



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Τρωτότητα καρστικού υδροφορέα και οριοθέτηση ζωνών
προστασίας σημείων υδροληψίας»**

Ουρανία Ι. Μουρκάκου

Εξεταστική Επιτροπή

Εμμανουήλ Στειακάκης, Αν. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Καθηγητής (Α.Π.Θ.)

Δρ. Μαρίνος Κριτσωτάκης (Περιφέρεια Κρήτης, Δ/νση Περιβάλλοντος και
Χωρικού Σχεδιασμού)

Χανιά, 2022

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη εργασία εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η δημιουργία ζωνών προστασίας των σημείων υδροληψίας (πηγές και γεωτρήσεις) του καρστικού υδροφορέα της Αγυιάς στη Δυτική Κρήτη (Νομός Χανίων) με σκοπό τη προστασία της ποιότητας των υπόγειων υδάτων του. Στην ανάγκη για τη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος οδήγησε η συνεχής υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η εργασία συμμορφώνεται με τις κατευθυντήριες γραμμές της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τη προστασία των υδροφορέων, ενώ επιπλέον συνυπολογίζει τη ιδιότητα της εγγενούς τρωτότητάς τους.

Οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντά μου, Αν. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη για την εμπιστοσύνη του απέναντί μου, τα ουσιαστικά του σχόλια και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια περαίωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών. Παράλληλα ευχαριστώ τον κ. Διονύση Βαβαδάκη για την πολύτιμη συνεισφορά του και τον χρόνο που αφιέρωσε για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη και τον κ. Μαρίνο Κριτσωτάκη που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή της εργασίας μου, για τις διορθώσεις τους και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω της οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή μελέτης, η οποία βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Νομού Χανίων (Κρήτη), χαρακτηρίζεται από μεγάλες μεταβολές του ανάγλυφου της από τον Βορρά προς τον Νότο, που οφείλονται στην καρστικοποίηση και στις ισχυρές τεκτονικές παραμορφώσεις. Η υδροφορία αναπτύσσεται σε καρστικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες της γεωτεκτονικής ενότητας Τρυπαλίου και εκφορτίζεται κυρίως στην περιοχή της Αγυιάς με ένα μέτωπο πηγών. Παράλληλα, το σύστημα εκμεταλλεύεται μέσω μιας σειράς γεωτρήσεων, ανάντη των πηγών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πρόταση μεθοδολογίας για την ολοκληρωμένη προστασία από ρύπανση των υπόγειων νερών του καρστικού υδροφορέα Αγυιάς, με την οριοθέτηση ζωνών προστασίας πηγών και έργων υδροληψίας (γεωτρήσεις). Για τον προσδιορισμό τους συνδυάστηκαν μέθοδοι που μελετούν την επιδεκτικότητα του υπόγειου νερού στην ρύπανση, τόσο στην κορεσμένη όσο και στην ακόρεστη ζώνη του καρστικού υδροφόρου συστήματος.

Αρχικά, μελετήθηκε η τρωτότητα του υδροφορέα Αγυιάς με τη χρήση τριών μεθόδων δεικτών (EPIK, PRESK και DRISTPi) που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για καρστικά συστήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ταύτιση στην εκτίμηση της τρωτότητας από τις δύο πρώτες μεθόδους, ενώ η μέθοδος DRISTPi φαίνεται πως είναι η πλέον ασφαλής διότι λαμβάνει υπόψη της την ροή του υπόγειου νερού στο καρστ.

Στη συνέχεια οριοθετήθηκαν ισόχρονες περιοχές κίνησης του υπόγειου νερού (άρα και του τυχόν ρύπου) γύρω από τα σημεία υδροληψίας (πηγές και γεωτρήσεις) μέσω δύο μεθόδων: α) Με την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων με το λογισμικό MODFLOW-2000, και β) με εμπειρικές εξισώσεις που προτείνονται στις Τεχνικές Προδιαγραφές των Ζωνών Προστασίας (ΥΠΕΝ, 2021). Οι μέθοδοι αυτές έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα.

Από τον συνδυασμό των παραπάνω, σχεδιάσθηκαν τρεις (3) ζώνες προστασίας γύρω από τα σημεία νερού του καρστικού υδροφορέα Αγυιάς.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΩΝ ΥΔΑΤΩΝ: ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	5
2.1.	Ευρωπαϊκή πολιτική υδάτων	5
2.1.1.	Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ.....	5
2.1.2.	Οδηγία 2006/118/ΕΚ: Προστασία των Υπόγειων Υδάτων από τη Ρύπανση και την Υποβάθμιση	7
2.1.3.	Οδηγία 2020/2184/ΕΕ: Σχετικά με την Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης.....	8
2.2.	Ελληνική Νομοθεσία	9
2.2.1.	Γενικά.....	9
2.2.2.	Σχέδια Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού.....	10
2.2.3.	Τεχνικές προδιαγραφές ζωνών προστασίας υδροληπτικών έργων ύδρευσης και πηγών.....	12
2.2.4.	Τεχνικές προδιαγραφές μελετών τρωτότητας – ρυπαντικής επιδεκτικότητας υπόγειων υδροφορέων	16
3.	ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	18
3.1.	Γενικά για την τρωτότητα	18
3.2.	Τρωτότητα καρστικών συστημάτων.....	20
3.3.	Μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας.....	23
3.3.1.	Μέθοδος DRASTIC.....	24
3.3.2.	Μέθοδος SINTACS	25
3.3.3.	Μέθοδος EPIK	26
3.3.4.	Μέθοδος REKS	28
3.3.5.	Μέθοδος PI	29
3.3.6.	Μέθοδοι RISKE και RISKE 2	30
3.3.7.	Μέθοδος KARSTIC	31
3.3.8.	Μέθοδοι COP και COP+K	32
3.3.9.	Μέθοδος PaPRIKa	35
3.3.10.	Η μέθοδος PRESK	36
3.3.8.	Μέθοδος DRISTPi	40
3.4.	Ζώνες προστασίας σημείων νερού	44
3.5.	Διαχείριση του προβλήματος σε άλλες χώρες	49
4.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	59

4.1.	Μορφολογία	60
4.2.	Γεωλογία	62
4.3.	Υδρολογία – Υδρογεωλογία	63
4.4.	Σημεία Νερού	64
4.5.	Ανθρωπογενείς πιέσεις στην περιοχή μελέτης.....	68
5.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	71
5.1.	Εδαφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης	72
5.2.	Εφαρμογή μεθόδου ΕΡΙΚ	75
5.3.	Εφαρμογή μεθόδου PRESK	78
5.4.	Εφαρμογή μεθόδου DRISTPi	78
5.5.	Σύγκριση αποτελεσμάτων	83
6.	ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΝΕΡΟΥ (ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ)	86
6.1.	Προσομοίωση ροής υπόγειων υδάτων και δημιουργία ισόχρονων ζωνών	86
6.2.	Κώδικας MODFLOW	89
6.2.1.	Γενικές παραδοχές	91
6.2.2.	Διακριτοποίηση χώρου, σχεδιασμός ανάγλυφου και υποκείμενων στρωμάτων	92
6.2.3.	Εισαγωγή υδρογεωλογικών παραμέτρων.....	95
6.2.4.	Εισαγωγή γεωτρήσεων άντλησης και παρατήρησης	96
6.2.5.	Σχεδιασμός οριακών συνθηκών.....	98
6.2.6.	Σχεδιασμός στόχων	101
6.2.7.	Επίλυση μοντέλου	102
6.2.8.	Αποτελέσματα προσομοίωσης	102
6.3.	Εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων	104
6.4.	Σύγκριση αριθμητικής μεθόδου – εμπειρικών σχέσεων.....	104
6.5.	Οριοθέτηση Ζωνών Προστασίας.....	105
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	107
7.1.	Συμπεράσματα	107
7.2.	Προτάσεις	109
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την διάρκεια του 20ου αιώνα, η ρύπανση και η μόλυνση των υδατικών πόρων αυξήθηκε ως αποτέλεσμα της ραγδαίας βιομηχανοποίησης της κοινωνίας. Εκτός από την εισαγωγή επικίνδυνων ανόργανων ρυπαντών όπως τα βαρέα μέταλλα, ένα μεγάλο τμήμα της ρύπανσης οφείλεται σε οργανικές ουσίες και στην μόλυνση από μικροοργανισμούς. Χρειάστηκε να παρέλθει αρκετός χρόνος ώστε η κοινή γνώμη να στρέψει την προσοχή της στο θέμα της προστασίας των υδάτων.

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν σημαντικά αποθέματα γλυκού νερού και είναι ένας σπουδαίος πόρος πόσιμου νερού σε πολλά σημεία του πλανήτη. Σε αρκετές περιοχές πρόκειται για τη μοναδική πηγή τροφοδοσίας πόσιμου νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές που διαθέτουν μολυσμένα ή περιορισμένα σε ποσότητα επιφανειακά ύδατα (WHO, 2006).

Σε ορισμένες κοινότητες ίσως να είναι η μόνη οικονομικά αποδεκτή λύση για την κάλυψη των αναγκών σε νερό, καθώς κατά κανόνα βρίσκονται σε καλύτερη κατάσταση όσον αφορά την ποιότητά τους και απαιτούν περιορισμένη ή και μηδενική επεξεργασία ώστε να διατεθούν προς κατανάλωση σε σχέση με τα επιφανειακά (WHO, 2006).

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η ποσότητα της υδροληψίας σε εκατομμύρια m³ στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα έτη 2008 και 2018. Παρατηρείται πως η εξάρτηση από τα υπόγεια ύδατα διαφέρει σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα στα μέλη. Κράτη στα οποία η μεγαλύτερη ποσότητα νερού έχει υπόγεια προέλευση είναι η Ελλάδα, η Κύπρος, η Κροατία, η Λετονία και η Σλοβακία. Αντίθετα, κράτη στα οποία η μεγαλύτερη ποσότητα νερού έχει επιφανειακή προέλευση είναι η Ισπανία, η Βουλγαρία, η Τσεχία, και η Ουγγαρία. (WHO, 2006).

Πίνακας 1.1: Ετήσιοι όγκοι υδροληψίας γλυκού και μη γλυκού νερού μεταξύ των κρατών της Ε.Ε. για τα έτη 2008 και 2018 (WHO, 2006).

Συνολική υδροληψία ($\times 10^6 \text{ m}^3$)						
	Γλυκό επιφανειακό νερό		Γλυκό υπόγειο νερό		Μη γλυκό νερό	
	2008	2018	2008	2018	2008	2018
Αλβανία		859		99		
Αυστρία						
Βέλγιο	5.517		612		0,0	0,0
Βόρεια Μακεδονία	561		155		0,0	
Βουλγαρία	5.810	4.859	616	566	0,6	10
Γαλλία ⁽⁴⁾	23.379	21.379	5.824	5.692	4.935	5.212
Γερμανία ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	26.476	18.362	5.825	5.963		
Δανία	8	202	688	872		
Ελλάδα ⁽¹⁾	5.820	3.898	3.651	6.225		
Εσθονία ⁽⁴⁾	1.276	1.541	330	247	4	4
Ηνωμένο Βασίλειο	6.208		2.139		7.408	
Ιρλανδία ⁽⁵⁾	561		213			
Ισπανία ⁽⁶⁾	29.199	254.866	6.174	6.394	244	155
Ιταλία						
Κροατία	279	249	440 ^(e)	424	325 ^(e)	296
Κύπρος	30	52	130	155		
Λετονία	97	97	131	109	0,2	0,1
Λιθουανία	2.104	123	171	163	2	56
Λουξεμβούργο ⁽⁷⁾	20	22	270	23	0,0	
Μάλτα	3	3 ^(e)	36 ^(e)	39 ^(e)	497 ^(e)	225
Ουγγαρία	4.926	3.718 ^(b)	537	514		
Ολλανδία	9.719	6.906	989	1.188	3.657	6.165
Πολωνία	8.727	7.825	2.638	2.509	296	237
Πορτογαλία ⁽¹⁾⁽⁴⁾	:	2.772 ^(b)	4.794 ^(e)	2.065 ^(b)		1.419
Ρουμανία	6.561	5.673	659	676		
Σερβία	4.168	5.061	522	496		
Σλοβακία	313	234	351	339		
Σλοβενία	854	768	186	190	0,0 ^(s)	0,0
Σουηδία ⁽⁹⁾			346		11.832	
Τουρκία	29.589 ^(e)	44.914 ^(e)	12.419	16.180 ^(e)		
Τσεχία	1.608	1.221	380	370		
Φιλανδία ⁽⁸⁾	6.208		264			

^(e) Υπολογισμένα στοιχεία, ^(s) Στοιχεία από Eurostat, ⁽¹⁾ Στοιχεία του 2007 αντί του 2008, ⁽²⁾ Επιφανειακά ύδατα: Στοιχεία του 2017 αντί του 2018, ⁽³⁾ Υπόγεια ύδατα: Στοιχεία του 2016 αντί του 2018, ⁽⁴⁾ Στοιχεία του 2017 αντί του 2018, ⁽⁵⁾ Επιφανειακά ύδατα: Στοιχεία του 2009 αντί του 2008, ⁽⁶⁾ Στοιχεία του 2016 αντί του 2018, ⁽⁷⁾ Στοιχεία του 2009 αντί του 2010, ⁽⁸⁾ Στοιχεία του 2006 αντί του 2008, ⁽⁹⁾ Μη γλυκό νερό: Στοιχεία του 2007 αντί του 2008

Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι συνήθως καλά προστατευμένοι από υπερκείμενα εδαφικά στρώματα. Με την κίνηση των υδάτων μέσα από τα στρώματα αυτά εξασθενούν τυχόν μικροοργανισμοί και μειώνεται η συγκέντρωση των χημικών ρύπων. Ωστόσο, χρειάζονται ιδιαίτερη προστασία και έλεγχο, καθώς δίοδοι προνομιακής κίνησης του επιφανειακού νερού μπορούν να οδηγήσουν στην ταχεία ρύπανση των αποθεμάτων τους. Ραγδαία ρύπανση μπορούν επίσης να υποστούν εάν στο σημείο υδροληψίας δεν λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προστασίας (WHO, 2006).

Ιδιαίτερα οι υδροφόροι ορίζοντες εντός ανθρακικών πετρωμάτων αποτελούν σημαντικά αποθέματα πόσιμου ύδατος. Στην Ευρωπαϊκή Ήπειρο συμβάλουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό στον εφοδιασμό των κατοίκων της με καθαρό νερό, καθώς σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες το καρστικής προέλευσης νερό καλύπτει έως και το 50 % των αναγκών για ύδρευση, ενώ σε αρκετές περιοχές είναι ο μοναδικός διαθέσιμος πόρος γλυκού νερού (COST 65, 1995).

Τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτουν το 12 % της επιφάνειας της Γης και περίπου το 35 % της επιφάνειας της Ευρωπαϊκής Ηπείρου, συνεπώς μεγάλες ποσότητες των απαραίτητων υδάτινων πόρων βρίσκονται αποθηκευμένες σε καρστικούς υδροφορείς. Υπολογίζεται πως περίπου το 20 – 25 % του παγκόσμιου πληθυσμού βασίζεται σε καρστικά συστήματα για την τροφοδοσία του σε νερό (Ford and Williams, 2007).

Ειδικά στην Ελλάδα, τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτουν περισσότερο από το 35 % της επικράτειας και τα καρστικά συστήματα που σχετίζονται με αυτά αποτελούν ένα θαυμάσιο πόρο υπόγειου νερού, ζωτικής σημασίας για την ύδρευση και την άρδευση πολλών περιοχών (Kallioras and Marinos, 2015).

Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας τους, ώστε να επιτευχθεί η άριστη κατάσταση τόσο της ποιότητας όσο και της ποσότητας των υδάτων. Μέσω της Οδηγίας Πλαίσιο για το πόσιμο νερό (WDF 2000/60/EK), που εκδόθηκε το 2000, η προστασία των υδάτων μετατράπηκε σε πρωταρχικό στόχο της περιβαλλοντικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι ζώνες προστασίας αποτελούν περιοχές (σύμφωνα με το Άρθρο 7, Παράγραφος 3 της Οδηγίας Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης), οι οποίες δημιουργούνται με σκοπό να προστατευθούν τα υπόγεια ύδατα που

προορίζονται για υδρευτικούς σκοπούς και υφίστανται εκμετάλλευση μέσω υδροληψιών, όπως οι πηγές, οι γεωτρήσεις ή τα φρέατα.

Παράλληλα με τη μελέτη των Ζωνών Προστασίας τις τελευταίες τρεις δεκαετίες πραγματοποιούνται με διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον μελέτες τρωτότητας των υδροφορέων. Ποικίλες μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας έχουν προταθεί και εφαρμοστεί. Στόχος τους είναι η μελέτη και κατανόηση των Ζωνών Τρωτότητας των υδροφορέων ώστε να καθίσταται πιο αποτελεσματική η προστασία τους. Εντούτοις, οι ζώνες αυτές δεν διερευνώνται κατά τη μελέτη των Ζωνών Προστασίας, καθώς σύμφωνα με το έως τώρα ισχύον νομοθετικό πλαίσιο, έχουν μόνο επιστημονικό και όχι θεσμικό ενδιαφέρον.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός τόσο των Ζωνών Τρωτότητας του καρστικού υδροφορέα Αγυιάς Χανίων στη Κρήτη, όσο και των Ζωνών Προστασίας των σημείων νερού του. Ο προσδιορισμός των πρώτων βασίζεται στη χρήση τριών μεθόδων δεικτών (EPIK, PRESK και DRISTPi), ενώ ο σχεδιασμός των δεύτερων στηρίζεται στη μέθοδο ισόχρονων καμπυλών με τη χρήση υφιστάμενου μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων και εμπειρικούς τύπους.

Η εργασία αποσκοπεί στην ανάδειξη της αξίας του συνδυασμού των παραπάνω ζωνών για τη βέλτιστη προστασία των υδροφορέων.

2. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΩΝ ΥΔΑΤΩΝ: ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

2.1. Ευρωπαϊκή πολιτική υδάτων

Από τις αρχές της δεκαετίας του '90 διαφάνηκε η ανάγκη λήψης κατάλληλων μέτρων για την προστασία της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος σε έκθεσή του επιβεβαίωσε την ανάγκη δράσης προς αυτή την κατεύθυνση (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 1996).

Έπειτα από μια μακροχρόνια περίοδο συζητήσεων και διαπραγματεύσεων μεταξύ των κρατών-μελών, τέθηκε σε ισχύ στις 22 Δεκεμβρίου 2000 η Οδηγία Πλαίσιο για τα ύδατα και στη συνέχεια εκδόθηκε μία σειρά Οδηγιών και Κανονισμών σχετικών με την προστασία, την διαχείριση και τα ποιοτικά πρότυπα του πόσιμου νερού. Ορισμένες από αυτές τις Οδηγίες, καθώς και η Οδηγία Πλαίσιο αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

2.1.1. *Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ*

Με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ (στο εξής ΟΠΥ), θεσπίστηκε το πλαίσιο της κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Μέσω αυτής καταργήθηκε ένα πλήθος Οδηγιών και Αποφάσεων που είχαν εκδοθεί παλαιότερα για την πρόληψη της υποβάθμισης του υδάτινου περιβάλλοντος.

Η ΟΠΥ προβλέπει τη θέσπιση ενεργειών που αποσκοπούν στην προστασία και την ορθή διαχείριση των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων. Σκοπός της ήταν η επίτευξη καλής κατάστασης σε όλα τα υδάτινα σώματα έως το 2015 σε κάθε κράτος μέλος, μέσω μιας σειράς ενεργειών. Οι στόχοι που ορίζει αναθεωρούνται ανά εξαετία.

Σε γενικές γραμμές στοχεύει στην βιώσιμη διαχείριση και προστασία των πόρων γλυκού νερού, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το νερό δεν αποτελεί εμπορικό προϊόν, αλλά κληρονομιά που πρέπει να προστατεύεται. Επιπρόσθετα, αποσκοπεί στην σταδιακή μείωση της απόρριψης των επικίνδυνων ουσιών στο νερό, και ιδιαίτερα των επικίνδυνων

ουσιών που παρουσιάζονται στον Πίνακα A.1 του Παραρτήματος Α, ώστε να εξασφαλισθεί η διαθεσιμότητα πόσιμου νερού στο πληθυσμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ειδικά για τα υπόγεια ύδατα, εκτός της εξασφάλισης καλής ποιότητάς τους η ΟΠΥ στοχεύει και στον εντοπισμό και αναστροφή κάθε ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οποιουδήποτε ρύπου.

Βασικοί στόχοι της ΟΠΥ είναι η:

- Προστασία και η βελτίωση της ποιότητας.
- Συνετή ορθολογική χρήση των φυσικών πόρων.
- Προληπτική δράση και επανόρθωση των προβλημάτων στην «πηγή» τους.
- Υιοθέτηση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Η ΟΠΥ έθεσε ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων σε κλίμακα «Λεκάνης Απορροής Ποταμού». Τα κράτη μέλη προσδιορίζουν τις επιμέρους λεκάνες απορροής ποταμού και καταρτίζουν ένα σχέδιο διαχείρισής τους, το οποίο αναθεωρείται ανά εξαετία. Ειδικότερα για τα υπόγεια ύδατα, η ΟΠΥ ορίζει ότι τα κράτη μέλη οφείλουν να λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα ώστε να προλαμβάνεται ή να περιορίζεται η ρύπανσή τους.

Επίσης στο Άρθρο 7 της ίδιας Οδηγίας, αναφέρεται ότι σε κάθε περιοχή λεκάνης απορροής, τα μέλη πρέπει να εντοπίζουν όλα τα υδατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για υδροληψία με σκοπό την ανθρώπινη κατανάλωση και παρέχουν κατά μέσο όρο άνω των 10 m³ ημερησίως ή εξυπηρετούν περισσότερα από 50 άτομα, καθώς και όλα τα υδατικά συστήματα που προορίζονται μελλοντικά για τέτοια χρήση και να παρακολουθούν την κατάστασή τους σύμφωνα με το Παράρτημα V της ΟΠΥ (Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

Επιπλέον ορίζει πως οφείλουν να εξασφαλίζουν ότι το νερό δέχεται τέτοια επεξεργασία ώστε να πληροί τις απαιτήσεις της οδηγίας 80/778/ΕΟΚ, όπως τροποποιήθηκε με την οδηγία 98/83/ΕΚ. Το ίδιο άρθρο αναφέρει πως για την εξασφάλιση της προσήκουσας προστασίας των προσδιοριζόμενων υδατικών συστημάτων και προκειμένου να μειωθεί

το επίπεδο επεξεργασίας και καθαρισμού του νερού που προορίζεται για ύδρευση, τα κράτη-μέλη μπορούν να καθιερώνουν ζώνες προστασίας για τα υδατικά αυτά συστήματα (Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

2.1.2. Οδηγία 2006/118/ΕΚ: Προστασία των Υπόγειων Υδάτων από τη Ρύπανση και την Υποβάθμιση

Η Οδηγία 2006/118/ΕΚ σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση τροποποιήθηκε εν μέρει από την Οδηγία 2014/80/ΕΕ της 20ης Ιουνίου 2014. Στην ανάγκη δημιουργίας της οδήγησε το γεγονός ότι τα υπόγεια ύδατα είναι ένας φυσικός πόρος πολύ μεγάλης αξίας, ο οποίος θα πρέπει να προστατεύεται από κάθε είδους υποβάθμιση.

Εκτιμώντας το γεγονός ότι τα υπόγεια νερά αποτελούν τον μεγαλύτερο και το πιο ευαίσθητο σύστημα υδάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και καλύπτουν τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες ενός μεγάλου ποσοστού των κατοίκων της, η Οδηγία ορίζει πως χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης και προστασίας, ώστε να μειώνεται κατά το δυνατόν περισσότερο η απαιτούμενη επεξεργασία τους πριν την κατανάλωσή τους, όπως ορίζει η ΟΠΥ.

Παράλληλα το νερό που προκύπτει με το υφιστάμενο καθεστώς επεξεργασίας πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της Οδηγίας 98/83/ΕΚ, ενώ από τις 13 Ιανουαρίου 2023 θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2020/2184/ΕΚ για την ποιότητα του ύδατος που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Στην Οδηγία περιγράφεται σαφώς η διαδικασία αξιολόγησης της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, του εντοπισμού των ανοδικών τάσεων στις συγκεντρώσεις ρύπων και του καθορισμού των σημείων εκκίνησης για την αναστροφή της υποβάθμισής τους. Επιπλέον, διευκρινίζονται τα μέτρα πρόληψης ή περιορισμού της εισαγωγής των ρύπων στα υπόγεια ύδατα από τα κράτη-μέλη.

2.1.3. Οδηγία 2020/2184/ΕΕ: Σχετικά με την Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης

Η Οδηγία 2020/2184/ΕΕ αποτελεί αναδιατύπωση της παλαιότερης Οδηγίας 98/83/ΕΚ, η οποία καταργείται στις 13 Ιανουαρίου 2023.

Επιβάλλει στα κράτη-μέλη την υποχρέωση να προσδιορίσουν και να παρακολουθούν τα υδατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για υδροληψίες με σκοπό την ανθρώπινη κατανάλωση και να λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα ώστε να αποφεύγεται η υποβάθμιση της ποιότητάς τους και να μειώνεται το επίπεδο επεξεργασίας και καθαρισμού των υδάτων.

Ειδικά το Άρθρο 8 εστιάζει στη διαχείριση του κινδύνου των λεκανών απορροής για τα σημεία υδροληψίας νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Η εκτίμηση του κινδύνου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Τη χαρτογράφηση των λεκανών απορροής και των ζωνών προστασίας εφόσον έχουν καθοριστεί τέτοιες.
- Την ταυτοποίηση των πηγών κινδύνου και των επικίνδυνων συμβάντων εντός των λεκανών.
- Την παρακολούθηση των χημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων στα επιφανειακά και στα υπόγεια ύδατα.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2020/2184/ΕΕ, ως υγιεινό και καθαρό νερό θεωρείται εκείνο το οποίο είναι απαλλαγμένο μικροοργανισμών, παρασίτων και οποιονδήποτε ουσιών, σε αριθμούς και συγκεντρώσεις που αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Οφείλει να συμμορφώνεται με τις μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων των μικροβιολογικών, χημικών και άλλων ενδεικτικών παραμέτρων που παρουσιάζονται στους Πίνακες Α.2, Α.3 και Α.4 του Παραρτήματος Α.

Τα κράτη-μέλη υποχρεούνται να ορίζουν μέγιστες επιτρεπτές τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους, ωστόσο αυτές δεν μπορούν να είναι μεγαλύτερες από τις ήδη καθορισμένες, ενώ αν καταστεί αναγκαίο μπορούν να ορίσουν τιμές για πρόσθετες

παραμέτρους. Επιπλέον, οφείλουν να λαμβάνουν όλα τα αναγκαία μέτρα προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι παρακολουθείται τακτικά η ποιότητα του νερού.

2.2. Ελληνική Νομοθεσία

2.2.1. Γενικά

Η εναρμόνιση του Εθνικού Δικαίου με τις διατάξεις και τα παραρτήματα της Οδηγίας Πλαίσιο, έγινε μέσω των διατάξεων του Νόμου 3199/2003 (ΦΕΚ 280 Α/09.12.2003), του Προεδρικού διατάγματος 51/2007 (ΦΕΚ 54/Α/08.03.2007) και των κανονιστικών πράξεων που εκδόθηκαν και εφαρμόζονται για την προστασία και τη διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (Νόμος 3199/2003).

Με αυτές τις διατάξεις της εθνικής νομοθεσίας ενσωματώθηκαν οι βασικές οδηγίες της ΟΠΥ για τους υδατικούς πόρους, συγκροτήθηκε μία νέα διοικητική δομή και καθορίστηκαν οι αρμοδιότητες των φορέων διοίκησης, τόσο σε εθνικό όσο και σε περιφερειακό επίπεδο για τον έλεγχο και την προστασία των υδάτων.

Με το Π.Δ. 51/2007 ορίστηκαν τα Υδατικά Διαμερίσματα της επικράτειας (Σχήμα 2.1) και δημιουργήθηκαν οι εξής διοικητικές μονάδες για την διαχείριση των υδάτων:

- Η Εθνική Επιτροπή Υδάτων, υπεύθυνη για την πρόταση και τον έλεγχο της Υδατικής Πολιτικής.
- Το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων, συμβουλεύει σχετικά με τα προγράμματα διαχείρισης και προστασίας υδατικών πόρων.
- Η Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, συντονίζει όλους τους δημόσιους φορείς που συμμετέχουν στη διαχείριση υδάτων.
- Η Διεύθυνση Υδάτων κάθε Περιφέρειας, υπεύθυνη για την εφαρμογή των νόμων και των κανονισμών σε τοπικό επίπεδο.

- Το Περιφερειακό Συμβούλιο Υδάτων, υπεύθυνο για την διαβούλευση των Σχεδίων Διαχείρισης των «Λεκανών Απορροής Ποταμού» που προτείνει η Διεύθυνση Υδάτων της εκάστοτε Περιφέρειας.



Σχήμα 2.1: Τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδος.

2.2.2. Σχέδια Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού

Τα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμού (ΣΔΛΑΠ) αποτελούν αποφάσεις στρατηγικού σχεδιασμού για κάθε Υδατικό Διαμέρισμα και παρέχουν τις απαραίτητες

πληροφορίες και τις λειτουργικές οδηγίες για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων εντός μιας «Λεκάνης Απορροής Ποταμού». Το περιεχόμενό τους ορίζεται στην ΟΠΥ (Άρθρο 13, Παράρτημα VII) και η εισαγωγή τους στην ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο έγινε με το ΠΔ 51/2007 (Άρθρο 10, Παράρτημα VII).

Με τη διαδικασία αυτή έγινε περιγραφή των χαρακτηριστικών των ποταμών, των λιμνών, των υπόγειων και των παράκτιων υδάτων, καθώς και των προστατευόμενων περιοχών που σχετίζονται με τα ύδατα, όπως απαιτείται από την ΟΠΥ.

Μεταξύ άλλων στα ΣΔΛΑΠ περιλαμβάνονται:

- Η σύνοψη των σημαντικών πιέσεων και επιπτώσεων που ασκούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες στα νερά.
- Το δίκτυο παρακολούθησης των υδάτων και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης, από τα οποία φαίνεται η οικολογική, η χημική και η ποσοτική κατάσταση των υδάτων.
- Ο κατάλογος των περιβαλλοντικών στόχων που καθορίζονται για τα ύδατα.
- Η περίληψη της οικονομικής ανάλυσης των χρήσεων του νερού.
- Η περίληψη προγραμμάτων των μέτρων που πρόκειται να θεσπιστούν.

Μέχρι στιγμής έχουν καταρτισθεί, εγκριθεί και υποβληθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα πρώτα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών, για την περίοδο 2009 – 2015 των δεκατεσσάρων Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας. Επιπλέον, έχει πραγματοποιηθεί η πρώτη αναθεώρηση των Σχεδίων Διαχείρισης για την περίοδο 2016 – 2021, ενώ τον Μάρτιο του 2019 ξεκίνησε η διαβούλευση σχετικά με τη δεύτερη αναθεώρησή τους και η υποβολή τους στην Ε.Ε. αναμενόταν να γίνει έως το Μάρτιο του 2022, όμως δεν έχει πραγματοποιηθεί έως και σήμερα (<http://wfdver.ypeka.gr>).

Ειδικά όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα, ο καθορισμός των μέτρων προστασίας τους από την ρύπανση και την υποβάθμιση, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2006/118/ΕΚ πραγματοποιήθηκε με την έκδοση των ΦΕΚ Β 2075/2009 και Β 3322/2011.

Επίσης, η συμμόρφωση της εθνικής νομοθεσίας προς τις διατάξεις της Οδηγίας 98/83/ΕΚ πραγματοποιήθηκε με την έκδοση του ΦΕΚ 3282/2017, στο οποίο παρουσιάζονται τα ανώτατα όρια που έχει θέσει η ελληνική πολιτεία για της χημικές τις μικροβιολογικές και άλλες παραμέτρους του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση.

2.2.3. Τεχνικές προδιαγραφές ζωνών προστασίας υδροληπτικών έργων ύδρευσης και πηγών

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, εξέδωσε την Άνοιξη του 2021 τις Τεχνικές Προδιαγραφές των μελετών για τις ζώνες προστασίας των υδροληπτικών έργων ύδρευσης και των πηγών από εν δυνάμει ρυπογόνες δραστηριότητες ή/και έργα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (1^η Αναθεώρηση ΣΔΛΑΠ, Μέτρο ΜΧΧΒ0401).

Σύμφωνα με τη 1^η Αναθεώρηση των ΣΔΛΑΠ, η σύνταξη ειδικών υδρογεωλογικών μελετών για τη λεπτομερή οριοθέτηση ζωνών προστασίας σημείων υδροληψίας πόσιμου νερού από υπόγεια υδατικά συστήματα, σχετίζεται με τα μέτρα για την προστασία των υδάτων που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση (Άρθρο 7, ΟΠΥ). Το μέτρο αυτό με κωδικό ΜΧΧΒ0404 αποτελεί ένα από την Ομάδα II των Βασικών Μέτρων των ΣΔΛΑΠ (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017β).

Πρόκειται για μελέτες που αφορούν υδροληψίες οι οποίες καλύπτουν ανάγκες οικισμών και πόλεων και όχι για ατομικές ανάγκες μικρών ομάδων. Συνεπώς, συντάσσονται κατά προτεραιότητα στις μεγάλες ΔΕΥΑ ή στους Δήμους που καλύπτουν ανάγκες μεγάλων πληθυσμών. Μέχρι την ολοκλήρωση των ανωτέρω ειδικών υδρογεωλογικών μελετών, ορίζονται προσωρινές ζώνες προστασίας στα έργα υδροληψίας για άντληση υπόγειου πόσιμου ύδατος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017β).

Υπεύθυνοι φορείς για τη σύνταξη των παραπάνω μελετών είναι η Διεύθυνση Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης σε συνεργασία με τους Δήμους και τις ΔΕΥΑ.

Σε αυτές περιγράφονται αναλυτικά ο αριθμός των ζωνών προστασίας και οι παράμετροι καθορισμού τους. Επίσης αναφέρονται τα κριτήρια και οι μέθοδοι οριοθέτησής τους, οι

απαιτούμενες εργασίες που πρέπει να γίνουν για τη σωστή οριοθέτησή τους και τέλος τα περιεχόμενα της τεχνικής έκθεσης που οφείλει να παρουσιάσει ο υπεύθυνος μελετητής.

Οι ζώνες προστασίας, σύμφωνα με το θεσμοθετημένο κανονιστικό πλαίσιο είναι τρεις:

Ζώνη προστασίας I (άμεσης προστασίας ή απαγορευμένη ζώνη): Έχει ακτίνα 10 έως 20 m περιμετρικά του σημείου υδροληψίας και προστατεύει το άμεσο περιβάλλον της υδροληψίας από τη ρύπανση. Σε αυτή απαγορεύεται πλήρως κάθε είδους δραστηριότητα εκτός από τις απαραίτητες εργασίες για τη καλή λειτουργία και συντήρηση του των έργων υδροληψίας.

Ζώνη προστασίας II (ελεγχόμενη ζώνη ή ζώνη μικροβιολογικής προστασίας): Ονομάζεται και ζώνη των 50 ημερών καθώς αφορά τη περιοχή στην οποία ένα μόριο νερού χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα της τάξης των 50 ημερών για να διανύσει την απόσταση από τα όριά της μέχρι την υδροληψία. Προστατεύει την υδροληψία από τη μικροβιολογική μόλυνση και από τη ρύπανση που προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες ή έργα που είναι επικίνδυνα λόγω γειτνιάσής. Σε αυτή απαγορεύονται δραστηριότητες των οποίων τα απόβλητα είναι δυνατό να επηρεάσουν τα υπόγεια υδατικά συστήματα ακόμη και έπειτα από επεξεργασία τους.

Σημαντικές παράμετροι για την οριοθέτηση αυτής της ζώνης είναι:

- Η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού,
- Η απόσταση μεταξύ των ορίων της ζώνης τροφοδοσίας και
- Η ακτίνα επίδρασης R προς τα ανάντη και προς τα κατόντη.

Τόσο ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων όσο και ο προσδιορισμός της Ζώνης II ανάντη, κατόντη και πλευρικά του σημείου υδροληψίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω εμπειρικών σχέσεων που αναφέρονται στις τεχνικές προδιαγραφές.

Η σημαντικότερη παράμετρος για την οριοθέτηση της Ζώνης II είναι η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού (V_0 σε m/d), η οποία μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τη σχέση 2.1.

$$V_o = \frac{K \cdot J_o \cdot 86400}{p} \quad [2.1]$$

όπου,

K η υδραυλική αγωγιμότητα του γεωλογικού σχηματισμού (m/s),

J_o η υδραυλική κλίση, και

p ο συντελεστής ενεργού πορώδους του υδροφορέα ($p = 0.462 + 0.045 \cdot \ln K$).

Η απόσταση (d σε m) που διανύει το υπόγειο νερό σε χρόνο t είναι ανάλογη της ταχύτητας της υπόγειας ροής και εκτιμάται από τη σχέση 2.2.

$$d = V_o \cdot t \quad [2.2]$$

Η απόσταση (σε m) μεταξύ των ορίων της ζώνης τροφοδοσίας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση 2.3

$$B_\alpha = \frac{Q}{H \cdot K \cdot J_o} = \frac{Q}{T \cdot J_o} \quad [2.3]$$

όπου,

Q η παροχή του υδροληπτικού έργου (m^3/s),

H το πάχος του υδροφορέα (m),

K η υδραυλική αγωγιμότητα των γεωλογικού σχηματισμού (m/s), και

T ο συντελεστής υδαταγωγιμότητας του υδροφορέα (m^2/s).

