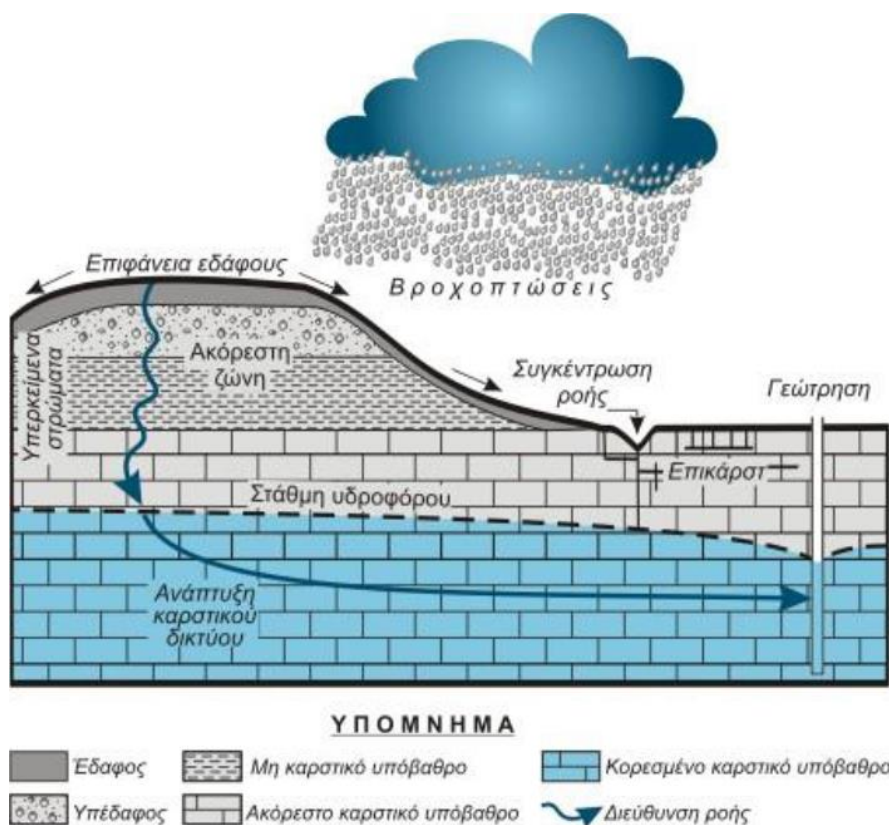
Η τρωτότητα των καρστικών υδροφόρων συστημάτων εξαρτάται από την παραμονή του νερού στα τμήματα του υδροφορέα (Doerfliger et al., 1999). Τα τμήματα αυτά σύμφωνα με τους Doerfliger et al., είναι:

1) Το κορεσμένο καρστ ή ενδοκάρστ, που περιλαμβάνει το υπόγειο καρστ. Στο παρόν τμήμα του υδροφορέα, η ταχύτητα ροής είναι μεγάλη μέσα στους καρστικούς αγωγούς. Όσο καλύτερη είναι η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου καρστικών αγωγών, τόσο υψηλότερη θα είναι και η τρωτότητα.

2) Το επικάρστ ή αλλιώς υποδερμική ζώνη, αν υπάρχει, είναι τμήμα της ακόρεστης ζώνης του υδροφορέα, το πιο κοντινό στην επιφάνεια. Συνεισφέρει στην κατείσδυση του νερού από την επιφάνεια στον υπόγειο υδροφορέα και επηρεάζει την προστατευτική λειτουργία που επιτελεί η ακόρεστη ζώνη. Όσο πιο άμεση είναι η σύνδεση του επικάρστ με το δίκτυο καρστικών αγωγών, τόσο ψηλότερη αναδεικνύεται η τρωτότητα του υδροφορέα.

3) Το προστατευτικό κάλυμμα, εκπροσωπεί τα ιζήματα που υπερκαλύπτουν τους καρστικούς σχηματισμούς. Τέτοια ιζήματα μπορούν να είναι: τεταρτογενείς και άλλες μη καρστικές αποθέσεις και το έδαφος. Ο χρόνος παραμονής του νερού στο προστατευτικό κάλυμμα, εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του καλύμματος. Αυτές οι δύο παράμετροι καθορίζουν την τρωτότητα του καρστικού υδροφορέα (Doerfliger et al., 1999). Το έδαφος και άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί, έχουν αυξημένη ικανότητα εξασθένησης (attenuation capacity), που είναι συνάρτηση χαρακτηριστικών όπως η υφή, η δομή, η παρουσία οργανικής ύλης και αργιλικών ορυκτών, η υδραυλική αγωγιμότητα, ο βαθμός κορεσμού κλπ. Όσο αυξάνει το πάχος του προστατευτικού καλύμματος, τόσο ελαττώνεται η τρωτότητα.

Στη διάρκεια της βασικής ροής η τρωτότητα είναι σχετικά χαμηλή, αφού τα νερά παραμένουν για πολύ χρόνο στον υδροφόρα. Όμως, κατά την υγρή περίοδο το νερό της βροχόπτωσης κατεισδύει στους αγωγούς του επικάρστ και έπειτα κινείται στο δίκτυο των καρστικών αγωγών. Το νερό φτάνει γρήγορα στις πηγές και οι διαδικασίες αυτοκαθαρισμού δεν είναι αποτελεσματικές με αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλής τρωτότητας (Καζάκης κ.ά., 2019). Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζεται το εννοιολογικό μοντέλο λειτουργίας ενός καρστικού υδροφόρα.



Σχήμα 5.1 Εννοιολογικό μοντέλο λειτουργίας ενός καρστικού υδροφόρου συστήματος (Cost Action 620, 2003 με τροποποιήσεις από Βουδούρης, 2009).

Μέθοδοι που έχουν προταθεί για την εκτίμηση της τρωτότητας στους καρστικούς υδροφορείς είναι: EPIC, REKS, RISKE. RISKE 2, PL, KARSTIC, COP και COP+K, η σλοβενική μέθοδος και η μέθοδος PaPRIKa. Από την εφαρμογή μιας εκ των παραπάνω μεθόδων μπορεί να εκτιμηθεί ο δείκτης τρωτότητας ενός καρστικού υδροφόρα (Karst Aquifer Vulnerability Index) (Voudouris & Kazakis, 2020).

5.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε: μεθόδους βαθμονόμησης (rating methods), που περιλαμβάνουν μεθόδους με δείκτες (index methods) και υβριδικές μεθόδους (hybrid methods), που συνδυάζουν μεθόδους δεικτών με άλλες στατιστικές μεθόδους (statistical methods). Άλλες μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας είναι οι στατιστικές μέθοδοι που προαναφέρθηκαν, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τις εξής διεργασίες: περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων επιλεγμένων ρύπων και ανάλυση συσχέτισης, σκοπός της οποίας είναι να ελέγξει αν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών. Τελευταία κατηγορία μεθόδων εκτίμησης τρωτότητας είναι οι μέθοδοι προσομοίωσης (simulating methods), στις οποίες διενεργείται αριθμητική επίλυση των εξισώσεων της κίνησης του υπόγειου νερού (Βουδούρης, 2009).

5.1.3 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Τεχνικές και μέθοδοι βαθμονόμησης (rating methods) της τρωτότητας, που εφαρμόζονται στις περιοχές ενδιαφέροντος, σύμφωνα με τον Βουδούρη, είναι: DRASTIC (Aller et al.1987), GOD (Foster, 1987), SEEPAGE (Moore & John, 1990), AVI (Van Stempvoort et al., 1992), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita & Regibus, 1995), DASTI (Ben Kabbour et al., 2004).

5.1.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ PaPRIKa

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τη Γαλλική Γεωλογική Εταιρεία (BRGM) με αρωγή και συνεργασία Πανεπιστημίων, προκειμένου να εκτιμάται η γενική τρωτότητα (ιδιοτρωτότητα ή intrinsic vulnerability), που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά καρστικών υδροφορέων. Η μέθοδος PaPRIKa βασίστηκε στις μεθόδους EPIC, RISKE. RISKE 2 και κάθε κεφαλαίο γράμμα αντιστοιχεί σε μία παράμετρο. Επομένως η μέθοδος PaPRIKa χρησιμοποιεί 4 παραμέτρους, εκ των οποίων καθεμία έχει διαφορετική βαρύτητα και δικές της υποπαραμέτρους (Dörfliger & Plagnes, 2009):

- 1) **Ικανότητα προστασίας (Protection, P)** με υποπαραγόντες αυτής:
 - Καταβυθιζόμενα υδατορεύματα, ως ζώνες τροφοδοσίας (Ca)
 - το εδαφικό κάλυμμα-στρώμα (εδαφικός τύπος και πάχος) (S)

- την ακόρεστη ζώνη (λιθολογία, πάχος, βαθμός ρωγμάτωσης) (Uz)
- το επικάρστ (E)

Η παράμετρος **P** επικεντρώνεται στην προστασία που προσφέρει στον υδροφορέα το περιβάλλον. Αναφέρεται σε ιδιότητες του υδροφορέα και σε κάποια σώματα, που καθυστερούν την κατείδδυση. Συνολικά εμπεριέχει όλα τα επιφανειακά και υποδερμικά στρώματα που μπορούν να καθυστερήσουν σημαντικά την κατείδδυση του νερού στον καρστικό υδροφορέα.

2) **Γεωλογικός ταμιευτήρας (Reservoir, R)**, ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν:

- ρήγματα
- καρστικές δομές

Η παράμετρος **R** περιγράφει τη λιθολογία και τη δομή της κορεσμένης ζώνης του καρστικού υδροφορέα βαθμονομώντας την, ανάλογα την πιθανότητα που έχει, να καρστικοποιηθεί, περισσότερο ή λιγότερο. Άλλα χαρακτηριστικά της ακόρεστης ζώνης, όπως οι τεκτονικές δομές-ρήγματα, βαθμονομούνται σύμφωνα με τη διεύθυνσή τους και συμπερασματικά τα ρήγματα που κατευθύνονται προς το σύστημα είναι λιγότερο προστατευτικά από άλλα (Chloé Ollivier et al., 2019).

3) **Κατείδδυση (Infiltration, I)**, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν:

- την κλίση, τη βλάστηση, το εδαφικό κάλυμμα και τα χαρακτηριστικά του καρστ

Το μεγάλο πάχος εδαφικού καλύμματος μειώνει την κατείδδυση, αντίθετα από κάποιες χαρακτηριστικές δομές του καρστ, όπως τα σπήλαια, οι δολίνες και οι καταβόθρες, οι οποίες επιτρέπουν την κατείδδυση και συνεργούν στη ρύπανση.

4) **Ανάπτυξη του Καρστ (Karstification, Ka)**, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν:

- Το βαθμό καρστικοποίησης
- την υδρογεωλογική συμπεριφορά του συστήματος
- την ανάπτυξη των καρστικών αγωγών

Το κριτήριο **Ka** εκπροσωπεί τον αντίκτυπο που έχει η καρστικοποίηση, στην υδρολογική συμπεριφορά του υδροφορέα. Οι καρστικές δομές που αναφέρθηκαν στο κριτήριο **I** και παρατηρούνται στην επιφάνεια (δολίνες και καταβόθρες), σχετίζονται με το καρστικό δίκτυο, καθώς είναι συνδεδεμένες υπεδαφικά με αυτό. Η ανάλυση του

ψηφιακού μοντέλου εδάφους καθιστά πιθανό τον προσδιορισμό των ενδοροϊκών περιοχών, όπως είναι οι καταβόθρες. Η επίδραση τέτοιων περιοχών στις επιφανειακές ροές είναι διαφορούμενη: απ' τη μία πλευρά επιτρέπουν την άμεση κατείσδυση, στην περίπτωση που είναι ανοιχτές δίοδοι για την κάθοδο του νερού και αφετέρου εμφανίζουν μία καθυστέρηση στην κατείσδυση ευνοώντας την εξάτμιση, στην περίπτωση οι καταβόθρες είναι πληρωμένες με αργιλικό υλικό (Chloé Ollivier et al., 2019).

Κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους, έχει συγκεκριμένο συντελεστή βαρύτητας, που φαίνεται στον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5.2 Βαρύτητα των παραμέτρων της μεθόδου PaPRIKa.

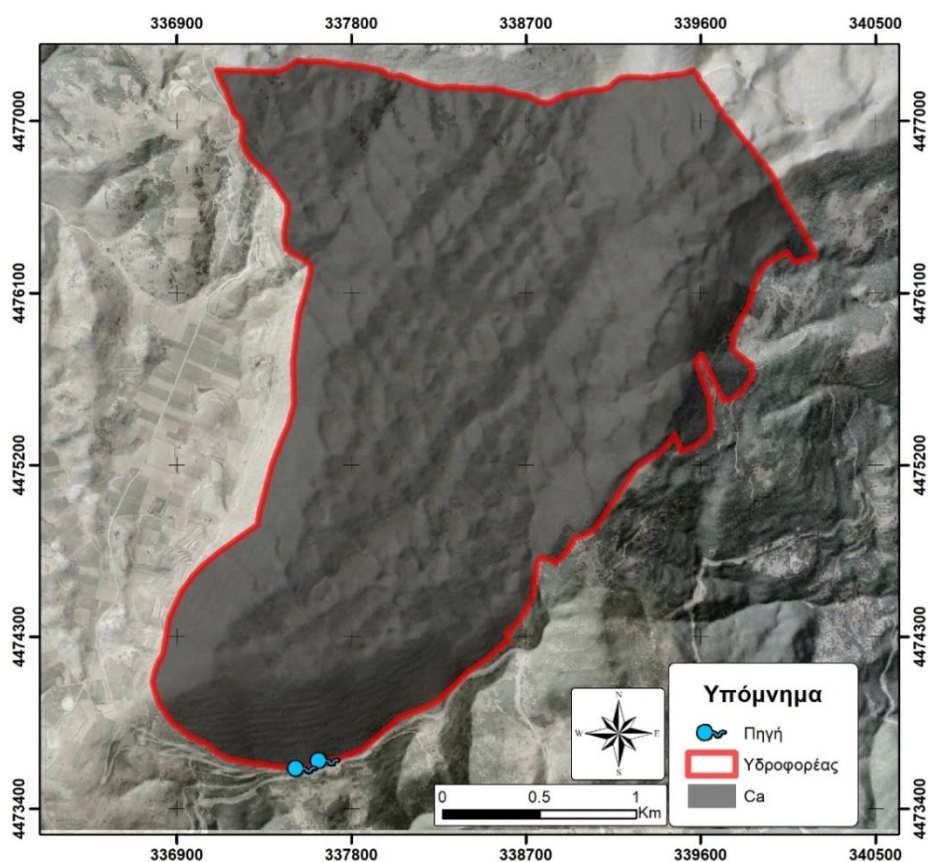
Παράμετρος	Βαρύτητα
Ικανότητα Προστασίας (P)	20%
Γεωλογικός ταμιευτήρας (R)	20%
Κατείσδυση (I)	30%
Ανάπτυξη του Καρστ (Ka)	30%

5.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΖΩΟΔΟΧΟΥ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ PaPRIKa