Η ακτίνα επίδρασης (σε m) ανάντη και κατάντη του υδροληπτικού έργου δίνεται από τις σχέσεις 2.4 και 2.5 αντίστοιχα:

$$R_{av} = 575 \cdot s \cdot \sqrt{H \cdot K} \quad [2.4]$$

$$R_{κατ} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot K \cdot J_o} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T \cdot J_o} = \frac{B\alpha}{2 \cdot \pi} \quad [2.5]$$

όπου,

- s η πτώση στάθμης (m),
- Q η παροχή του υδροληπτικού έργου (m^3/s),
- H το πάχος του υδροφορέα (m),
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s),
- J_o η υδραυλική κλίση του υδροφορέα,
- T ο συντελεστής υδαταγωγιμότητας του γεωλογικού σχηματισμού (m^2/s), και
- B_α η απόσταση μεταξύ των ορίων της ζώνης τροφοδοσίας (m).

Με βάση τα παραπάνω είναι δυνατό να υπολογισθεί το μέγεθος (σε m) της ισόχρονης καμπύλης στα ανάντη ($L_{αν.}$) και στα κατάντη ($L_{κατ.}$) σύμφωνα με τις σχέσεις 2.6 και 2.7:

$$L_{αν} = \frac{d + \sqrt{d \cdot (d + 8 + R_{αν})}}{2} \quad [2.6]$$

$$L_{κατ} = \frac{d + \sqrt{d \cdot (d + 8 + R_{κατ})}}{2} \quad [2.7]$$

Τέλος, η πλευρική ανάπτυξη της ισόχρονης καμπύλης των πενήντα ημερών ($L_{πλ}$ σε m) υπολογίζεται από τη σχέση 2.8:

$$L_{πλ} = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot H \cdot p}} \quad [2.8]$$

Ζώνη προστασίας III (επιτηρούμενη ζώνη ή ζώνη χημικής προστασίας): Περιβάλλει τις ζώνες I και II και εκτείνεται μέχρι τα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης, από την οποία τροφοδοτείται το υδροληπτικό έργο. Προστατεύει από ρύπους, που είναι αδύνατο να εξουδετερωθούν από την ικανότητα αυτοκαθαρισμού του εδάφους, όπως οι χημικές ουσίες και τα ραδιενεργά απόβλητα.

Η έκταση αυτή μπορεί να προσδιορισθεί βάσει υδρολιθολογικών και πιεζομετρικών χαρτών, τις υδραυλικές παραμέτρους και τις γενικές υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, με τη χρήση αναλυτικών ή αριθμητικών μοντέλων ή εμπειρικά με τη σχέση 2.9:

$$A_r = \frac{Q}{P \cdot I_c} \quad [2.9]$$

όπου,

A_r η περιοχή τροφοδοσίας (km^2),

Q ο ετήσιος όγκος νερού που εκφορτίζεται μέσω πηγής ή αντλείται (m^3/y),

P η ετήσια βροχόπτωση, και

I_c ο συντελεστής κατείδυσης.

Η ακτίνα της κυκλικής περιοχής τροφοδοσίας δίνεται από τη σχέση 2.10:

$$r = \sqrt{\frac{A_r}{\pi}} \quad [2.10]$$

όπου,

r η ακτίνα της γεώτρησης (m).

2.2.4. Τεχνικές προδιαγραφές μελετών τρωτότητας – ρυπαντικής επιδεκτικότητας υπόγειων υδροφορέων

Οι τεχνικές προδιαγραφές μελετών τρωτότητας – ρυπαντικής επιδεκτικότητας των υπόγειων υδροφορέων εκδόθηκαν την Άνοιξη του 2021 από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας με σκοπό το καθορισμό του πλαισίου των απαιτούμενων εργασιών και των κατάλληλων τεχνικών και μεθόδων για την εκπόνηση των συγκεκριμένων μελετών. Οι μελέτες τρωτότητας – ρυπαντικής επιδεκτικότητας συνδέονται άμεσα με το βασικό μέτρο των ΣΔΛΑΠ ΜΧΧΒ0402 «Προστασία ΥΥΣ που εντάσσονται στο μητρώο προστατευόμενων περιοχών ανθρώπινης κατανάλωσης και καθορισμός θεσμικού πλαισίου προστασίας».

Σε αυτές περιγράφονται αναλυτικά οι παράμετροι, τα κριτήρια και οι προτεινόμενες μέθοδοι προσδιορισμού των ζωνών τρωτότητας, οι απαιτούμενες εργασίες που πρέπει

να γίνουν για τη σωστή οριοθέτησή τους και τέλος τα περιεχόμενα της τεχνικής έκθεσης που οφείλει να παρουσιάσει ο υπεύθυνος μελετητής.

Οι βασικές πληροφορίες που χρειάζονται για τον καθορισμό και οριοθέτηση των ζωνών της τρωτότητας των υπόγειων νερών αφορούν την γεωλογική και τεκτονική δομή, την υδρογεωλογία, την υδροχημεία και την γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης, καθώς επίσης τις χρήσεις γης της περιοχής. Αντίθετα με ότι συμβαίνει στον προσδιορισμό των ζωνών προστασίας δεν απαιτούνται γνώσεις σχετικά με τον αριθμό των υδρομαστευτικών έργων και την πυκνότητά τους, τη ποσότητα των απολήψεων από την υπόγεια υδροφορία, την ακτίνα επίδρασης και τον κώνο πτώσης στάθμης του υδροληπτικού έργου.

Η οριοθέτηση των ζωνών τρωτότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση μεθόδων βαθμονόμησης (ή δεικτών/υπέρθεσης) είτε με στατιστικές μεθόδους. Οι μέθοδοι βαθμονόμησης διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του υδροφορέα (κοκκώδης, καρστικός ή με ρωγματώσεις).

3. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

3.1. Γενικά για την τρωτότητα

Ο όρος «τρωτότητα» προτάθηκε για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 60 (Margat, 1968) και σκοπό είχε να εξηγήσει τον βαθμό της προστασίας από την ρύπανση που προσφέρει το φυσικό περιβάλλον στα υπόγεια ύδατα, λαμβάνοντας υπόψη το βάθος, την ταχύτητα του υπόγειου νερού, την διαπερατότητα και την σχέση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Έκτοτε ο ορισμός άλλαξε αρκετές φορές:

Ο Foster (1987) όρισε ως τρωτότητα όλα τα εγγενή χαρακτηριστικά ενός υδροφορέα που καθορίζουν την ευαισθησία των διαφόρων τμημάτων ως προς ένα ρυπαντικό φορτίο.

Ο Vrba (1991) αναφέρει ότι η τρωτότητα είναι μία αμετάβλητη εγγενής ιδιότητα του ακόρεστου και του κορεσμένου τμήματος ενός υπόγειου υδατικού συστήματος και εξαρτάται από την ικανότητα ή την αδυναμία αυτού του συστήματος να αντιμετωπίσει τις πιέσεις που δέχεται από φυσικές διεργασίες ή από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Τέλος, οι Vrba και Zaporozec (1994) περιγράφουν την τρωτότητα ως μια εγγενή, μη μετρήσιμη και αδιάστατη ιδιότητα ενός συστήματος υπόγειων υδάτων, που εξαρτάται από την ευαισθησία αυτού του συστήματος απέναντι στις ανθρωπογενείς ή φυσικές πιέσεις.

Αντίθετα, με την τρωτότητα, ο όρος «ευαισθησία» του υδροφορέα εκφράζει την ευκολία με την οποία ένας ρύπος μεταναστεύει στον υδροφορέα από την επιφάνεια του εδάφους. Είναι ανεξάρτητη των χαρακτηριστικών του ρύπου και των χρήσεων γης, αλλά εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες, την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη (Βουδούρης, 2006).

Δύο κύριοι τύποι τρωτότητας μπορούν να οριστούν σύμφωνα με το Cost 65 (1995):

- Η εγγενής (intrinsic) τρωτότητα ή ιδιοτρωτότητα, η οποία εξαρτάται από τα γεωλογικά, τα υδρογεωλογικά και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

μελέτης και είναι ανεξάρτητη από το είδος και τα χαρακτηριστικά των ρύπων. Δεν εξειδικεύεται σε κάποιον ρυπαντή και ταυτίζεται με την ευαισθησία του υδροφορέα.

- Η ειδική (specific) τρωτότητα, στην εκτίμηση της οποίας λαμβάνεται υπόψη η εγγενής τρωτότητα και επιπλέον τα χαρακτηριστικά του ή των ρύπων που εντοπίζονται στο σύστημα.

Ο παραπάνω ορισμός της εγγενούς τρωτότητας έχει υιοθετηθεί στη παρούσα εργασία.

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων: η προστασία των πόρων (resource protection) και η προστασία των πηγών τους (source protection). Ως «πόρος» εννοείται το σώμα των υπόγειων υδάτων και ως «πηγή» κάθε φυσική πηγή ή τεχνητό σημείο υδροληψίας. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες, καθώς είναι αδύνατο να προστατευτεί μία πηγή χωρίς να προστατευτεί ο ίδιος ο πόρος (Goldscheider, 2010).

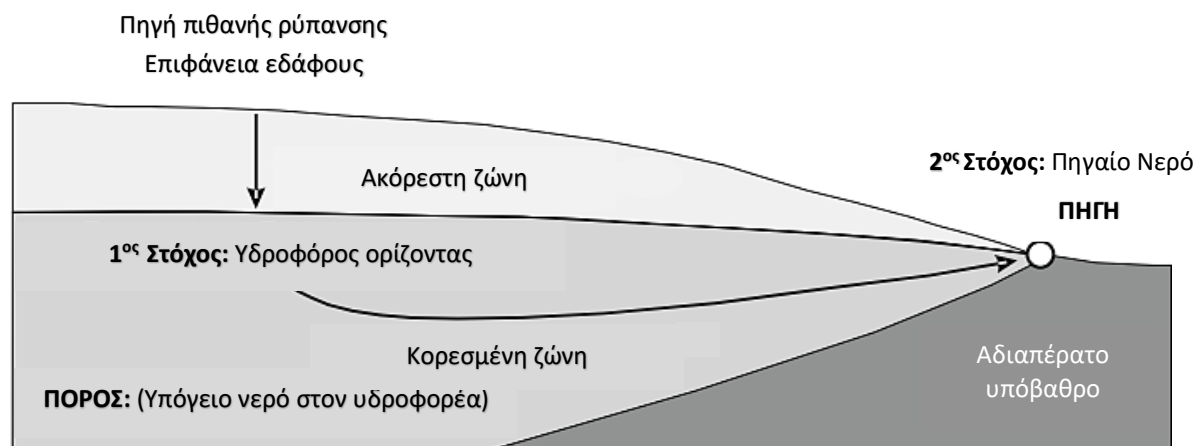
Η τρωτότητα των υδροφορέων δεν είναι ίδια σε όλη τους την έκταση και η πιθανότητα μόλυνσης των υπόγειων υδάτων είναι μεγαλύτερη κοντά στο σημείο υδροληψίας, το οποίο συχνά είναι περιφραγμένο. Εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελούν οι υδροφόροι με έντονη ετερογένεια όπως οι καρστικοί.

Κάθε ρύπος μπορεί δυνητικά να εισαχθεί στο υδατικό σύστημα από μία ορισμένη πηγή ρύπανσης. Η είσοδος του σχετίζεται με το είδος του, την συμπεριφορά του και τις υδρογεωλογικές συνθήκες.

Στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων η πηγή προέλευσης του ρύπου μπορεί να είναι είτε επιφανειακή είτε υπόγεια. Η παραμονή του ρύπου στο σύστημα συνδέεται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.

Η διαδρομή που ακολουθεί είναι κατά κύριο λόγο μία καθοδική πορεία εντός της ακόρεστης ζώνης του υδροφορέα και στην συνέχεια κινείται στο κορεσμένο τμήμα του. Τελικά, αν πραγματοποιείται εκμετάλλευση του υδροφορέα, ο ρύπος καταλήγει στο σημείο υδροληψίας (Goldscheider, 2010, Βουδούρης, 2006).

Ένα από τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκε για την απόδοση της έννοιας της τρωτότητας και την προστασία των υπόγειων υδάτων και την κατανόηση της έννοιας της τρωτότητας είναι αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διαδρομή ρύπου από την είσοδό του εντός του υδροφορέα έως το σημείο υδροληψίας (Goldscheider, 2010).

Το Σχήμα 3.1 αποδίδει την Ευρωπαϊκή Προσέγγιση της εκτίμησης της τρωτότητας που περιλαμβάνει τρία στάδια: την είσοδο του ρύπου στο σύστημα μέσω της ακόρεστης ζώνης, τη μετακίνησή του εντός του υδροφορέα και την άφιξη του στο σημείο της υδροληψίας (πηγή ή γεώτρηση).

Για την εκτίμηση της τρωτότητας χρησιμοποιούνται μέθοδοι δεικτών και υβριδικές μέθοδοι, όπου συνδυάζονται μέθοδοι δεικτών με στατιστικές μεθόδους. Επίσης εφαρμόζονται καθαρά στατιστικές μέθοδοι και μέθοδοι προσομοίωσης (Βουδούρης, 2016).

3.2. Τρωτότητα καρστικών συστημάτων

Εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των καρστικών συστημάτων η ποιότητα των υδάτων τους μπορεί εύκολα να υποβαθμιστεί ως αποτέλεσμα ανθρωπογενών επιδράσεων.

Ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η απουσία εδαφικού καλύμματος ικανού πάχους, η ύπαρξη επικαρστικής ζώνης και η σημειακή φόρτιση του υδροφορέα μέσω

καρστικών δομών που επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων ροής των υδάτων και συνεπώς μετακίνηση των ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις εντός ενός σύντομου χρονικού διαστήματος.

Ως εκ τούτου, η υψηλή ευαισθησία τους απαιτεί την εφαρμογή αποτελεσματικών πρακτικών για την προστασία τους, μέρος των οποίων είναι ο σχεδιασμός χαρτών τρωτότητας. Ο σχεδιασμός ζωνών τρωτότητας σε καρστικούς υδροφόρους είναι περισσότερο πολύπλοκος σε σχέση με τους πορώδεις υδροφόρους λόγω της έντονης ετερογένειας και ανισοτροπίας που παρουσιάζουν και των υψηλών ταχυτήτων ροής που μπορούν να φτάσουν τα 500 m/h (Goldscheider, 2005).

Στα καρστικά συστήματα η τρωτότητα σχετίζεται με τα παρακάτω χαρακτηριστικά, τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη της (COST Action 620):

- Κάθε καρστικό σύστημα είναι μοναδικό και διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.
- Εμφανίζουν έντονη ετερογένεια και ανισοτροπία, ως εκ τούτου η εξαγωγή συμπερασμάτων σε αυτούς τους υδροφόρους καθίσταται περισσότερο προβληματική σε σχέση με άλλους.
- Η επαναφόρτισή τους γίνεται είτε μέσω της κατείσδυσης επιφανειακών υδάτων από τα υπερκείμενα εδαφικά στρώματα, είτε από την συγκέντρωση υδάτων σε δολίνες και αβαθείς επιφανειακές κοιλότητες.
- Τα υπερκείμενα εδαφικά στρώματα μπορούν να προσφέρουν κάποιου είδους προστασία. Ωστόσο σε περιοχές που καλύπτονται από υπερκείμενους σχηματισμούς χαμηλής περατότητας πρέπει να αναμένεται κάποιου είδους πλευρική ή υπο-επιφανειακή ροή.
- Το επικάρστ φαίνεται πως συμβάλει στην φυσική προστασία του συστήματος μέσω της αποθήκευσης του νερού που πραγματοποιείται σε αυτό, αλλά η κατακόρυφη κίνηση των υδάτων αυξάνει τον βαθμό της τρωτότητας. Σε γενικές γραμμές η δομή και η λειτουργία του επικάρστ είναι δύσκολο να εκτιμηθεί.

- Οι καρστικοί υδροφόροι είναι δυνατό να διαθέτουν διπλό πορώδες (λόγω των ρωγμών και των κενών χώρων που προκύπτουν από την διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων), ή τριπλό, αν αναπτύσσεται επιπλέον πορώδες μεταξύ των κόκκων. Επίσης, είναι δυνατό στο ίδιο σύστημα να υπάρχουν ζώνες πολύ γρήγορης ή πολύ αργής κίνησης των υπόγειων υδάτων, συνεπώς οι ρύποι μπορούν είτε να κινούνται με μεγάλη ταχύτητα ή να αποθηκεύονται για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Παρουσιάζουν άμεση απόκριση στις μεταβολές των υδρολογικών φαινομένων. Η αυξομείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να είναι της τάξης δεκάδων μέτρων.
- Συχνά οι καρστικοί υδροφορείς καταλαμβάνουν πολύ μεγάλες εκτάσεις και συνδέονται υδραυλικά σε μεγάλες αποστάσεις. Οι υδρολογικές λεκάνες τους είναι δύσκολο να εκτιμηθούν, μεταβάλλονται χρονικά και επηρεάζονται από τις υδρολογικές συνθήκες. Οι υδρογεωλογικές λεκάνες των καρστικών πηγών συχνά συμπίπτουν και έπειτα από δοκιμές με δείκτες φαίνεται πως οι γραμμές ροής των υδάτων είναι δυνατό να διασταυρώνονται.

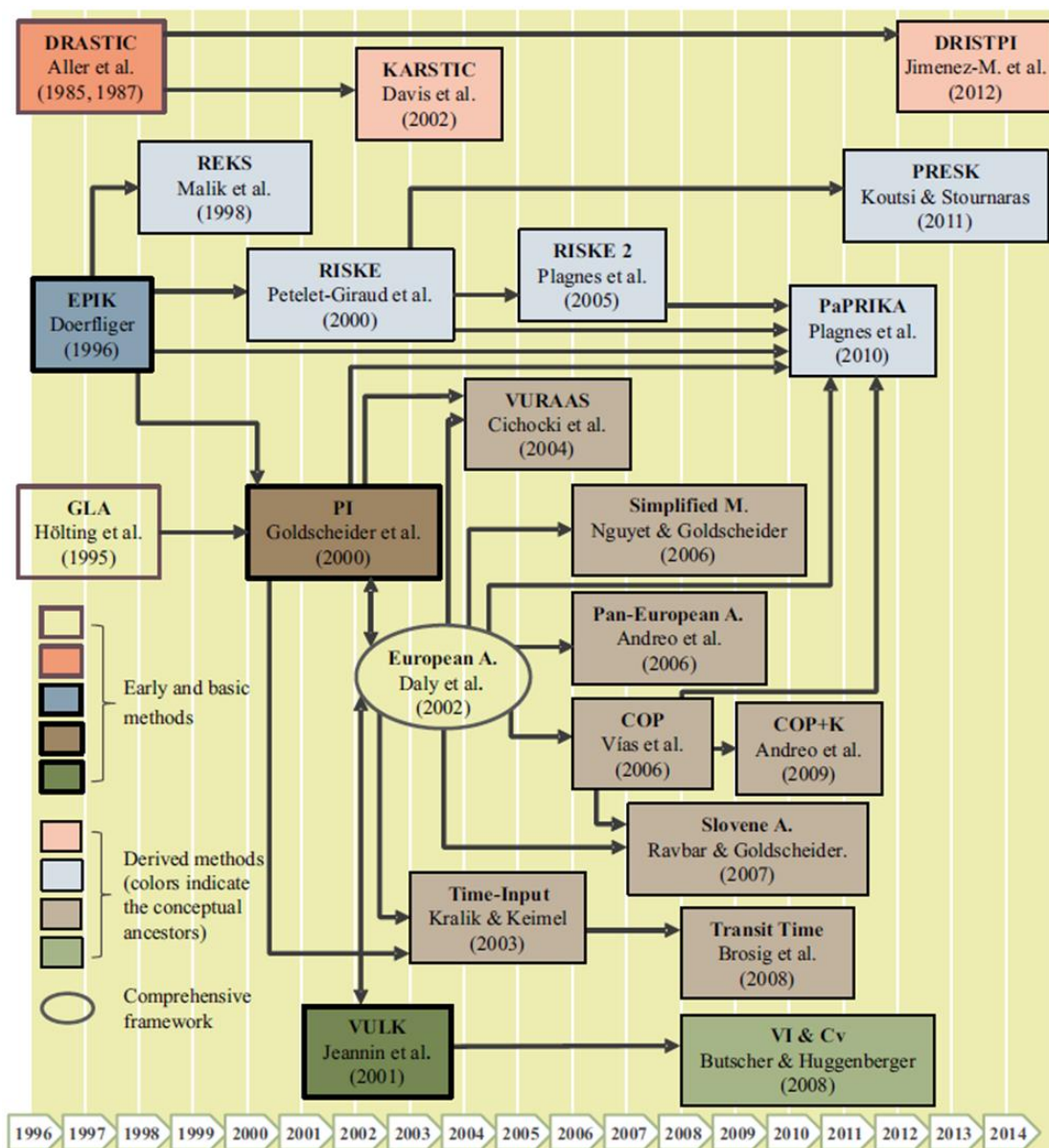
Η τρωτότητα των καρστικών συστημάτων εξαρτάται επίσης από τον χρόνο παραμονής του νερού στα διάφορα τμήματα του υδροφορέα όπως (Dörfliger et al., 1999):

1. Το ενδοκάρστ ή κορεσμένο καρστ: Πρόκειται για ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο καρστικών αγωγών στο οποίο η ταχύτητα ροής των υδάτων εντός των αγωγών είναι υψηλή. Ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο καρστικών αγωγών συνεπάγεται υψηλή τρωτότητα.
2. Το επικάρστ: Αποτελεί τμήμα της ακόρεστης ζώνης εντός του οποίου δημιουργούνται επικρεμάμενοι υδροφόροι ορίζοντες, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα των υδάτων συνεχίζει την πορεία της προς την κορεσμένη ζώνη. Όσο πιο άμεσα συνδεδεμένο είναι το επικάρστ με δίκτυο αγωγών τόσο υψηλότερη είναι η τρωτότητα των υπόγειων υδάτων.

3. Το προστατευτικό εδαφικό κάλυμμα: Πρόκειται για ιζήματα που υπέρκεινται των ανθρακικών πετρωμάτων. Ο χρόνος παραμονής των υδάτων σε αυτό το στρώμα εξαρτάται από την διαπερατότητα και το πάχος του.

3.3. Μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας

Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας σε καρστικούς υδροφορείς.



Σχήμα 3.2: Χρονική εξέλιξη των μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας σε καρστικούς υδροφορείς (Iván and Mádl-Szőnyi, 2017).

Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι βαθμονόμησης για την εκτίμηση της τρωτότητας των καρστικών υδροφόρων, σύμφωνα με τη χρονική σειρά δημοσίευσής τους.

3.3.1. Μέθοδος DRASTIC

Η μέθοδος DRASTIC (Aller et al., 1987) δημιουργήθηκε από τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ. Είναι η πρώτη μέθοδος για την εκτίμηση της τρωτότητας που προτάθηκε και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους υδροφορέα, ωστόσο έχει κάποιους περιορισμούς για τους καρστικούς.

Το ακρωνύμιο DRASTIC προέρχεται από τα αρχικά γράμματα των επτά παραμέτρων του υδροφορέα που αξιολογεί και συγκεκριμένα των (Polemio et al., 2009):

D – Βάθος στάθμης του υδροφορέα (Depth to Groundwater),

R – Μέγεθος επαναφόρτισης του υδροφορέα (Net recharge),

A – Είδος του υδροφορέα (Aquifer medium),

S – Εδαφικό μέσο (Soil medium),

T – Τοπογραφία (Topography),

I – Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (Impact of the unsaturated zone), και

C – Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα (Conductivity (hydraulic) of the aquifer).

Για κάθε θέση της περιοχής μελέτης προκύπτει ο δείκτης τρωτότητας DRASTIC ($I_{DRASTIC}$) ως το άθροισμα των γινομένων της τιμής κάθε παραμέτρου με το συντελεστή βαρύτητάς τους:

$$I_{DRASTIC} = \sum R(i,7) \times W(1,n) \quad [3.1]$$

όπου,

$P(i,7)$ η τιμή κάθε παραμέτρου,

$W(1,n)$ ο συντελεστής βαρύτητας κάθε παραμέτρου, και

n ο αριθμός των συντελεστών βαρύτητας.

Όσο υψηλότερη η τιμή του δείκτη τρωτότητας, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων ή η τρωτότητα του υδροφορέα (Al-Zabet, 2002).

3.3.2. Μέθοδος SINTACS

Η μέθοδος αναπτύχθηκε από Ιταλούς υδρογεωλόγους (Civita, 1994) και βασίζεται στο μοντέλο DRASTIC.

Το ακρωνύμιο SINTACS προέρχεται από ιταλική ονομασία των επτά παραμέτρων που αξιολογεί (Civita-Maio, 2004):

S – Βάθος της στάθμης του υδροφορέα (Soggicenza),

I – Ενεργή κατείσδυση (Infiltrazione),

N – Ικανότητα απόσβεσης των ρύπων της ακόρεστης ζώνης (Non saturo),

T – Ικανότητα απόσβεσης των ρύπων της εδαφικής ζώνης (Tipologia della copertura),

A – Είδος του υδροφορέα (Aquifero),

C – Υδραυλική αγωγιμότητα (Conducibilita), και

S – Τοπογραφία (Superficie topografica).

Πρόκειται για μία σχετικά πολύπλοκη μέθοδο με την οποία προσδιορίζονται έξι κατηγορίες τρωτότητας. Έχει προκύψει από τη προσαρμογή της μεθόδου DRASTIC στις συνθήκες της Μεσογείου και χρησιμοποιεί τις βασικές της παραμέτρους τροποποιώντας παράλληλα τον τρόπο βαθμονόμησής τους.

Παρέχει τέσσερις τάξεις βαθμονόμησης, ενώ επιπλέον ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί και άλλες όπου θεωρεί ότι απαιτείται (Gogu and Dassargues, 2000).

Όπως φαίνεται στη σχέση 3.2, ο δείκτης τρωτότητας SINTACS υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{SINTACS} = \Sigma [P(i,7) \times W(1,n)] \quad [3.2]$$

όπου,

$P(i,7)$ η τιμή κάθε παραμέτρου,

$W(1,n)$ ο συντελεστής βαρύτητας κάθε παραμέτρου, και

n ο αριθμός των συντελεστών βαρύτητας.

3.3.3. Μέθοδος EPIK

Η μέθοδος EPIK (Doerfliger et al., 1999) υπήρξε μία από τις πρώτες μεθόδους εκτίμησης της γενικής τρωτότητας των καρστικών υδροφορέων. Αναπτύχθηκε για τη μελέτη των καρστικών υδροφορέων της Ελβετίας.

Η ονομασία της προέρχεται από τα αρχικά των τεσσάρων παραμέτρων που αξιολογούνται:

E – Επικάρστ (Epikarst),

P – Προστατευτικό κάλυμμα (Protective cover),

I – Συνθήκες κατείδουσας (Infiltration conditions), και

K – Ανάπτυξη καρστικού δικτύου (Karst network development).

Κάθε παράμετρος διαιρείται σε τρεις ή τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την προστασία που προσφέρει στο σύστημα (πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή αντίστοιχα) (βλέπε Πίνακες 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4) σε κάθε σημείο της περιοχής και η τελική τιμή του παράγοντα προστασίας (F_p) υπολογίζεται από τη σχέση 3.3 (Βουδούρης και Καζάκης, 2020):

$$F_p = 3 \times E + 1 \times P + 3 \times I + 2 \times K \quad [3.3]$$

όπου E , P , I και K οι βαθμολογίες των τεσσάρων μεταβλητών (E , P , I και K αντίστοιχα).

Υψηλές τιμές του παράγοντα προστασίας F_r συμβολίζουν αυξημένη φυσική προστασία του υδροφορέα και συνεπώς μικρή τιμή τρωτότητας (Vogelbacher et al., 2019, Βουδούρης και Καζάκης, 2020, Nekkoub et al., 2020).

Πίνακας 3.1: Παράμετρος E , Επικάρστ.

Επικάρστ	Χαρακτηριστικές καρστικές μορφές
Καλά ανεπτυγμένο E_1	Δολίνες, καταβόθρες, έντονες ρηγμάτωσεις κ.λπ.
Μετρίως ανεπτυγμένο E_2	Διαδοχικές δολίνες, έντονες ρηγμάτωσεις.
Ελαφρώς ανεπτυγμένο ή απουσία E_3	Απουσία καρστικών μορφολογικών φαινομένων και χαμηλή πυκνότητα ρηγμάτωσης.

Πίνακας 3.2: Παράμετρος P , Προστατευτικό κάλυμμα.

Προστατευτικό κάλυμμα	Χαρακτηρισμός	
	Περίπτωση Α	Περίπτωση Β
P_1	0-20 cm εδάφους	0-20 cm εδάφους υπερκείμενο στρωμάτων με πάχος <1 m.
P_2	20-100 cm εδάφους	20-100 cm εδάφους υπερκείμενο στρωμάτων με πάχος <1 m.
P_3	100-200 cm εδάφους	<100 cm εδάφους ή >100 cm εδάφους και ύπαρξη στρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας με πάχος >100 cm.
P_4	> 200 cm εδάφους	>100 cm εδάφους και μεγάλου πάχους κλαστικά στρώματα με πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα ή >8 m γεωλογικών σχηματισμών με χαμηλή υδροπερατότητα (άργιλος ή αργιλώδης ιλύς).

Περίπτωση Α: Παρουσία εδάφους κατευθείαν υπερκείμενου των ασβεστολίθων ή αδρομερών κλαστικών στρωμάτων (π.χ. πλευρικά κορήματα) με υψηλή υδροπερατότητα.

Περίπτωση Β: Παρουσία εδάφους επάνω σε χαμηλής υδροπερατότητας γεωλογικά στρώματα.

Πίνακας 3.3: Παράμετρος I, Συνθήκες κατείδυσης.

Συνθήκες κατείδυσης	Χαρακτηρισμός
I ₁ Σημειακή	Μόνιμη ή παροδική επιφανειακή τροφοδοσία μιας καταβόθρας από ένα υδρόρεμα-λεκάνες απορροής των ανωτέρω υδρορεμάτων.
I ₂	Περιοχές της λεκάνης απορροής της περίπτωσης I ₁ με κλίση >10% για καλλιεργούμενες περιοχές και 25% για λιβάδια και βοσκοτόπους.
I ₃	Περιοχές της λεκάνης απορροής της περίπτωσης I ₁ με κλίση.
I ₄ Διάχυτη	Η υπόλοιπη λεκάνη απορροής.

Πίνακας 3.4: Παράμετρος K, Ανάπτυξη καρστικού δικτύου.

Καρστικό δίκτυο	Χαρακτηρισμός
K ₁	Παρουσία ενός καλά ανεπτυγμένου καρστικού δικτύου.
K ₂	Παρουσία ενός φτωχά ανεπτυγμένου καρστικού δικτύου.
K ₃	Μη καρστικός υδροφορέας με διακλάσεις. Παρουσία μιας πηγής σε πορώδες μέσον τροφοδοτούμενη από καρστικό υδροφορέα.

3.3.4. Μέθοδος REKS

Η μέθοδος REKS δημιουργήθηκε προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες αξιόπιστης εκτίμησης ορισμένων εκ των παραγόντων που αξιολογούνται στην μέθοδο EPIK, σε μία εφαρμογή υπολογισμού της τρωτότητας ενός καρστικού υδροφορέα της Σλοβενίας. Σε αυτή συνεκτιμώνται οι εξής τέσσερις μεταβλητές (Malik and Svasta, 1999):

R – Η εκτίμηση των υδραυλικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων του υποβάθρου (Rocks),

E – Η εμφάνιση επικάρστ (Epikarst),

K – Ο βαθμός καρστικοποίησης (Karstification), και

S – Η ύπαρξη εδαφικού καλύμματος (Soil cover).

Στη μέθοδο REKS δεν χρησιμοποιούνται συντελεστές βαρύτητας για κάθε παράμετρο, όπως συμβαίνει στην μέθοδο EPIK. Η τελική τιμή τρωτότητας προκύπτει από το άθροισμα

των τεσσάρων παραγόντων που προαναφέρθηκαν και μπορεί να κυμαίνεται από < 5 (πολύ χαμηλή τρωτότητα) έως > 10 (πολύ υψηλή τρωτότητα) (Malik and Svasta, 1999).

3.3.5. Μέθοδος PI

Η μέθοδος PI (Goldsheider et al., 2000) αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της εγγενούς τρωτότητας των υδροφορέων, ιδιαίτερα των καρστικών. Μαζί με τις EPIK και DRASTIC θεωρούνται η βάση για το σχεδιασμό ποικίλων μεταγενεστέρων τεχνικών. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη καρστική περιοχή Engen της νοτιοδυτικής Γερμανίας και βασίζεται στην αξιολόγηση δύο συντελεστών, P και I, από τους οποίους προκύπτει η ονομασία της.

Ο παράγοντας P (Effectiveness of the protective cover) αφορά τη προστασία που προσφέρει το υπερκείμενο κάλυμμα στον υδροφορέα. Η προστασία αυτή είναι συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους του εδάφους, του υπεδάφους, των μη καρστικών σχηματισμών καθώς και της ακόρεστης ζώνης των καρστικών σχηματισμών. Η εκτίμησή του πραγματοποιείται με μία τεχνική ελαφρώς τροποποιημένη σε σχέση με αυτή που πρότειναν οι Holting et al. (1995) στη μέθοδο GLA (Goldsheider et al., 2000).

Για την εκτίμηση του παράγοντα P πραγματοποιείται προηγουμένως μία ταξινόμηση πέντε παραμέτρων στη περιοχή ενδιαφέροντος (T – Υπερκείμενο εδαφικό κάλυμμα, R – Επαναφόρτιση του υδροφορέα, S – Υπέδαφος, L – Λιθολογία και F – Ρωγμάτωση). Στη συνέχεια συνυπολογίζοντας το πάχος κάθε στρώματος (M), το αδιαπέρατο υπόβαθρο (B = L × F) και την αρτεσιανή πίεση (A), προκύπτει σύμφωνα με τη Σχέση 3.4 η τιμή της παραμέτρου PTS (Goldsheider et al., 2000).

$$PTS = [T + (\sum_{i=1}^n B_i \cdot M_i + \sum_{l=1}^m S_l \cdot M_l)] \times R + A \quad [3.4]$$

Η προστασία του προστατευτικού καλύμματος (PTS) μπορεί να πάρει τιμές από < 10 (πολύ χαμηλή προστασία – πολύ υψηλή τρωτότητα) έως < 10.000 (πολύ υψηλή προστασία – πολύ χαμηλή τρωτότητα). Βάσει της τιμής της παραμέτρου PTS, ο παράγοντας P ταξινομείται σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με τη προστασία που προσφέρει στο σύστημα (Goldsheider et al., 2000).

Ο παράγοντας I (Infiltration conditions) αφορά τις συνθήκες διήθησης σύμφωνα με τις οποίες τα ύδατα που κινούνται στη επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους καταλήγουν στον υδροφόρα. Είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του εδάφους, των χρήσεων γης, της βλάστησης, της κλίσης του εδάφους και των καρστικών χαρακτηριστικών τα οποία επιτρέπουν στα επιφανειακά ύδατα να καταλήγουν με ταχύ ρυθμό στον υπόγειο υδροφόρα (Goldsheider et al., 2000).

Ο παράγοντας I υπολογίζεται μέσω μιας διαδικασίας τριών βημάτων. Πρώτα προσδιορίζεται το είδος της ροής και στην συνέχεια εκτιμάται ο συντελεστής I' ανάλογα με το είδος της ροής, τη κλίση της και το είδος της βλάστησης. Τέλος, υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή I ως συνάρτηση του I', η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 0.0 έως 1.0 (Ghanem et al., 2017).

Ο τελικός συντελεστής προστασίας π, προκύπτει από το γινόμενο των παραγόντων P και I:

$$\pi = P \times I \quad [3.5]$$

Κυμαίνεται από 0.0 έως 5.0, όπου οι υψηλές τιμές υποδηλώνουν μεγάλη φυσική προστασία του υδροφόρα και χαμηλό βαθμό τρωτότητας (Ghanem et al., 2017).

3.3.6. Μέθοδοι RISKE και RISKE 2

Η μέθοδος RISKE (Petelet Giraud et al., 2000) αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της τρωτότητας καρστικών υδροφορέων και βασίζεται στην αρχή της μεθόδου EPIK. Η ονομασία προέρχεται από τα αρχικά των παραμέτρων:

R – Λιθολογία του υδροφόρα (Aquifer rock),

I – Συνθήκες κατείσδυσης (Infiltration conditions),

S – Έδαφος (Soil),

K – Βαθμός καρστικοποίησης (Degree of karstification), και

E – Παρουσία επικάρστ (Epikarst presence or absence).

Κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους αξιολογείται και διακρίνεται σε εύρη τιμών. Με τη βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών είναι δυνατό να κατασκευαστούν πέντε θεματικοί χάρτες στους οποίους να παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις κάθε παραμέτρου αντίστοιχα (Kattaa et al., 2010).

Ο υπολογισμός του δείκτη τρωτότητας κατά RISKE προκύπτει από άθροισμα των γινομένων των τιμών κάθε παραμέτρου επί τον συντελεστή βαρύτητας κάθε παραμέτρου (Kattaa et al, 2010):

$$I_{RISKE} = \alpha \times Ri + \beta \times Ij + \delta \times Sk + \gamma \times Kl + \varepsilon \times Em \quad [3.6]$$

όπου, α , β , γ , δ , ε οι συντελεστές βαρύτητας κάθε παραμέτρου, οι οποίοι δέχονται τιμές από 1 έως 4.

Η μέθοδος RISKE 2 (Plagnes et al., 2005) αποτελεί βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου RISKE, στην οποία το τμήμα του επικάρστ θεωρείται ξεχωριστός υδροφορέας και ταξινομείται ανάλογα με την πλευρική του εξάπλωση, την αποθηκευτική του ικανότητα και σύμφωνα με την υδρογεωλογική του λειτουργία αντί της αξιολόγησης των καρστικών του χαρακτηριστικών (Kavouri et al., 2011).

3.3.7. Μέθοδος KARSTIC

Η μέθοδος KARSTIC (Davis et al., 2002) είναι μία τροποποιημένη εκδοχή της ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου DRASTIC για τους καρστικούς υδροφορείς. Η ονομασία της προέρχεται από τα αρχικά των επτά παραμέτρων που αξιολογούνται:

K – Επιφανειακές καρστικές μορφές με επιφανειακή επανατροφοδότηση (Karst sinkholes with surface recharge),

A – Είδος του υδροφορέα (Aquifer medium),

R – Ρυθμός επανατροφοδότησης (Recharge rate),

S – Εδαφικό μέσο (Soil medium),

T – Ανάγλυφο (Topography),

I – Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (Impact of the unsaturated zone), και

C – Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα (Conductivity (hydraulic) of the aquifer).

Η παράμετρος D (Βάθος της πιεζομετρικής στάθμης) της μεθόδου DRASTIC αντικαταστάθηκε από την παράμετρο K και η επίδραση της βάθους ενσωματώθηκε στην παράμετρο I (Inán and Mádl-Szőnyi, 2017).

Κατά την αξιολόγηση του παράγοντα K συνυπολογίζονται παράμετροι που αφορούν τη γεωλογία και την ανάπτυξη καρστικών δομών του υδροφορέα (Davis et al., 2002).

Για κάθε παράμετρο εκτιμάται μία τιμή και ένα συντελεστής βαρύτητας που σχετίζονται με τη συμβολή τους στη προστασία του υδροφορέα. Για παράδειγμα η παράμετρος T, που αφορά τη κλίση της επιφάνειας του εδάφους έχει ιδιαίτερη αξία διότι επηρεάζει τη ποσότητα των υδάτων που κατεϊσδύουν. Μικρή κλίση εδάφους συνεπάγεται μεγαλύτερη κατεϊσδυση κατακρημνισμάτων και ρύπων στον υδροφορέα και δέχεται μεγαλύτερη τιμή. Αντίθετα, η έντονη κλίση του εδάφους συμβάλλει στη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή και στο περιορισμό της κατεϊσδυσης και δέχεται μικρότερες τιμές.

Ομοίως, οι συντελεστές βαρύτητας είναι μεγαλύτεροι για τις παραμέτρους που έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη προστασία του υδροφορέα. Για παράδειγμα, ο συντελεστής βαρύτητας της ανάπτυξης του καρστικού δικτύου (K) είναι μεγαλύτερος από εκείνον της κλίσης (T) (Davis et al., 2002).

3.3.8. Μέθοδοι COP και COP+K

Η μέθοδος COP (Vias et al., 2002) εκτιμά την τιμή της εγγενούς τρωτότητας των υπόγειων υδάτων σε ανθρακικούς υδροφορείς ποικίλου βαθμού καρστικοποίησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε συστήματα διάχυτης όσο και σημειακής ροής, σε διάφορες κλιματικές συνθήκες και κυρίως στις μεσογειακές συνθήκες.

Το ακρωνύμιο COP προκύπτει από τα αρχικά των τριών παραμέτρων που αξιολογούνται. Πιο αναλυτικά πρόκειται για τις (Vías et al., 2006):

C – Συγκέντρωση ροής (Flow concertation),

O – Ιδιότητες των υπερκείμενων στρωμάτων (Overlying layers), και

P – Κατακρημνίσματα (Precipitation).

Με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα καρστικά χαρακτηριστικά μειώνουν τη φυσική προστασία που προσφέρουν οι υπερκείμενοι σχηματισμοί.

Η παράμετρος O αξιολογεί τη προστασία που προσφέρουν οι ιδιότητες και το πάχος της ακόρεστης ζώνης στον υδροφορέα. Για την εκτίμησή του εξετάζονται οι υπο-παράμετροι O_s – Έδαφος (Soil) και O_L - Λιθολογικά στρώματα της ακόρεστης ζώνης (Lithology subfactor).

Η εκτίμηση της παραμέτρου C που αφορά τη συγκέντρωση της ροής, βασίζεται στις μεθόδους PI (Goldscheider et al., 2000) και EPIK (Doerfliger, 1996). Έχουν διατυπωθεί δύο σενάρια για τον τρόπο υπολογισμού της (Vías et al., 2006).

Το πρώτο σενάριο αφορά την κατάσταση όπου εμφανίζεται επιφανειακή απορροή λόγω της ύπαρξης εδαφικών στρωμάτων χαμηλής περατότητας. Το δίκτυο της επιφανειακής απορροής οδηγείται σε περιοχές σημειακής κατείσδυσης, στις οποίες το νερό εμφανίζει υψηλές ταχύτητες (Vías et al., 2006).

Το δεύτερο σενάριο αφορά την κατάσταση κατά την οποία εμφανίζεται διάχυτη κατείσδυση σε μία περιοχή (Vías et al., 2006).

Η παράμετρος P περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά των κατακρημνισμάτων που επηρεάζουν τον ρυθμό κατείσδυσης, όπως ο όγκος τους, η χρονική τους κατανομή, η έντασή και η διάρκειά τους. Για την εκτίμησή του εξετάζονται οι υπο-παράγοντες P_a (ποσότητα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων) και P_i (ένταση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων) (Vías et al., 2006).

Οι παράμετροι C και P χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, ώστε να υπολογίζεται με περισσότερη βεβαιότητα η προστασία που προσφέρουν τα υπερκείμενα στρώματα στον υδροφορέα. Οι παράμετροι O και C αφορούν τα χαρακτηριστικά του χώρου στον οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά του ρύπου, ενώ η παράμετρος P τα χαρακτηριστικά του

μέσου (νερό) που μεταφέρει τους ρύπους διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (Vías et al., 2006).

Η εκτίμηση του τελικού δείκτη τρωτότητας κατά COP υπολογίζεται ως το γινόμενο των τιμών των τριών παραμέτρων:

$$I_{COP} = C \times O \times P \quad [3.7]$$

Σύμφωνα με τον δείκτη τρωτότητας COP προκύπτουν πέντε τάξεις τρωτότητας, από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή (15 έως 0 αντίστοιχα) (Vías et al., 2006).

Η μέθοδος COP+K (Andreo et al., 2009) αποτελεί επέκταση της μεθόδου COP για την εκτίμηση της τρωτότητας των υδροληπτικών έργων σε καρστικούς υδροφόρους (source protection). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα κάθε τύπου ροής και υπό ποικίλες κλιματικές συνθήκες.

Για την εφαρμογή της απαιτείται η εκτίμηση της τρωτότητας όπως ορίζει η απλή μέθοδος COP και επιπλέον η αξιολόγηση ακόμη μιας παραμέτρου που αφορά τις ιδιότητες της κορεσμένης καρστικής ζώνης (K – Karst saturated zone). Για αυτόν τον σκοπό εκτιμάται η επίδραση των εξής τριών μεταβλητών (Andreo et al., 2009):

- Χρόνος μετακίνησης (t),
- Βαθμός διασύνδεσης και συνεισφοράς των διαφόρων σημείων του υδροφορέα στη ποσότητα του νερού που εκρέει από την πηγή (r), και
- Πληροφορίες σχετικά με τους καρστικούς αγωγούς στους οποίους πραγματοποιείται απευθείας κατέισδυση των επιφανειακών υδάτων (n).

Η τελική τιμή του παράγοντα K προκύπτει ως το γινόμενο των τιμών των τριών παραπάνω μεταβλητών (Σχέση 3.8) και κυμαίνεται από 0 έως 125 (Andreo et al., 2009).

$$K = t \times r \times n \quad [3.8]$$

Μέσω των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών είναι δυνατόν να παρουσιαστεί ο θεματικός χάρτης της χωρικής μεταβολής του παράγοντα K και ο χάρτης τρωτότητας των υδροληπτικών έργων (Andreo et al., 2009).

3.3.9. Μέθοδος PaPRIKa

Αναπτύχθηκε από τους Dorflieger et al. (2010) και εφαρμόστηκε και δοκιμάστηκε σε εννέα υδροφορείς της Γαλλίας, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από διαφορετικές γεωλογικές, υδρολογικές, τοπογραφικές και κλιματικές συνθήκες ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της στα διαφορετικά δεδομένα που συναντώνται στη χώρα.

Μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση και τη χαρτογράφηση της τρωτότητας τόσο του φυσικού πόρου (resource protection) όσο και του υδροληπτικού έργου (source protection) σε καρστικούς υδροφορείς. Η ονομασία της προέρχεται από τα αρχικά των φράσεων:

Προστασία του υδροφορέα (Pa – Protection of aquifer), μέσω της αξιολόγησης τεσσάρων κριτηρίων και συγκεκριμένα των:

P – Ικανότητα προστασίας στον υδροφορέα (Protection cover) η οποία προέρχεται από το εδαφικό κάλυμμα, την ακόρεστη ζώνη, το επικάρστ και τις ζώνες προστασίας προνομιακών διόδων νερού,

R – Λιθολογία και χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα (Rock type factor),

I – Συνθήκες διήθησης (Infiltration conditions factor) και

Ka – Βαθμός καρστικοποίησης (Karstic degree).

Αυτές οι τέσσερις παράμετροι διακρίνονται σε δύο ομάδες. Οι μεν P και R σχετίζονται με τη δομή του υδροφορέα, ενώ οι I και Ka με την υδρογεωλογική του συμπεριφορά (Dorflieger et al., 2010).

Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, οι παράμετροι ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την προστασία που προσφέρουν στο σύστημα (πολύ χαμηλή

προστασία ή πολύ υψηλή τρωτότητα έως πολύ υψηλή προστασία ή πολύ χαμηλή τρωτότητα). Μέσω των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών μπορούν να προκύψουν οι θεματικοί χάρτες, που παρουσιάζουν με τη βοήθεια της χρωματικής κλίμακας τη μεταβολή των τιμών των τεσσάρων παραμέτρων στη περιοχή μελέτης.

Ο τελικός δείκτης τρωτότητας κατά PaPRIKa σε κάθε περιοχή υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων των τιμών κάθε παραμέτρου επί το συντελεστή βαρύτητάς της:

$$Vg = r \times R + p \times P + i \times I + k \times Ka \quad [3.9]$$

όπου, r , p , i , k οι συντελεστές βαρύτητας κάθε παραμέτρου, το άθροισμα των οποίων ισούται με τη μονάδα.

Συνήθως το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας της πρώτης ομάδας παραμέτρων (P και R) είναι ίσο με 0.4 και των υπολοίπων δύο (I και Ka) ίσο με 0.6 (Dorflieger et al., 2010).

Από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτουν δύο χάρτες τρωτότητας: Ο χάρτης τρωτότητας του φυσικού πόρου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους ενδιαφερόμενους ως εργαλείο για τον έλεγχο της διάχυτης ρύπανσης και την αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων και ο χάρτης τρωτότητας στη θέση σύλληψης του έργου υδροληψίας για την πρόληψη της μόλυνσης από τυχαία ρύπανση και για τον καθορισμό των απαραίτητων ζωνών προστασίας του πόσιμου νερού στους καρστικούς υδροφορείς (Kavouri et al., 2011).

3.3.10. Η μέθοδος PRESK

Η μέθοδος PRESK (Koutsi and Stournaras, 2011) αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της τρωτότητας σε ανθρακικούς υδροφορείς. Αποτελεί μία προσαρμογή της μεθόδου RISKE ειδικά για την περιοχή της Μεσογείου και χρησιμοποιεί τις ίδιες παραμέτρους με ορισμένες τροποποιήσεις και απλοποιήσεις.

Το ακρωνύμιο PRESK προκύπτει από τα αρχικά των πέντε παραμέτρων που αξιολογούνται και συγκεκριμένα των:

P – Προστασία του υδροφορέα (Protection),

R – Λιθολογία του υδροφορέα (Type of rock),

E – Εμφάνιση επικάρστ (Epikarst),

S – Εδαφικό κάλυμμα (Soil cover), και

K – Βαθμός καρστικοποίησης (Karstification degree).

Κάθε παράμετρος διαιρείται σε τέσσερεις κατηγορίες (0 – 3) ανάλογα με την προστασία που προσφέρει στο σύστημα (πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή αντίστοιχα).

Οι πέντε παράμετροι αξιολογούνται και η τελική τιμή του παράγοντα προστασίας (I_g) υπολογίζεται από τη σχέση 3.10 (Koutsis and Stournaras, 2011).

$$I_{PRESK} = 0.263 \times Pi + 0.0971 \times Rj + 0.160 \times En + 0.419 \times Sk + 0.062 \times Km \quad [3.10]$$

όπου, Pi , Rj , En , Sk , Km οι βαθμολογίες των πέντε παραμέτρων της μεθόδου (P , R , E , S και K , αντίστοιχα).

Ειδικά για την εκτίμηση της παραμέτρου P μελετώνται οι υπο-παράγοντες I – Inclination (Κλίση) και V – Vegetation (Φυτοκάλυψη). Η κλίση συνδέεται άμεσα με τη ποσότητα των υδάτων που κατεισδύουν καθώς η χαμηλή κλίση οδηγεί σε διάχυτη κατείσδυση ενώ αντίθετα η αύξηση της κλίσης προκαλεί αύξηση της επιφανειακής απορροής.

Η υπο-παράμετρος I διαιρείται σε τέσσερεις κατηγορίες ανάλογα με τη γωνία της κλίσης του εδάφους (Πίνακας 3.5).

Πίνακας 3.5: Υπο-παράμετρος I , Κλίση (Koutsis and Stournaras, 2011).

Κλίση (I)	Περιγραφή	Κλίση %
I_0	Πολύ απότομη κλίση	$> 45^\circ$
I_1	Απότομη κλίση	$25^\circ - 45^\circ$
I_2	Μέτρια κλίση	$5^\circ - 25^\circ$
I_3	Χαμηλή κλίση	$0^\circ - 5^\circ$

Η υπο-παράμετρος της φυτοκάλυψης εξαρτάται από την παρουσία και τη πυκνότητα της χλωρίδας και επηρεάζει τη τιμή της εξατμισοδιαπνοής. Διακρίνεται στις τέσσερις κατηγορίες του Πίνακα 3.6 (Koutsis and Stournaras, 2011).

Πίνακας 3.6: Υπο-παράμετρος V, Φυτοκάλυψη (Koutsis and Stournaras, 2011).

Φυτοκάλυψη (V)	Περιγραφή
V ₀	Δάση
V ₁	Αραιά δέντρα και πυκνοί θάμνοι
V ₂	Αραιοί θάμνοι και δέντρα και καλλιεργημένες εκτάσεις
V ₃	Απουσία φυτοκάλυψης

Η τελική παράμετρος P ορίζεται ως το άθροισμα των γινομένων των τιμών των υπο-παραμέτρων I και V επί τους συντελεστές βαρύτητάς τους 4/5 και 1/5, αντίστοιχα (σχέση 3.11).

$$P = 0.8 \times I + 0.2 \times V \quad [3.11]$$

Η παράμετρος R, που σχετίζεται με τη λιθολογία και τη τεκτονική του υδροφορέα επηρεάζει τη κατείσδυση των υδάτων και διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες (Πίνακας 3.7).

Πίνακας 3.7: Παράμετρος R, Λιθολογία και τεκτονική (Koutsis and Stournaras, 2011).

Λιθολογία και τεκτονική (R)	Περιγραφή
R ₀	Σκληρά, ρωγματωμένα πετρώματα
R ₁	Αλλουβιακοί σχηματισμοί, κορήματα και κροκαλοπαγή
R ₂	Μικρού πάχους, ελαφρώς κερματισμένοι και ρωγματωμένοι ανθρακικοί σχηματισμοί
R ₃	Μεγάλου πάχους ελαφρώς κερματισμένοι και ρωγματωμένοι ανθρακικοί σχηματισμοί και μικρού πάχους έντονα κερματισμένοι και ρωγματωμένοι ανθρακικοί σχηματισμοί

Η παράμετρος E αφορά τον τύπο της επικαρστικής ζώνης και διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση το πάχος της όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.8.

Η παράμετρος S αφορά το εδαφικό κάλυμμα που υπέρκειται του καρστικού υδροφορέα και ταξινομείται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με το πάχος του (Πίνακας 3.9).

Πίνακας 3.8: Παράμετρος E, Επικαρστική ζώνη (Koutsis and Stournaras, 2011).

Επικαρστική ζώνη (E)	Περιγραφή	Πάχος
E ₀	Καλά ανεπτυγμένη επικαρστική ζώνη	> 1m
E ₁	Μέτρια ανεπτυγμένη επικαρστική ζώνη	50 cm – 1 m
E ₂	Φτωχά ανεπτυγμένη επικαρστική ζώνη	< 50 cm
E ₃	Απουσία επικαρστικής ζώνης	-

Πίνακας 3.9: Παράμετρος S, Εδαφικό κάλυμμα (Koutsis and Stournaras, 2011).

Επικαρστική ζώνη (E)	Περιγραφή	Πάχος
S ₀	Μεγάλου πάχους εδαφικό κάλυμμα	> 5 m
S ₁	Μέτριου πάχους εδαφικό κάλυμμα	1 m – 5 m
S ₂	Μικρού πάχους εδαφικό κάλυμμα	< 1 cm
S ₃	Απουσία εδαφικού καλύμματος	-

Πίνακας 3.10: Παράμετρος K, Ανάπτυξη καρστικού δικτύου (Koutsis and Stournaras, 2011).

Ανάπτυξη καρστικού δικτύου (K)	Περιγραφή
K ₀	Υδροφορέας με φτωχά ανεπτυγμένο καρστικό δίκτυο ή με απουσία καρστ
K ₁	Υδροφορέας με ρωγματωμένα αλλά όχι καρστικοποιημένα πετρώματα
K ₂	Υδροφορέας με φτωχή ανάπτυξη καρστικού δικτύου
K ₃	Υδροφορέας με καλά ή πολύ καλά ανεπτυγμένο καρστικό δίκτυο

Τέλος, η παράμετρος K αφορά την ανάπτυξη του καρστικού δικτύου που επηρεάζει την ταχύτητα των υπόγειων υδάτων και ταξινομείται σε τέσσερις κατηγορίες (Πίνακας 3.10).

3.3.8. Μέθοδος DRISTPi

Η μέθοδος DRISTPi που αναπτύχθηκε για τους καρστικούς υδροφορείς της Ισπανίας (Jiménez-Madrid et al., 2013) βασίζεται στο παλαιότερο μοντέλο της μεθόδου DRASTIC (Aller et al., 1987). Το ακρωνύμιο DRISTPi προέρχεται από τα αρχικά των παραμέτρων που αξιολογούνται στη μέθοδο και συγκεκριμένα:

D – Βάθος των υδάτων (Water depth),

R – Εμπλουτισμός του υδροφορέα (Net recharge),

I – Λιθολογία της ακόρεστης ζώνης (Impact of the vadose zone),

S – Εδαφικός σχηματισμός (Soil media),

T – Τοπογραφία (Topography), και

Pi – Θέσεις προνομιακής κατείδυσης (Preferential infiltration).

Η παράμετρος Pi αφορά τις περιοχές εκείνες όπου αναπτύσσεται εκλεκτική και ραγδαία κατείδυση των υδάτων προς τον υδροφορέα, όπως σε δολίνες και πόλγες με αποτέλεσμα να καθίσταται περισσότερο τρωτός στη ρύπανση (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Πρόκειται για μία σχετικά νέα μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ανθρακικούς υδροφορείς και εστιάζει περισσότερο στη προστασία του φυσικού πόρου (resource protection) και λιγότερο στη προστασία των υδροληπτικών έργων (source protection).

Αφαιρέθηκαν οι παράμετροι A – Λιθολογία του υδροφορέα (Aquifer lithology) και C – Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity) της μεθόδου DRASTIC, που σχετίζονται κυρίως με την οριζόντια και κατακόρη κίνηση των νερών εντός του υδροφορέα αντίστοιχα (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Η εκτίμηση των παραμέτρων S, T και L πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αρχές της μεθόδου DRASTIC, και η εκτίμηση των P_i και D διαφέρει αναλόγως με τον αν πρόκειται για πετρώματα που έχουν υποστεί καρστικοποίηση ή όχι (Jiménez-Madrid et al., 2013). Κάθε παράμετρος αξιολογείται ανάλογα με την προστασία που προσφέρει στο σύστημα (πολύ υψηλή έως πολύ χαμηλή αντίστοιχα).

Πιο αναλυτικά, η παράμετρος D αφορά το βάθος του υδροφορέα και βαθμολογείται με βάση τον Πίνακα 3.11. Η ύπαρξη του υδροφορέα σε μικρά βάθη επικουρεί στη τρωτότητά του.

Η παράμετρος R αφορά την επαναφόρτιση του υδροφορέα και ταξινομείται σε οκτώ κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της σε mm ανά έτος (Πίνακας 3.12). Όσο εντονότερη είναι η επαναφόρτιση του υδροφορέα, τόσο αυξάνεται η τρωτότητά του.

Πίνακας 3.11: Παράμετρος D, Βάθος υδροφορέα (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Βάθος υδροφορέα (m)	Βαθμολογία D
0 - 5	10
5 - 15	9
15 - 30	7
30 - 50	5
50 - 75	3
75 - 100	2
>100	1

Πίνακας 3.12: Παράμετρος R, Επαναφόρτιση (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Επαναφόρτιση (mm/year)	Βαθμολογία R
0 - 20	1
20 - 50	2
50 - 100	4
100 - 150	6
150 - 200	7
200 - 250	8
250 - 300	9
>300	10

Η παράμετρος I, αφορά την ακόρεστη ζώνη και διακρίνεται σε οκτώ ομάδες ανάλογα με το είδος της ακόρεστης ζώνης (Πίνακας 3.13).

Η παράμετρος S, αφορά το εδαφικό μέσο και βαθμολογείται από 1 έως 10 ανάλογα με το είδος του εδάφους (Πίνακας 3.14).

Η παράμετρος T, αφορά τη κλίση της επιφάνειας του εδάφους και διακρίνεται σε πέντε ομάδες ανάλογα με το ποσοστό της (Πίνακας 3.15).

Η παράμετρος P_i, αφορά την προνομοιακή κατείδυση στη ζώνη τροφοδοσίας του υδροφορέα και διακρίνεται σε διαφορετικές ομάδες για καρστικούς και μη καρστικούς σχηματισμούς (Πίνακας 3.16).

Πίνακας 3.13: Παράμετρος I, Ακόρεστη ζώνη (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Ακόρεστη ζώνη	Βαθμολογία I
Βράχος	1
Άργιλος	2
Άργιλος / ιλύς / σχιστόλιθος	3
Πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα	4
Ασβεστόλιθος ή ψαμμίτης / άμμος και χαλίκι με ιλύ και άργιλο	6
Άμμος και χαλίκι	8
Βασάλτης	9
Καρστ	10

Πίνακας 3.14: Παράμετρος S, Εδαφικό μέσο (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Εδαφικό μέσο	Βαθμολογία S
Άργιλος / Ασβεστόλιθος / Μάργα	1
Μαύρη γη	2
Παχύ στρώμα αργίλου	3
Παχύ στρώμα Ιλύος	4
Πηλός	5

Παχύ στρώμα άμμου	6
Αργιλώδες έδαφος με ρωγματώσεις	7
Τύρφη	8
Άμμος	9
Λεπτό χαλικώδες έδαφος	10

Πίνακας 3.15: Παράμετρος *T*, Κλίση (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Κλίση (%)	Βαθμολογία <i>T</i>
+18	1
12 - 18	3
6 - 12	5
2 - 6	9
0 - 2	10

Πίνακας 3.16: Παράμετρος *Pi*, Προνομιακή κατείσδυση (Jiménez-Madrid et al., 2013).

	Προνομιακή κατείσδυση	Βαθμολογία <i>Pi</i>
Καρστικοί σχηματισμοί	Διάφορες καρστικές δομές	10
	Ποτάμι	10
	Λατομείο	9
	Φαράγγι / ρέμα	7
Μη καρστικοί σχηματισμοί	Ζώνη τροφοδοσίας	10
	Ζώνη έντονης ρωγμάτωσης	6
	Ζώνη μικρής ρωγμάτωσης	3
	Υπόλοιπη περιοχή	1

Ο δείκτης τρωτότητας κατά DRISTPi ($I_{DRISTPi}$) προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων των έξι παραμέτρων επί το συντελεστή βαρύτητάς τους, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχέση 3.12), παίρνει τιμές από 17 έως > 162 οι οποίες διακρίνονται σε πέντε τάξεις, και χαρακτηρίζουν την τρωτότητα από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή αντίστοιχα (Jiménez-Madrid et al., 2013).

$$I_{DRISTPi} = D \times n + R \times 4 + I \times 5 + S \times 2 + T + Pi \times 5 \quad [3.12]$$

όπου,

D, R, I, S, T, Pi οι βαθμολογίες των πέντε παραμέτρων της μεθόδου,

$n = 2$ για πετρώματα που έχουν υποστεί καρστικοποίηση, και

$n = 5$ για πετρώματα που δεν έχουν υποστεί καρστικοποίηση.

Υψηλές τιμές $I_{DRISTPi}$ συμβολίζουν μειωμένη φυσική προστασία του υδροφορέα και συνεπώς υψηλή τιμή τρωτότητας. Σύμφωνα με τους Jiménez-Madrid et. Al (2013), η τρωτότητα του υδροφορέα κατηγοριοποιείται σε πέντε ομάδες ανάλογα με τη τιμή όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.17.

Πίνακας 3.17: Κατηγορίες τρωτότητας καρστικών υδροφορέων κατά $DRISTPi$ (Jiménez-Madrid et al., 2013).

Τιμή τρωτότητας κατά $DRISTPi$	Κατηγορία τρωτότητας
17 - 50	Πολύ χαμηλή
50 - 60	Χαμηλή
60 - 110	Μέτρια
110 - 140	Υψηλή
> 140	Πολύ υψηλή

3.4. Ζώνες προστασίας σημείων νερού

Το νερό πηγαίας προέλευσης αποτελεί έναν ανανεώσιμο φυσικό πόρο. Για να εμπλουτισθεί μετά την εκμετάλλευσή του, αρκούν τα φυσικά κατακρημνίσματα, μέσω της απευθείας κατείσδυσής τους, της διήθησης των επιφανειακών υδάτων ή της υπόγειας τροφοδοσίας από μία γειτονική λεκάνη, εφόσον δεν επέλθει κάποια δραματική αλλαγή στις κλιματικές συνθήκες. Παρά ταύτα, θα μπορούσε κανείς να επισημάνει ότι αρκετά συχνά πραγματοποιείται μία σπατάλη των αποθεμάτων των καθαρών υπόγειων

υδάτων, μέσω της μόλυνσης και της ρύπανσής τους (Goldscheider, 2010, Βουδούρης, 2006).

Η πλειοψηφία των ανθρώπινων δραστηριοτήτων μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων. Η προστασία των υπόγειων υδάτων οφείλει να αποτελεί προτεραιότητα, ιδιαίτερα στις ζώνες εκείνες όπου οι ουσίες μπορούν εύκολα να εισχωρήσουν στον υδροφορέα, ενώ και στις λιγότερο ευαίσθητες ζώνες οι επικίνδυνες δραστηριότητες θα πρέπει να περιορίζονται κατά το δυνατό. Παράλληλα, υδάτινοι όγκοι που δεν υφίστανται εκμετάλλευση επί του παρόντος, θα πρέπει να προστατεύονται για τυχόν μελλοντική χρήση (Goldscheider, 2010).

Ο ορισμός «Ζωνών Προστασίας» των σημείων υδροληψίας και η εφαρμογή ορθών πρακτικών όσον αφορά τη χρήση της γης πλησίον τους, μπορούν να συμβάλουν στην μείωση των ρυπογόνων και μολυσματικών δραστηριοτήτων και συνεπώς στην βιώσιμη εκμετάλλευση των πολύτιμων αυτών πόρων.

Στις Ζώνες Προστασίας των υπόγειων υδάτων απαγορεύονται ή επιβάλλονται όροι σε ορισμένες δραστηριότητες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν την είσοδο ρύπων και μικροοργανισμών σε αυτά και να ρυπάνουν μία περιοχή για την οποία απαιτείται ιδιαίτερη μέριμνα. Πρόκειται για δραστηριότητες που έως εκείνη την στιγμή δεν υπόκειντο σε κάποιο περιορισμό ή διέθεταν ορισμένους περιορισμούς.

Οι περιορισμοί αυτοί συνοδεύονται από ποινικές κυρώσεις σε περίπτωση μη τήρησής τους, παρέχοντας έτσι ένα επιπλέον εργαλείο στην προσπάθεια αντιμετώπισης των ενεργειών που μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση των υδάτινων πόρων. Οι ακριβείς περιορισμοί που επιβάλλονται ποικίλουν και πρέπει κάθε φορά να προσαρμόζονται στις τοπικές συνθήκες. Συνεπώς διαφέρουν αρκετά από κράτος σε κράτος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαφορετικές περιοχές γύρω από το σημείο υδροληψίας έχουν διαφορετικές ανάγκες για προστασία. Επιπλέον, οικονομικοί λόγοι επιβάλλουν η λήψη των αυστηρότερων μέτρων να γίνεται για μικρές περιοχές με μεγαλύτερη ευαισθησία. Αντίθετα στις περιοχές όπου ο κίνδυνος δεν είναι τόσο αυξημένος λαμβάνονται λιγότερο αυστηρά μέτρα.

Ως εκ τούτου, τόσο γύρω από τις άμεσες υδροληψίες, όπως είναι οι πηγές, οι υδρογεωτρήσεις και τα φρέατα, όσο και γύρω από τις έμμεσες, όπως είναι οι θέσεις εμφιάλωσης και απόληψης νερού, διαμορφώνονται ζώνες διαφορετικού βαθμού προστασίας που σε γενικές γραμμές μπορούν να περιγραφούν ως εξής (Στουρνάρας, 2013):

- Ζώνη I: Ζώνη πολύ υψηλής περιμετρικής προστασίας της υδροληψίας με περίφραξη, όπου σε αυτή δεν επιτρέπεται καμία δραστηριότητα.
- Ζώνη II: Ζώνη μέτριας προστασίας, που εκτείνεται γύρω από την πρώτη, δεν διαθέτει περίφραξη και εντός αυτής επιτρέπονται ορισμένες δραστηριότητες.
- Ζώνη III: Ζώνη επιτήρησης, που περικλείει τις άλλες δύο και εντός της επιτρέπονται περισσότερες δραστηριότητες.

Εξωτερικά της τρίτης Ζώνης υπάρχει ελευθερία δραστηριοτήτων και χρήσεων γης.

Το μέγεθος και το σχήμα των Ζωνών Προστασίας μπορεί να εξαρτάται από τις υδρογεωλογικές και τις γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης όπως (European Commission, 2007):

- Το μέγεθος της υδροληψίας.
- Την τρωτότητα του υδροφορέα.
- Τις υδρογεωλογικές ιδιότητες του υδροφορέα.
- Το είδος του ρύπου και των πηγών ρύπανσης. Κατά βάση μεγαλύτερες Ζώνες Προστασίας απαιτούνται στις περιπτώσεις ρύπων με μεγάλο χρόνο ζωής, προερχόμενοι από διάχυτες πηγές, σε αντίθεση με τους περισσότερο εξασθενημένους ρύπους που προέρχονται από μικρές σημειακές πηγές.
- Το κριτήριο βάσει του οποίου σχεδιάζονται οι ζώνες, δηλαδή, αν βασίζονται στον χρόνο μεταφοράς του ρύπου από την πηγή της ρύπανσης έως το σημείο υδροληψίας ή στο μέγεθος της ζώνης τροφοδοσίας. Η πρώτη περίπτωση επιλέγεται συνήθως για τους περισσότερο εξασθενημένους ρύπους, ενώ η δεύτερη για τους πιο επίμονους.

Οι πηγές ρύπανσης ταξινομούνται ανάλογα με τη γεωμετρία τους και το ρυθμό εκπομπής τους. Στη πρώτη περίπτωση, διακρίνονται σε σημειακές (όπως τα ΧΥΤΑ και οι βόθροι), γραμμικές (όπως οι δρόμοι και οι αύλακες) και διάχυτες (όπως η νιτρορύπανση και η όξινη βροχή). Στη δεύτερη περίπτωση, σύμφωνα με το ρυθμό εκπομπής των ρυπογόνων ουσιών, διακρίνονται σε συνεχούς εκπομπής και επαναλαμβανόμενης εκπομπής, περιοδικής ή μη (Βουδούρης, 2016).

Οι πιθανοί ρύποι που μπορεί να εντοπιστούν σε ένα υπόγειο υδροφόρο σύστημα διακρίνονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες (COST Action 620):

1. Ανόργανοι ρύποι:

- Άζωτο
- Φώσφορος
- Βαριά μέταλλα
- Ραδιενεργά στοιχεία

2. Οργανικοί ρύποι:

- Light non-aqueous phase liquids (LNAPLs)
- Dense non-aqueous phase liquids (DNAPLs)
- Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)
- Polychlorinated biphenyls (PCBs)

3. Παρασιτοκτόνα:

- Εντομοκτόνα
- Ζιζανιοκτόνα
- Μυκητοκτόνα
- Νηματωδοκτόνα
- Ακαριοκτόνα
- Τρωκτικοκτόνα

4. Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Επιπλέον, ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων είναι δυνατό να προκύψει λόγω θερμικής αλλοίωσης από νερά ψύξης των βιομηχανιών και από υφαλμύριση του γλυκού νερού στους παράκτιους υδροφορείς (Βουδούρης, 2016).

Σύμφωνα με την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2016), οι δραστηριότητες που ασκούν πιέσεις και επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα των υδάτων των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων είναι οι εξής:

- Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων .
- Οι μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες.
- Οι βιομηχανικές μονάδες (συμπεριλαμβανομένων των θερμοηλεκτρικών σταθμών).
- Οι κτηνοτροφικές μονάδες.
- Οι διαρροές από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) και χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ).
- Οι απορροές από εξορυκτικές δραστηριότητες.
- Οι γεωργικές δραστηριότητες.
- Τα αστικά λύματα που δεν καταλήγουν σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
- Η ποιμενική κτηνοτροφία.
- Άλλες διάχυτες πηγές ρύπανσης, όπως οι εγκαταλελειμμένοι χώροι.
- Οι απολήψεις νερού από υπόγεια ύδατα.
- Ο Τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδάτων.
- Η μεταβολή της υπόγειας στάθμης και της ποσότητας των υπογείων νερών, εξαιτίας υπογείων εκμεταλλεύσεων ή μεγάλων υπογείων έργων και
- Άλλες πηγές, όπως η ανάμειξη όμβριων υδάτων με ρύπους.

3.5. Διαχείριση του προβλήματος σε άλλες χώρες

Ηνωμένο Βασίλειο

Στο Ηνωμένο Βασίλειο το υπόγειο νερό παρέχει το ένα τρίτο του πόσιμου ύδατος. Ιδιαίτερα στην Νότια Αγγλία περίπου το 80% του ύδατος που χρησιμοποιείται είναι υπόγειο. Η πολιτεία έχει την εξουσία να ορίζει τις Ζώνες Προστασίας των υδάτων μέσω της πράξης Water Resources Act, τόσο για τις πηγές όσο και για τις υδρογεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για την παροχή πόσιμου νερού (Environment Agency, 2019a).

Οι πολίτες ενδιαφέρονται και μαθαίνουν ποιες είναι οι υφιστάμενες Ζώνες Προστασίας και ιδιαίτερα όσοι (Environment Agency, 2019a):

- Η κατοικία τους δεν συνδέεται με το κεντρικό αποχετευτικό δίκτυο της περιοχής.
- Δραστηριοποιούνται σε τομείς που μπορούν να επηρεάσουν τα υπόγεια ύδατα.
- Δραστηριοποιούνται στον τομέα εμφιάλωσης νερού.
- Είναι ιδιοκτήτες εκτάσεων που βρίσκονται εντός των ζωνών προστασίας.
- Ενδιαφέρονται για την ποιότητα του νερού της περιοχής τους και

Σχεδιάζονται τρεις Ζώνες Προστασίας: η εσωτερική, η εξωτερική και η τρίτη που αντιστοιχεί στην λεκάνη απορροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σε σπάνιες περιπτώσεις ορίζεται μία τέταρτη. Για τον σχεδιασμό τους χρησιμοποιούνται μοντέλα τα οποία εκτιμούν τον χρόνο μεταφοράς του ρύπου εντός του υδροφορέα έως το σημείο υδροληψίας (Environment Agency, 2019a).