5.2.1 P- ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

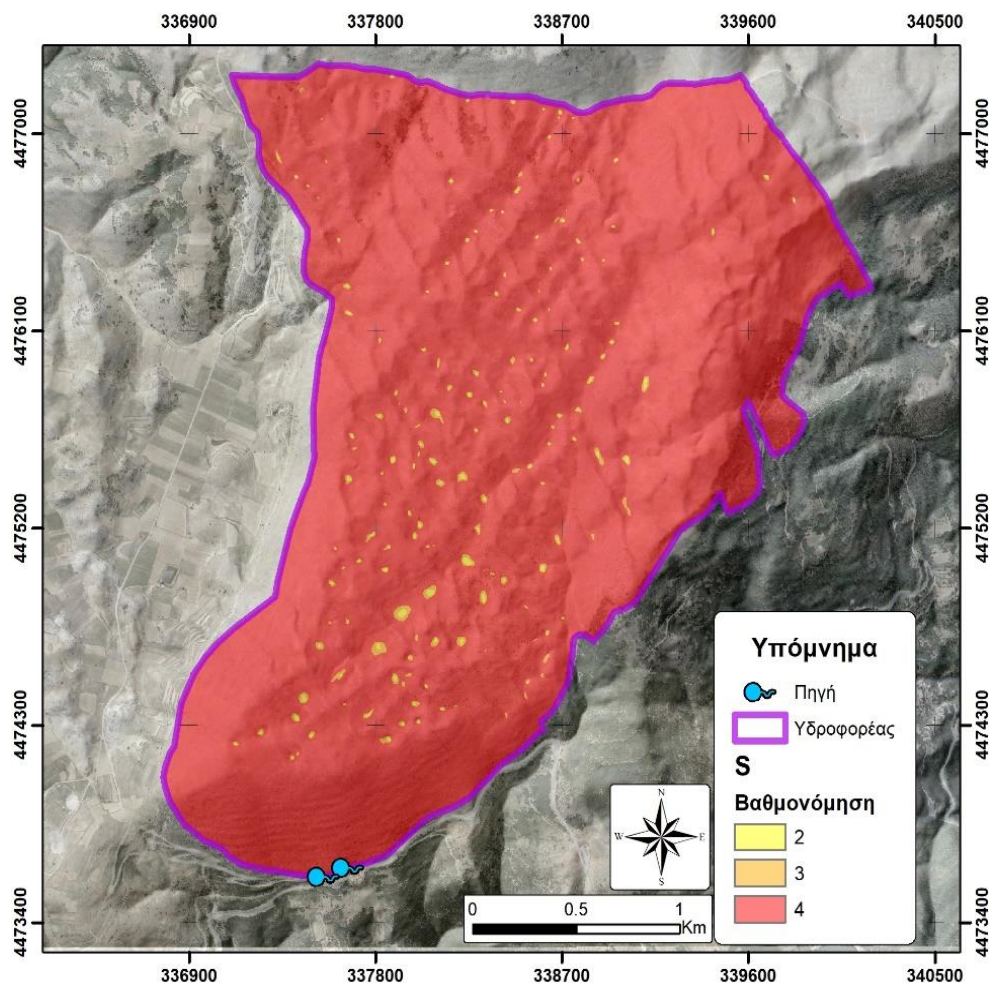
Η παράμετρος προστασίας (**P**) του υδροφορέα στη Ζωοδόχο Πηγή, συνυπολογίζεται και προκύπτει από την προστασία που παρέχουν και οι τέσσερις υποπαράμετροι που προαναφέρθηκαν. Η καταβύθιση υδατορευμάτων, που οδηγούνται στον καρστικό υδροφορέα μέσω των ανοιχτών καρστικών δομών είναι φανερό πως ελλοχεύει τον κίνδυνο για είσοδο ρύπων στον υδροφορέα. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας των γρήγορων ταχυτήτων ροής και της έλλειψης φυσικής διαδικασίας φιλτραρίσματος, μέσω των ζωνών ενός τυπικού καρστικού συστήματος.

Υδατορεύματα παρ' όλα αυτά, δεν εντοπίζονται στην περιοχή έρευνας. Επομένως, στο θεματικό χάρτη (Σχήμα 5.2) αυτή η υποπαράμετρος (**Ca**), δε θα πάρει κάποια τιμή. Στον ίδιο χάρτη, διακρίνονται τα όρια του υδροφορέα, αλλά και τις πηγές στα νότια όριά του.



Σχήμα 5.2 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης υποπαραμέτρου Ca.

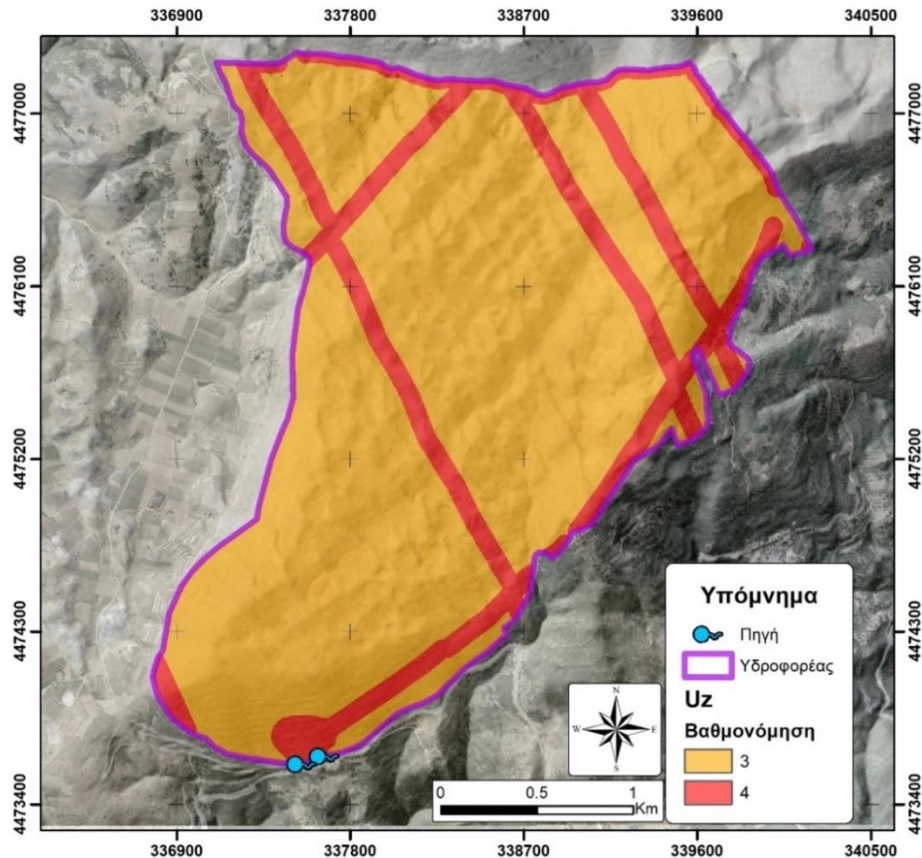
Το προστατευτικό εδαφικό κάλυμμα (**S**), ως υποπαράμετρος της **P**, έχει την ικανότητα να προστατεύει το υποκείμενο καρστικό σύστημα, καθώς καλύπτει τους καρστικούς σχηματισμούς, αλλά ουσιαστικά καθυστερεί και φιλτράρει το νερό που κατεισδύει. Το έδαφος και άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν σημαντική ικανότητα εξασθένησης (attenuation capacity), που σχετίζεται με παραμέτρους όπως: υφή, δομή, παρουσία οργανικής ύλης και αργιλικών ορυκτών, υδραυλική αγωγιμότητα, βάθος κορεσμού κλπ. (Βουδούρης, 2009). Τα ιζήματα αντιπροσωπεύονται από χαλίκια, κροκάλες και αμμο-ιλυώδες υλικό πλήρωσης και το πάχος τους είναι μεγαλύτερο των 5 m (Καζάκης κ.ά., 2019). Το γεγονός συσσώρευσης των ιζημάτων εντός των δολινών βελτιώνει τοπικά την ικανότητα προστασίας. Στον ακόλουθο θεματικό χάρτη (Σχήμα 5.3), με τιμή 2 βαθμονομούνται οι περιοχές μεγάλης προστασίας του καρστικού υδροφορέα.