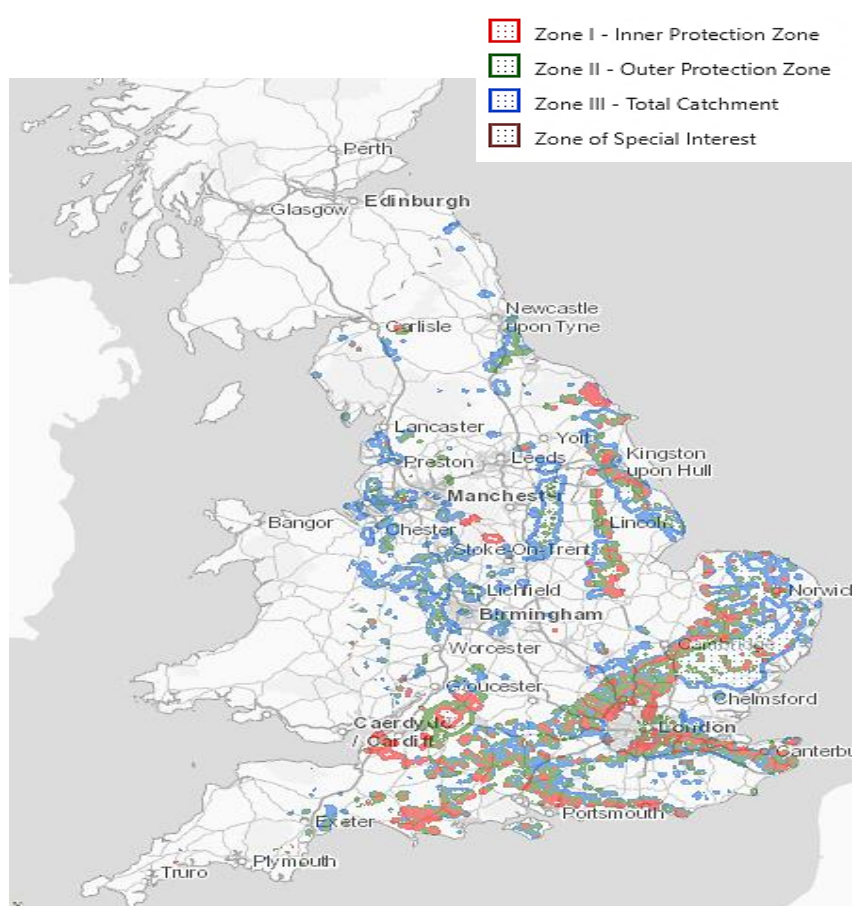
Ειδικότερα, οι Ζώνες Προστασίας ορίζονται ως εξής (Environment Agency, 2019a):

Εσωτερική Ζώνη 1: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας, εντός της οποίας ο ρύπος χρειάζεται 50 ημέρες μέχρι να καταλήξει σε αυτό και έχει ελάχιστη ακτίνα 50 m.

Εξωτερική Ζώνη 2: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας, εντός της οποίας ο ρύπος χρειάζεται 400 ημέρες για να καταλήξει σε αυτό και έχει ελάχιστη ακτίνα 250 m ή 500 m, ανάλογα με τη ποσότητα του νερού που λαμβάνεται.

Ζώνη 3 Απορροής: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας στην οποία καταλήγουν όλα τα υπόγεια ύδατα.

Ζώνη 4 Ειδικού Ενδιαφέροντος: Ορίζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται επιπλέον προστασία.



Σχήμα 3.3: Τρέχουσες ζώνες προστασίας στο Ηνωμένο Βασίλειο
(environment.data.gov.uk).

Όλα τα σημεία υδροληψίας που προορίζονται για την λήψη πόσιμου νερού έχουν τουλάχιστον μία ζώνη με ακτίνα 50 m. Οι δραστηριότητες που περιορίζονται ή απαγορεύονται εντός αυτής είναι (Environment Agency, 2018):

- Οι κατασκευές υποδομών.
- Η αποθήκευση ρυπογόνων ουσιών.
- Η αποθήκευση ουσιών οργανικής προέλευσης.
- Η δημιουργία χώρων απόθεσης απορριμμάτων.
- Η απόρριψη υγρών αποβλήτων ή ιλύος.
- Η δημιουργία κοιμητηρίων.
- Η ταφή νεκρών ζώων.
- Η κατασκευή υπόγειων συστημάτων ψύξης ή θέρμανσης.

Οι παράγοντες που ελέγχουν το σχήμα και το μέγεθος της ζώνης 1 και της ζώνης 2 είναι (Environment Agency, 2019b):

- Ο ρυθμός εκφόρτισης και επαναφόρτισης του υδροφορέα.
- Το ενεργό πορώδες και η μεταβολή του στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση.
- Η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταβολή της στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση.
- Το πάχος του υδροφορέα.
- Η υδραυλική βαθμίδα και η φορά της ροής των υπόγειων υδάτων.

Οι παράγοντες που ελέγχουν το σχήμα και το μέγεθος της τρίτης ζώνης είναι ο ρυθμός εκφόρτισης και επαναφόρτισης του υδροφορέα.

Το καρστ παρουσιάζει μία μεγάλη πρόκληση όσον αφορά την οριοθέτηση των Ζωνών Προστασίας, η οποία πρέπει να βασίζεται στα διαθέσιμα στοιχεία, στους πόρους και στην πολυπλοκότητα του συστήματος. Για την προσομοίωση της κίνησης του νερού στο

υπέδαφος, στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιείται κυρίως το λογισμικό MODFLOW (Environment Agency, 2019b).

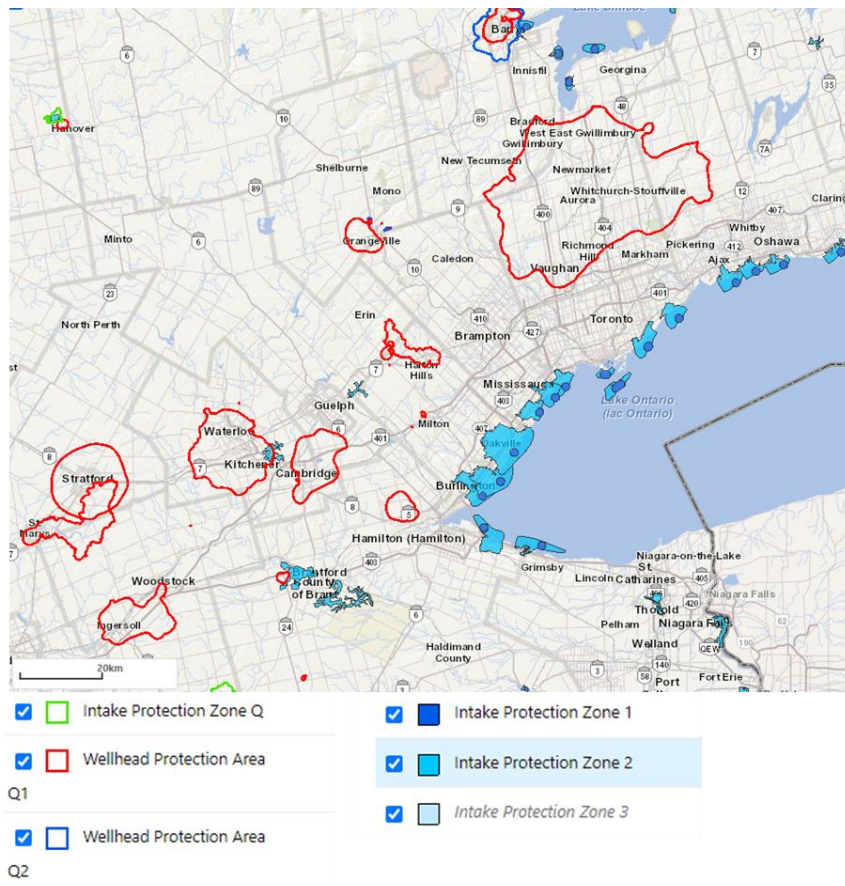
Καναδάς, Οντάριο

Στο Οντάριο του Καναδά, η πολιτεία έδρασε με σκοπό να προστατεύσει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο το νερό που προορίζεται για ύδρευση. Αφορμή ήταν η νόσηση περισσότερων από δύο χιλιάδων ανθρώπων και ο θάνατος έξι ανθρώπων λόγω της μόλυνσης των υδάτων του δικτύου ύδρευσης από τα βακτήρια *Escherichia coli* και *Campylobacter jejuni* (Bruce-Grey-Owen Sound Health Unit, 2000).

Στον Καναδά γίνεται χρήση προειδοποιητικών ενδείξεων τα οποία υπενθυμίζουν στους πολίτες ότι μια ανεπιθύμητη διαρροή ουσιών ή μία απόρριψη αποβλήτων στην συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε κάποιο σημείο υδροληψίας που βρίσκεται πλησίον.

Ταυτόχρονα αποτελούν αφορμή ώστε να ενημερωθούν οι πολίτες για το πρόγραμμα προστασίας υδάτων που εφαρμόζεται (Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2018). Η εφαρμογή αυτού του προληπτικού μέτρου θα μπορούσε να έχει ενδιαφέρον και στην Ελλάδα.

Πλέον η επαρχία του Οντάριο διαθέτει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προστασίας του πόσιμου νερού (Σχήμα 3.4), το οποίο καθορίζεται με τη νομοθετική πράξη Clean Act, 2006. Ως αποτέλεσμα περισσότεροι από το 99,8 % των ελέγχων ποιότητας νερού να πληρούν τα αυστηρά πρότυπα ποιότητας που έχει θέσει η πολιτεία (<https://www.ontario.ca/>).



Σχήμα 3.4: Ενδεικτική εικόνα των ζωνών προστασίας του υδροφόρου συστήματος και των υδροληπτικών έργων σε τμήμα της επαρχίας του Οντάριο (<https://www.lioapplications.lrc.gov.on.ca/>).

Σλοβενία

Στην Σλοβενία, το κράτος έχει την ευθύνη του προσδιορισμού των Ζωνών Προστασίας. Η κυβέρνηση εκδίδει νομοθετικές πράξεις μετά από συνεννόηση των τοπικών φορέων με τα αρμόδια Υπουργεία, με αποτέλεσμα η όλη διαδικασία να καθίσταται αρκετά αργή (Brenčič et al, 2016).

Οι Ζώνες Προστασίας ορίζονται διαφορετικά για τους καρστικούς, τους ρωγματωμένους και τους κοκκώδεις υδροφόρους. Επίσης ορίζεται και μία τέταρτη κατηγορία υδροφορέα: εκείνος στον οποίον πραγματοποιείται απευθείας κατείσδυση επιφανειακών υδάτων. Ειδικά στους ρωγματωμένους υδροφόρους, οι ζώνες προστασίας σχεδιάζονται ανάλογα με την ταχύτητα των υπόγειων υδάτων. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη των 10 m/day,

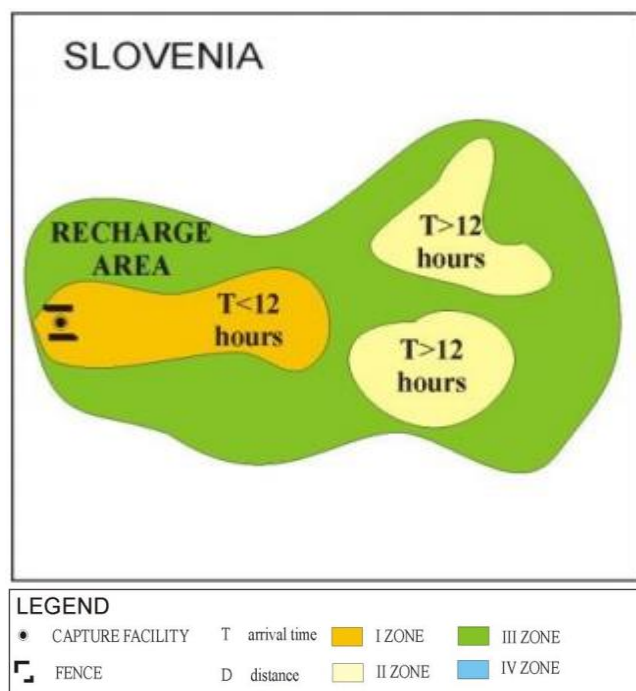
ορίζονται όπως στους καρστικούς, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ορίζονται όπως στους κοκκώδεις (Brenčič et al, 2016).

Περίπου το 50 % της έκτασης της χώρας καλύπτεται από καρστικούς σχηματισμούς και συνεπώς διαθέτει πληθώρα καρστικών υδροφόρων. Ο σχεδιασμός των Ζωνών Προστασίας σε αυτούς γίνεται σε σχέση με τον χρόνο που μεσολαβεί ώστε ένας ρύπος να μην μολύνει την πηγή (Σχήμα 3.5). Ο εν λόγω σχεδιασμός ακολουθεί το παρακάτω μοντέλο (Brenčič et al, 2016):

Ζώνη Περίφραξης ή Ζώνη 0: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας με περίμετρο 25 m για τις καρστικές πηγές, ενώ για άλλες εγκαταστάσεις αντιστοιχεί στην περιοχή ακριβώς γύρω από το σημείο υδροληψίας, η οποία είναι περιφραγμένη.

Ζώνη I: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας, στην οποία τα υπόγεια ύδατα χρειάζονται λιγότερο από 12 ώρες μέχρι να φτάσουν σε αυτό. Σε αυτή την ζώνη περιλαμβάνονται και οι περιοχές στις οποίες παρουσιάζονται φαινόμενα άμεσης κατείσδυσης.

Ζώνη II: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας έως τα όρια της Ζώνης I, στην οποία τα υπόγεια ύδατα παραμένουν περισσότερο από 12 ώρες.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση των Ζωνών Προστασίας των υπόγειων υδάτων στους καρστικούς υδροφόρους της Σλοβενίας (Brenčič et al., 2016).

Ζώνη III: Όλα τα υπόλοιπα τμήματα της λεκάνης απορροής που δεν εντάσσονται στις προηγούμενες κατηγορίες.

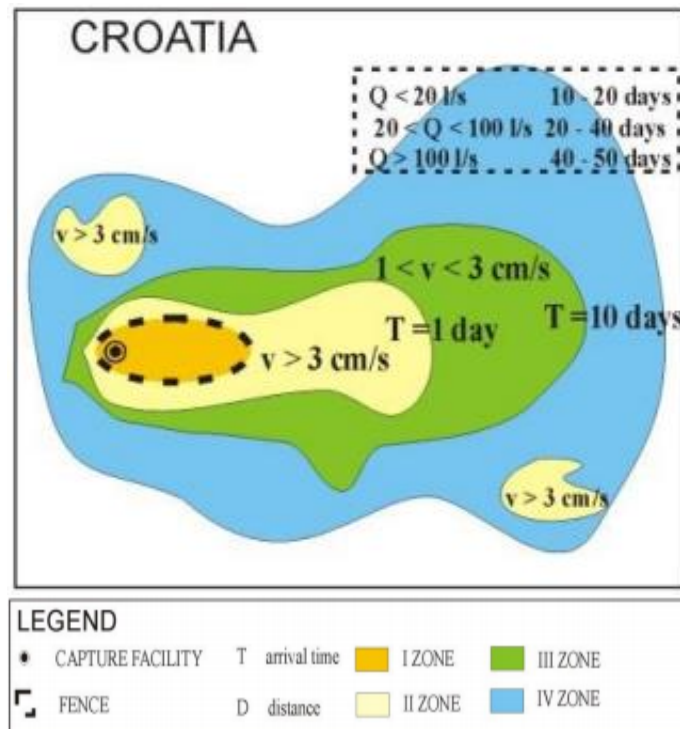
Επιπλέον οι Ζώνες II και III μπορούν να διαιρεθούν σε μικρότερες.

Στην Σλοβενία, ειδικά για τους γεωργούς των οποίων οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις βρίσκονται εντός της Ζώνης I και το εισόδημά τους μειώνεται λόγω του καθεστώτος προστασίας, προβλέπεται είτε χρηματική αποζημίωση, είτε παροχή κάποιας άλλης καλλιεργήσιμης έκτασης από το κράτος.

Κροατία

Στην Κροατία, η εφαρμογή του μέτρου των Ζωνών Προστασίας εξαρτάται άμεσα από τους φορείς στον οποίων την επικράτεια πρόκειται να σχεδιαστούν. Πιο αναλυτικά, εάν οι ζώνες εκτείνονται εντός των ορίων μιας τοπικής κοινότητας, τότε η τοπική αυτοδιοίκηση είναι υπεύθυνη για την εφαρμογή τους, ενώ αν ξεπερνούν τα όρια μίας τοπικής κοινότητας τότε καθίσταται υπεύθυνη η περιφέρεια (Brenčič et al, 2016).

Οι ζώνες για τους ρωγματομένους και τους καρστικούς υδροφόρους ορίζονται με διαφορετικό τρόπο από εκείνο που ορίζονται στους κοκκώδεις υδροφόρους, σύμφωνα με το εξής μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 (Brenčič et al, 2016):



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση των Ζωνών Προστασίας των υπόγειων υδάτων στους καρστικούς υδροφόρους της Κροατίας (Brenčič et al., 2016).

Ζώνη I: Η περιοχή ακριβώς γύρω από το σημείο υδροληψίας, η οποία προστατεύεται με περίφραξη.

Ζώνη II: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας και έως τα όρια της Ζώνης I, στην οποία ο χρόνος παραμονής του νερού είναι μικρότερος από 24 ώρες και ταυτόχρονα η ταχύτητά του είναι μεγαλύτερη των 3 m/s. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται περιοχές των Ζωνών III και IV στις οποίες παρατηρούνται φαινόμενα άμεσης κατείσδυσης. Οι περιοχές αυτές οφείλουν να είναι και περιφραγμένες.

Ζώνη III: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας και έως τα όρια της Ζώνης II, στην οποία η ταχύτητα των υπόγειων υδάτων κυμαίνεται από 1 cm/s έως 3 cm/s και ο χρόνος παραμονής τους εντός της κυμαίνεται από 10 έως 20 ημέρες.

Ζώνη IV: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας και έως τα όρια της Ζώνης III. Τα όριά της εξαρτώνται από τη παροχή της υδροληψίας. Εάν η παροχή είναι μικρότερη από 20 l/s, η Ζώνη IV ταυτίζεται με την περιοχή στην οποία ο χρόνος παραμονής των υπόγειων υδάτων εντός της κυμαίνεται από 10 έως 20 ημέρες. Εάν η παροχή είναι 20 έως 100 l/s, ταυτίζεται με την περιοχή που ο χρόνος παραμονής των υπόγειων υδάτων εντός της κυμαίνεται από 20 έως 40 ημέρες. Τέλος, για παροχή υδροληψίας μεγαλύτερης των 100 l/s, η Ζώνη ταυτίζεται με την περιοχή που ο χρόνος παραμονής των υπόγειων υδάτων εντός της κυμαίνεται από 40 έως 50 ημέρες.

Ιταλία

Στην Ιταλία υπεύθυνες για τον ορισμό των ζωνών προστασίας είναι οι Περιφέρειες έπειτα από προτάσεις των τοπικών Κοινοτήτων.

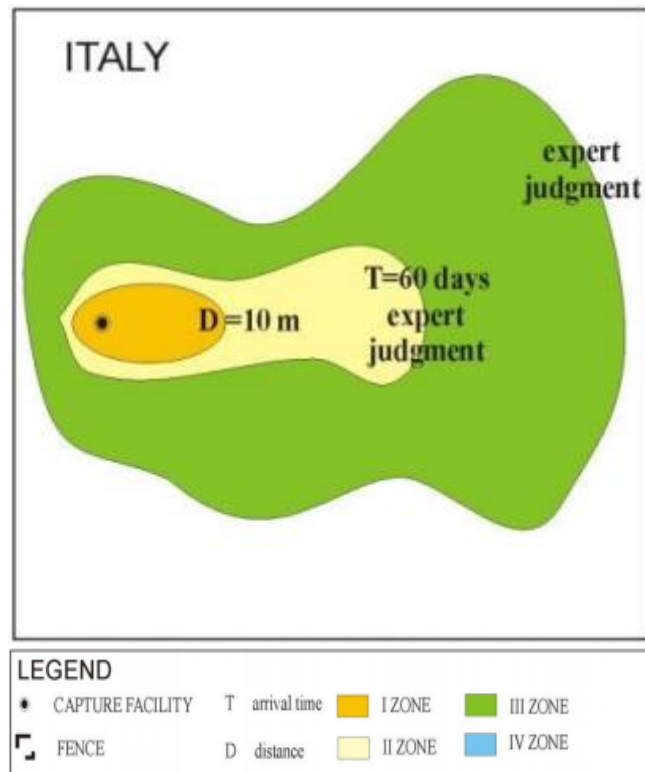
Οι καρστικοί υδροφόροι είναι μια πολύ σημαντική πηγή πόσιμου ύδατος στη συγκεκριμένη χώρα, ωστόσο οι γεωλογικές συνθήκες μεταβάλλονται τοπικά σε μεγάλο βαθμό. Στο Βορειοανατολικό τμήμα της οι καρστικοί υδροφόροι αποτελούν μέρος του μεγάλου Διναρικού καρστικού συστήματος, στο Βόρειο αποτελούν τμήμα των Άλπεων και στην υπόλοιπη επικράτεια σχετίζονται με τα Απέννινα Όρη (Brenčič et al, 2016).

Συνεπώς, λόγω της παραπάνω ιδιαιτερότητας δεν έχει διαμορφωθεί μία κοινή προσέγγιση για την δημιουργία των Ζωνών Προστασίας. Σε γενικές γραμμές ισχύει το μοντέλο του Σχήματος 3.7 (Brenčič et al, 2016):

Ζώνη I: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας, σε ακτίνα 10 m, η οποία προστατεύεται από κάθε είδους δραστηριότητα.

Ζώνη II: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας έως και τα όρια της Ζώνης I, στην οποία ο χρόνος παραμονής των υπόγειων υδάτων εντός της είναι 60 ημέρες. Σε αυτή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα μέτρα και οι περιορισμοί που ισχύουν, ενώ ορισμένες δραστηριότητες είναι απολύτως απαγορευμένες.

Ζώνη III: Η περιοχή γύρω από το σημείο υδροληψίας έως και τα όρια της Ζώνης II. Τα όρια της ζώνης αυτής καθορίζονται από ειδικούς.



Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση των Ζωνών Προστασίας των υπόγειων υδάτων στους καρστικούς υδροφόρους της Ιταλίας (Brenčič et al., 2016).

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Βόρειο τμήμα του Νομού Χανίων. Ορίζεται μεταξύ των ΒΔ υπωρειών των Λευκών Ορέων και των παράλιων του Δήμου Πλατανιά, Βόρεια του οικισμού Αγυιά (Σχήμα 4.1). Το δυτικό όριο της περιοχής μελέτης ορίζεται από την κοιλάδα του Κερίτη, το ανατολικό από το φαράγγι Θερίσου και το βόρειο από το βύθισμα της Αγυιάς.



Σχήμα 4.1: Περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα από Google Earth – Άποψη από ΝΝΑ).

Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται οι τρεις Λεκάνες Απορροής Ποταμού του Υδατικού Διαμερίσματος της Κρήτης (ΕΛ13) (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017α).

Η περιοχή ενδιαφέροντος ανήκει στην Λεκάνη Απορροής Ρεμάτων Βορείου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου (ΕΛ1339) και στο καρστικό Υπόγειο Υδατικό Σύστημα ΒΔ Λευκών Ορέων (Αγυιάς) (ΕΛ1300031).

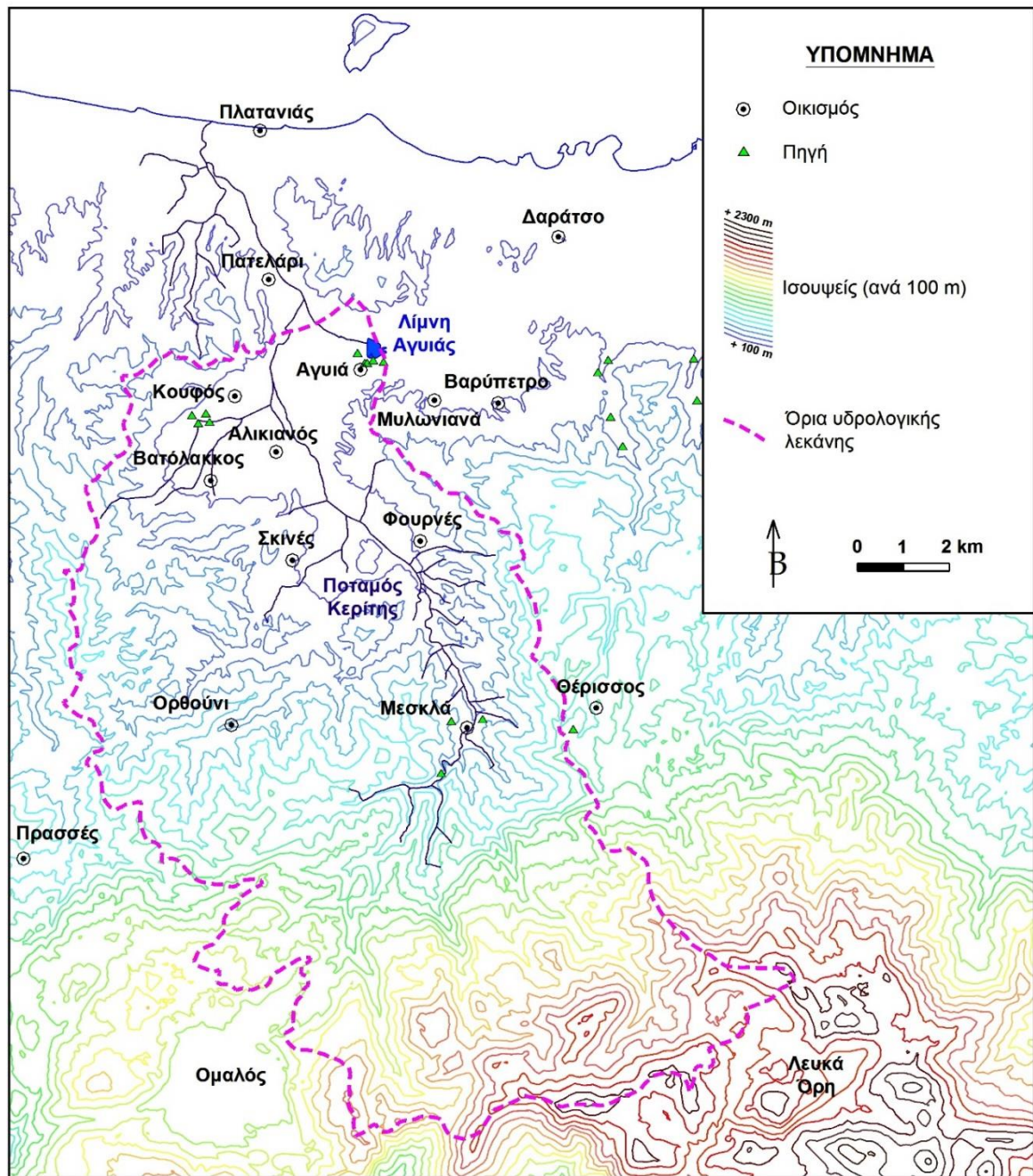


Σχήμα 4.2: Λεκάνες Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (EL13)
 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2017α).

4.1. Μορφολογία

Η υδρολογική λεκάνη του Κερίτη (Σχήμα 4.3), αποτελεί υπολεκάνη του υδροφόρου συστήματος των ΒΔ Λευκών Ορέων. Καταλαμβάνει μια έκταση 154.4 km² και εκτείνεται με διεύθυνση Β – Ν από την στάθμη της θάλασσας μέχρι το υψόμετρο των 2100 m περίπου. Το τμήμα της υδρολογικής λεκάνης Κερίτη («υπολεκάνη» Αγυιάς) που βρίσκεται σε υψόμετρο άνω των +40 m (απόλυτη στάθμη ανάβλυσης των πηγών Αγυιάς), έχει έκταση 148.9 km².

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλες μεταβολές του ανάγλυφου της από τον Βορρά προς τον Νότο οι οποίες οφείλονται τόσο στην καρστικοποίηση που έχει υποστεί όσο και στις ισχυρή τεκτονική δραστηριότητα. Το ανάγλυφο στα νοτιότερα τμήματα της περιοχής είναι έντονο, με πολυάριθμες κορυφές και ελάχιστη βλάστηση, κυρίως θαμνώδη, ενώ το βορειότερο τμήμα της λεκάνης χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλά υψόμετρα με έντονη βλάστηση, καλλιεργημένες εκτάσεις και υδροφορία. Οι κλίσεις κυμαίνονται από μηδενικές έως 70%.

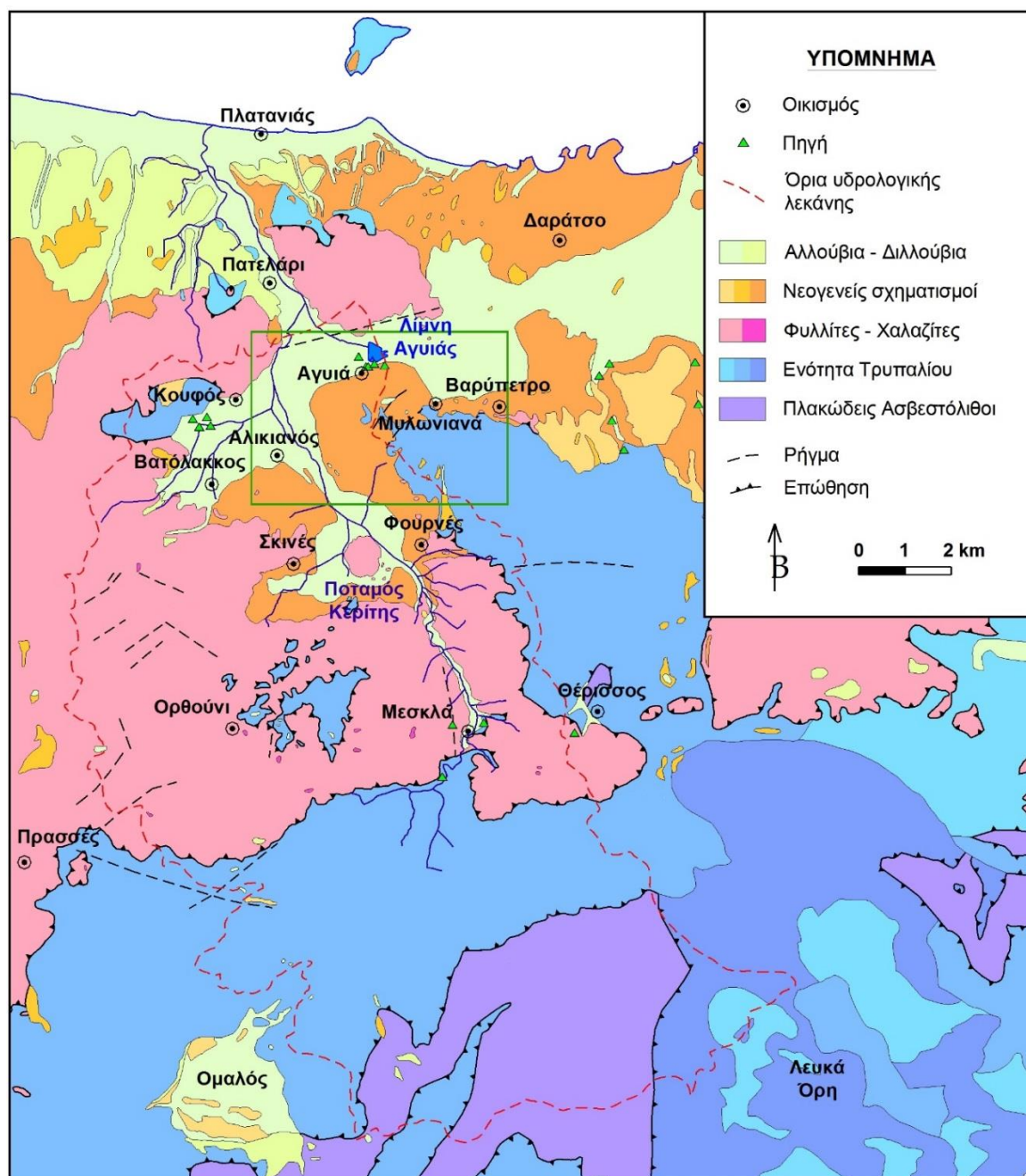


Σχήμα 4.3: Τοπογραφικός χάρτης με την υδρολογική λεκάνη (υπολεκάνη) Αγιιάς.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό (Csa) σύμφωνα με τη κλιματική κατάταξη του Köppen (Kottek et al., 2006), με ήπιους χειμώνες, ξηρά και πολύ ζεστά καλοκαίρια.

4.2. Γεωλογία

Η γεωλογική δομή της περιοχής ακολουθεί την πολυπλοκότητα της δομής της Κρήτης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Γεωλογικός χάρτης περιοχής ενδιαφέροντος. Στο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή στην οποία έγινε προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων.

Στο νοτιότερο τμήμα της όπως και στο μεγαλύτερο μέρος των Λευκών Ορέων εντοπίζεται η ενότητα των Πλακωδών Ασβεστολίθων. Πρόκειται για κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους Ιουρασικής – Ηωκαινικής ηλικίας (Φυτρολάκης, 1980), οι οποίοι κατά θέσεις διακόπτονται από ενστρώσεις αδιαπέρατων σχηματισμών που εμποδίζουν την κατακόρυφη κίνηση του νερού και προκαλούν την κίνηση του στον υπερκείμενο ανθρακικό υδροφορέα του Τρυπαλίου.

Η ενότητα του Τρυπαλίου, ηλικίας Ανώτερης Τριαδικής – Λασίου, η οποία βρίσκεται επωθημένη επί της σειράς των Πλακωδών Ασβεστολίθων. Με βάση τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών εμφανίσεων της ενότητας, την αξιολόγηση γεωτρητικών δεδομένων και ότι την εποχική διακύμανση τις στάθμης των γεωτρήσεων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι εμφανίζει έντονη καρστικοποίηση και εντός αυτής αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες υψηλού δυναμικού. Κατά τόπους στο βόρειο τμήμα της περιοχής εντοπίζονται ανθρακικά πετρώματα της ζώνης της Τρίπολης.

Η λοφώδης έκταση μεταξύ του πεδινού τμήματος και των υπωρειών των Λευκών Ορέων καλύπτεται από την ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών, Πέρμο – Τριαδικής ηλικίας. Το τεκτονικό κάλυμμα των Φυλλιτών – Χαλαζιτών είναι επωθημένο στην ανθρακική ενότητα του Τρυπαλίου και στους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους. Τα βορειότερα πεδινά τμήματα της περιοχής καλύπτονται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα καθώς και από σύγχρονες αποθέσεις.

Οι σημαντικότερες ζώνες ρηγμάτωσης που διατρέχουν την περιοχή ενδιαφέροντος έχουν κύρια διεύθυνση Α – Δ. Μία από αυτές αποτελεί την τεκτονική επαφή των Φυλλιτών με το καρστικό σύστημα της περιοχής και ταυτίζεται με τον άξονα εμφάνισης των πηγών της Αγυιάς (Στειακάκης κ.ά., 2017).

4.3. Υδρολογία – Υδρογεωλογία

Η υδροφορία αναπτύσσεται στους καρστικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες Τρυπαλίου και εκφορτίζεται με ένα μέτωπο πηγών με συνολική ετήσια απορροή 28,79 εκατομμύρια m³ (Στοιχεία 2016). Το νερό των πηγών της Αγυιάς είναι καλής ποσιμότητας ή 1^{ης} τάξης,

βάσει του διαγράμματος ποσιμότητας κατά Waterlot, με θερμοκρασία σχεδόν σταθερή στους 13 °C (Παυλίδου, 2009).

Με βάση την πιεζομετρία της περιοχής, η κύρια διεύθυνση υπόγειας ροής είναι από Νότια – Νοτιοανατολικά προς τα Βόρεια, χωρίς όμως να πραγματοποιούνται διαφυγές βορειότερα του άξονα εμφάνισης των πηγών (Στειακάκης κ.ά., 2017). Η καρστική υδροφορία του συστήματος των πηγών της Αγυιάς τροφοδοτείται από το ανάντη τμήμα των Λευκών Ορέων, το οποίο περιλαμβάνει και το Οροπέδιο του Ομαλού. Από ιχνηθετήσεις που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ έχει διαπιστωθεί υδραυλική επικοινωνία του Οροπεδίου του Ομαλού με τις πηγές Αγυιάς και Μεσκλών (Λιονής – Περλέρος, 2001).

Η κύρια πηγή τροφοδοσίας είναι η κατείσδυση του μετεωρικού νερού, η οποία ανέρχεται σε ποσοστό 37% περίπου του ετήσιου ύψους κατακρημνισμάτων στην υπο-λεκάνη Αγυιάς. Από τις σχετικά περιορισμένες και καθόλου συστηματικές μετρήσεις των εκφορτίσεων των πηγών της Αγυιάς προκύπτει ότι κύρια εκφόρτιση του συγκεκριμένου καρστικού συστήματος αποτελεί η πηγή Καλαμιώνα, με μέσο όρο εκκενώσιμων αποθεμάτων ίσο με $46,91 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Μουρκάκου, 2018).

Η βροχοβαθμίδα δίνεται από την σχέση:

$$P = 2.065 \cdot h + 478.38 \quad [4.1]$$

όπου,

P ύψος κατακρημνισμάτων σε mm, και

h απόλυτο υψόμετρο σε m.

4.4. Σημεία Νερού

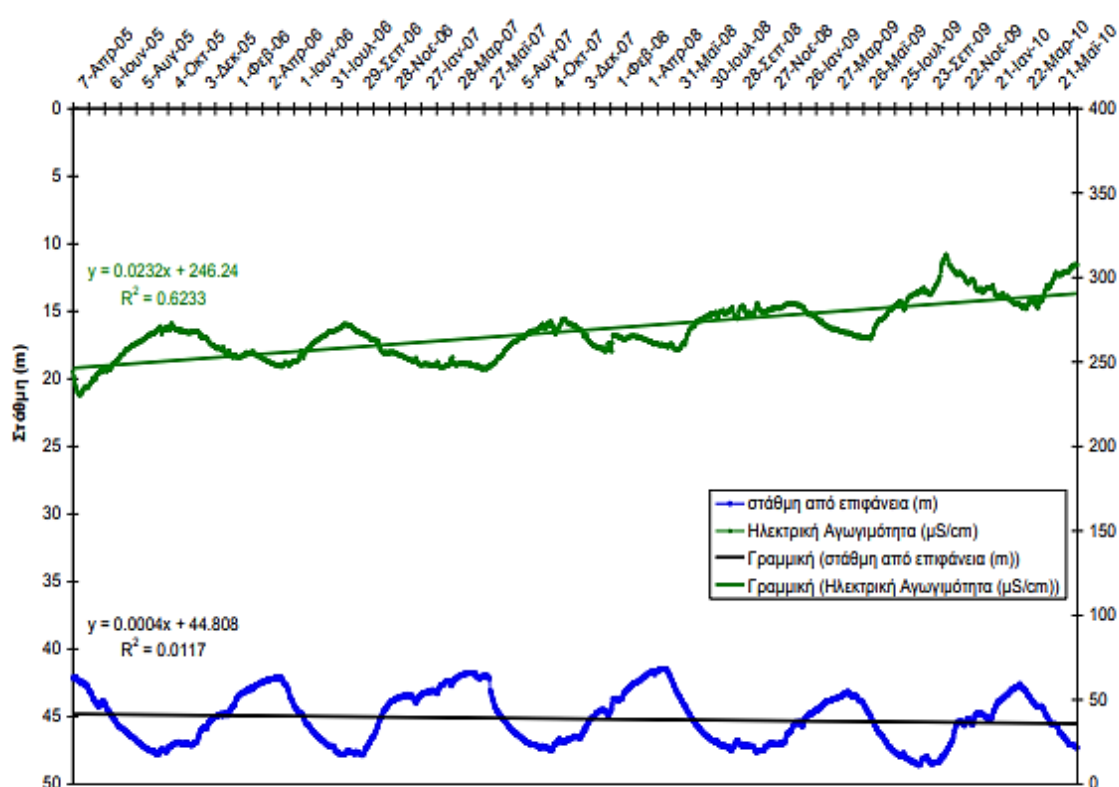
Το καρστικό Υπόγειο Υδατικό Σύστημα ΒΔ Λευκών Ορέων (Αγυιάς), βρίσκεται στο βόρειο και κεντρικό τμήμα του Ν. Χανίων και εκτιμάται ότι απορρέουν από αυτό περίπου $150 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$.

Τα υδρογεωλογικά όρια του συστήματος δεν μπορούν να καθοριστούν σαφώς, αν και σύμφωνα με την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017β) η έκταση της υδρογεωλογικής λεκάνης είναι ίση με 122.83 km².

Το νερό του καρστικού συστήματος βρίσκεται σε καλή ποιοτική και ποσοτική κατάσταση. Τις σημαντικότερες πιέσεις στην κατάσταση των υδάτων ασκούν οι εκταταμένες καλλιέργειες, οι αντλήσεις και τα ελαιοτριβεία.

Τα κυριότερα σημεία εκφόρτισης της παραπάνω υδροφορίας εντοπίζονται στις πηγές Αγυιάς και Μεσκλών (βλέπε Σχήμα 4.4). Από τις πηγές της Αγυιάς εκφορτίζονται περίπου 70×10^6 m³/έτος, ενώ από τις πηγές Μεσκλών περίπου 30×10^6 m³/έτος (Περιφέρεια Κρήτης, 2007).

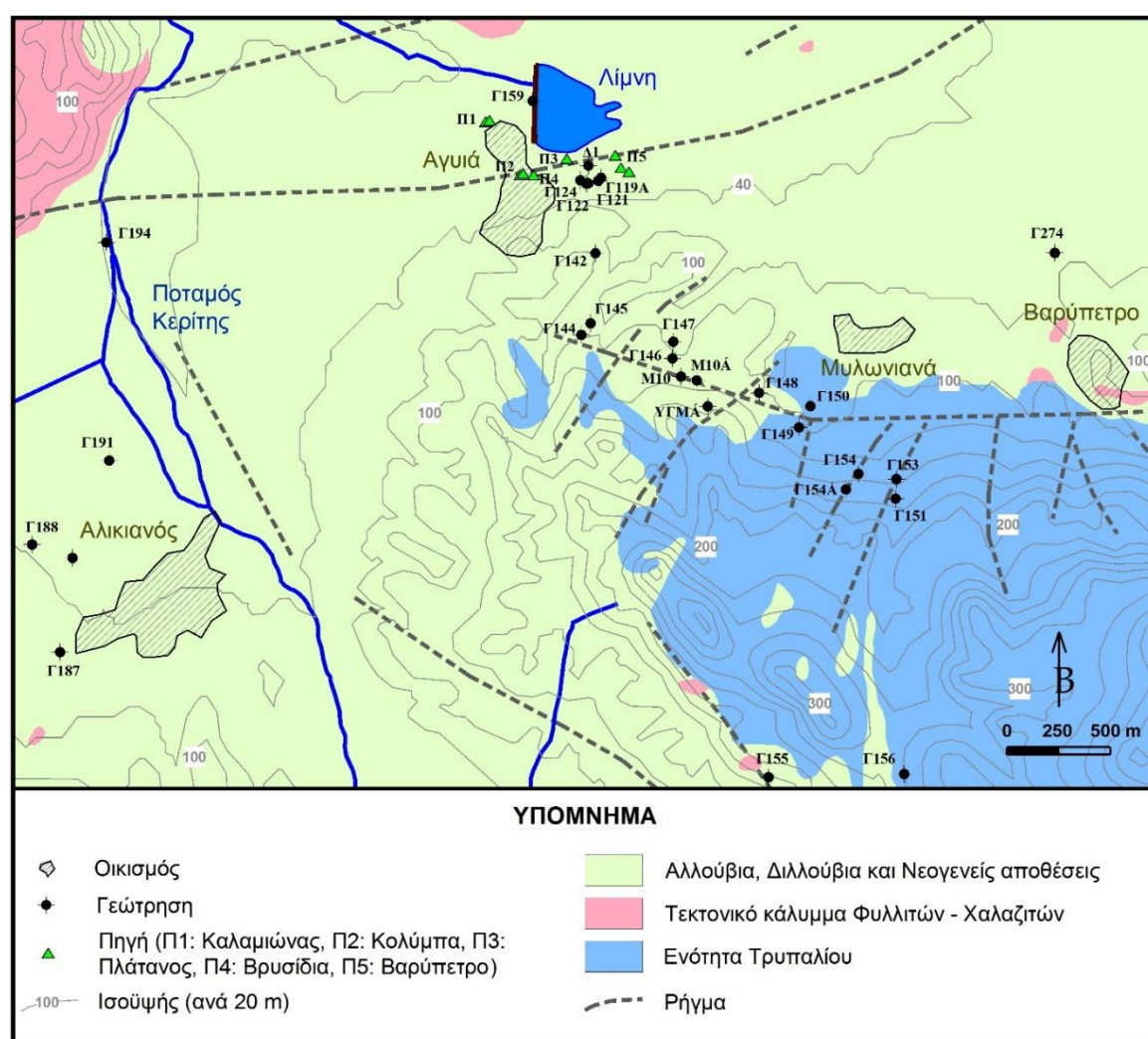
Στο διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Σχήμα 4.5) παρατηρείται ότι το ισοζύγιο εμπλουτισμού / αντλήσεων είναι σταθερό και η πτώση της στάθμης είναι της τάξης των 5 m (Κριτσωτάκης – Παυλίδου, 2013).



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Αγυιάς (Κριτσωτάκης – Παυλίδου, 2013).

Σύμφωνα με τους Κριτσωτάκη και Παυλίδου (2013), οι αντλούμενες ποσότητες από τις πηγές Αγυιάς κυμαίνονται μεταξύ 1000 και 4000 m³/h και στις πηγές Μεσκλών μεταξύ 50 και 5000 m³/h. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι απορροές αυτές έχουν ελαττωθεί λόγω των υδρομαστεύσεων των πηγών και των αντλήσεων των ανάντη γεωτρήσεων.

Η υδροφορία αναπτύσσεται στους καρστικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες Τρυπαλίου και εκφορτίζεται κυρίως στην περιοχή της Αγυιάς με ένα μέτωπο 5 ομάδων πηγών (βλέπε Σχήμα 4.6 και Πίνακα 4.1): Πλάτανος (Π1), Βρυσίδα (Π2), Κολύμπα (Π3), Καλαμιώνας (Π4) και Βαρύπετρος (Π5).



Σχήμα 4.6: Γεωλογικός / υδρογεωλογικός χάρτης με τα σημεία νερού στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τα όρια της περιοχής δίνονται στο Σχήμα 4.4.

Πίνακας 4.1: Ενδεικτικές καταγραφές ετήσιας απορροής πηγών Αγυιάς (Στειακάκης κ.ά., 2017).

Πηγές	Ετήσιες απορροές (εκατομμύρια m ³)		
	1990	2009	2016
Καλαμιώνας	13,28	11,21	10,02
Κολύμπα	9,74	8,02	6,95
Βρυσίδια	2,61	1,47	0,46
Πλάτανος	11,60	10,50	9,81
Βαρύπετρο	7,99	4,07	1,55
ΣΥΝΟΛΟ	45,22	35,27	28,79

Πρόκειται για πηγές επαφής – υπερπλήρωσης που εντοπίζονται σε υψόμετρα από +33,52 m (Καλαμιώνας) μέχρι +40,64 m (Βαρύπετρος). Ειδικά για την πηγή Πλατάνου, η εκφόρτισή της εκδηλώνεται σε συνθήκες υπό-πίεσης (Στειακάκης κ.ά., 2017).

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 4.1, οι μετρημένες παροχές στις πηγές δίνουν πολύ μικρότερες τιμές απορροής από την μέση εκτιμώμενη τιμή των 70×10^6 m³/έτος. Αυτό οφείλεται: α) στο ότι οι παροχές αυτές δεν καταγράφονται συστηματικά, και β) τα σημεία στα οποία μετρούνται δεν είναι τα πλέον ιδανικά ώστε να περιλαμβάνουν το σύνολο των απορροών όλων των πηγών. Πάντως, σε κάθε περίπτωση παρατηρείται συνεχής μείωση των παροχών που εν πολλοίς οφείλεται στην αύξηση των αντλήσεων ανάντη τους.

Επιπλέον των πηγών, το σύστημα εκμεταλλεύεται μέσω μιας σειράς γεωτρήσεων σε δύο πεδία εκμετάλλευσης: Αγυιάς και Μυλωνιανών (Σχήμα 10). Στην διαχείριση τους εμπλέκονται τέσσερεις φορείς: Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Χανίων (ΔΕΥΑΧ), Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης (ΟΑΚ), Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων Βαρυπέτρου (ΤΟΕΒΒ) και Εταιρεία Εμφιάλωσης Νερά Κρήτης Α.Ε.

Με βάση το τελευταίο σχέδιο εκμετάλλευσής τους, οι αντλήσεις διαμορφώνονται όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές παροχές άντλησης γεωτρήσεων Αγυιάς

Κωδικός γεώτρησης	Φορέας διαχείρισης	Ενδεικτική παροχή (m ³ /h)
Πεδίο Αγυιάς		
Γ119Α	ΔΕΥΑΧ	295
Γ121	ΔΕΥΑΧ	280
Γ122	ΔΕΥΑΧ	210
Γ124	ΔΕΥΑΧ	300
Δ1	ΔΕΥΑΧ	170
Πεδίο Μυλωνιανών		
Γ144 (Μ2)	ΟΑΚ	900
Γ147 (Μ1)	ΟΑΚ	900
Γ148 (Μ8)	ΟΑΚ	900
Γ149 (Μ5)	ΟΑΚ	300
Γ153 (Μ7)	Νερά Κρήτης	60
Γ154Α (Μ6-ΝΕΑ)	ΟΑΚ	300
Μ10	ΤΟΕΒΒ	310
Μ10Α (Μ10-ΝΕΑ)	ΤΟΕΒΒ	300
ΥΓΜΔ	ΟΑΚ	950
ΣΥΝΟΛΟ		6.175

4.5. Ανθρωπογενείς πιέσεις στην περιοχή μελέτης

Οι κυριότερες αιτίες επιβάρυνσης των υπόγειων υδάτων είναι οι εξής (Στουρνάρας, 2013):

- Χώροι απόθεσης απορριμμάτων: Τόσο η ανεξέλεγκτη διάθεση απορριμμάτων στους Χ.Α.Δ.Α., όσο και οι αστοχίες που μπορεί να προκύψουν κατά την οργανωμένη διάθεσή τους στους Χ.Υ.Τ.Α. και Χ.Υ.Τ.Υ., πλήττουν σε μεγάλο βαθμό τα υδροφόρα συστήματα. Η ρύπανση και στην συνέχεια στην διήθηση των κατακρημνισμάτων, τα οποία μεταφέρουν ουσίες στα υπόγεια υδροφόρα συστήματα.

- Υπόνομοι: Τα υπόγειο υδατικό σύστημα είναι δυνατό να πλήττεται από διαρροές που είναι δύσκολο να εντοπιστούν και μπορεί να οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες ή θραύσεις από φορτία του εδάφους, σεισμούς, ριζικά συστήματα και φθορές.
- Νεκροταφεία: Τα νεκροταφεία αποτελούν χώρους πολύ μεγάλης παραγωγής ρευστών αποβλήτων, πλούσιων σε COD, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , που προέρχονται από διαδικασίες ρευστοποίησης, αμμωνιοποίησης και αζωτοποίησης.
- Βόθροι: Κυρίως από τους διηθητικούς, αλλά και από τους στεγανούς οικιακούς βόθρους δημιουργείται ρύπανση λόγω των διαρροών και των διαφυγών αερίων.
- Γεωργία: Η γεωργική παραγωγή και ιδιαίτερα η εντατική γεωργική παραγωγή, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το υδατικό περιβάλλον κυρίως μέσω οργανικών, χημικών και βακτηριολογικών ρυπαντών ή ανόργανων χημικών ρυπαντών.
- Κτηνοτροφία: Τα κτηνοτροφικά απόβλητα σχετίζονται με την διάθεση των αποβλήτων και των λυμάτων τόσο των κτηνοτροφικών μονάδων, όσο και με των μονάδων επεξεργασίας κρέατος.
- Μικρής κλίμακας βιομηχανία.

Στην υδρολογική λεκάνη που τροφοδοτεί τον καρστικό υδροφορέα της Αγυιάς Χανίων συναντώνται τόσο κατοικημένες περιοχές όσο και εκτάσεις που εκμεταλλεύονται για γεωργικούς και κτηνοτροφικούς σκοπούς. Στα νοτιότερα τμήματά της υπάρχουν δασώδεις εκτάσεις.

Στη περιοχή δεν εντοπίζονται χώροι ανεξέλεγκτης απόθεσης απορριμμάτων καθώς το σύνολο των απορριμμάτων των Δήμων Χανίων και Πλατανιά καταλήγουν στον οργανωμένο Χ.Υ.Τ.Υ. ο οποίος βρίσκεται στις Κορακιές Ακρωτηρίου, σε μεγάλη απόσταση από τη υπό μελέτη περιοχή.

Όλες οι μεγάλοι οικισμοί οι οποίοι βρίσκονται εντός του σχεδίου πόλεως διαθέτουν κεντρικό αποχετευτικό σύστημα. Ωστόσο, στους αραιοδομημένους οικισμούς η

απόρριψη των υγρών αποβλήτων των οικιών γίνεται συνήθως σε διηθητικούς και στεγανούς βόθρους.

Ο πρωτογενής τομέας είναι η βασική πλουτοπαραγωγική πηγή της περιοχής μελέτης. Στα βόρεια και κεντρικά τμήματά της περιοχής μελέτης υπάρχει πλήθος καλλιεργημένων εκτάσεων όπου γίνεται συχνά απόρριψη εδαφοβελτιωτικών και παρασιτοκτόνων ουσιών. Επιπλέον σε όλη της έκταση της υδρολογικής λεκάνης της Αγυιάς εντοπίζονται πολυάριθμες κτηνοτροφικές μονάδες.

Απόρροια της έντονης δραστηριότητας με τον πρωτογενή τομέα είναι η δημιουργία μικρής κλίμακας βιομηχανιών οι οποίες ασχολούνται κυρίως με την παραγωγή και συσκευασία χυμών και την επεξεργασία κρέατος. Επιπλέον υπάρχουν πολυάριθμα ελαιουργεία και τυροκομεία.

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την εκτίμηση των ζωνών τρωτότητας και την κατασκευή χαρτών τρωτότητας της υδρολογικής λεκάνης Αγυιάς επιλέχθηκαν οι μέθοδοι δεικτών EPIK, PRESK και DRISTPi. Οι τρεις αυτές μέθοδοι έχουν κατασκευαστεί για να εφαρμόζονται ειδικά σε καρστικούς υδροφόρους. Η τρωτότητα της περιοχής μελετήθηκε με περισσότερες από μία μεθόδους, οι οποίες ερευνούν διαφορετικές παραμέτρους, ώστε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους να προκύψουν περισσότερο ασφαλή συμπεράσματα.

Η EPIK είναι η πρώτη μέθοδος προσδιορισμού τρωτότητας που σχεδιάστηκε να λαμβάνει υπόψη της τα καρστικά χαρακτηριστικά και έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές περιπτώσεις. Δεν λαμβάνει υπόψη της χρονοεξαρτώμενες μεταβλητές, όπως η ένταση των βροχοπτώσεων και η επαναφόρτιση του υδροφορέα. Αντίθετα αξιολογεί μόνο παραμέτρους που σχετίζονται με τα εγγενή χαρακτηριστικά του.

Η μέθοδος PRESK αποτελεί εξέλιξη της EPIK και δημιουργήθηκε για να εφαρμόζεται ειδικά στις μεσογειακές συνθήκες. Πέρα των παραμέτρων που αξιολογεί η EPIK, διερευνά επιπλέον και τη λιθολογία του υδροφορέα. Αντίθετα με την EPIK, η PRESK δεν έχει δοκιμαστεί σε πολλούς υδροφόρους, καθώς πρόκειται και για σχετικά πρόσφατη μέθοδο.

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι παρεμφερείς, με τη διαφορά πως η EPIK δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στα χαρακτηριστικά της επικαρστικής ζώνης και στις συνθήκες κατείσδυσης, ενώ η PRESK δίνει έμφαση στη προστασία που προσφέρεται στον υδροφορέα από τη μορφολογία (κλίση), τη φυτοκάλυψη και το εδαφικό κάλυμμα.

Τέλος, όσον αφορά τη DRISTPi, πρόκειται για μία μέθοδο με διαφορετική θεώρηση, καθώς αξιολογεί και χρονικά εξαρτώμενες παραμέτρους που αγνοούνται στις άλλες δύο μεθόδους και έχουν να κάνουν με την κίνηση του υπόγειου νερού. Τέτοιες παράμετροι είναι η επαναφόρτιση του υδροφορέα και οι προνομοιακές κατεισχύσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στα καρστικά συστήματα.

5.1. Εδαφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης

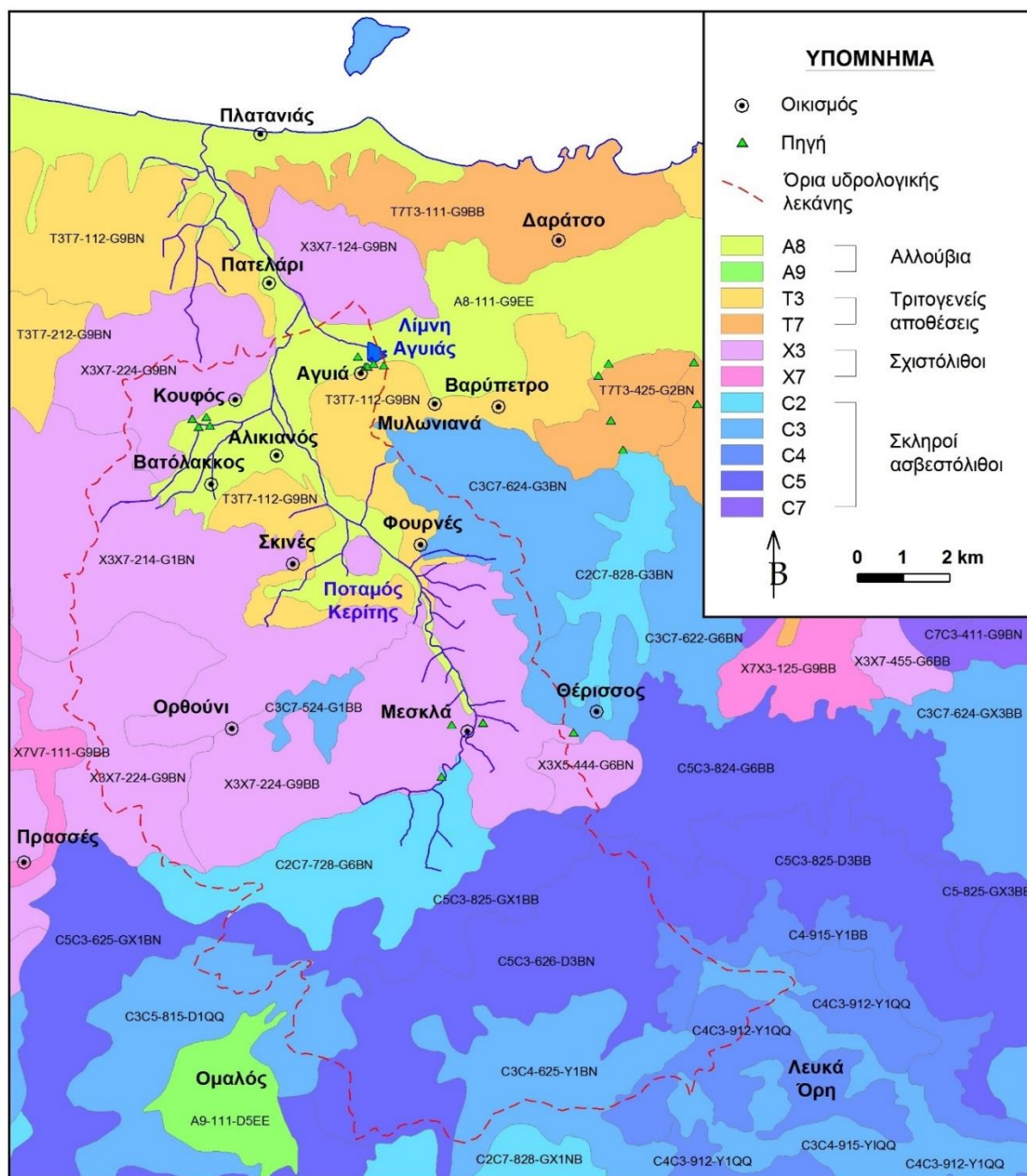
Για την εκτίμηση της τρωτότητας με βάση τις τρεις παραπάνω μεθόδους, χρησιμοποιήθηκε ο εδαφολογικός χάρτης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Ο εδαφολογικός χάρτης της περιοχής αποτελεί συνδυασμό του «Γεωγραφικού χάρτη γαιών, Φύλλο Βατόλακκος» (Σχοινάς κ.ά., 1997) του «Γεωγραφικού χάρτη γαιών, Φύλλο Περιβόλια» (Σχοινάς κ.ά., 1997) και του «Γεωγραφικού χάρτη γαιών, Φύλλο Περιβόλια» (Ανέστης κ.ά., 1997), κλίμακας 1:50.000 της Δασικής Υπηρεσίας.

Κάθε επιφανειακή εμφάνιση χαρακτηρίζεται από έναν κωδικό, στον οποίο καταγράφεται η γεωμορφολογία (μητρικό υλικό και φυσιογραφία), το βάθος του εδάφους, η διάβρωσή του, οι κλίσεις επιφάνειας, η βλάστηση και ο βαθμός ανθρωπογενούς επίδρασης στην βλάστηση. Η ερμηνεία των εδαφολογικών αυτών κωδικών δίνεται στους Πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3.

Κατά την αξιολόγηση των παραμέτρων των τριών μεθόδων δεικτών που εφαρμόστηκαν (EPIK, PRESK και DRISTPi), κάθε επιφανειακή εμφάνιση αξιολογήθηκε με βάση τους κωδικούς του εδαφολογικού χάρτη και από επιτόπου αναγνωρίσεις / παρατηρήσεις (κυρίως όσον αφορά τις καλλιεργημένες εκτάσεις).

Οι παραπάνω παρατηρήσεις, τοπικού χαρακτήρα, αφορούν τη διάβρωση του εδάφους, τις κλίσεις επιφάνειας, έντονες καρστικές μορφές που εμφανίζονται σε διάφορα τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος, τον βαθμό της ανθρωπογενούς επίδρασης και τις χρήσεις γης.

Ειδικά για την ανθρωπογενή επίδραση (βλέπε ενότητα 4.5) και τις χρήσεις γης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν μεταβληθεί σημαντικά από την περίοδο σύνταξης των γεωγραφικών χαρτών γαιών (1997), καθώς έχουν αυξηθεί οι καλλιεργημένες εκτάσεις στα βόρεια και κεντρικά τμήματα της περιοχής.



Σχήμα 5.1: Εδαφολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (Σχοινάς κ.ά., 1997).

Πίνακας 5.1: Ερμηνεία των εδαφολογικών κωδικών για το μητρικό υλικό και τη φυσιογραφία της περιοχής (Σχήμα 5.1).

Μητρικό υλικό	Φυσιογραφία
X: Σχιστόλιθοι	0: Επίπεδη επιφάνεια
C: Σκληροί ασβεστόλιθοι	1: Απότομες κορυφές
T: Τριτογενείς αποθέσεις	2: Απότομες πλαγιές
A: Αλλούβια	3: Αποστρογγυλεμένες κορυφές
V: Κολλούβια σχιστολίθων	4: Επάνω μέρος κλιτύων
H: Κολούβια Ασβεστολίθων	5: Μέσο μέρος κλιτύων
S: Κώνοι αποθέσεων	6: Αναβαθμοί
B: Κοίτες ποταμών	7: Κάτω μέρος κλιτύων
	8: Ανοιχτή κοιλάδα
	9: Κλειστή κοιλάδα

Πίνακας 5.2: Ερμηνεία των εδαφολογικών κωδικών για το βάθος του εδάφους, τη διάβρωσή του και τις κλίσεις της επιφάνειας (Σχήμα 5.1).

Βάθος εδάφους	Διάβρωση εδάφους	Κλίσεις επιφάνειας
1: Βαθύ	1: Καμία	1: Ελαφρές
2: Βαθύ και αβαθές	2: Καμία και μέτρια	2: Ελαφρές και μέτριες
3: Βαθύ και βράχος	3: Καμία και έντονη	3: Ελαφρές και απότομες
4: Αβαθές και βαθύ	4: Μέτρια και καμία	4: Μέτριες και ελαφρές
5: Αβαθές	5: Μέτρια	5: Μέτριες
6: Αβαθές και βράχος	6: Μέτρια και έντονη	6: Μέτριες και απότομες
7: Βράχος και βαθύ	7: Έντονη και καμία	7: Απότομες και ελαφρές
8: Βράχος και αβαθές	8: Έντονη και μέτρια	8: Απότομες και μέτριες
9: Βράχος	9: Έντονη	9: Απότομες

Πίνακας 5.3: Ερμηνεία των εδαφολογικών κωδικών για τη βλάστηση, τον βαθμό της ανθρωπογενούς επίδρασης και τις εκθέσεις (Σχήμα 5.1).

Βλάστηση	Βαθμός ανθρωπογενούς επίδρασης	Εκθέσεις
G: Ζώνη αειφύλλων πλατυφύλλων	1: Ασθενής	BB: Βόρειες
(GX: Κυπαρίσσι & Τραχεία πεύκη)	2: Μέτριος	BN: Βόρειες και νότιες
D: Ζώνη κυπαρίσσου - σφενδάμου	3: Έντονος	QQ: Ποικίλες
Y: Ψευδαλπική Ζώνη	4: Γυμνή από βλάστηση έκταση	NB: Νότιες και βόρειες
	5: Χορτολίβαδα	NN: Νότιες
	6: Φρύγανα	EE: Επίπεδα
	9: Καλλιεργημένη έκταση	EB: Επίπεδα και βόρειες
		EN: Επίπεδα και νότιες
		BE: Βόρειες και επίπεδα
		NE: Νότιες και επίπεδα
		QE: Ποικίλες και επίπεδα
		EQ: Επίπεδα και ποικίλες

5.2. Εφαρμογή μεθόδου ΕΡΙΚ

Οι τιμές του παράγοντα προστασίας F_p υπολογίσθηκαν με βάση τη σχέση 3.4 (κεφ. 3).

Η βαθμολογία κάθε τμήματος της περιοχής μελέτης, καθώς και η τελική τιμή της τρωτότητας φαίνεται στο Πίνακα 5.4.

Ο χαρακτηρισμός των ζωνών τρωτότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5.

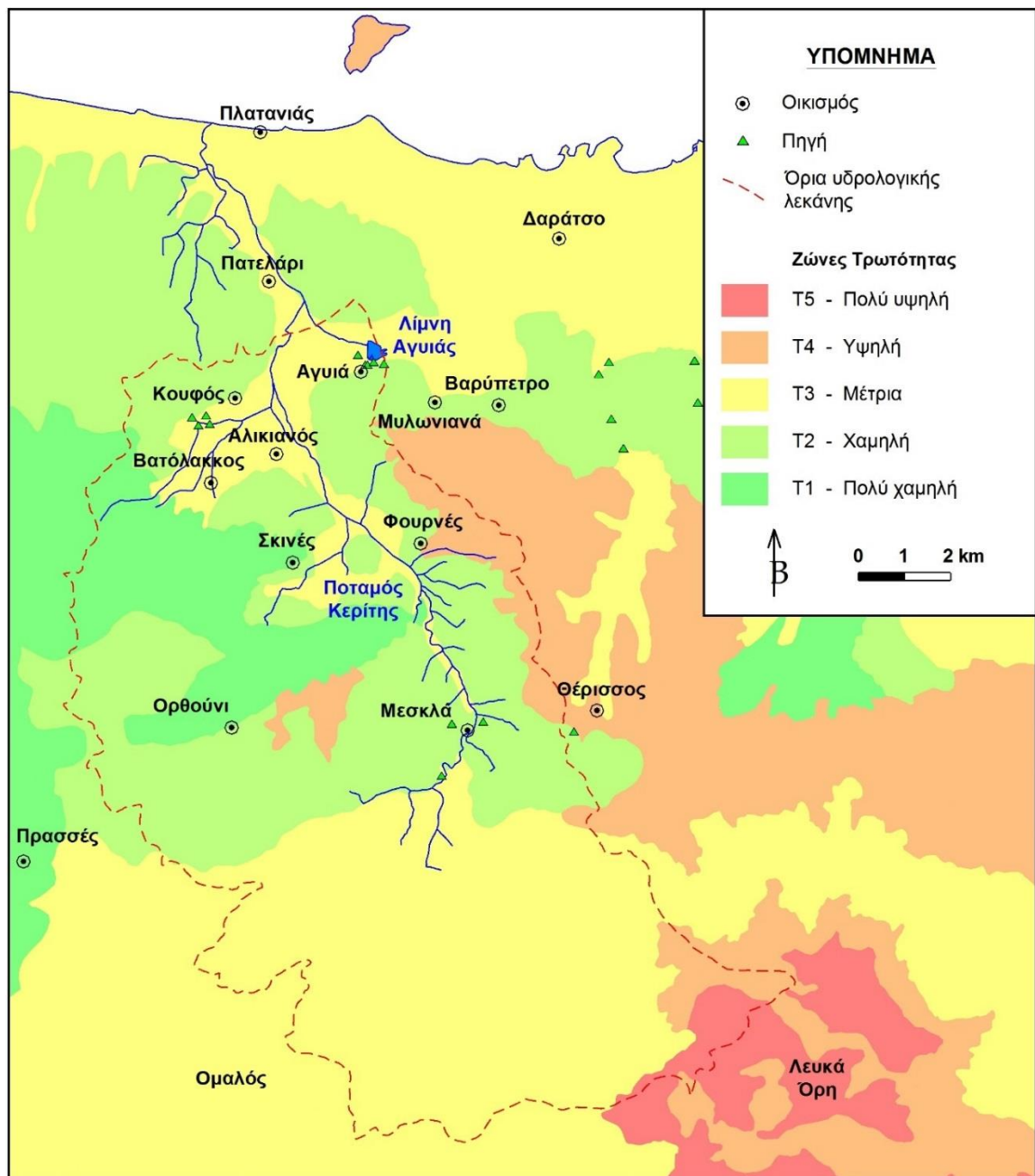
Ο χάρτης τρωτότητας που προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

Πίνακας 5.4: Εκτίμηση τιμών F_p σε κάθε περιοχή του εδαφολογικού χάρτη (Σχήμα 5.1).

Εδαφολογικός κωδικός	Βαθμολογία ΕΡΙΚ				F_p
	Ε	Ρ	Ι	Κ	
A8-111-1-G9EE	2	4	1	3	19
A9-111-1-D5EE	2	4	1	3	19
C2C7-728-1-G6BN	1	3	4	2	22
C2C7-828-1-G3BN	1	2	4	2	21
C2C7-828-1-GX1NB	2	2	4	1	22
C2C7-828-2-GX1NB	2	2	4	1	22
C3C4-625-1-Y1BN	2	2	3	1	19
C3C4-915-1-Y1QQ	1	1	3	1	15
C3C5-815-1-D1QQ	2	2	3	1	19
C3C5-825-1-D2BB	2	2	3	1	19
C3C7-524-1-G1BB	2	1	2	1	15
C3C7-622-1-G6BN	2	2	2	1	16
C3C7-623-1-G3NN	1	2	2	2	15
C3C7-624-1-G3BN	2	2	2	1	16
C3C7-624-1-GX3BB	2	2	2	1	16
C3C7-725-1-G3NB	1	3	3	2	19
C4-915-1-Y1BB	2	1	2	1	15
C4C3-912-1-Y1QQ	2	1	1	1	12
C4C3-912-2-Y1QQ	2	1	1	1	12
C5-825-1-GX3BB	2	2	3	2	21
C5C3-625-1-GX1BN	3	2	3	1	22
C5C3-626-1-D3BN	2	2	3	2	21
C5C3-626-2-D3BN	2	2	2	2	18
C5C3-824-1-G6BB	3	2	1	1	16
C5C3-825-1-D3BB	2	2	2	2	18
C5C3-825-1-GX1BB	3	2	2	1	19
C7-424-1-G9NB	2	3	3	2	22
C7C2-826-1-G3BB	2	2	2	2	18
C7C3-411-1-G9BN	2	3	3	2	22
T3T7-112-1-G9BN	2	4	3	3	25
T3T7-112-2-G9BN	2	4	3	3	25
T3T7-212-1-G9BN	2	3	3	3	24
T3T7-421-1-G6QQ	2	3	1	3	18
T7T3-111-1-G9BB	2	4	1	3	19
T7T3-111-3-G9BB	2	4	1	3	19
T7T3-424-1-G6BB	2	3	3	3	24
T7T3-425-1-G2BN	2	3	3	3	24
X3X5-425-1-G1BB	3	4	3	3	28
X3X5-444-1-G6BN	2	4	3	3	25
X3X7-124-1-G9BN	2	4	3	3	25
X3X7-211-1-G9QQ	2	4	3	3	25
X3X7-214-1-G1BN	3	4	3	3	28
X3X7-215-1-G1BN	3	4	3	3	28
X3X7-224-1-G9BB	2	4	3	3	25
X3X7-224-1-G9BN	2	4	3	3	25
X3X7-224-2-G9BN	2	4	3	3	25
X3X7-455-1-G6BB	2	4	3	3	25
X5X3-225-1-G1BN	3	4	3	3	28
X7V7-111-1-G9BB	3	4	3	3	28
X7X3-125-1-G9BB	3	4	3	3	28

Πίνακας 5.5: Ζώνες τρωτότητας έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου ΕΡΙΚ.

Κωδικός	Χαρακτηρισμός τρωτότητας	Fp
T5	Πολύ Υψηλή	< 13
T4	Υψηλή	13-17
T3	Μέτρια	18-22
T2	Χαμηλή	23-27
T1	Πολύ Χαμηλή	> 27



Σχήμα 5.2: Χάρτης τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος κατά ΕΡΙΚ.

5.3. Εφαρμογή μεθόδου PRESK

Για την εκτίμηση της τιμής της τρωτότητας κατά PRESK χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εδαφολογικός χάρτης (Σχήμα 5.1) και οι σχέσεις 3.10 και 3.11 (βλέπε κεφ. 3).

Η βαθμολογία κάθε τμήματος της περιοχής μελέτης, καθώς και η τελική τιμή της τρωτότητας φαίνεται στο Πίνακα 5.6.

Ο χαρακτηρισμός των ζωνών τρωτότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7.

Ο χάρτης τρωτότητας που προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

5.4. Εφαρμογή μεθόδου DRISTPi

Για την εκτίμηση της τιμής της τρωτότητας κατά DRISTPi χρησιμοποιήθηκε ο εδαφολογικός χάρτης του Σχήματος 5.1 και η σχέση 3.12 (βλέπε κεφ. 3).

Η βαθμολογία κάθε τμήματος της περιοχής μελέτης, καθώς και η τελική τιμή της τρωτότητας φαίνεται στον Πίνακα 5.8.