Σχήμα 5.3 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης υποπαραμέτρου S.

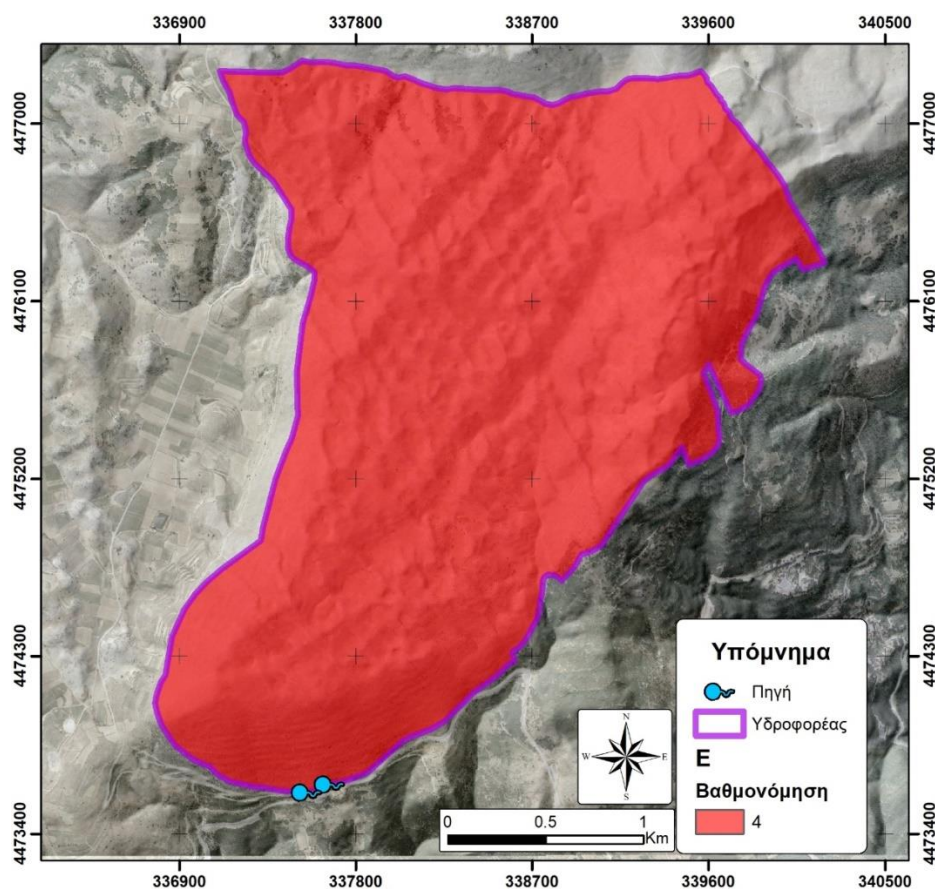
Παρατηρείται η ταύτιση των περιοχών αυτών, με τις καρστικές δομές (δολίνες). Όσο αυξάνονται οι τιμές στον θεματικό χάρτη, αυξάνεται και η τρωτότητα, καθώς η προστασία που παρέχεται στον υδροφορέα, ελαττώνεται.

Βασική υποπαράμετρος προστασίας, έναντι των ρύπων, αναδεικνύεται η ακόρεστη ζώνη (Unsaturated Zone). Αποτελεί το τμήμα μεταξύ της εδαφικής επιφάνειας και της στάθμης του υπογείου νερού. Το πάχος, η λιθολογία και η υφισταμένη τεκτονική κατάσταση της ακόρεστης ζώνης επηρεάζουν τη βαθμονόμηση στο θεματικό χάρτη. Στην περιοχή έρευνας η ακόρεστη ζώνη έχει πάχος μεγαλύτερο των 50 μέτρων στη μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα, ενώ πλησίον των πηγών το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι μικρότερο (Καζάκης κ.ά., 2019). Στον επόμενο θεματικό χάρτη (**Σχήμα 5.4**) είναι εμφανές πως οι περιοχές που βαθμονομούνται με 4, με την ψηλότερη τιμή και τη λιγότερη προστασία έναντι της τρωτότητας, συμπίπτουν με τα ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή. Με την τιμή 3 βαθμονομείται η υπόλοιπη έκταση του υδροφορέα, στην οποία μπορεί να μην υπάρχουν ζώνες διάρρηξης, αλλά ο κερματισμός των σχηματισμών είναι έντονος, αρνητικό στοιχείο αναφορικά με την προστασία του υδροφορέα.



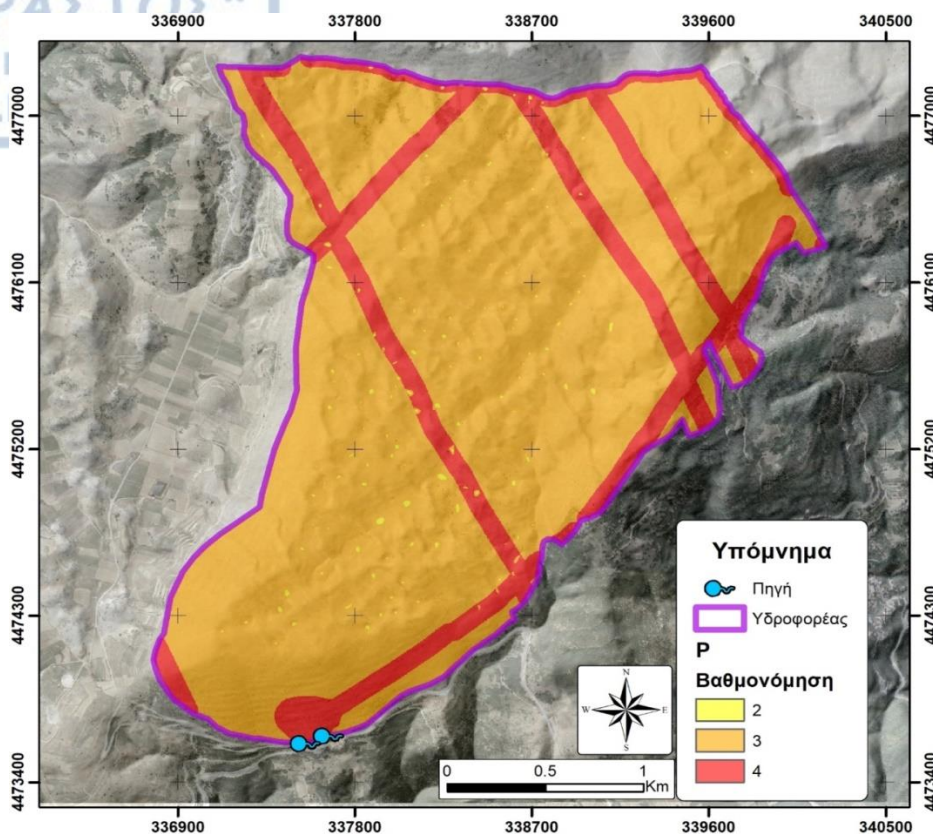
Σχήμα 5.4 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης υποπαραμέτρου Uz.

Ακόμη μία υποπαράμετρος είναι το επικάρστ (**E**). Είναι τμήμα της ακόρεστης ζώνης, με καίριο ρόλο στο χρόνο που κάνει το νερό να κατεισδύσει από την επιφάνεια προς τον υδροφορέα. Η υποπαράμετρος του επικάρστ επιδρά στη συνολική προστασία που θα προσφέρει η ακόρεστη ζώνη (**Σχήμα 5.5**). Όμως η παρουσία του επικάρστ δεν είναι δεδομένη σε κάθε υπόγειο υδατικό σύστημα, όπως συμβαίνει να απουσιάζει και στον υδροφορέα της Ζωοδόχου Πηγής. Η έλλειψή του αποδίδει σε όλη την έκταση του υδροφορέα, τη μεγαλύτερη τιμή και πρακτικά θα μειώσει την προστασία.



Σχήμα 5.5 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της υποπαράμετρου E.

Προϊόν της υπέρθεσης των τεσσάρων θεματικών χαρτών των υποπαράμετρων της **P**, είναι ο τελικός χάρτης της παραμέτρου **P (Protection)** (**Σχήμα 5.6**), της μεθόδου PaPRIKa. Οι τιμές της **P** κυμαίνονται από 2 έως 4. Η πιο χαμηλή τιμή (2), αντιστοιχεί στις περιοχές που παρέχουν την καλύτερη δυνατή προστασία και όσο αυξάνεται η τιμή, οι συνθήκες είναι πιο δυσμενείς ως προς την τρωτότητα.

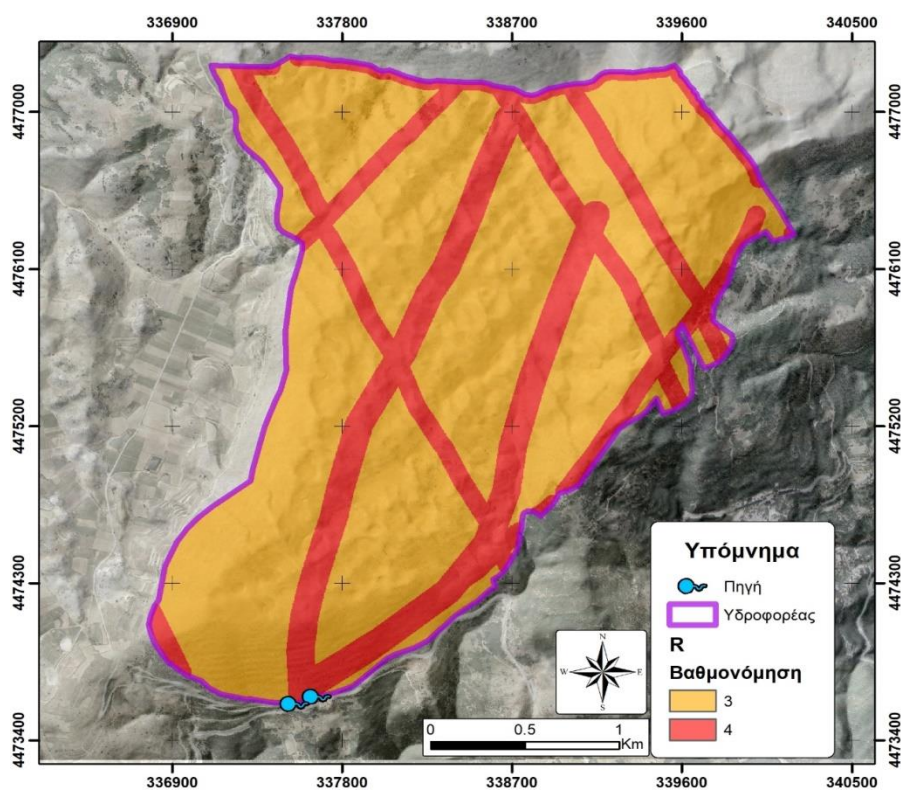


Σχήμα 5.6 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης παραμέτρου P.

5.2.2 Ρ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Ο υδροφορέας αναπτύσσεται μέσα σε ένα γεωλογικό σχηματισμό-ταμιευτήρα. Η επίδραση των χαρακτηριστικών αυτών του ταμιευτήρα ως προς την τρωτότητα, εξαρτάται από τη λιθολογία και τις δομικές ιδιότητες του ανθρακικού σχηματισμού (ρήγματα, βαθμός διάρρηξης) (Kavouri et al., 2011). Η παράμετρος **R** (Reservoir), στη μέθοδο PaPRIKa, λαμβάνει υπ' όψιν την παρουσία ρηγμάτων και καρστικών δομών. Τυπικές γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωμορφολογικές μελέτες παρέχουν εν μέρει πληροφορίες για το βαθμό ανάπτυξης του καρστ, αλλά δεν μπορούν να προσδιορίσουν την εσωτερική δομή του καρστικού συστήματος. Η γνώση της γεωμετρίας και της δομής των διαφόρων τμημάτων του καρστικού συστήματος (επικάρστ, ζώνες διείδυσης, καρστικοί αγωγοί, κοιλάτητες κλπ.) συνοδεύεται από αβεβαιότητα, λόγω της σύνθετης φύσης των καρστικών συστημάτων (Chalikakis et al., 2011). Η ανίχνευση των στοιχείων αυτών, η γενικότερη γνώση της γεωμετρίας, της δομής των διαφόρων τμημάτων του καρστικού συστήματος σε βάθος επιτυγχάνεται και αποκτάται, με τη βοήθεια των γεωφυσικών μεθόδων.

Στην προκειμένη περιοχή έρευνας, δολίνες βρίσκονται διάσπαρτες σε όλη την έκταση του υδροφορέα και μέρος αυτών αγγίζει τα βάθη των 200 m από την επιφάνεια, συμπέρασμα που διεξήχθη με τη βοήθεια των γεωηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης. Οι περιοχές με τις καρστικές αυτές δομές, εμφανίζουν αυξημένο κίνδυνο έναντι της τρωτότητας. Γι' αυτό το λόγο, στο θεματικό χάρτη της παραμέτρου **R** (Σχήμα 5.7), βαθμονομούνται με την πιο μεγάλη τιμή (4) και εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα του υδροφορέα με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ. Άλλες περιοχές που βαθμονομούνται με την ίδια τιμή, είναι οι περιοχές όπου εντοπίζονται τα ρήγματα στην περιοχή. Η υπόλοιπη έκταση του υδροφορέα, εξ' αιτίας της απουσίας ρηγμάτων και δολινών, βαθμολογείται με χαμηλότερη τιμή (3) και παρέχει σχετικά καλύτερη προστασία ενάντια στην τρωτότητα.



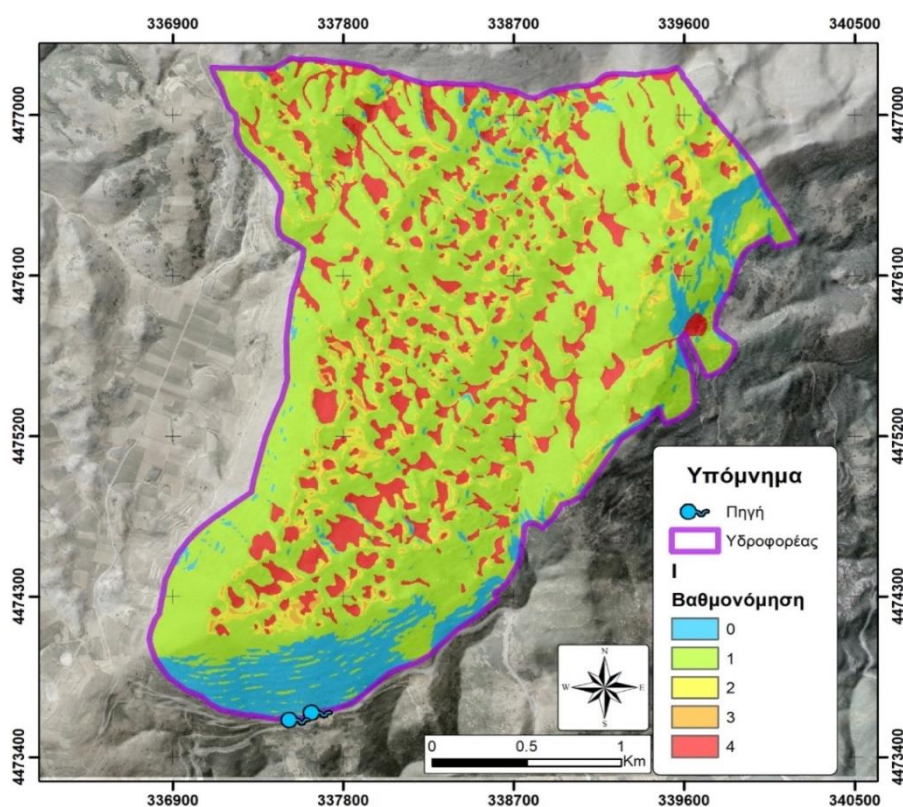
Σχήμα 5.7 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης παραμέτρου R.