Ο χαρακτηρισμός των ζωνών τρωτότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9.

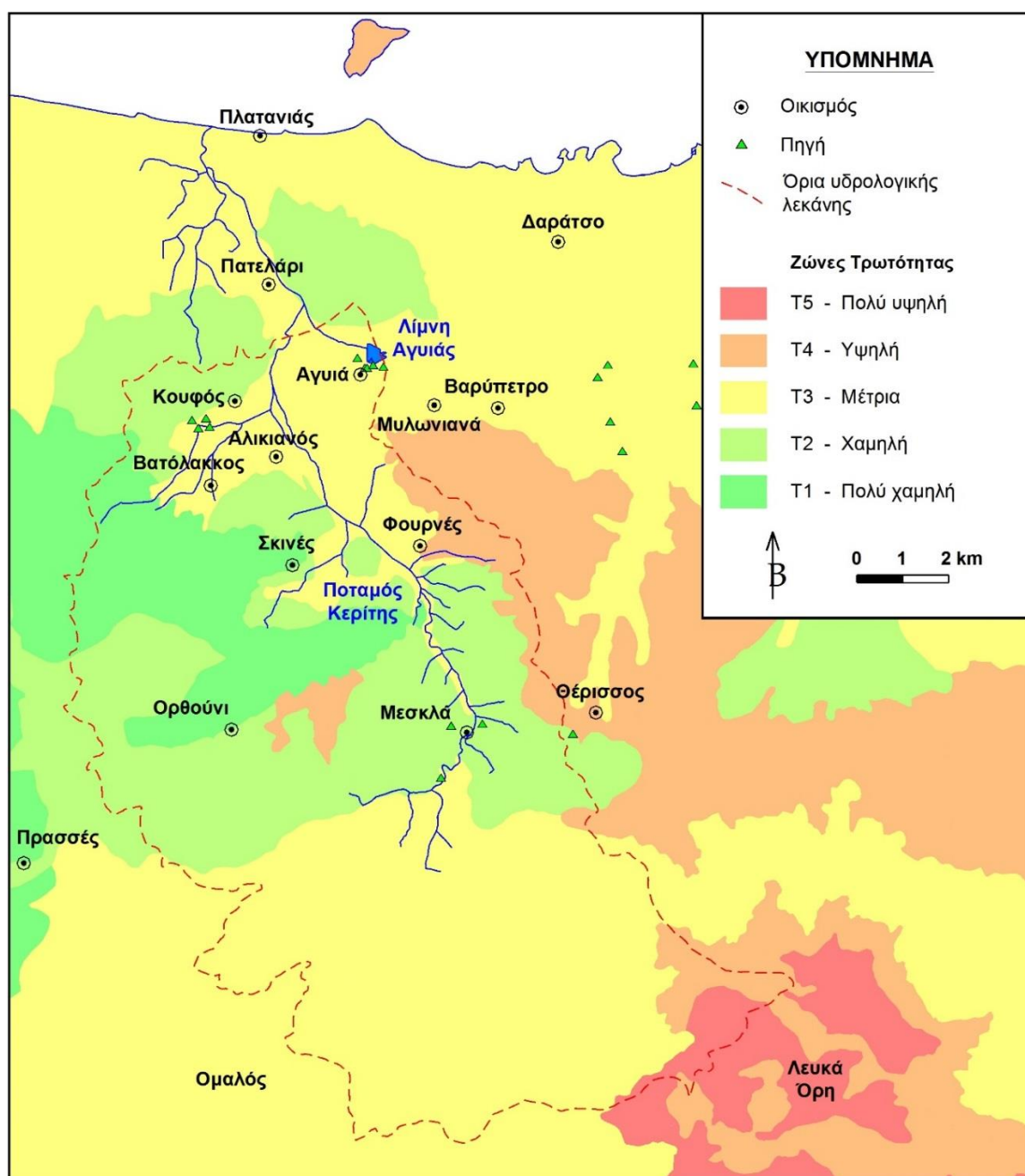
Ο χάρτης τρωτότητας που προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

Πίνακας 5.6: Εκτίμηση τιμών I_{PRESK} σε κάθε περιοχή του εδαφολογικού χάρτη (Σχήμα 5.1).

Εδαφολογικός κωδικός	Βαθμολογία PRESK						I_{PRESK}
	I	V	R	E	S	K	
A8-111-1-G9EE	3	2	1	3	0	0	1.3
A9-111-1-D5EE	3	2	1	3	0	0	1.3
C2C7-728-1-G6BN	0	2	2	2	2	2	1.6
C2C7-828-1-G3BN	0	2	2	2	2	2	1.6
C2C7-828-1-GX1NB	0	2	2	2	2	2	1.6
C2C7-828-2-GX1NB	0	2	2	2	2	2	1.6
C3C4-625-1-Y1BN	1	3	2	1	2	2	1.7
C3C4-915-1-Y1QQ	1	3	2	1	3	3	2.2
C3C5-815-1-D1QQ	1	1	2	1	2	2	1.6
C3C5-825-1-D2BB	1	2	2	1	2	2	1.6
C3C7-524-1-G1BB	2	1	2	1	3	2	2.2
C3C7-622-1-G6BN	2	2	2	1	2	2	1.8
C3C7-623-1-G3NN	2	2	2	2	2	2	2.0
C3C7-624-1-G3BN	2	2	2	1	2	2	1.8
C3C7-624-1-GX3BB	2	2	2	1	2	2	1.8
C3C7-725-1-G3NB	1	2	2	2	2	1	1.7
C4-915-1-Y1BB	1	3	3	1	3	3	2.3
C4C3-912-1-Y1QQ	3	3	3	0	3	3	2.5
C4C3-912-2-Y1QQ	3	3	3	0	3	3	2.5
C5-825-1-GX3BB	1	1	3	1	2	2	1.7
C5C3-625-1-GX1BN	1	0	3	1	2	3	1.7
C5C3-626-1-D3BN	1	2	3	1	2	2	1.7
C5C3-626-2-D3BN	0	2	3	2	2	2	1.7
C5C3-824-1-G6BB	2	2	3	1	2	2	1.9
C5C3-825-1-D3BB	1	2	3	1	2	2	1.7
C5C3-825-1-GX1BB	1	0	3	0	2	3	1.5
C7-424-1-G9NB	2	2	3	1	1	3	1.6
C7C2-826-1-G3BB	0	2	3	1	2	3	1.6
C7C3-411-1-G9BN	3	2	3	1	1	1	1.7
T3T7-112-1-G9BN	2	2	1	3	1	0	1.5
T3T7-112-2-G9BN	2	2	1	3	1	0	1.5
T3T7-212-1-G9BN	2	2	1	3	1	0	1.5
T3T7-421-1-G6QQ	3	2	1	3	1	0	1.7
T7T3-111-1-G9BB	3	2	1	3	0	0	1.3
T7T3-111-3-G9BB	3	2	1	3	0	0	1.3
T7T3-424-1-G6BB	2	2	1	3	1	0	1.5
T7T3-425-1-G2BN	2	2	1	3	1	0	1.5
X3X5-425-1-G1BB	1	1	0	1	0	0	0.4
X3X5-444-1-G6BN	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-124-1-G9BN	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-211-1-G9QQ	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-214-1-G1BN	1	1	0	1	0	0	0.4
X3X7-215-1-G1BN	1	1	0	1	0	0	0.4
X3X7-224-1-G9BB	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-224-1-G9BN	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-224-2-G9BN	1	2	0	3	0	0	0.8
X3X7-455-1-G6BB	1	2	0	3	0	0	0.8
X5X3-225-1-G1BN	1	1	0	1	0	0	0.4
X7V7-111-1-G9BB	1	2	0	1	1	0	0.9
X7X3-125-1-G9BB	1	2	0	1	1	0	0.9

Πίνακας 5.7: Ζώνες τρωτότητας έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου PRESK.

Κωδικός	Χαρακτηρισμός τρωτότητας	Ig
T5	Πολύ Υψηλή	> 2.4
T4	Υψηλή	1.9-2.4
T3	Μέτρια	1.3-1.8
T2	Χαμηλή	0.7-1.2
T1	Πολύ Χαμηλή	< 0.7



Σχήμα 5.3: Χάρτης τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος κατά PRESK.

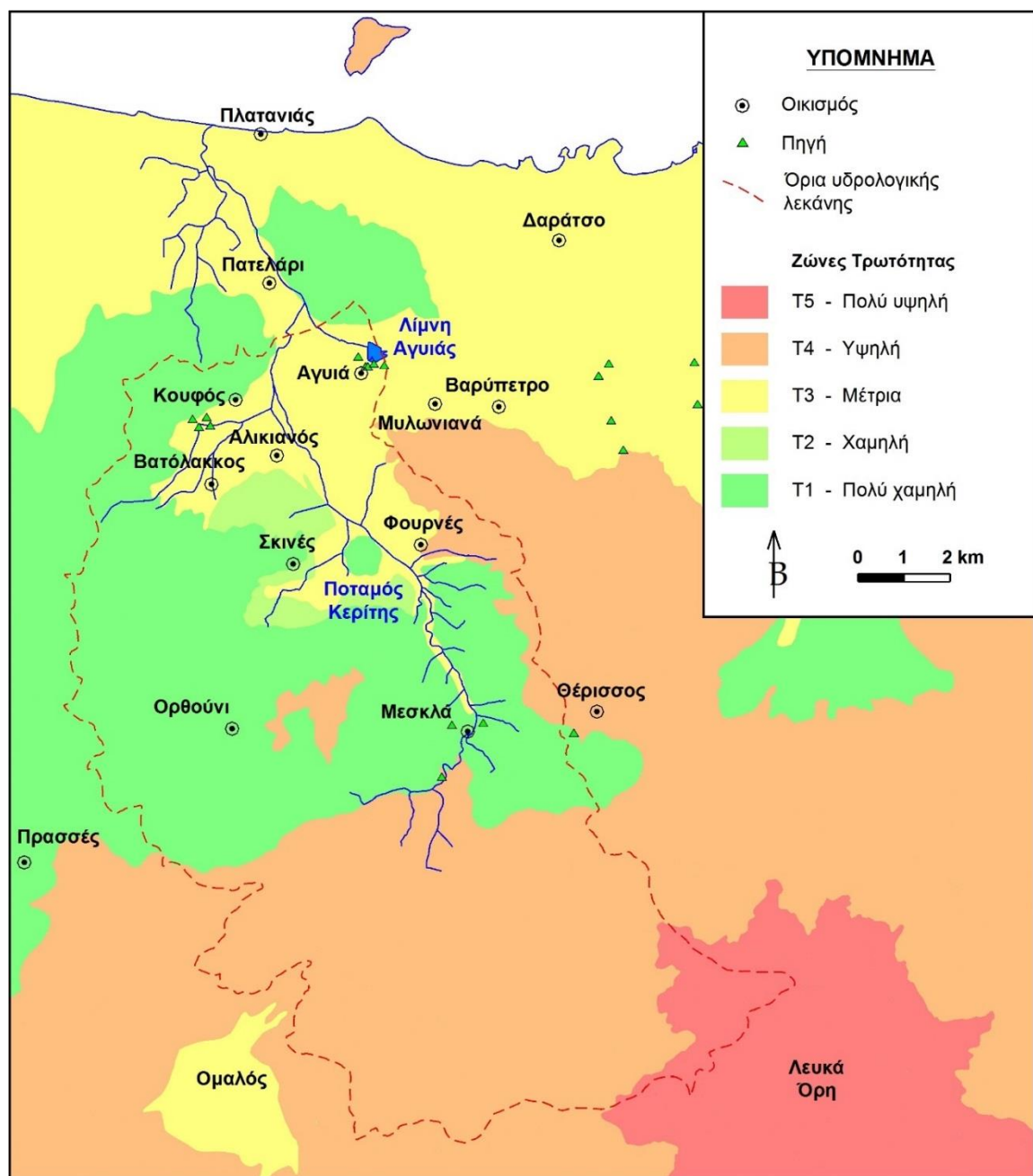
Πίνακας 5.8: Εκτίμηση τιμών $I_{DRISTPi}$ σε κάθε περιοχή του εδαφολογικού χάρτη (Σχήμα

5.1).

Εδαφολογικός κωδικός	Βαθμολογία DRISTPi						$I_{DRISTPi}$
	D	R	I	S	T	Pi	
A8-111-1-G9EE	5	4	3	6	5	6	88
A9-111-1-D5EE	5	4	6	6	5	3	88
C2C7-728-1-G6BN	7	8	6	1	2	7	115
C2C7-828-1-G3BN	7	7	6	1	2	7	111
C2C7-828-1-GX1NB	7	8	6	1	2	7	115
C2C7-828-2-GX1NB	7	8	6	1	2	7	115
C3C4-625-1-Y1BN	7	9	6	1	3	7	120
C3C4-915-1-Y1QQ	7	9	10	1	3	10	155
C3C5-815-1-D1QQ	7	9	6	1	3	7	120
C3C5-825-1-D2BB	7	8	6	1	3	7	116
C3C7-524-1-G1BB	7	9	6	1	4	7	121
C3C7-622-1-G6BN	7	8	6	1	4	7	117
C3C7-623-1-G3NN	7	7	6	1	3	7	112
C3C7-624-1-G3BN	7	7	6	1	4	7	113
C3C7-624-1-GX3BB	7	7	6	1	4	7	113
C3C7-725-1-G3NB	7	7	6	1	3	7	112
C4-915-1-Y1BB	7	9	10	1	3	10	155
C4C3-912-1-Y1QQ	7	9	10	1	4	10	156
C4C3-912-2-Y1QQ	7	9	10	1	4	10	156
C5-825-1-GX3BB	7	7	6	1	3	7	112
C5C3-625-1-GX1BN	7	9	6	1	3	7	120
C5C3-626-1-D3BN	7	7	6	1	2	7	111
C5C3-626-2-D3BN	7	7	6	1	2	7	111
C5C3-824-1-G6BB	7	8	6	1	4	7	117
C5C3-825-1-D3BB	7	7	6	1	3	7	112
C5C3-825-1-GX1BB	7	9	6	1	3	7	120
C7-424-1-G9NB	7	7	6	1	4	7	113
C7C2-826-1-G3BB	7	7	6	1	2	7	111
C7C3-411-1-G9BN	7	7	6	1	5	7	114
T3T7-112-1-G9BN	2	6	6	3	4	6	98
T3T7-112-2-G9BN	2	6	6	3	4	3	83
T3T7-212-1-G9BN	2	6	6	3	4	3	83
T3T7-421-1-G6QQ	2	6	6	3	5	6	99
T7T3-111-1-G9BB	2	6	6	3	5	6	99
T7T3-111-3-G9BB	2	6	6	3	5	6	99
T7T3-424-1-G6BB	2	6	6	3	4	6	98
T7T3-425-1-G2BN	2	6	6	3	3	6	97
X3X5-425-1-G1BB	1	2	3	5	3	1	43
X3X5-444-1-G6BN	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-124-1-G9BN	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-211-1-G9QQ	1	2	3	5	5	1	45
X3X7-214-1-G1BN	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-215-1-G1BN	1	2	3	5	3	1	43
X3X7-224-1-G9BB	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-224-1-G9BN	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-224-2-G9BN	1	2	3	5	4	1	44
X3X7-455-1-G6BB	1	2	3	5	3	1	43
X5X3-225-1-G1BN	1	2	3	5	3	1	43
X7V7-111-1-G9BB	1	2	3	5	5	1	45
X7X3-125-1-G9BB	1	2	3	5	3	1	43

Πίνακας 5.9: Ζώνες τρωτότητας έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου DRISTPi.

Κωδικός	Χαρακτηρισμός τρωτότητας	I _{DRISTPi}
T5	Πολύ Υψηλή	140-190
T4	Υψηλή	110-139
T3	Μέτρια	80-109
T2	Χαμηλή	50-79
T1	Πολύ Χαμηλή	19-49



Σχήμα 5.4: Χάρτης τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος κατά DRISTPi.

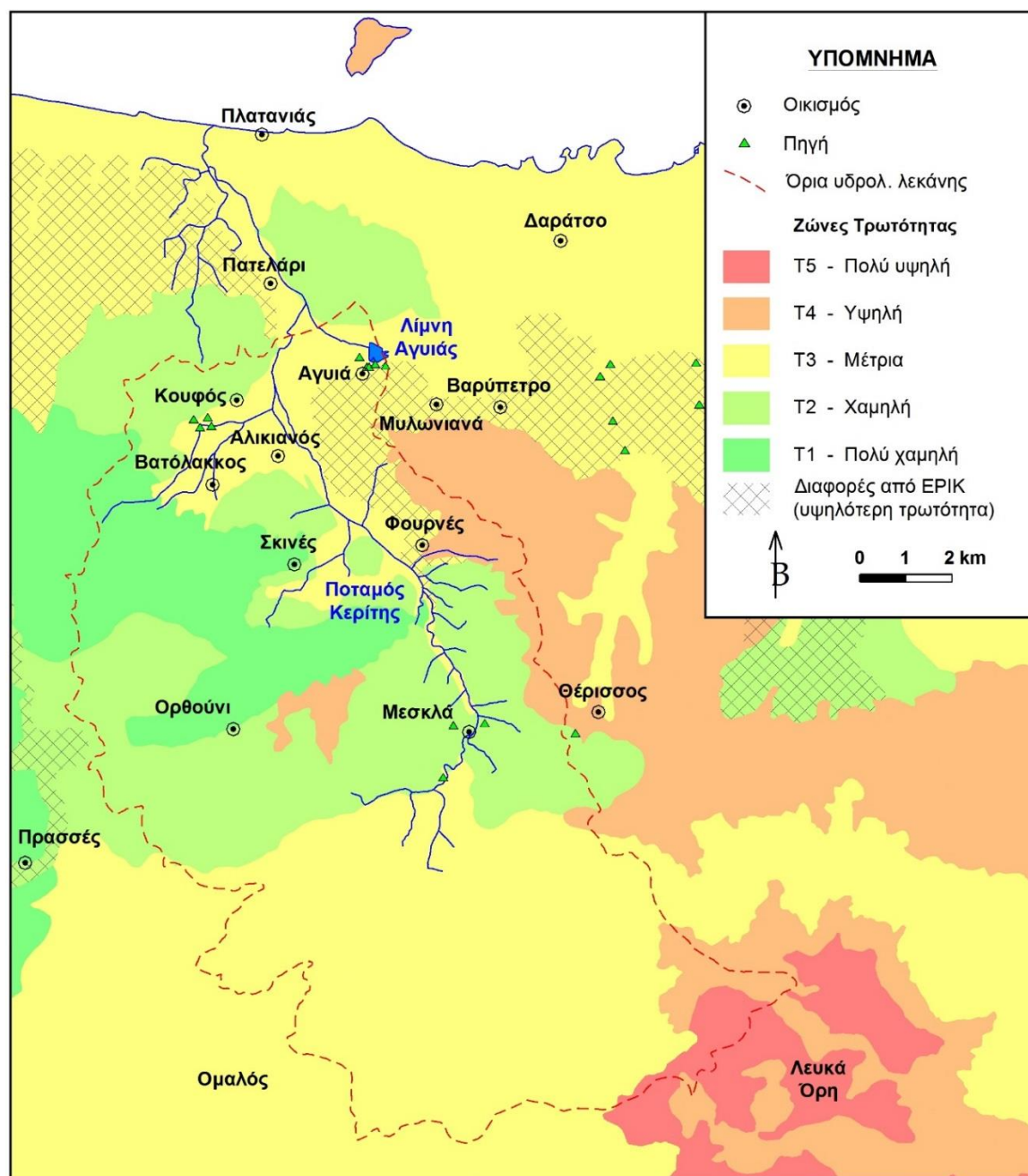
5.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των μεθόδων EPIK και PRESK είναι σχεδόν ταυτόσημα στην περιοχή έρευνας, με πιο απαισιόδοξη την μέθοδο PRESK. Στο Σχήμα 5.5 εμφανίζονται γραμμοσκιασμένες οι περιοχές όπου η μέθοδος PRESK υποδεικνύει υψηλότερη τρωτότητα από την EPIK (από T1 σε T2 και από T2 σε T3).

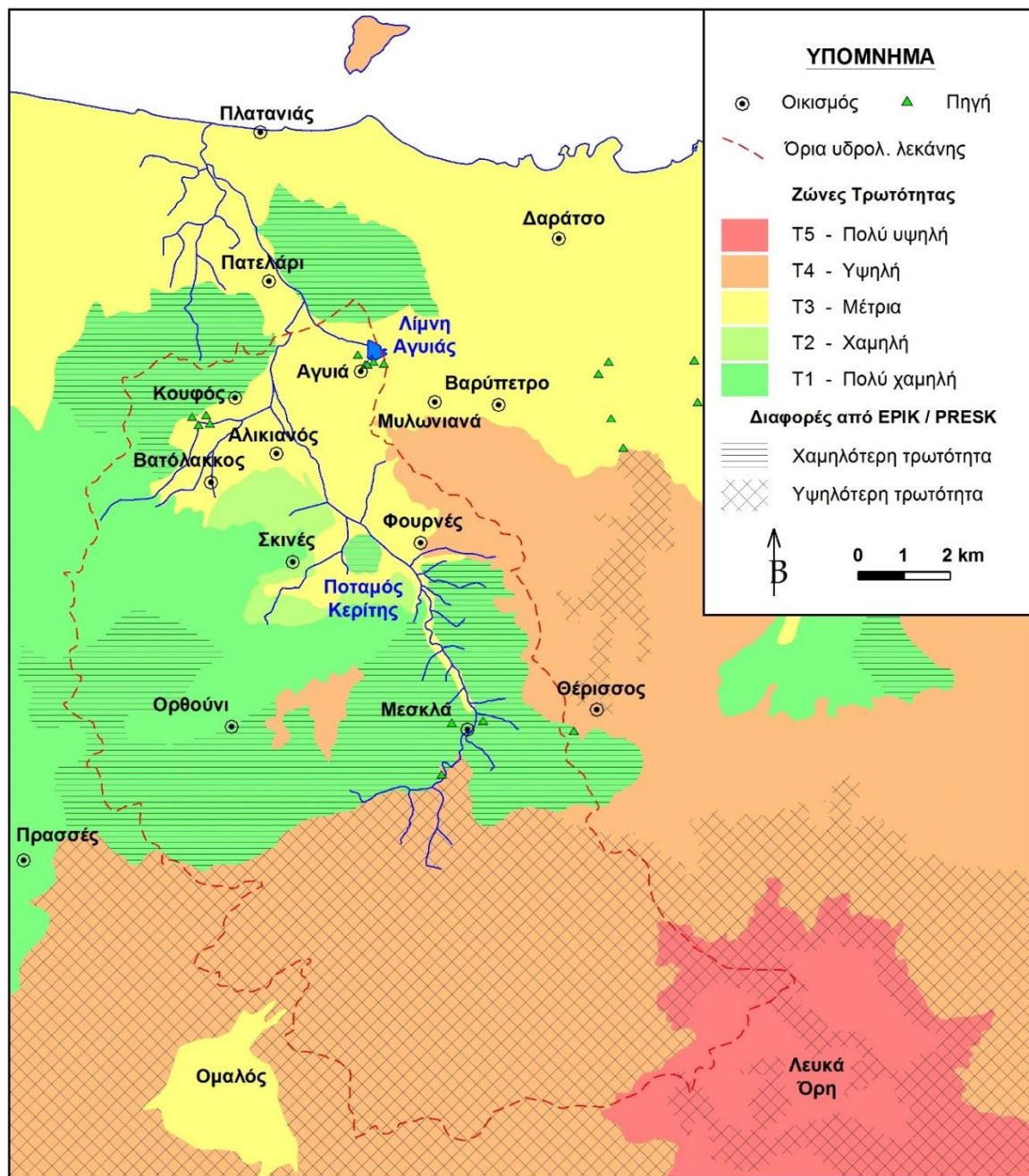
Εντούτοις, αν και με τις δύο μεθόδους λαμβάνονται υπόψη τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα (π.χ. ανάπτυξη του καρστ), δεν λαμβάνεται υπόψη η ροή του υπόγειου νερού. Επίσης, πρόκειται για ποιοτικές μεθόδους στις οποίες η βαθμολόγηση γίνεται με βάση περιγραφές και υποκειμενικές εκτιμήσεις (Βαβαδάκης κ.ά., 2022).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου DRISTPi κρίνονται ως ασφαλέστερα σε σχέση με αυτά της EPIK και της PRESK (βλέπε Σχήμα 5.6), υπό την έννοια ότι δίδει έμφαση στην τρωτότητα των καρστικών σχηματισμών που αποτελούν τις πιο ευάλωτες περιοχές στην ρύπανση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την DRISTPi αξιολογούνται παράμετροι που αγνοούνται στις άλλες δύο μεθόδους, όπως η επαναφόρτιση του υδροφορέα και κυρίως οι προνομοιακές κατεισδύσεις που είναι σημαντικές στα καρστικά συστήματα (Μουρκάκου κ.ά., 2022).

Και στις τρεις μεθόδους οι ζώνες τρωτότητας με τον μικρότερο βαθμό προστασίας εντοπίζονται στις περιοχές όπου η διείσδυση του νερού ευνοείται από τον κερματισμό και τον βαθμό αποκάρσωσης (πολύ υψηλή και υψηλή τρωτότητα). Διαπιστώνεται όμως, ότι με την μέθοδο DRISTPi υποβαθμίζεται η τρωτότητα των μη καρστικών σχηματισμών, ενώ αντίθετα αναβαθμίζεται αυτή των καρστικών PRESK (Μουρκάκου κ.ά., 2022).



Σχήμα 5.5: Χάρτης τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος κατά PRESK, στον οποίο σημειώνονται οι διαφορές από την εφαρμογή της ΕΡΙΚ (Βαβαδάκης κ.ά., 2022).



Σχήμα 5.6: Χάρτης τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος κατά DRISTPi, στον οποίο σημειώνονται οι διαφορές από την εφαρμογή των ΕΠΙΚ και PRESK (Μουρκάκου κ.ά., 2022).

6. ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΝΕΡΟΥ (ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ)

Η οριοθέτηση των Ζωνών Προστασίας πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους:

- Με προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων μέσω του λογισμικού MODFLOW και τη δημιουργία των ισόχρονων ζωνών των 50 ημερών με τη βοήθεια της υπο-ρουτίνας Modpath.
- Με χρήση εμπειρικών εξισώσεων.

6.1. Προσομοίωση ροής υπόγειων υδάτων και δημιουργία ισόχρονων ζωνών

Ένα μοντέλο αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση του πολύπλοκου φυσικού κόσμου. Τα εννοιολογικά μοντέλα της ροής των υπόγειων υδάτων συγκεντρώνουν και παρουσιάζουν με απλό τρόπο όλη την υπάρχουσα γνώση σχετικά με την υδρογεωλογία της περιοχής. Πρόκειται για ένα τρόπο απόδοσης της παλαιότερης και της τρέχουσας κατάστασής του υπό μελέτη συστήματος, βάσει πληροφοριών που έχουν συγκεντρωθεί από το πεδίο ή από παρόμοια συστήματα (Anderson et al., 2015).

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα διακρίνονται σε φυσικά (εργαστηριακά) και μαθηματικά μοντέλα και παρόλο που δεν απαιτούνται κατά την διερεύνηση των υδρογεωλογικών προβλημάτων, σχεδόν όλα μπορούν να επωφεληθούν από αυτά (Anderson et al., 2015).

Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα data-driven και τα process-based μοντέλα. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται εμπειρικές ή/ και στατιστικές σχέσεις προερχόμενες από τα διαθέσιμα δεδομένα για την εκτίμηση μιας άγνωστης μεταβλητής. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται διαδικασίες και αρχές της φυσικής επιστήμης. Ειδικότερα, διακρίνονται σε στοχαστικά, όταν οποιαδήποτε από τις παραμέτρους τους χαρακτηρίζεται από μια πιθανοτική κατανομή και ντετερμινιστικά (Anderson et al., 2015).

Ένα process-based μαθηματικό μοντέλο της υπόγειας ροής των υδάτων διαμορφώνεται σε τρία στάδια:

1. Τη μαθηματική σχέση που περιγράφει τις φυσικές διεργασίες του υπό μελέτη πεδίου.
2. Τον ορισμό των οριακών συνθηκών του.
3. Τον ορισμό των συνθηκών κατά την έναρξη της προσομοίωσης.

Τα μαθηματικά μοντέλα δύνανται να επιλυθούν με αναλυτικό ή αριθμητικό τρόπο.

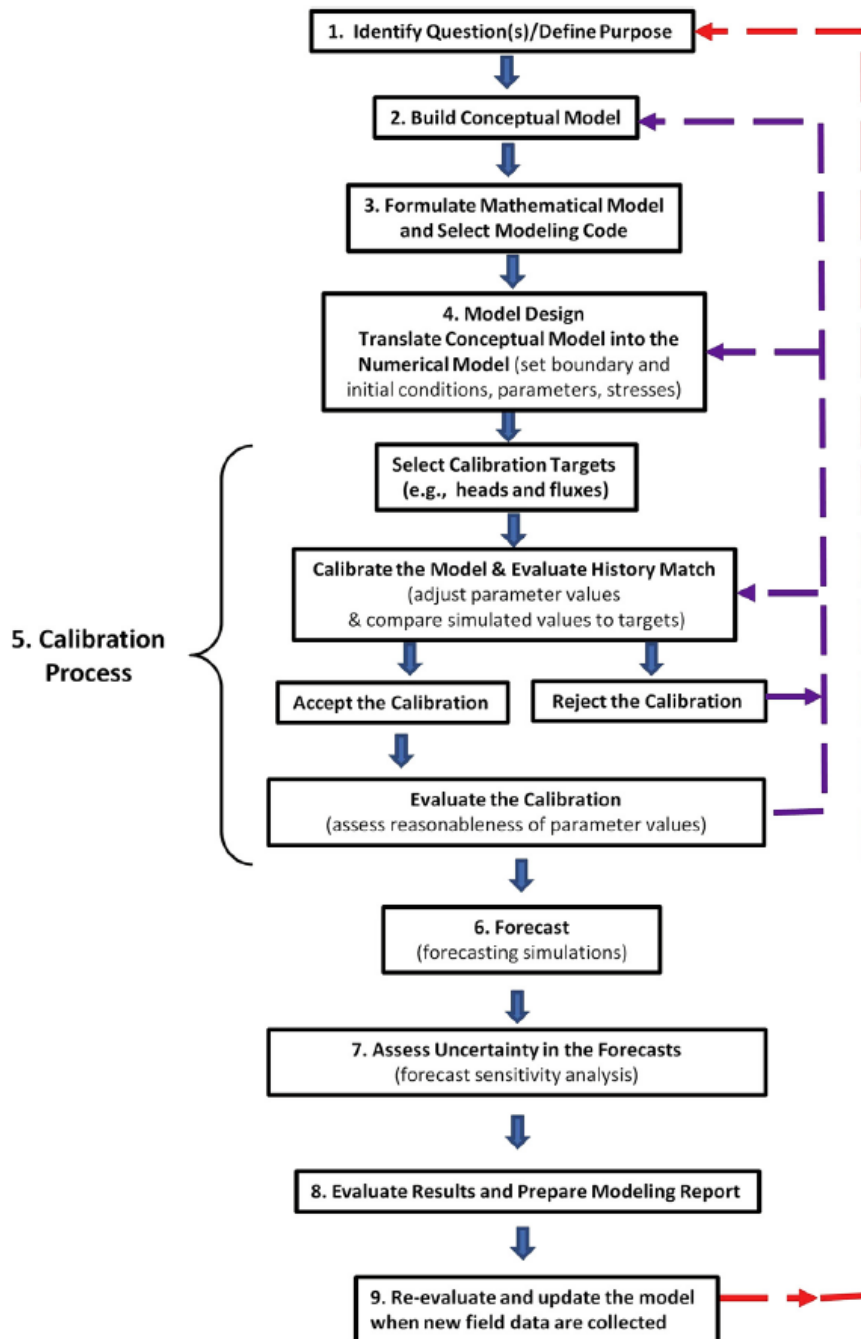
Τα αριθμητικά μοντέλα βασίζονται κυρίως είτε στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και αξιοποιούνται στη τρισδιάστατη προσομοίωση της σταθερής ή μεταβλητής ροής σε ένα ετερογενές μέσο με περίπλοκες οριακές συνθήκες και χαρακτηριστικά. Η πολυπλοκότητα ενός αριθμητικού μοντέλου εξαρτάται από τον αριθμό των φυσικών διεργασιών που καλείται να περιγράψει και τον αριθμό των κελιών, των στρωμάτων και των παραμέτρων (Anderson et al., 2015).

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής ξεκινούν με τον προσδιορισμό του σκοπού για τον οποίο πρόκειται να δημιουργηθούν. Ο συνηθέστερος σκοπός τους είναι ο προσδιορισμός κάποιας μελλοντικής υδρολογικής κατάστασης ωστόσο σπανιότερα χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσομοιώσουν παρελθοντικές συνθήκες ή ως ερμηνευτικά εργαλεία (Anderson et al., 2015).

Οι Reilly και Hardbaugh αναγνώρισαν πέντε λόγους για τους οποίους κατασκευάζονται τα συγκεκριμένα μοντέλα (Anderson et al., 2015):

1. Η βασική κατανόηση του συστήματος των υπογείων υδάτων.
2. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υδροφορέα.
3. Η κατανόηση της υφιστάμενης κατάστασης του συστήματος.
4. Η κατανόηση της μελλοντικής κατάστασης του συστήματος.
5. Η κατανόηση της παρελθούσας κατάστασης του συστήματος.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας της προσομοίωσης όπως την προτείνουν οι Anderson et al. (2015), η οποία αποτελείται συνολικά από εννέα βήματα.



Σχήμα 6.1: Απεικόνιση των βημάτων στη διαδικασία προσομοίωσης της υπόγειας ροής (Anderson and Woessner, 2015).

Κάθε μοντέλο διέπεται από ορισμένους περιορισμούς. Καθώς αποτελούν απλοποιήσεις της πραγματικότητας περιορίζονται από τις απλουστευτικές προσεγγίσεις τους, τη μη μοναδικότητα και την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων τους. Ο όρος μη μοναδικότητα περιγράφει το γεγονός πως διάφοροι συνδυασμοί εισόδου παράγουν αποτελέσματα που συμφωνούν με τα δεδομένα του πεδίου (Anderson et al., 2015).

Η αβεβαιότητα των συγκεκριμένων μοντέλων προκύπτει από μια σειρά παραγόντων που σχετίζονται με την αναπαράσταση των διεργασιών στις οποίες υποβάλλονται τα υπόγεια ύδατα κατά την ροή τους. Πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τυχόν υποθέσεις τις οποίες κάνει ο μελετητής κατά τη δημιουργία του μοντέλου, από υδρογεωλογικές συνθήκες που δεν μπορούν να περιγραφούν ή να ποσοτικοποιηθούν επαρκώς, αλλά και από μη αναμενόμενα στοιχεία όπως τυχόν ετερογένεια όσον αφορά τις ιδιότητες του υπεδάφους (Anderson et al., 2015).

Για την οριοθέτηση των ζωνών προστασίας, χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο ροής των υπόγειων νερών που έχει κατασκευασθεί με χρήση του κώδικα MODFLOW-2000.

Η περιοχή μελέτης καλύπτει μία έκταση 20,7 km² και περιλαμβάνει την κύρια ζώνη εκφόρτισης του υδροφορέα της Αγυιάς. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε βάσει δεδομένων πεδίου (Steiakakis et al., 2015).

Το παραπάνω μοντέλο επικαιροποιήθηκε με βάση τα τελευταία (μετά το 2017) διατιθέμενα δεδομένα. Με βάση τις επιλύσεις του σχεδιάστηκαν οι ισόχρονες περιοχές των 50 ημερών όπως ορίζουν οι Τεχνικές Προδιαγραφές των Ζωνών Προστασίας (ΥΠΕΝ, 2021β).

6.2. Κώδικας MODFLOW

Το MODFLOW είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος κώδικας προσομοίωσης της ροής των υπόγειων υδάτων. Βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων διαφορών και σχεδιάστηκε από το United States Geological Survey (USGS).

Επιτρέπει τη δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου των υδρογεωλογικών συνθηκών του υπό μελέτη πεδίου. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφόρων κατά την οποία το μοντέλο διακρίνεται σε σειρές, στήλες και στρώματα και ορίζεται ένα σύνολο κελιών (grid blocks), μέσω των οποίων περιγράφεται η χωρική μεταβολή των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων. Κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου, κάθε κελί δέχεται τιμές σχετικά με τις παραπάνω ιδιότητες καθώς και σχετικά με τις διαστάσεις του και στη συνέχεια το πρόγραμμα MODFLOW χρησιμοποιεί τις κατάλληλες εξισώσεις πεπερασμένων διαφόρων για να υπολογίσει το υδραυλικό φορτίο στο κέντρο κάθε κελιού (www.waterloohydrogeologic.com).

Ο αρχικός σχεδιασμός του USGS MODFLOW απαιτούσε για τη δημιουργία των μοντέλων την εισαγωγή όλων των δεδομένων με τη μορφή txt αρχείων, γεγονός που καθιστούσε τη κατασκευή τους δύσκολη και χρονοβόρα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη δημιουργία Graphical User Interfaces (GUIs), συμπεριλαμβανομένου του Visual MODFLOW, που επιτρέπουν το γραφικό σχεδιασμό των μοντέλων στην οθόνη του υπολογιστή με τη βοήθεια dxf, txt και shp αρχείων που μπορούν να εισαχθούν με εύκολο τρόπο.