5.2.3 Ι- ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

Ο όρος κατείσδυση αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού εντός της ζώνης αερισμού, προς τη ζώνη κορεσμού. Σχετίζεται άμεσα με την εκτίμηση της τρωτότητας, αφού η ίδια ως διαδικασία, συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπογείων υδροφορέων, ουσιαστικά εμπλουτίζει τον υδροφορέα. Όμως, όσο

μεγαλύτερος είναι ο εμπλουτισμός, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ενός ρύπου να φτάσει στον υδροφόρα. Μέτρο της κατείσδυσης αποτελεί ο συντελεστής κατείσδυσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατείσδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα) (Βουδούρης, 2009).

Η παράμετρος της κατείσδυσης, στη μέθοδο PaPRIKa, απορρέει από την κλίση, που έχει η επιφάνεια του εδάφους, σε συνδυασμό με τις ανοιχτές επιφανειακές καρστικές δομές της περιοχής. Στο θεματικό χάρτη της παραμέτρου **I**, γίνεται αντιληπτό ότι οι περιοχές που βαθμονομούνται με τη χαμηλότερη τιμή (0) (Σχήμα 5.8), αντιστοιχούν σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις του εδάφους απ' όπου απουσιάζουν επιφανειακές καρστικές δομές.



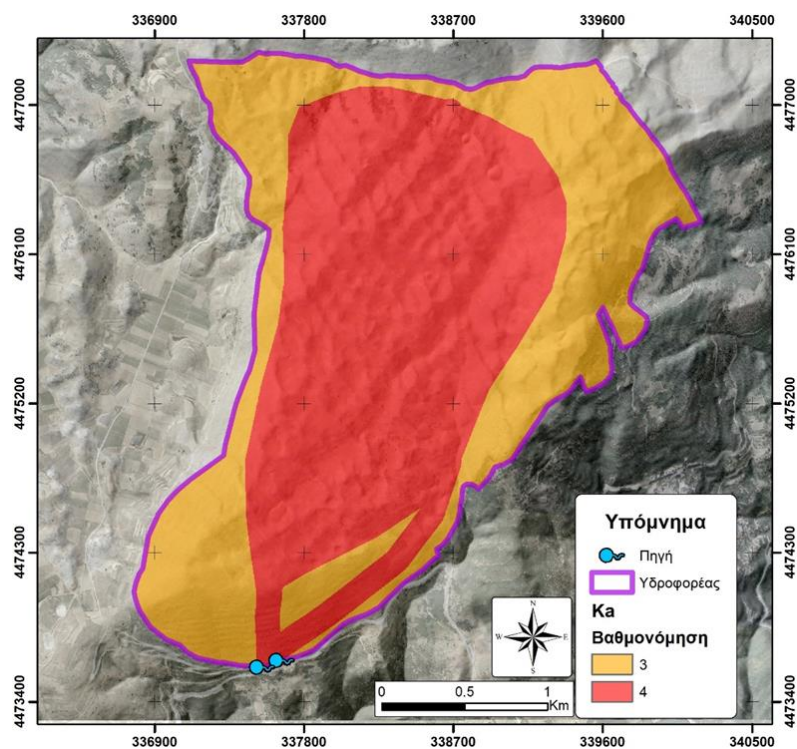
Σχήμα 5.8 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης παραμέτρου **I**.

Οι μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις ευνοούν την επιφανειακή απορροή αντί για την κατείσδυση, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ρυπαντικό δυναμικό. Αντίθετα οπουδήποτε υπάρχουν καρστικές δομές, είτε μειώνονται οι κλίσεις, οι τιμές βαθμονόμησης αυξάνονται. Τα σημεία με τις μεγαλύτερες τιμές (4) στο θεματικό χάρτη είναι σημεία μεγαλύτερου εμπλουτισμού και υποθάλπουν την τρωτότητα.

5.2.4 Ka- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ

Τα ανθρακικά πετρώματα, από τη φύση τους εμφανίζουν προδιάθεση ως προς την καρστικοποίηση. Έτσι δημιουργούνται συστήματα διακλάσεων και ρηγμάτων στα οποία είναι δυνατόν να κατεισδύει το επιφανειακό νερό. Τα συστήματα αυτά αποτελούν ένα δευτερογενές πορώδες στο πέτρωμα, το οποίο με τη δράση της καρστικής διάβρωσης διευρύνεται υπέρμετρα (διεύρυνση διακλάσεων, δημιουργία υπόγειων αγωγών κλπ.) (Βουβαλίδης, 2011). Κατ' αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η συνεχής ανάπτυξη του υπόγειου δικτύου αποστράγγισης, το οποίο έχει προεκβολές ως την επιφάνεια και συνδέεται με καρστικές δομές. Η κατεισδυση του επιφανειακού νερού γίνεται ταχύτατα προς το εσωτερικό των ασβεστολίθων από τις διακλάσεις και διαμέσου των υπόγειων αγωγών απορρέει προς τα κατάντη. Επομένως, ο βαθμός καρστικοποίησης ενός σχηματισμού, καθορίζει τον τρόπο υδρολογικής λειτουργίας του υδροφορέα. Γίνεται εύκολα κατανοητό, πως ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο καρστικών αγωγών συνεπάγεται υψηλή τρωτότητα και κατ' επέκταση, πολύ υψηλή τρωτότητα αποδίδεται σε υψηλό βαθμό καρστικοποίησης των ασβεστολίθων (Βουδούρης & Καζάκης, 2020).

Η ανάπτυξη του Karst στην περιοχή έρευνας, στον επόμενο θεματικό χάρτη (Σχήμα 5.9), βαθμονομείται με την ψηλότερη τιμή (4), βασιζόμενη σε γεωφυσικές διασκοπήσεις και υδρογεωλογική χαρτογράφηση.



Σχήμα 5.9 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης παραμέτρου Ka.

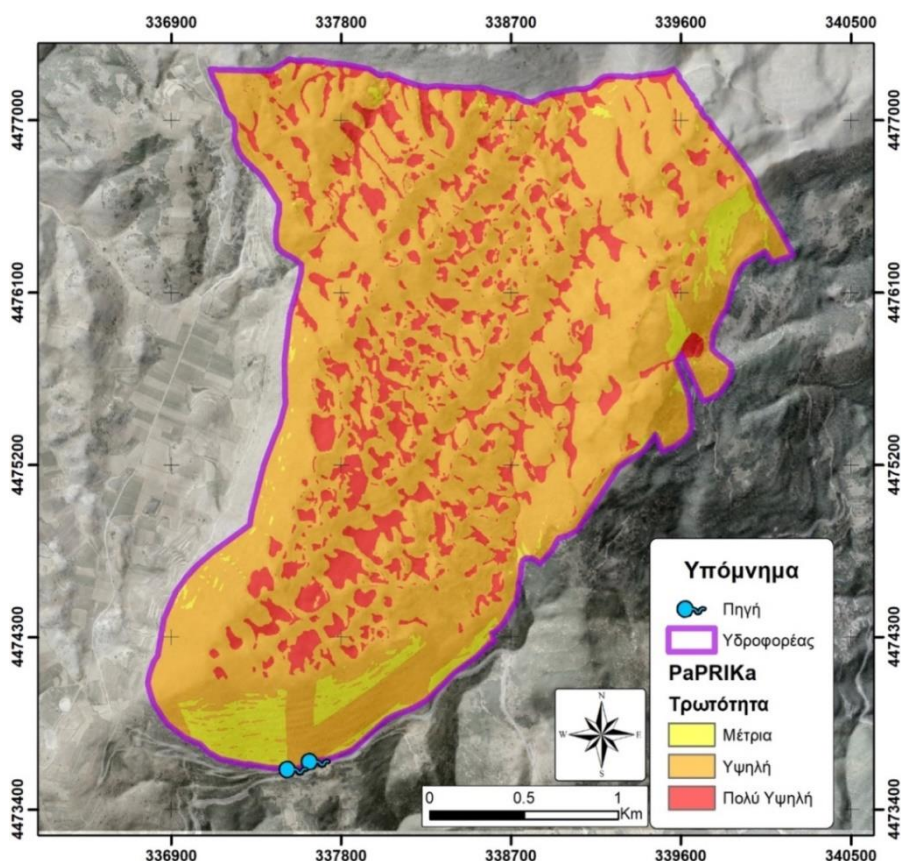
5.2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η σύνταξη του τελικού χάρτη τρωτότητας με τη μέθοδο PaPRIKa πραγματοποιείται με βάση τη σχέση (1) και οπτικά με την υπέρθεση των προηγούμενων θεματικών χαρτών σε περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών.

$$Vg = i \cdot I + r \cdot R + p \cdot P + k \cdot Ka \quad (1)$$

όπου: **I**, **R**, **P**, **Ka** οι παράμετροι της μεθόδου και *i*, *r*, *p*, *k* οι συντελεστές βαρύτητας των παραμέτρων (Καζάκης κ.ά., 2019) (Πίνακας 5.3).

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής που απεικονίζονται στον τελικό χάρτη της τρωτότητας στη Ζωοδόχο Πηγή (Σχήμα 5.10), αναδεικνύουν την ύπαρξη τριών κατηγοριών τρωτότητας του υδροφορέα: μέση τρωτότητα, υψηλή και πολύ υψηλή.

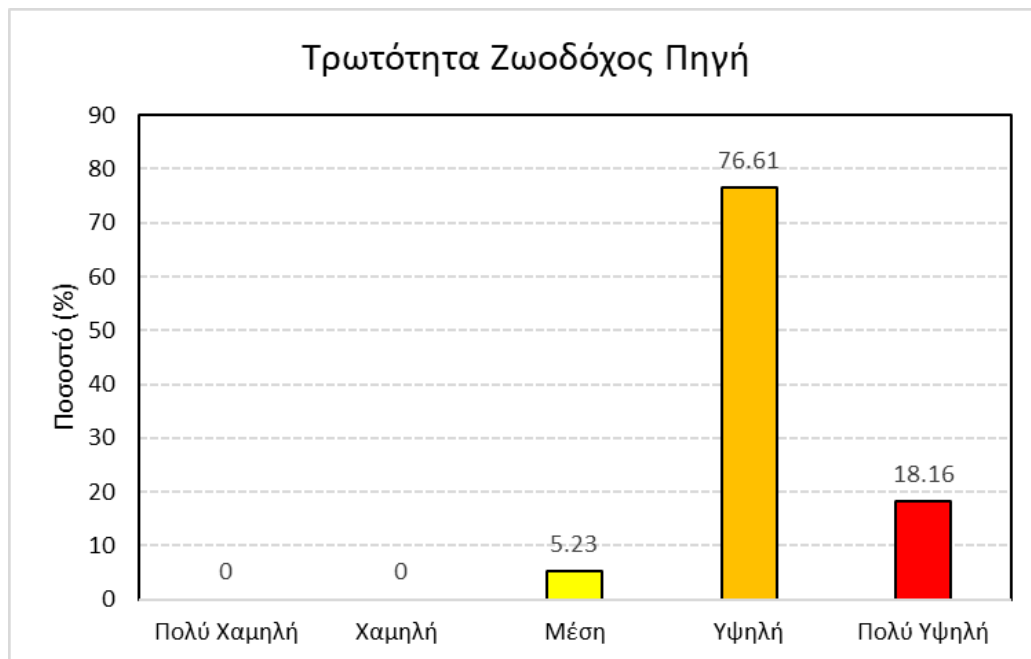


Σχήμα 5.10 Τελικός χάρτης τρωτότητας του καρστικού υδροφορέα στην περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής με τη μέθοδο PaPRIKa.

Τμήματα της περιοχής έρευνας με μέση τρωτότητα εντοπίζονται κυρίως στα νότια του υδροφορέα και διάσπαρτα μέρη κοντά στα όρια του υδροφορέα (Σχήμα 5.11). Σε

αυτά τα τμήματα μέσης τρωτότητας, απουσιάζουν καρστικές και τεκτονικές δομές και οι κλίσεις είναι μεγάλες. Παρ' όλα τα θετικά στοιχεία έναντι της τρωτότητας, το αρνητικό στοιχείο για τον υδροφορέα είναι, πως καλύπτουν μικρό μέρος αυτού (Σχήμα 5.11), αφού καταλαμβάνουν μόνο το 5.23% της συνολικής έκτασης του υδροφορέα.

Τα τμήματα που κατατάσσονται στην υψηλή τρωτότητα καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα, που υπολογίζεται στο 76.6% της συνολικής έκτασης και εμφανίζονται σαν ζώνη που περικλείει τα διάσπαρτα τμήματα πολύ υψηλής τρωτότητας. Τα τμήματα αυτά, δεν είναι άλλα από σημεία με τις ανοιχτές επιφανειακές καρστικές δομές του υδροφορέα, τις δολίνες. Η έκταση των περιοχών πολύ υψηλής τρωτότητας αντιστοιχεί στο 18.16% της συνολικής έκτασης.



Σχήμα 5.11 Ιστόγραμμα με την έκταση (%) που καταλαμβάνουν οι κατηγορίες τρωτότητας στον καρστικό υδροφορέα της Ζωοδόχου Πηγής.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εκπόνηση αυτής της προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, απορρέουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

1. Στην περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής Κοζάνης εντοπίζεται εντός των Τριαδικο-Ιουρασικών κρυσταλλικών ασβεστολίθων, ένα υδροφόρο καρστικό σύστημα, που εκφορτίζεται από τις ομώνυμες πηγές.
2. Το κλίμα της περιοχής διαμορφώνεται από πολύ υγρούς-ψυχρούς χειμώνες και σχετικά θερμά καλοκαίρια. Τα κατακρημνίσματα συμβάλλουν στην τροφοδοσία του υπόγειου υδροφόρου συστήματος.
3. Για την εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα, εφαρμόστηκε η μέθοδος PaPRIKa.
4. Με βάση τον τελικό χάρτη τρωτότητας, η έκταση που χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή τρωτότητα, αντιστοιχεί σε ποσοστό 18,16% επί της συνολικής έκτασης περιοχής έρευνας, το 76,61% χαρακτηρίζεται από υψηλή τρωτότητα, ενώ μόλις το 5,23% επί της συνολικής έκτασης είναι μέτρια τρωτό.

6.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

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 χάραξη πολιτικών και δράσεων σε όλα τα επίπεδα της δημόσιας διοίκησης (Βουδούρης, 2009). Οι χάρτες τρωτότητας παρ' όλα αυτά, είναι μια ειδική κατηγορία υδρογεωλογικών χαρτών και επειδή είναι χρονοεξαρτώμενοι απαιτούν ενημέρωση σε τακτά χρονικά διαστήματα (Βουδούρης & Καζάκης, 2020).

Μετά την εκτίμηση της τρωτότητας ενός υδροφορέα, έπεται η εφαρμογή μέτρων προστασίας και ορθολογικής διαχείρισης αυτού. Ιδιαίτερα για τους καρστικούς υδροφορείς είναι πολύ πιο επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής μέτρων πρόληψης, αφού αποτελούν μια κατηγορία υπόγειων υδροφορέων αρκετά ευάλωτων στην εξωτερική ρύπανση. Τα μέτρα αυτά βασίζονται στα εξής:

- Οριοθέτηση περιμέτρου προστασίας στον υπό εκμετάλλευση υδροφορέα. Προστατεύοντας όλη την έκταση του υδροφορέα, διαφυλάσσεται και εξασφαλίζεται έμμεσα και η ποιοτική κατάσταση των υδάτων του υδροληπτικού έργου, στην προκειμένη των πηγών, καθώς ο υδροφορέας εκφορτίζει σε αυτές. Η οριοθέτηση των ζωνών συνοδεύεται από απαγορεύσεις ως προς κάποιες ανθρώπινες δραστηριότητες,

όπως εντατικές αγροτικές καλλιέργειες με χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λειτουργία λατομείων, κλπ., οι οποίες εμπίπτουν στην υφιστάμενη νομοθεσία.

- Συστηματική και συνεχή καταγραφή, μέσω σταθμού καταγραφής, της ποιότητας των υπόγειων νερών (ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH), της παροχής των πηγών κλπ., που οδηγούν στη βέλτιστη διαχείριση του καρστικού υδροφορέα, καθώς παρέχουν επικαιροποιημένα δεδομένα.
- Στην ανόρυξη υδρογεωτρήσεων, για τη βέλτιστη διαχείριση του υδροφορέα, ως προς την ποσοτική προσέγγιση. Με συνεχή καταγραφή στάθμης σε πιεζόμετρα, θα καταστεί δυνατός ο έλεγχος, ώστε ο υδροφορέας να αποφέρει, με αυτά τα υδροληπτικά έργα, τις μέγιστες ποσότητες νερού, σε ασφαλή, εμπεριστατωμένα πλαίσια.

Η εφαρμογή των παραπάνω μέτρων είναι υψίστης σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία και τη συνολική ευημερία κάθε καρστικού υδροφορέα. Η αβελτηρία για προστασία του υπόγειου υδάτινου πλούτου, επιφέρει ολέθρια αποτελέσματα στον ίδιο τον άνθρωπο, μιας και η πλήρης αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί, είναι πολύ χρονοβόρα με μεγάλο οικονομικό κόστος.

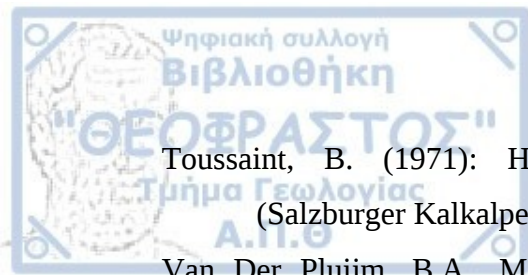


Ελληνική

- Βουβαλίδης, Κ. (2011): Φυσική Γεωγραφία. Εκδόσεις Δίσιγμα, Θεσσαλονίκη σελ. 158.
- Βουδούρης, Κ. (2009): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος- Υπόγεια νερά και περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 460.
- Βουδούρης, Κ. (2013): Τεχνική Υδρογεωλογία- Υπόγεια Νερά. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 429.
- Βουδούρης, Κ. (2015): Εκμετάλλευση και διαχείριση υπογείου νερού. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 654.
- Βουδούρης, Κ., Καζάκης, Ν. (2020): «Εκτίμηση της τρωτότητας καρστικών υδροφορέων με τη μέθοδο PaPRIKa: Η περίπτωση του υδροφορέα Μιτσικελίου Ιωαννίνων, Ελλάδα». Υδροτεχνικά 30, σελ. 1-13.
- Βουδούρης, Κ. (2021): Τεχνική Υδρογεωλογία- Υπόγεια νερά. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 422.
- Καζάκης κ.ά. (2019): «Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την προστασία και τη βέλτιστη διαχείριση καρστικών υδροφορέων τροφοδοσίας υδραγωγείων Δήμου Κοζάνης», σελ. 178.
- Μουντράκης, Δ. (1985): Γεωλογία της Ελλάδος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 208.
- Ντότσικα κ.ά. (2008): «Γεωχημικοί και ισοτοπικοί δείκτες για τον προσδιορισμό της προέλευσης των θερμών ρευστών της Σαντορίνης». 8ο Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο της Ελλάδας, Αθήνα, σελ. 82.
- Παυλίδης, Σ., Μουντράκης, Δ. (1994): Νεοτεκτονική. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 135.
- Στίκα, Μ., (2020): «Επίδραση τεκτονικών συνθηκών στην προσομοίωση υπόγειας ροής καρστικών υδροφορέων». Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σελ. 100.

Ξενόγλωσση

- Audra, P. (1994): «Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains: Exemples le Tennenengebirge (Autriche), l'Ile de Crémieux, la Chartreuse et le Vercors (France)». Karstologia Mémoires 5, p. 279.
- Chalikakis et al. (2011): «Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview.» Hydrogeology Journal 19, p. 1169-1180.
- Chloé Ollivier et al. (2019): «Challenges and Limitations of Karst Aquifer Vulnerability Mapping Based on the PaPRIKa Method - Application to a Large European Karst». Environments 6 (3), p. 13.
- Cost Action 620 (2003): «Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) aquifers». Francois Zwahlen, p. 297.
- Davis et al. (1996): Structural geology of rocks and regions. Wiley, p. 864.
- Doerfliger et al. (1999): «Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas uusing a multi-attribute approach and GIS tools (EPIC method)». Env. Geology 39, p. 165-176.
- Dörfliger, N., Plagnes, V. (2009): «Mapping the vulnerability of karst aquifers. Guidelines of the method PAPRIKa». Rapport BRGM RP-57527-FR. Hydrogéologie (Orléans), Vol.148, p. 100.
- Goldscheider, N., Drew, D. (2007): Methods in karst Hydrogeology. CRC Press, p. 280.
- Häuselmann et al. (1999): «Relationships between karst and tectonics: case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland)». Geodinamica Acta 12, p. 377-388.
- Kavouri et al. (2011): «PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France).» Hydrogeology Journal 19, p. 339-353.
- Lohman, S. W. (1972): Groundwater Hydraulics. U.S Geological Survey Professional Paper, p. 708.
- Margat, J. (1968): Vulnérabilité des Nappes d'eau Souterraine à la Pollution, p. 31.
- Marinos, P., Hoek, E. (2000): «GSI-A geologically friendly tool for rock mass strength estimation», p. 1422-1446.
- Springer, L., Stevens, A. (2009): Spheres of discharge of springs, Hydrogeology Journal 17, p. 83–93.



Toussaint, B. (1971): Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 23, p. 5-115.

Van Der Pluijm, B.A., Marshak, S. (2003): Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. WW Norton & Company, p. 673.

Witthüser, T. (2002): Untersuchungen zum Stofftransport in geklüfteten Festgesteinen unter besonderer Berücksichtigung der Matrixdiffusion . Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, p. 165.

Λιαδικτυακές πηγές

Ειδική Γραμματεία Υδάτων <http://wfdver.ypeka.gr/el/home-gr/> (ανακτήθηκε την 3/3/2022).

Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. <https://www.pdm.gov.gr/> (ανακτήθηκε την 9/4/2022).

<https://www.meteo.gr/> (ανακτήθηκε την 10/4/2022).

Google Earth Pro.