Στη συνέχεια αυτές οι Visual MODFLOW πληροφορίες μετατρέπονται από το λογισμικό σε αρχεία txt που εκτελούνται από τον κώδικα USGS MODFLOW (www.waterloohydrogeologic.com).

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του κώδικα MODFLOW είναι ότι επιτρέπει την επανεκτίμηση της κατάστασης του υπό μελέτη πεδίου στη περίπτωση που μεταβληθούν οι αρχικές συνθήκες και ο αρχικός σχεδιασμός.

Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν γραφικά σε 2D και 3D εικόνες μέσω του Visual MODFLOW, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την απεικόνιση της επίδρασης της μεταβολής της αρχικής κατάστασης του μοντέλου στο υδρογεωλογικό σύστημα (www.waterloohydrogeologic.com).

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου ύδατος στο MODFLOW είναι η ακόλουθη (USGS, 2000):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [6.1]$$

όπου,

K η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στις διευθύνσεις xx , yy και zz , αντίστοιχα,

H πιεζομετρική στάθμη,

W παροχή πηγών ή / και καταβόθρων, με $W < 0$ για ροή έξω από το σύστημα και $W > 0$ για ροή προς το υδρογεωλογικό σύστημα που εξετάζεται,

S_s ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους συστήματος, και

t ο χρόνος.

6.2.1. Γενικές παραδοχές

Κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου έγιναν οι παρακάτω παραδοχές οι οποίες κρίθηκαν απαραίτητες για την επίλυση με το πρόγραμμα MODFLOW:

- Ο καρστικός υδροφορέας θεωρήθηκε ως ισοδύναμο πορώδες μέσο και χαρακτηρίστηκε ελεύθερος με δυνατότητα μετάβασης σε υπό πίεση συνθήκες, ανάλογα με τη σχετική θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας.
- Τα διάφορα υδρολιθολογικά στρώματα είναι ομοιογενή. Η παραδοχή αυτή είναι αναγκαία προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή του νόμου του Darcy, σχέση στην οποία στηρίζεται το MODFLOW. Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ισχύει, καθώς οι καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί λειτουργούν ως ιδιαίτερη υδρολιθολογική ενότητα στην οποία η κύρια ροή συμβαίνει μέσω καρστικών αγωγών. Όμως, σε μακροκλίμακα, είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι ο Νόμος Darcy δίνει αξιόλογα αποτελέσματα, ακόμη και για τέτοιους σχηματισμούς (Στειακάκης κ.ά., 2017).
- Τα υδρολιθολογικά στρώματα θεωρήθηκαν ισότροπα. Αυτό σημαίνει ότι ο "συντελεστής ανισοτροπίας" (T_x/T_y) είναι ίσος με 1, οπότε κάθε ιδιότητα των υδρολιθολογικών σχηματισμών είναι ίση προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (x , y). Η παραδοχή αυτή έγινε λόγω ανεπάρκειας στοιχείων και όχι για "τεχνικούς" λόγους,

καθώς το MODFLOW παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να θεωρήσει τον συντελεστή ανισοτροπίας.

6.2.2. Διακριτοποίηση χώρου, σχεδιασμός ανάγλυφου και υποκείμενων στρωμάτων

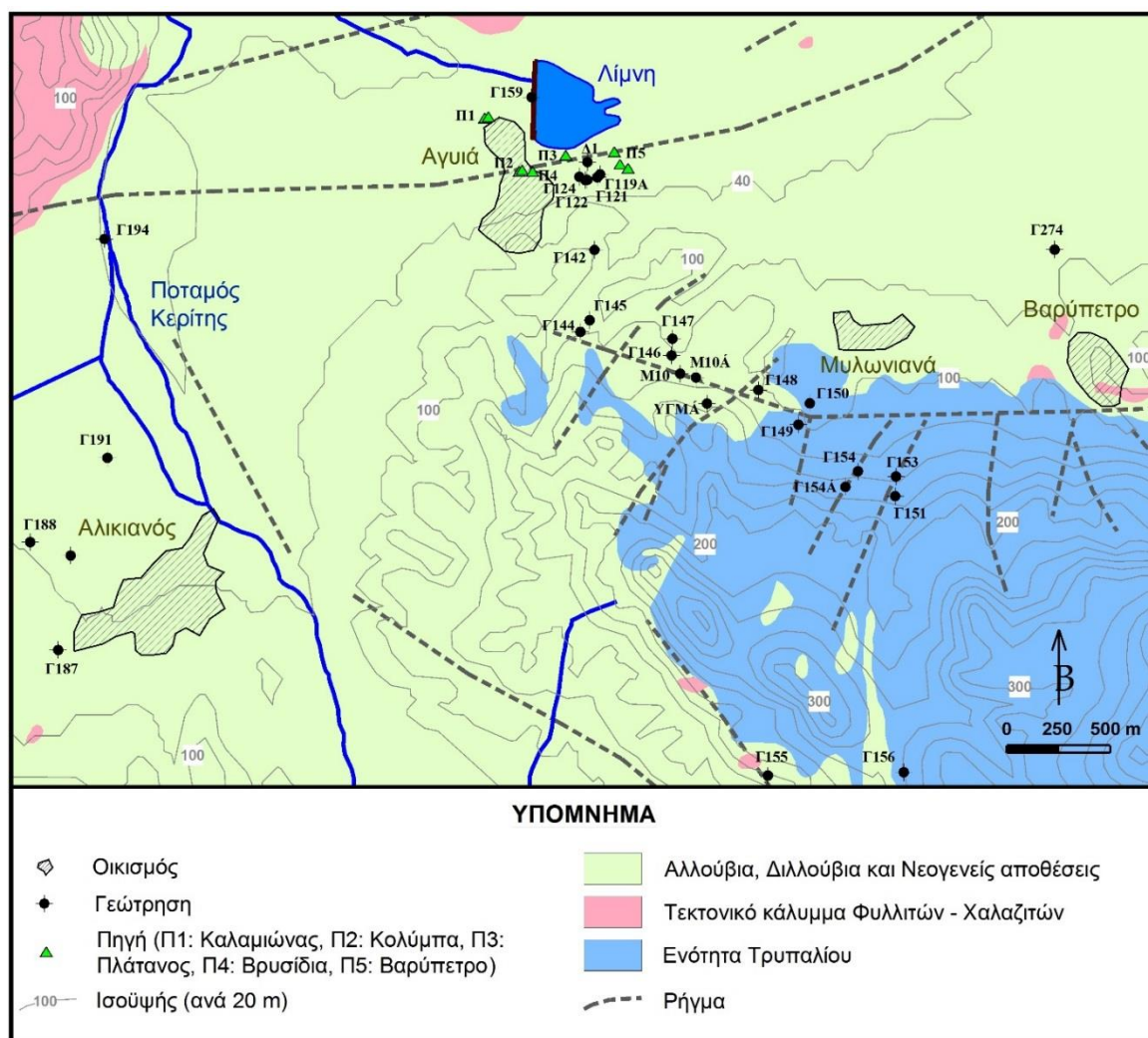
Για τη περιοχή ενδιαφέροντος δημιουργήθηκε ο απαιτούμενος κάνναβος μέσω του περιβάλλοντος GUI (Σχήμα 6.2). Η δημιουργία του καννάβου αποτελεί το πρώτο και ένα από τα πιο σημαντικά βήματα για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου. Ο αριθμός των κελιών και συνεπώς των κόμβων των κελιών επηρεάζει την ακρίβεια της επίλυσης, τον χρόνο που απαιτείται για αυτή καθώς και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

The screenshot shows the MODFLOW GUI for creating a model domain and setting units. The interface is divided into several sections:

- Create model using base Map:** A checkbox that is currently unchecked.
- Map File:** A text input field with a "Browse" button next to it.
- Model Domain:** A section containing input fields for the model domain parameters:
 - Columns(i):** 20
 - Rows(j):** 20
 - Xmin:** 0 [m]
 - Xmax:** 1000 [m]
 - Ymin:** 0 [m]
 - Ymax:** 1000 [m]
 - Layers(k):** 1
 - Zmin:** 0 [m]
 - Zmax:** 20 [m]
- Setup Transport Model:** A checkbox that is currently unchecked.
- Units:** A section containing dropdown menus for the units of the model parameters:
 - Length:** meters
 - Time:** days
 - Conductivity:** m/second
 - Pumping Rate:** m³/day
 - Recharge:** mm/year
 - Mass:** kg
 - Concentration:** mg/L
- Diagram:** A 3D diagram of a rectangular prism representing the model domain, with axes labeled x, y, and z. The top face is labeled with i, j, and k.
- Buttons:** "Create" and "Cancel" buttons at the bottom.

Σχήμα 6.2: Δημιουργία καννάβου και καθορισμός μονάδων μέτρησης.

Τα όρια της περιοχής προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3 (σημ. Σχήμα 4.5 από το κεφ. 4).



Σχήμα 6.3: Περιοχή προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού: Γεωλογικός / υδρογεωλογικός χάρτης με τα σημεία νερού.

Στη προκειμένη περίπτωση δημιουργήθηκε κάναβος 227 στηλών και 150 γραμμών, με διαστάσεις κελιού 27.9×27.5 m. Ωστόσο στο τμήμα της περιοχής μελέτης περιμετρικά των πηγών της Αγκυιάς ο κάναβος σχεδιάστηκε πιο πυκνός με μικρότερες διαστάσεις κελιού, 13.4×13.8 m.

Η ακριβής μορφολογία της επιφάνειας της περιοχής μελέτης προσδιορίστηκε μέσω τοπογραφικών χαρτών και συγκεκριμένα από τα φύλλα Βατόλακκος, Βρύσες, Περιβόλια και Χανιά, κλίμακας 1:50.000 (ΓΥΣ, 2007). Για την πιστή αναπαράσταση του ανάγλυφου της περιοχής, σχεδιάστηκαν μέσω του προγράμματος AutoCAD ισοϋψείς καμπύλες με ισοδιάσταση 20 m και όπου κρίθηκε αναγκαίο 10 m. Στη συνέχεια, ο χάρτης

μετατράπηκε, μέσω ειδικού προγράμματος (SDPS), σε μορφή πίνακα συντεταγμένων x , y , z (αρχείο ASCII, τύπου .txt) και εισήχθη στο μοντέλο.

Για την αναπαράσταση του ανάγλυφου των υπόγειων στρωμάτων και για κάθε ένα από τα τρία στρώματα υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος, κατασκευάστηκαν αρχεία ASCII, τύπου .txt, τα οποία περιλάμβαναν τις συντεταγμένες (x , y , z) του ανάγλυφου των δαπέδων τους και οι οποίες εισήχθησαν στο μοντέλο όμοια με το επιφανειακό ανάγλυφο. Ως εκ τούτου κατασκευάστηκαν τα εξής τρία στρώματα:

Στρώμα 1: Νεογενή,

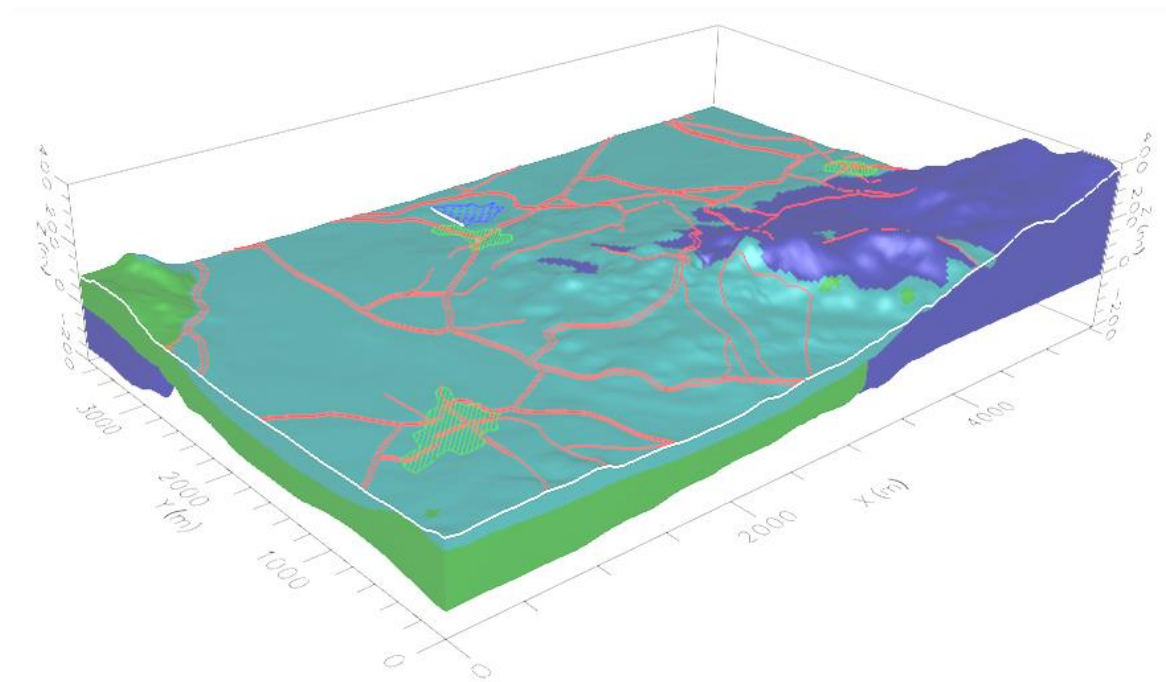
Στρώμα 2: Φυλλίτες – Χαλαζίτες, και

Στρώμα 3: Ασβεστόλιθοι Τρυπαλίου.

Για λόγους απλοποίησης του σχεδιασμού του μοντέλου, οι λοιποί γεωλογικοί σχηματισμοί, μικρότερης έκτασης και υδρογεωλογικής σημασίας συμπεριλήφθηκαν ανάλογα με τα υδρογεωλογικά τους χαρακτηριστικά σε κάποιο από τα παραπάνω τρία στρώματα.

Επίσης, το MODFLOW δεν αναγνωρίζει ρήγματα, ενώ δεν νοείται διακοπή του στρώματος κατά την οριζόντια διεύθυνση (π.χ. λόγω απότομης βύθισης στην μια πλευρά του ρήγματος και ανύψωσης στην άλλη). Για τους λόγους αυτούς ο σχεδιασμός των ρηγμάτων προσεγγίσθηκε ως απότομα "σκαλοπάτια" των δαπέδων.

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται τρισδιάστατη απεικόνιση (μέσω του βοηθητικού προγράμματος D-Explorer), τόσο του ανάγλυφου της επιφάνειας, όσο και των δαπέδων των 3 υπόγειων στρωμάτων, όπως αυτά σχεδιάστηκαν στο μοντέλο.



Σχήμα 6.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου. Προοπτική από νοτιοδυτικά.

6.2.3. Εισαγωγή υδρογεωλογικών παραμέτρων

Η υδροπερατότητα (k) των τριών στρωμάτων υπολογίσθηκε βάσει εκτιμήσεων παλαιότερων ερευνών στην περιοχή και σε παρόμοια πετρώματα (Μονόπωλης κ.ά., 1999, Λιονής και Περλέρος, 2001).

Στον Πίνακα 6.1 αναγράφονται οι τιμές υδροπερατότητας που τελικά εισάχθηκαν στο μοντέλο.

Λόγω της θεωρούμενης ισοτροπίας, οι οριζόντιες περατότητες λήφθηκαν ίσες, δηλαδή, $k_x = k_y$. Η κατακόρυφη περατότητα (k_z) των υδροφόρων σχηματισμών τέθηκε ίση με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη για τα Νεογενή, μία τάξη μεγέθους μικρότερη για τους Ασβεστόλιθους Τρυπαλίου και ίδια για την ενότητα των Φυλλιτών – Χαλαζιτών.

Πίνακας 6.1: Τιμές υδροπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών.

Υδρολιθολογική Ενότητα	Kx, Ky (m/s)	Kz (m/s)
Νεογενή	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-7}$
Φυλλίτες – Χαλαζίτες	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Ασβεστόλιθοι Τρυπαλίου	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$

6.2.4. Εισαγωγή γεωτρήσεων άντλησης και παρατήρησης

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης αντλείται από 14 παραγωγικές γεωτρήσεις (Γ119Α, Γ121, Γ122, Γ124, Δ1, Γ144, Γ147, Γ148, Γ149, Γ153, Γ154Α, Μ10, ΥΓΜΔ), πέντε εκ των οποίων βρίσκονται στο πεδίο της Αγυιάς και οι υπόλοιπες εννέα στο πεδίο των Μυλωνιανών (Σχήμα 4.5).

Πρόκειται για γεωτρήσεις που εκμεταλλεύονται από την Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων, τον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης, τον Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων Βαρυπέτρου και την εταιρεία εμφιάλωσης "Νερά Κρήτης".

Η εισαγωγή των γεωτρήσεων στο μοντέλο πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής «Add pumping wells», με την οποία εισάγονται πληροφορίες που αφορούν τη θέση των γεωτρήσεων (ΕΓΣΑ '87), τον ρυθμό άντλησής τους σε m³/day και το μήκος των φίλτρων τους τα οποία για λόγους ευκρίνειας παρουσιάζονται ενιαία (από το ανώτερο έως το κατώτερο) και όχι ασυνεχή, όπως είναι στην πραγματικότητα.

Στον Πίνακα 6.2 δίνονται οι συντεταγμένες (κατά ΕΓΣΑ '87) των παραπάνω γεωτρήσεων, καθώς επίσης πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία τους.

Πίνακας 6.2: Στοιχεία των γεωτρήσεων άντλησης που θεωρήθηκαν στο μοντέλο.

Κωδικός γεώτρησης	X	Y	Screen Bottom (m)	Screen Top (m)	Ρυθμός άντλησης (m ³ /day)
Πεδίο Αγκυιάς					
Γ119Α	2832,32	2941,71	-28	51	-4.425
Γ121	2783,32	2929,89	-34	50	-4.200
Γ122	2774,16	2928,03	-30	52	-3.150
Γ124	2745,42	2943,94	-30	49	-4.500
Δ1	2784,26	3014,81	-166	43	-2.500
Πεδίο Μυλωνιανών					
Γ144	2748,19	2201,57	21	100	-13.500
Γ147	3188,19	2171,57	10	99	-13.500
Γ148	3608,19	1931,57	10	99	-13.500
Γ149	3822,24	1764,03	31	100	-4.500
Γ153	4284,04	1496,32	20	139	-900
Γ154Α	4037,15	1452,7	20	145	-4.500
Μ10	3238,34	1997,98	-30	109	-4.650
Μ10Α	3313,72	1978,92	30	115	-4.500
ΥΓΜΔ	3369,17	1852,79	10	135	-14.250

Επιπλέον των παραγωγικών γεωτρήσεων, υπάρχουν στη περιοχή μελέτης επίσης 18 γεωτρήσεις παρατήρησης της πιεζομετρικής στάθμης του υδροφορέα (Σχήμα 4.5).

Πρόκειται για τις γεωτρήσεις Γ119, Γ138, Γ140, Γ141, Γ142, Γ145, Γ146, Γ151, Γ154, Γ155, Γ156, Γ159, Γ187, Γ188, Γ189, Γ191, Γ194 και Γ274, οι συντεταγμένες των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Η εισαγωγή αυτών των γεωτρήσεων στο μοντέλο πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής «Add head observation wells», με την οποία εισάγονται πληροφορίες που αφορούν τις μετρήσεις στάθμης νερού σε αυτές (head).

Πίνακας 6.3: Στοιχεία των γεωτρήσεων παρατήρησης που θεωρήθηκαν στο μοντέλο.

Κωδικός γεώτρησης	X	Y	Elevation (m)	Head (m)
Γ119	2845,62	2956,14	50,0	44,5
Γ138	2245,17	3153,80	37,0	42,9
Γ140	2680,65	3031,99	41,0	42,8
Γ141	2304,34	3108,01	39,0	44,0
Γ142	2818,19	2591,57	98,0	45,6
Γ145	2794,99	2252,01	98,0	44,6
Γ146	3190,55	2081,95	100,0	47,5
Γ151	4271	1403,28	158,0	47,5
Γ154	4091	1523,28	134,0	43,0
Γ155	3655,58	55,35	187,0	51,0
Γ156	4312,1	70,70	255,0	50,5
Γ159	2514,66	3328,22	34,0	37,5
Γ187	227,37	660,87	64,0	37,5
Γ188	92,4	1181,21	59,0	35,5
Γ189	287,86	1116,26	59,0	35,5
Γ191	465,5	1587,78	49,0	35,0
Γ194	451,19	2643,54	39,0	33,0
Γ274	5041	2593,28	80,0	59,0

6.2.5. Σχεδιασμός οριακών συνθηκών

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, στην περιοχή αναβλύζουν μία σειρά πηγών, οι θέσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 4.5. Πρόκειται για τις ομάδες πηγών «Πλάτανος» (Π1), «Βρυσίδα» (Π2), «Κολύμπα» (Π3), «Καλαμιώνας» (Π4) και «Βαρύπετρος» (Π5). Οι πηγές αυτές θεωρήθηκαν στο μοντέλο μέσω της εντολής «Drain».

Προκειμένου όμως να εισαχθεί στο μοντέλο ένα φυσικό όριο (στην συγκεκριμένη περίπτωση πηγή) ως περιοχή αποστράγγισης (drain), απαιτείται από το πρόγραμμα ο υπολογισμός δύο επιπλέον παραμέτρων, της στάθμης αποστράγγισης (H_b) και της αγωγιμότητας (ή παροχευευστικότητα – conductance, C).

Επίσης ως «Στάθμη αποστράγγισης» στο μοντέλο θεωρείται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέσα στην περιοχή που αποστραγγίζεται από τις πηγές και τα σημεία υδροληψίας. Η αποστράγγιση θεωρείται ότι λειτουργεί σε συνθήκες μερικής πληρότητας, και η στάθμη αποστράγγισης να είναι περίπου ίση με τη μέση στάθμη της αποστραγγιζόμενης περιοχής. Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται το υψόμετρο της στάθμης αποστράγγισης των πέντε ομάδων πηγών που θεωρήθηκε στη προσομοίωση.

Πίνακας 6.4: Στάθμη αποστράγγισης των πηγών.

Πηγή	Στάθμη αποστράγγισης (m)
Πλάτανος - Π1	32.90
Βρισίδια - Π2	35.55
Κολύμπα - Π3	36.40
Καλαμιώνας - Π4	35.25
Βαρύπετρος - Π5	37.70

Η «αγωγιμότητα» είναι ένας συντελεστής που εκφράζει την απώλεια φορτίου μεταξύ του σημείου αποστράγγισης και του υπόγειου υδροφορέα. Αυτή η απώλεια προκαλείται από το γεγονός ότι η ροή κοντά στη θέση αποστράγγιση γίνεται συγκλίνουσα, από την παρουσία ξενόφερτου υλικού, από το κατά πόσο είναι καταπονημένο το πέτρωμα που φιλοξενεί το σημείο απορροής, από τα τοιχώματα της αποστράγγισης και από το αν τυχόν ανοίγματα στα τοιχώματα της αποστράγγισης είναι φραγμένα, είτε από υλικά, είτε από φυτά κ.λπ. (Harbaugh et al., 2000).

Η αγωγιμότητα C (σε m^2/day) συνήθως δίνεται από την σχέση:

$$C = k \cdot \frac{A}{B} \quad [6.2]$$

όπου,

k η υδροπερατότητα του υδροφορέα που αποστραγγίζεται (m/day),

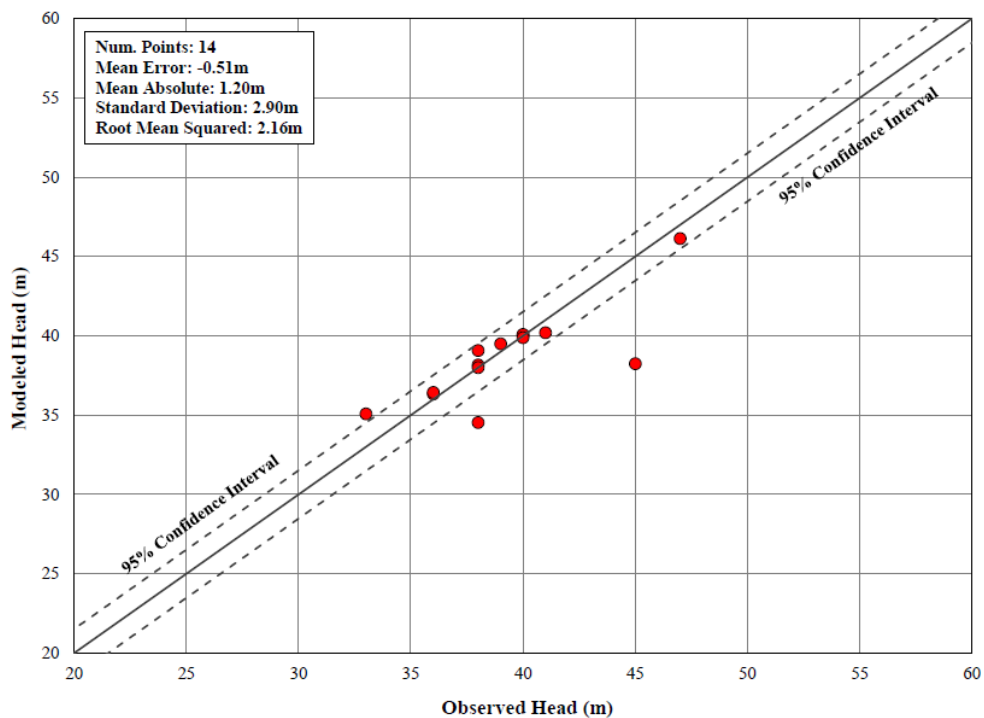
A το εμβαδόν της επιφανείας της περιοχής αποστράγγισης (m^2), και

B το πάχος της ζώνης αποστράγγισης (m).

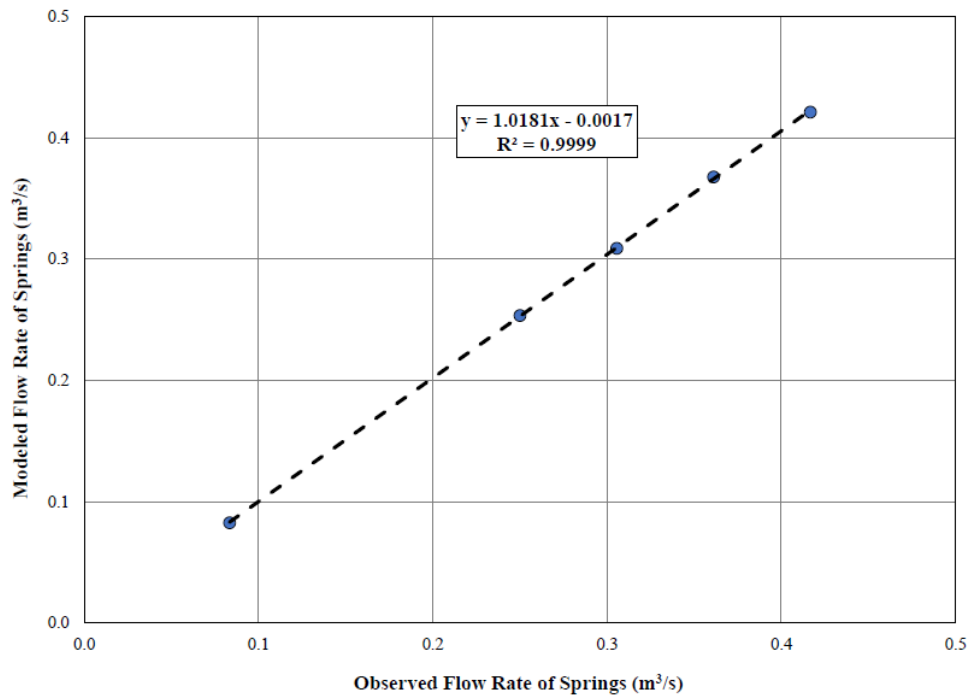
Η παραπάνω σχέση είναι η πιο συνηθισμένη (ενδεικτική) σε μοντέλα ροής. Επίσης, από τους ίδιους συγγραφείς τονίζεται ότι είναι δυνατόν μεγάλες αυξομειώσεις στην αγωγιμότητα να μην επιφέρουν ουσιαστικές αλλαγές στην υδραυλική συμπεριφορά στην περιοχή αποστράγγισης.

Η αγωγιμότητα των πέντε ομάδων πηγών που εκφορτίζουν τον υδροφορέα θεωρήθηκε ίση με 10.000 m²/day.

Οι τιμές των οριακών συνθηκών οριστικοποιήθηκαν μετά από πλήθος επιλύσεων (trial and error), προκειμένου να προσομοιωθεί ικανοποιητικά τόσο η πιεζομετρία όσο και οι παροχές των πηγών (βλέπε Σχήματα 6.5 και 6.6). Το μοντέλο ρυθμίστηκε και επαληθεύτηκε με μετρήσεις πεδίου.



Σχήμα 6.5: Συσχετισμός παρατηρούμενης και υπολογιζόμενης από το μοντέλο πιεζομετρίας στις γεωτρήσεις.

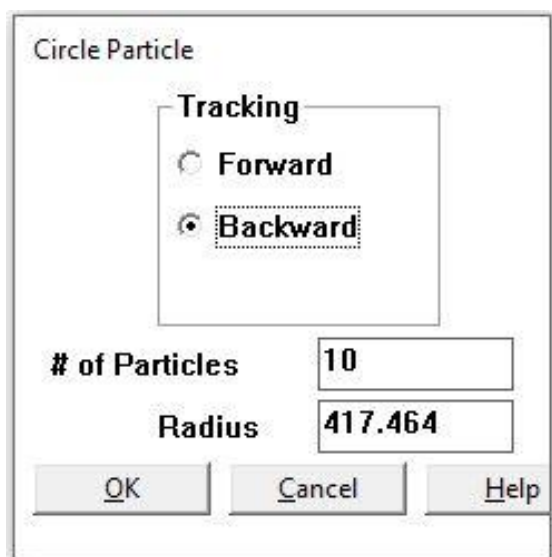


Σχήμα 6.6: Συσχετισμός παρατηρούμενης και υπολογιζόμενης από το μοντέλο απορροής στις πηγές.

6.2.6. Σχεδιασμός στόχων

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, και για τον καθορισμό των ζωνών προστασίας των πηγών και των γεωτρήσεων, ορίσθηκαν οι «στόχοι» (particles) γύρω από κάθε σημείο υδροληψίας. Με τη βοήθεια του λογισμικού ModPath σχεδιάζονται οι γραμμές ροής (pathlines) που ακολουθεί το υπόγειο νερό σε τρεις διαστάσεις – εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση 50 ημέρες) έως ότου να καταλήξει στους παραπάνω στόχους.

Μέσω της εντολής «Particles» οι στόχοι σχεδιάστηκαν κυκλικά γύρω από κάθε σημείο υδροληψίας αν και το μοντέλο προσφέρει επίσης τη δυνατότητα τοποθέτησης μεμονωμένων στόχων σε οποιοδήποτε σημείο ή στόχων σε γραμμική μορφή. Επιπλέον, ο μελετητής καλείται να επιλέξει την κατεύθυνση των γραμμών ροής να κινούνται από (forward) ή προς (backward) τους στόχους, το πλήθος τους και την ακτίνα του κύκλου τους σε m (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Σχεδιασμός κυκλικών στόχων γύρω από τα σημεία υδροληψίας.

6.2.7. Επίλυση μοντέλου

Η επίλυση της προσομοίωσης ενεργοποιείται από το κεντρικό μενού εντολών του Visual ModFlow μέσω της εντολής «Run», στην συνέχεια γίνεται η επιλογή μεταξύ σταθερής ή μεταβαλλόμενης ροής και τέλος μέσω της εντολής «Translate and Run» επιλέγονται οι αλγόριθμοι με τους οποίους θα εκτελεσθεί το πρόγραμμα.

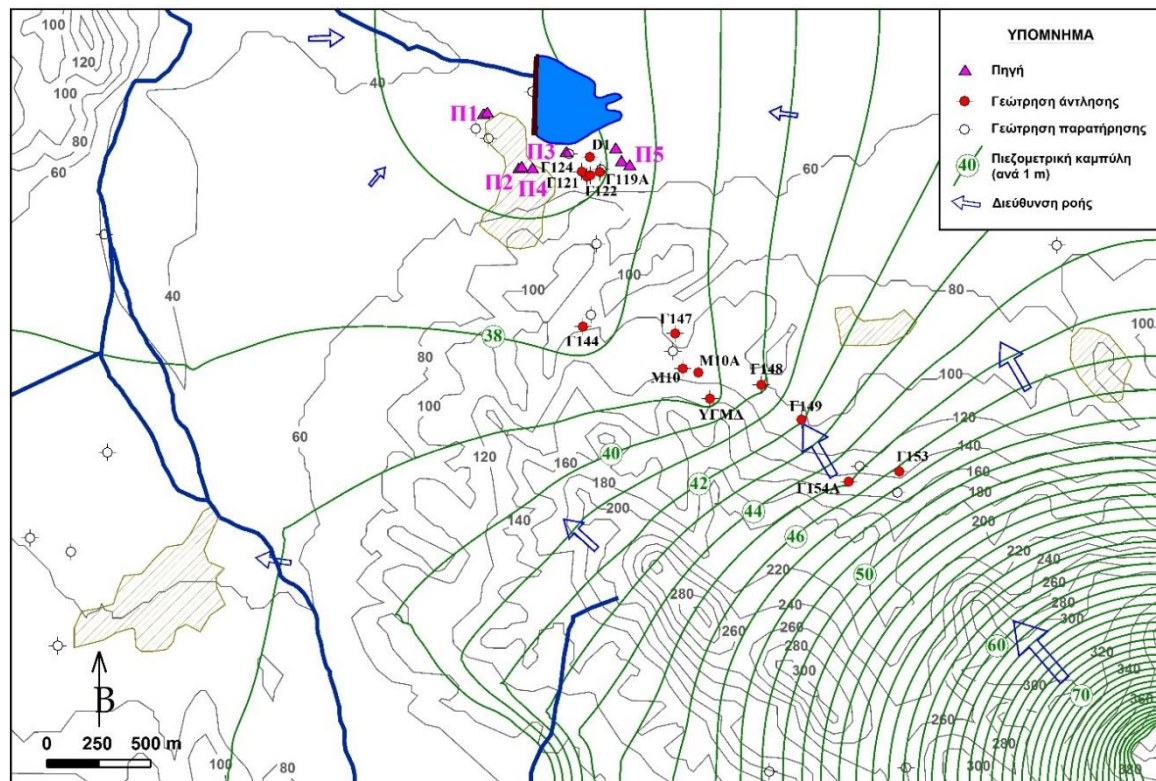
Στη προκειμένη περίπτωση το μοντέλο έτρεξε με συνθήκες σταθερής ροής, συνεπώς είναι ανεξάρτητο από τον χρόνο.

Για την εκτέλεση του προγράμματος επιλέχθηκαν τα λογισμικά MODFLOW και MODPATH, ωστόσο δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι υπορουτίνες ZONEBUDGET, MT3D / RT3D και PEST για διαφορετικούς σκοπούς.

6.2.8. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μετά την εκτέλεσή του προγράμματος προσφέρεται η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων όσον αφορά με τη πιεζομετρία, τη ταχύτητα ροής, τις γραμμές ροής, και το ισοζύγιο εισροής – εκροής υδάτων.

Στο Σχήμα 6.8 δίνεται πιεζομετρικός χάρτης, στον οποίο επιβεβαιώνεται η κύρια κατεύθυνση ροής του υπόγειου νερού, από NNA προς ΒΔ και Βόρεια.

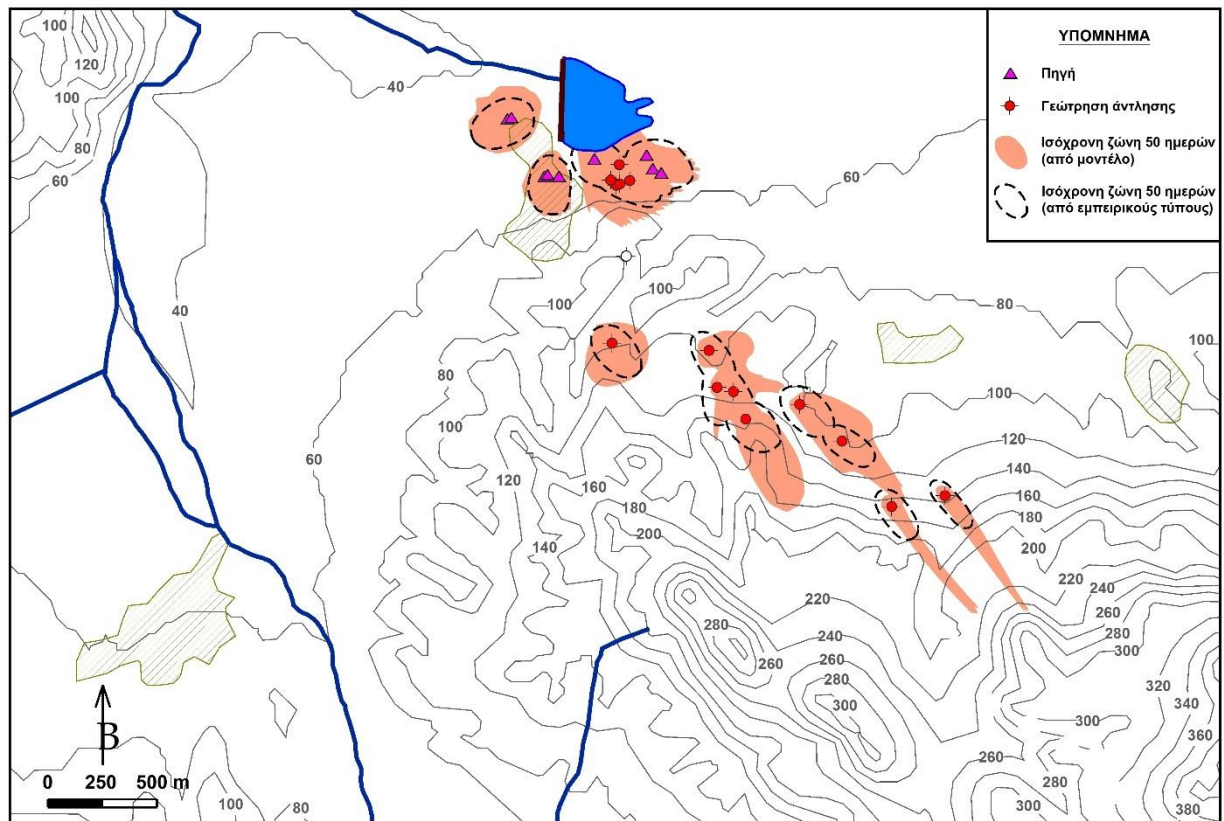


Σχήμα 6.8: Πιεζομετρικός χάρτης από την προσομοίωση ροής του υπόγειου νερού μέσω MODFLOW-2000.

Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 6.8 το μέγεθος στα βέλη ροής (μπλε) είναι ανάλογο της υπολογιζόμενης από το πρόγραμμα ταχύτητας ροής.

Στο Σχήμα 6.9 δίνονται οι ισόχρονες ζώνες 50 ημερών που προέκυψαν με βάση το μοντέλο ροής. Όπως αναμενόταν, οι ζώνες αυτές δείχνουν κατεύθυνση που ακολουθεί την διεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων, δηλαδή από ΝΝΑ προς Βόρεια και μέγεθος ανάλογο με τις καταγραφόμενες παροχές.

Επισημαίνεται ότι η έκταση των ζωνών κατάντη των σημείων νερού οφείλεται στη ροή του υπόγειου νερού από τα υπερκείμενα στρώματα (νεότερα ιζήματα).



Σχήμα 6.9: Ισόχρονες ζώνες διαδρομής ροής υπόγειου νερού προς πηγές και γεωτρήσεις (Στειακάκης κ.ά., 2022).

6.3. Εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων

Οι Ζώνες Προστασίας προσδιορίστηκαν και μέσω της χρήσης εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες προσδιορίζονται στις Τεχνικές Προδιαγραφές των μελετών ζωνών προστασίας υδροληπτικών έργων ύδρευσης και πηγών (Ενότητα 2.2.3).

Οι Σχέσεις 2.1 έως 2.8 εφαρμόστηκαν για χρόνο $t = 50$ ημέρες και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9.

6.4. Σύγκριση αριθμητικής μεθόδου – εμπειρικών σχέσεων

Διαπιστώνεται ότι οι περιοχές που ορίζονται από τις ισόχρονες καμπύλες των 50 ημερών και σχεδιάσθηκαν με χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής συμπίπτουν ή και εκτείνονται σε μεγαλύτερη έκταση από τις αντίστοιχες περιοχές που ορίσθηκαν με βάση τις εμπειρικές σχέσεις. Οι ισόχρονες καμπύλες που προέκυψαν από τη προσομοίωση της

υπόγειας ροής, μπορούν να χαρακτηριστούν περισσότερο ασφαλείς καθώς εκτείνονται σε μεγαλύτερη έκταση προς τα νότια τμήματα της περιοχής μελέτης.

6.5. Οριοθέτηση Ζωνών Προστασίας

Με βάση τα παραπάνω, σχεδιάσθηκαν οι ζώνες προστασίας των σημείων νερού του καρστικού υδροφορέα της Αγυιάς (Σχήμα 6.11), ως εξής:

Ζώνη Προστασίας I

Περιοχές που εκτείνονται 20 m γύρω από τις πηγές και τις γεωτρήσεις άντλησης, σύμφωνα με τις Τεχνικές Προδιαγραφές του ΥΠΕΝ (2021α).

Οι περιοχές αυτές θα πρέπει να αποκλειστούν από οποιαδήποτε ανθρωπογενή δραστηριότητα. Κρίνεται αναγκαία η περίφραξή τους.

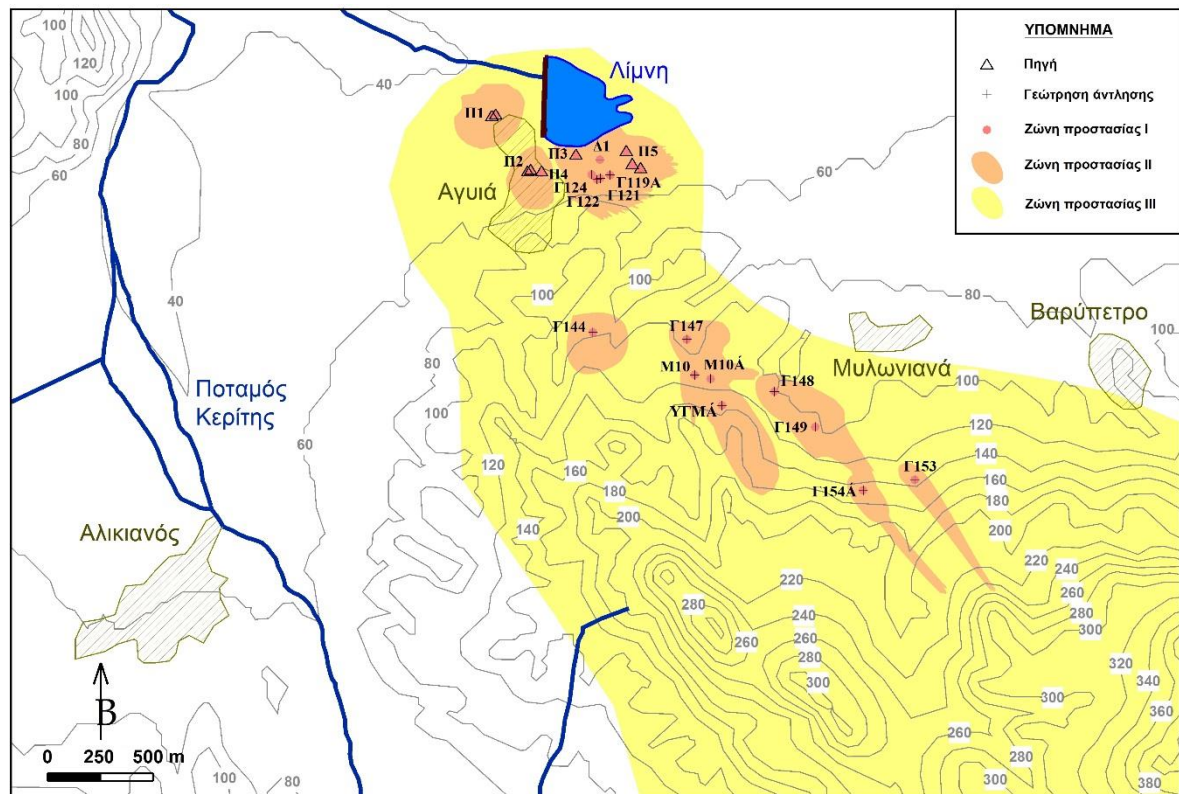
Ζώνη Προστασίας II (ελεγχόμενη ζώνη)

Ορίζεται με βάση τις ισόχρονες καμπύλες των 50 ημερών, οι οποίες προέκυψαν με χρήση τόσο του αριθμητικού μοντέλου όσο και εμπειρικών εξισώσεων (Σχήμα 6.10). Όπου οι περιοχές αυτές διέφεραν, υιοθετήθηκε η δυσμενέστερη εκτίμηση (μεγαλύτερη περιοχή).

Σε αυτές τις περιοχές προτείνεται καταρχήν η απομάκρυνση εστιών ρύπανσης από οποιαδήποτε ανθρωπογενή δραστηριότητα, όπως βιοτεχνίες, ελαιουργεία, βόθροι, νεκροταφεία κ.λπ. Επίσης, κρίνεται απαραίτητη η επιτήρησή τους σε 24ωρη βάση.

Ζώνη Προστασίας III

Η ζώνη αυτή επεκτείνεται ανάντη του λόφου Μυλωνιανών και περιλαμβάνει όλες τις περιοχές με υψηλή (T4) και πολύ υψηλή τρωτότητα (T5), όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου DRISTP_i (βλέπε Σχήμα 5.4), οι οποίες συμβάλουν στην τροφοδοσία των πηγών και των γεωτρήσεων, μέχρι και τα Λευκά Όρη.



Σχήμα 6.10: Χάρτης ζωνών προστασίας στην περιοχή προσομοίωσης (Στειακάκης κ.ά., 2022).

Πρόκειται για μια περιοχή, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το ανάγλυφο της υδρογεωλογικής λεκάνης που επιτρέπει την ροή του υπόγειου νερού προς τα σημεία υδροληψίας, και ως εκ τούτου έχει εκτιμηθεί προσεγγιστικά.

Στο Σχήμα 6.10 δίνεται ένα μικρό τμήμα της Ζώνης III, στην περιοχή που έγινε προσομοίωση του υπόγειου νερού και συνεπώς είναι ευκολότερος ο καθορισμός των ορίων της. Το σύνολο της περιοχής είναι πολύ μεγαλύτερο, καθώς θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις ανάντη ζώνες υψηλής (T4) και πολύ υψηλής τρωτότητας (T5) μέχρι τα Λευκά Όρη, όπως αυτές διακρίνονται στο Σχήμα 5.4 (κεφ. 5), οι οποίες συμβάλουν στην τροφοδοσία των σημείων νερού (πηγές και γεωτρήσεις).

Σε όλη αυτή την περιοχή θα πρέπει το καρστικό νερό να προστατεύεται από μικροβιολογικούς ρύπους και να εξασφαλίζεται (με συχνούς ελέγχους και καταγραφή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων) ικανός χρόνος για παρεμβάσεις σε περίπτωση ατυχήματος μόλυνσης.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαμορφώσει μία ολοκληρωμένη πολιτική υδάτων εκδίδοντας μια σειρά Οδηγιών και Κανονισμών που αφορούν τη προστασία τη διαχείριση και τα ποιοτικά πρότυπα του πόσιμου ύδατος. Ιδιαίτερη αξία έχει η έκδοση της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ), η οποία έθεσε ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων σε κλίμακα Λεκανών Απορροής Ποταμού.

Η ελληνική νομοθεσία έχει εναρμονιστεί επαρκώς με τις κατευθυντήριες γραμμές της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τη προστασία των υδάτων μέσω του Προεδρικού Διατάγματος 51/2007 και των κανονιστικών πράξεων που εκδόθηκαν κατ' εξουσιοδότησή του. Επιπλέον, έχουν καθοριστεί οι τεχνικές προδιαγραφές των μελετών που απαιτούν τα μέτρα προστασίας των Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής.

Η κάλυψη των αναγκών της Ελλάδος για πόσιμο νερό πραγματοποιείται κυρίως από την εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων, συχνά εντός καρστικών υδροφορέων, συνεπώς η προστασία τους έχει ιδιαίτερη σημασία για την ύδρευση της χώρας.

Το θέμα της τρωτότητας των υδροφόρων έχει απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα. Από το 1985 έως σήμερα, πολλοί ερευνητές μελέτησαν την τρωτότητα των καρστικών συστημάτων και διαμόρφωσαν ποικίλες μεθόδους βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των ζωνών τρωτότητας.

Η τρωτότητα κάθε περιοχής ενός υδροφορέα και οι ζώνες τρωτότητας, όπως αυτές προκύπτουν έπειτα από τη χρήση μεθόδων βαθμονόμησης, εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροφορέα (είδος υδροφορέα, γεωλογία ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, υδραυλική αγωγιμότητα, πιεζομετρική στάθμη, ανάπτυξη καρστικού δικτύου, εμφάνιση επικάρστ), τον ρυθμό επαναφόρτισής του, το είδος του εδαφικού μέσου, τη βλάστηση και την τοπογραφία της περιοχής μελέτης.

Από την εφαρμογή των τριών μεθόδων, EPIK, PRESK και DRISTPi για την εκτίμηση της τρωτότητας και τον προσδιορισμό των ζωνών τρωτότητας στον υδροφορέα της Αγυιάς και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους προκύπτει ότι:

- Τα αποτελέσματα των EPIK και PRESK είναι σχεδόν ταυτόσημα. Στις περιοχές που επικρατούν οι Τριτογενείς αποθέσεις η μέθοδος PRESK δίνει δυσμενέστερη τιμή τρωτότητας κατά μία κατηγορία (μέτρια αντί υψηλής).
- Οι ζώνες τρωτότητας κατά DRISTPi διαφοροποιούνται αρκετά σε σχέση με εκείνες των προηγούμενων δύο μεθόδων. Υποβαθμίζουν τη τρωτότητα των μη καρστικών σχηματισμών (πολύ χαμηλή αντί χαμηλής), ενώ αντίθετα αναβαθμίζουν αυτή των καρστικών (υψηλή και πολύ υψηλή αντί μέτριας και υψηλής αντίστοιχα). Συνεπώς η μέθοδος DRISTPi κρίνεται ως η πλέον συντηρητική για τον προσδιορισμό των ζωνών προστασίας στη περιοχή.
- Κατά τη μελέτη της μεθόδου DRISTPi πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ετήσιες και υπερετήσιες μεταβολές των παραμέτρων που εκτιμά, όπως είναι το βάθος της πιεζομετρικής στάθμης και ο εμπλουτισμός του υδροφορέα.

Οι ζώνες προστασίας των σημείων νερού, αντίθετα με τις ζώνες τρωτότητας, δεν στηρίζονται σε κάποια μέθοδο δεικτών αλλά σε εμπειρικές σχέσεις και αριθμητικές μεθόδους. Το μέγεθος τους εξαρτάται κυρίως από τη ταχύτητα της ροής των υπόγειων υδάτων. Σχεδιάζονται με βασική παράμετρο τον χρόνο (σε ημέρες) που χρειάζεται για να φθάσει ένας ρύπος από ένα σημείο εισόδου στον υδροφορέα, έως το σημείο υδρομάστευσης.

Από τη σύγκριση των ισόχρονων ζωνών προστασίας των 50 ημερών στα σημεία νερού του υδροφορέα της Αγυιάς με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων και με τη προσομοίωση της υπόγειας ροής στο MODFLOW διαπιστώνεται ότι:

- Οι ζώνες που προέκυψαν από την προσομοίωση της υπόγειας ροής είτε ταυτίζονται είτε εκτείνονται νοτιότερα σε σχέση με τις ζώνες που προέκυψαν από την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων.

- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το λογισμικό MODFLOW χαρακτηρίζονται περισσότερο συντηρητικά σε σχέση με εκείνα των εμπειρικών σχέσεων.

Οι ζώνες προστασίας των σημείων νερού του καρστικού υδροφορέα της Αγυιάς σχεδιάσθηκαν έπειτα από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και της ασφαλέστερης μεθόδου δεικτών, την μέθοδο DRISTPi ως εξής:

- Ζώνη Προστασίας I: Περιοχές που εκτείνονται 20 m γύρω από τις πηγές και τις γεωτρήσεις άντλησης.
- Ζώνη Προστασίας II (ελεγχόμενη ζώνη): Ορίζεται με βάση τις ισόχρονες καμπύλες των 50 ημερών, οι οποίες προέκυψαν με χρήση τόσο του αριθμητικού μοντέλου όσο και εμπειρικών εξισώσεων. Όπου οι περιοχές αυτές διέφεραν, υιοθετήθηκε η δυσμενέστερη εκτίμηση (μεγαλύτερη περιοχή).
- Ζώνη Προστασίας III: Η ζώνη αυτή επεκτείνεται ανάντη του λόφου Μυλωνιανών και περιλαμβάνει όλες τις περιοχές με υψηλή (T4) και πολύ υψηλή τρωτότητα (T5), όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή της πιο συντηρητικής μεθόδου DRISTPi (βλέπε Σχήμα 5.4 στο κεφάλαιο 5), οι οποίες συμβάλουν στην τροφοδοσία των πηγών και των γεωτρήσεων, μέχρι και τα Λευκά Όρη.

7.2. Προτάσεις

Για τη βελτιστοποίηση των μεθοδολογιών που αναφέρθηκαν, σχετικά με την οριοθέτηση των ζωνών τρωτότητας και των ζωνών προστασίας των σημείων νερού, ειδικά για τον καρστικό υδροφορέα της Αγυιάς, προτείνονται τα εξής:

Μέτρα που στοχεύουν στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων

Περιλαμβάνουν την καταγραφή όλων των πιθανών πηγών ρύπανσης, της μορφής τους και του ρυθμού εκπομπής τους. Κρίνεται επίσης απαραίτητος ο σχεδιασμός ή η ενημέρωση των υπαρχόντων χαρτών χρήσεων γης όπου αυτοί υπάρχουν.

Επιπλέον, προτείνεται η εγκατάσταση ενός πυκνού δικτύου σταθμών συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων ώστε να εντοπίζεται οποιαδήποτε αυξητική τάση στη συγκέντρωση των χημικών ρύπων και των μικροοργανισμών στα υπόγεια ύδατα και να είναι γνωστά τα διαθέσιμα αποθέματά τους.

Στην προσπάθεια συλλογής δεδομένων, η εκτέλεση ιχνηθετήσεων θα ήταν πολύ χρήσιμη για τον καθορισμό της πραγματικής ταχύτητας του υπόγειου καρστικού νερού και την επιβεβαίωση της κατεύθυνσης της ροής του.

Μέτρα για τον σχεδιασμό της προστασίας

Πέρα της μελέτης της εγγενούς τρωτότητας του υδροφορέα, ο προσδιορισμός της ειδικής τρωτότητας θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμος στις περιοχές όπου έχουν εντοπιστεί ενεργές πηγές ρύπανσης. Για την ολοκληρωμένη προστασία του καρστικού υδροφορέα είναι απαραίτητη η εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης και στην κορεσμένη ζώνη λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού.

Επιπρόσθετα, όπως παρουσιάστηκε και στην Ενότητα 6.5 προτείνεται κατά την οριοθέτηση των ζωνών προστασίας να λαμβάνονται υπόψη οι ζώνες τρωτότητας ειδικά στις περιπτώσεις υδροφορέων με ασαφή όρια υδρογεωλογικής λεκάνης. Τέλος, ο προσδιορισμός των ζωνών προστασίας θα πρέπει να συνδυάζεται με συστηματική και λεπτομερή ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τις επιτρεπόμενες και τις μη επιτρεπόμενες δραστηριότητες εντός αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανέστης, Γ., Ζιάγκας, Ε. και Νάκος Γ. (1997). Γεωγραφικός χάρτης γαιών, Φύλλο Βρύσσαι. Κλίμακα 1:50.000, Δασική Υπηρεσία.

Βαβαδάκης, Δ., Στειακάκης, Ε., Μουρκάκου, Ο. και Κριτσωτάκης Μ. (2022). Εκτίμηση τρωτότητας του καρστικού υδροφορέα Αγκιάς (Κρήτη) με τις μεθόδους ΕΡΙΚ και PRESK. Πρακτικά 12^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου: Το υπόγειο νερό σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον, Λευκωσία, 20-22 Μαρτίου.

Βουδούρης, Κ. (2006). Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2006.

Βουδούρης, Κ. (2016). Υδρογεωλογία περιβάλλοντος: Υπόγεια νερά και περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.

Βουδούρης, Κ. και Καζάκης, Ν. (2020). Εκτίμηση της τρωτότητας καρστικών υδροφορέων με τη μέθοδο PaPRIKa: Η περίπτωση του υδροφορέα Μιτσικελίου Ιωαννίνων, Ελλάδα. Υδροτεχνικά, Τόμος 30, Ελλάδα.

ΓΥΣ (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) (2007). «Τοπογραφικοί χάρτες-Φύλλα Βατόλακκος, Βρύσες, Περιβόλια, Χανιά». Κλίμακα 1: 50.000.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2016). 1^η Αναθεώρηση Σχεδίων Διαχείρισης των 14 Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας (ΕΛ), μεθοδολογία ανάλυσης ανθρωπογενών πιέσεων και επιπτώσεων τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Έκδοση 1, Νοέμβριος 2016.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017α). 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (ΕΛ 13). Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017β). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (ΕΛ 13). Ενδιάμεση φάση 2: Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Σεπτέμβριος 2017.

Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (1996). Το Περιβάλλον στην Ευρωπαϊκή Ένωση, Έκθεση για την επανεξέταση του πέμπτου προγράμματος περιβαλλοντικής δράσης. Επίσημες Εκδόσεις των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Κοπεγχάγη.

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο (2000). Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση Πλαισίου Κοινοτικής Δράσης στον Τομέα της Πολιτικής των Υδάτων. Επίσημη εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Φύλλο L 327, Δεκέμβριος 2000.

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο (2006). Οδηγία 2006/118/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου της 12^{ης} Δεκεμβρίου 2006 Σχετικά με την Προστασία των Υπόγειων Υδάτων από την Ρύπανση και την Υποβάθμιση. Επίσημη εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Φύλλο L 372/19, Δεκέμβριος 2006.

Ευρωπαϊκό Συμβούλιο (1998). Οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της 3^{ης} Νοεμβρίου 1998 Σχετικά με την Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης. Επίσημη εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Φύλλο L 330/32, Δεκέμβριος 1998.

ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1956). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος –Φύλλο Πλατανιάς». Κλίμακα 1:50.000 (Χαρτογράφηση: Η.Ι. Martini).

ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1969). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος –Φύλλο Αλικιανός». Κλίμακα 1:50.000 (Χαρτογράφηση: Α. Τάταρης και Γ.Ε. Χριστοδούλου).

ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1971). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος –Φύλλο Χανιά». Κλίμακα 1:50.000 (Χαρτογράφηση: Ε. Καραγεωργίου).

ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1993). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος –Φύλλο Βρύσες». Κλίμακα 1:50.000 (Χαρτογράφηση: Μ.Βιδάκης , Μ. Τριανταφύλλης και Ι. Μυλωνάκης).

Κριτσωτάκης, Μ. και Παυλίδου, Σ. (2013). Κατάσταση υπόγειων υδροφόρων Κρήτης. Διεύθυνση Υδάτων Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης, Ηράκλειο.

Λιονής, Μ. και Περλέρος, Β. (2001). Υδρογεωλογική μελέτη κάμπου Χανίων. Υπουργείο Γεωργίας, Τμήμα Υδρογεωλογίας – Γεωτρήσεων και Μαθηματικών Ομοιωμάτων, Αθήνα.

Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Καδιανάκης, Μ., Βαβαδάκης, Δ. και Κλειδοπούλου, Μ. (1999). Προσδιορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων στα ανθρακικά πετρώματα της Κρήτης (μεθοδολογία – στατιστική ανάλυση). Πρακτικά 5ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία.

Μουρκάκου, Ο. (2018). Συμβολή στην εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου του καρστικού υδροφορέα Αγιάς Χανίων. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Μουρκάκου, Ο., Βαβαδάκης, Δ. και Στειακάκης, Ε. (2022). Αξιολόγηση μεθόδου DRISTPI για την εκτίμηση της τρωτότητας καρστικών συστημάτων. Πρακτικά 12^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου: Το υπόγειο νερό σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον, Λευκωσία, 20-22 Μαρτίου.

Παυλίδου, Σ. (2009). GR 1303: Καρστικό υδροφόρο σύστημα Λευκών Ορέων. Γ' ΚΠΣ - Επιχειρησιακό Πρόγραμμα: Ανταγωνιστικότητα, Έργο: Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπογείων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας (Κ.Ε. 7.3.2.1), Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Ρέθυμνο.

Περιφέρεια Κρήτης (2007). Κατάσταση υπογείων υδροφορέων Κρήτης – Παρατηρήσεις για το τρέχον υδρολογικό έτος (1η Νοεμβρίου 2006 έως 30η Απριλίου 2007). Γενική Διεύθυνση Περιφέρειας, Διεύθυνση Υδάτων, Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και Ποσότητας των Υδάτων, Ηράκλειο.

Στειακάκης, Ε., Βαβαδάκης, Δ. και Κριτσωτάκης, Μ. (2017). Καρστικές πηγές Αγυιάς και επιχειρουμένη αναρρύθμιση: Δυνατότητες και προβλήματα. Πρακτικά 11^{ου} Διεθνούς Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Τόμος 1, σελ. 435-444, Αθήνα.

Στειακάκης, Ε., Βαβαδάκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ. και Παυλίδου, Σ. (2022). Ζώνες προστασίας στον καρστικό υδροφορέα Αγυιάς (Κρήτη). Πρακτικά 12^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου: Το υπόγειο νερό σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον, Λευκωσία, 20-22 Μαρτίου.

Στουρνάρας, Κ.Γ. (2013). Θέματα Υδατικής και Οικολογικής Πολιτικής. Εκδόσεις Δίαυλος, Οκτώβριος 2013, Αθήνα.

Σχοινάς, Κ., Ζιάγκας, Ε. και Νάκος Γ. (1997). Γεωγραφικός χάρτης γαιών, Φύλλο Βατόλακκος. Κλίμακα 1:50.000, Δασική Υπηρεσία.

Σχοινάς, Κ., Ζιάγκας, Ε. και Νάκος Γ. (1997). Γεωγραφικός χάρτης γαιών, Φύλλο Περιβόλια. Κλίμακα 1:50.000, Δασική Υπηρεσία.

ΥΠΕΝ (2003). Νόμος 3199/2003: Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000. Ελληνική Δημοκρατία, ΦΕΚ Α' 280/9.12.2003.

ΥΠΕΝ (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας) (2021α). Τεχνικές Προδιαγραφές Μελετών Ζωνών Προστασίας Υδροληπτικών Έργων Ύδρευσης & Πηγών: Σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. ΕΣΠΑ 2014-2020 (<http://wfdver.ypeka.gr/el/home-gr/>).

ΥΠΕΝ (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας) (2021β). Τεχνικές Προδιαγραφές Μελετών Τρωτότητας – Ρυπαντικής Επιδεκτικότητας Υπόγειων Υδροφορέων: Σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. ΕΣΠΑ 2014-2020 (<http://wfdver.ypeka.gr/el/home-gr/>).

Φυτρολάκης, Ν. (1980). Η Γεωλογική δομή της Κρήτης – προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα (μεθ' ενός τεκτονικού χάρτου εκτός κειμένου. Διατριβή Υψηλότητας, Εκδόσεις Έδρας Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας – Γεωλογίας ΕΜΠ, Αθήνα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Aller, L., Bennett, T., Leher, J. H., Peetty, R. J., and Hackett G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting. EPA 600/2-87-035:622.

Al-Zabet, T. (2002). Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Env. Geol.* 43, 203–208.

Anderson, M.P., Woessner, W.W. and Hunt, R.J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.

Andreo, B., Ravbar, N. and Vías, J. (2009). Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: Application to pilot sites. *Hydrogeology Journal*. 17. 749-758.

Brenčič M. and Čenčur Curk B. (2016). Drinking water protection zones in the Adriatic region – state of the art and guidelines for the improvement of the present status. University of Ljubljana Faculty of Natural Sciences and Engineering, September 2016.

Bruce-Grey-Owen Sound Health Unit (2000). The Investigative Report of the Walkerton Outbreak of Waterborne Gastroenteritis. October 2000.

Civita M. and De Maio M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “compined” approach. *Geofisica International*, Vol. 43, Num. 4, 513-532.

COST 65 (1995). Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65). European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN, Brussels, 446.

Davis, A.D., Long, A. and Wireman, M. (2002). KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*. 42. 65-72.

Doerfliger, N., Jeannin, P. and Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39, 165–176.

Doerfliger, N., Plagnes, V. and Kavouri, K. (2010). PaPRIKa a multicriteria vulnerability method as a tool for sustainable management of karst aquifers. Example of application on a test site in SW France. Sustainability of the karst environment dinaric karst and other karst regions. International Interdisciplinary Scientific Conference, Plitvice Lakes, Croatia, 23-26 September 2009.

Environment Agency (2019a). Guidance: Groundwater Source Protection Zones.

Environment Agency (2019b). Manual for the Production of Groundwater Source Protection Zones. March 2019.

European Commission (2007). Common Implementation Strategy for the WFD – Guidance on Groundwater in Drinking Water Protected Areas. CIS Guidance Document No. 16, Luxembourg.

Ford, D. and Williams, P.D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley, Hoboken.

Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W. & van Waegeningh, H.G. (eds.) *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research, Proceedings and Information.

No. 38, The Hague. pp. 69–86.

Ghanem, M., Ahmad, W., Keilan, Y. and Sawaftah, F. (2017). Groundwater vulnerability mapping assessment of central West Bank catchments using PI method. *Environ. Earth Sci.* 76, 347. DOI: 10.1007/s12665-017-6681-y.

Gogu, R.C. and Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* 39, 549-559. DOI: 10.1007/s002540050466.

Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. and Hötzl, H. (2000). The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 46, 3: 157-166.

Goldscheider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal*. 13. 555-564.

Goldscheider, N. (2010). *Groundwater Hydrology of Springs*. Butterworth-Heinemann publications, 305-338. DOI: 10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6.

Ivan, V. and Madl-Szonyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environ. Earth Sci.*, 76, 112.

Jiménez-Madrid, A., Carrasco, F., Martínez, C. and Gogu, R.C. (2013). DRISTPi, a new groundwater vulnerability mapping method for use in karstic and non-karstic aquifers. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46, 245-255, 25 March 2013. DOI: 10.1144/qjegh2012-038.

Kallioras, A. and Marinos, P. (2015). Water resources assessment and management of karst aquifer systems in Greece. *Environ. Earth Sci.* 74, 83-100.

Kattaa, B., Al-Fares, W. and Rahman Al Charideh, A. (2010). Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, 1103-1110. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.12.008.

Kavouri, K., Plagnes, V., Dörfliger, N., Tremoulet, J., Rejiba, F. and Marchet, P. (2011). PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability-application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*, 19, 339-353.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated Meteorol. Zeitschrift 15, 259-63.

Koutsis, R. and Stournaras, G. (2011). Groundwater vulnerability assessment in the Loussipolje area, N Peloponessus: the PRESK method. In: Lambrakis, N., Stournaras, G. & K. Katsanou (Eds.), *Advances in the Research of the Environment* (Vol. 2, pp. 335-342). Berlin, Heidelberg: Springer.

Malik, P. and Svasta, J. (1999). REKS: an alternative method of karst groundwater vulnerability estimation. *Hydrogeology and Land Use Management. Proceeding of the XXIX Congress of the International Association of Hydrogeologists*, Bratislava, 79-85.

Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination)*. Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD, BRGM, Orleans.

Nekkoub, A., Baali, F., Hadji, R. and Hamed, Y. (2020). The EPIK multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 13, 709.

Ontario Ministry of the Environment and Climate Change (2018). *Education and Outreach for Source Protection Drinking Water Protection Zone Road Signs*. Government of Ontario, Torondo.

Polemio, M., Casarano, D. and Limoni, P.P. (2009). Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1461-1470.

Steiakakis, E., Vavadakis, D. and Kritsotakis, M. (2015). Simulation of springs discharge from a karstic aquifer (Crete, Greece), using limited data. *Environ Earth Sci*, Volume 74, Issue 5, 4303-4315. DOI: 10.1007/s12665-015-4496-2.

Vrba, J. (1991). *Mapping of Groundwater Vulnerability*. International Association of Hydrogeologists, Ground Water Protection Commission, Unpublished Working Paper for Meeting in Tampa, FL, USA.

Vbra, J. and Zaporozec, A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Verlag Heinz Heise, Hannover.

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, J.M., Carrasco, F. and Vadillo, I. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: application in two pilot sites in southern Spain. *Hydrogeol. J.* 14(6), 912-925.

Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K. and Bold, S. (2019). Groundwater vulnerability and risk assessment in a karst aquifer of Greece using EPIK method. *Environments* 2019, 6(11), 116.

WHO (2006). Protecting Groundwater for Health - Managing the Quality of Drinking - water Sources. Edited by Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. and Chorus, I. IWA Publishing.

Zwahlen, F. (ed) (2004). Cost Action 620: Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (karst) Aquifers: Final Report. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Luxembourg.

Ιστότοποι

<https://conservationontario.ca/> (Conservation Ontario)

<https://environment.data.gov.uk/> (Department for Environment, Food & Rural Affairs)

<http://wfdver.ypeka.gr> (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας)

<https://www.lioapplications.lrc.gov.on.ca/>

<https://www.waterloohydrogeologic.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α1: Κατάλογος ουσιών προτεραιότητας στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.

Παράμετρος	Αριθμός CAS	Αριθμός ΕΕ
Ανθρακένιο	15972-60-8	240-110-8
Βρωμιούχοι διφαινυλαιθέρες	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Κάδμιο και οι ενώσεις του	7440-43-9	231-152-8
Χλωροαλκάνια C ₁₀₋₁₃	85535-84-8	287-476-5
Φθαλικό δι(2-αιθυλεξύλιο) (DEHP)	117-81-7	204-211-0
Endosulfan (Ενδοσουλφάνη)	115-29-7	204-079-4
Εξαχλωροβενζόλιο	118-74-1	204-273-9
Εξαχλωροβουταδιένιο	87-68-3	201-765-5
Εξαχλωροκυκλοεξάνιο	608-73-1	210-168-9
Υδράργυρος και οι ενώσεις του	7439-97-6	231-106-7
Εννεύλοφαινόλες	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Πενταχλωροβενζόλιο	608-93-5	210-172-0
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH)	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Ενώσεις τριβουτυλοκασιτέρου	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Τριφλουραλίνη	1582-09-8	216-428-8
Dicofol	115-32-2	204-082-0
Υπερφθοροκτανοσουλφονικό οξύ και τα παράγωγά του (PFOS)	1763-23-1	217-179-8
Quinoxifen	124495-18-7	δεν εφαρμόζεται
Διοξίνες και παρόμοιες με τις διοξίνες ενώσεις	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Εξαβρωμοκυκλοωδεκάνιο (HBCDD)	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
Heptachlor και εποξείδιο του heptachlor	76-44-8/1024-57-3	200-962-3/213-831-0

Πίνακας Α.2: Μέγιστες τιμές μικροβιολογικών παραμέτρων όπως καθορίζονται από
στην Οδηγία 2020/2184/ΕΕ.

Παράμετρος	Μέγιστη τιμή
Escherichia coli (E. coli)	0 / 100 ml
Εντερόκοκκοι	0 / 100 ml
<i>Για το νερό που πωλείται σε φιάλες ή δοχεία, ισχύουν τα ακόλουθα:</i>	
Escherichia coli (E. coli)	0 / 250 ml
Εντερόκοκκοι	0 / 250 ml
Pseudomonas aeruginosa	0 / 250 ml
Αριθμός αποικιών σε 22 °C	100 / ml
Αριθμός αποικιών 37 °C	20 / ml

Πίνακας Α.3: Μέγιστες τιμές χημικών παραμέτρων όπως καθορίζονται από στην Οδηγία 2020/2184/ΕΕ.

Παράμετρος	Μέγιστη τιμή
Ακρυλαμίδιο	0,1 µg/l
Αντιμόνιο	10,0 µg/l
Αρσενικό	10,0 µg/l
Βενζόλιο	1,0 µg/l
Βενζο-α-πυρένιο	0,01 µg/l
Δισφαινόλη Α	2,5 µg/l
Βόριο	1,5 mg/l
Βρωμικά άλατα	10,0 µg/l
Κάδμιο	5,0 µg/l
Χλωρικά	0,25 mg/l
Χλωριώδη	0,25 mg/l
Χρώμιο	25,0 µg/l
Χαλκός	2,0 mg/l
Κυανιούχα	50,0 µg/l
1,2-Διχλωροαιθάνιο	3,0 µg/l
Επιχλωρυδρίνη	0,1 µg/l
Φθοριούχα	1,5 mg/l
Αλογονοοξικά οξέα (HAA5)	60,0 µg/l
Μόλυβδος	5,0 µg/l
Υδράργυρος	1,0 µg/l
Μικροκυστίνη-LR	1,0 µg/l
Νικέλιο	20,0 µg/l
Νιτρικά	50,0 mg/l
Νιτρώδη	0,5 mg/l
Παρασιτοκτόνα	0,1 µg/l
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0,5 µg/l
Σύνολο PFAS	0,5 µg/l
Άθροισμα των PFAS	0,1 µg/l
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0,1 µg/l
Σελήνιο	20 µg/l
Τετραχλωροαιθένιο και Τριχλωραιθένιο	10 µg/l
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100 µg/l
Ουράνιο	30 µg/l
Βινυλοχλωρίδιο	0,5 µg/l

Πίνακας Α.4: Μέγιστες τιμές άλλων παραμέτρων όπως καθορίζονται από την Οδηγία 2020/2184/ΕΕ.

Παράμετρος	Μέγιστη τιμή
Αργίλιο	200 µg/l
Αμμώνιο	0,5 mg/l
Χλωριούχα άλατα	250 mg/l
Clostridium perfringens (συμπεριλαμβανομένων των σπορίων)	0 / 100 ml
Χρώμα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Αγωγιμότητα	2500 µS/cm στους 20 °C
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου	$6,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$
Σίδηρος	200 µg/l
Μαγγάνιο	50 µg/l
Οσμή	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Οξειδωσιμότητα	5 mg/l O ₂
Θειικά άλατα	250 µg/l
Νάτριο	200 µg/l
Γεύση	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Αριθμός αποικιών σε 22°C	Άνευ ασυνήθους μεταβολής
Κολοβακτηριοειδή	0 / 100 ml
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	Άνευ ασυνήθους μεταβολής
Θολότητα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής