

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DRASTIC: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΓΛΑΥΚΟΥ (Ν. ΑΧΑΪΑΣ)

Κ. Βουδούρης¹, Δ. Μανδηλαράς²

¹ Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. Εργ. Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας
54 124 Θεσσαλονίκη, E-mail: kvoudour@geo.auth.gr

² MSc, Υποψ. Διδ. Υδρογεωλογίας, Παν/μιο Πατρών, Τμ. Γεωλογίας, 26110, Ρίο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο υδροφορέας του πεδινού τμήματος της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου, Νότια της πόλης των Πατρών έχει έκταση 14,5 km² και αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Λόγω των πολλαπλών δραστηριοτήτων η περιοχή δέχεται πολλές περιβαλλοντικές πιέσεις με σημαντικότερες αυτές πάνω στους υδατικούς πόρους. Ο υδροφορέας εξαιτίας της παρουσίας πολλών πηγών ρύπανσης εμφανίζει ποιοτική υποβάθμιση. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι: βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, ενεργή κατείσδυση, υλικό υδροφορέα, έδαφος, κλίση αναγλύφου, ακόρεστη ζώνη, συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας και επιπλέον η παράμετρος χρήσεων γης. Με βάση τις τιμές του δείκτη DRASTIC κατασκευάστηκε χάρτης τρωτότητας της περιοχής έρευνας, όπου διακρίνεται ένας τομέας υψηλής τρωτότητας στο παράκτιο τμήμα του υδροφορέα και ένας τομέας μέσης τρωτότητας στο Ανατολικό τμήμα του υδροφορέα. Η αξιοπιστία της μεθόδου ελέγχθηκε με τη χρήση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων από δείγματα υπόγειου νερού.

EVALUATION OF GROUNDWATER VULNERABILITY USING THE DRASTIC METHOD: CASE STUDY OF ALLUVIAL AQUIFER OF GLAFKOS BASIN, ACHAIA

K. Voudouris¹, D. Mandilaras²

¹ Dept. of Geology, Aristotle University of Thessaloniki
54 124 Thessaloniki, E-mail: kvoudour@geo.auth.gr

² MSc, Dept. of Geology, University of Patras, 26110, RIO, Greece

ABSTRACT

The alluvial aquifer of Glafkos basin extends south of Patras, covering an area of 14.5 km². The aquifer is the main source of water supply in the area. Regional environment is subject to numerous pressures, most important of which are the changes of land uses and groundwater. The aquifer shows contamination due to the existence of sources of pollutants. DRASTIC method was applied to evaluate aquifer vulnerability. Parameters included: Depth, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, Hydraulic Conductivity of the aquifer and Land use categories. Based on DRASTIC index values a groundwater vulnerability map was illustrated. High vulnerability values are recorded in the western coastal part of the study area. Moderate DRASTIC index values are observed in the eastern part, indicating areas of moderate vulnerability potential. DRASTIC method was tested using data from hydrochemical analyses of groundwater samples.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εντατική χρήση των υπόγειων υδατικών πόρων, που υπερβαίνει την ικανότητα ανανέωσης αυτών, προκαλεί την ποσοτική μείωσή τους. Στην περίπτωση μάλιστα των παράκτιων υδροφόρων συστημάτων προκαλεί την αύξηση της αλατινότητάς τους, λόγω διείσδυσης της θάλασσας. Στους εσωτερικούς υδροφόρους η ανεξέλεγκτη διάθεση λυμάτων και αποβλήτων, καθώς και αγροχημικών από γεωργικές δραστηριότητες προκαλούν ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών.

Για την αποτίμηση του βαθμού ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων εισάγεται η έννοια της τρωτότητας (vulnerability). Η έννοια της τρωτότητας βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό. Συνεπώς κάποιες περιοχές είναι πιο εύαλτες από κάποιες άλλες. Η τρωτότητα σχετίζεται με την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφόρο ορίζοντα. Η έννοια της τρωτότητας εισήχθη για πρώτη φορά από τον Margat (1968) στη Γαλλία, ο οποίος χρησιμοποίησε τον όρο για να εκφράσει τον βαθμό προστασίας που προσφέρει το φυσικό περιβάλλον εναντίον της ρύπανσης των υπόγειων νερών. Οι βασικές παράμετροι που έλαβε υπόψη ο Margat ήταν το βάθος του υπόγειου νερού, η διαπερατότητα, η ταχύτητα του υπόγειου νερού και η σχέση υπόγειων και επιφανειακών νερών. Οι Olmer & Rezac (1974) όρισαν την τρωτότητα «ως τον βαθμό έκθεσης των υπόγειων νερών σε κίνδυνο υποβάθμισης από φυσικές ουσίες». Ο Villumsen (1983) θεώρησε την ποιότητα των υπόγειων νερών ως δείκτη τρωτότητας και έδωσε έμφαση στη δυναμική των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι Bachmat & Collin (1987) όρισαν την τρωτότητα ως «την ευαισθησία της ποιότητας των υπόγειων νερών σε επιπτώσεις από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως καταδεικνύεται από τις αλλαγές της ποιότητας των υπόγειων νερών».

Η τρωτότητα διακρίνεται σε: ειδική (specific), που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή και σε γενική (intrinsic), που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο ρυπαντή (Holman et al. 2000). Η τρωτότητα του υπόγειου νερού είναι συνάρτηση τόσο των χαρακτηριστικών του υδροφόρου συστήματος, όσο και της απόστασης από την πηγή ρύπανσης, των χαρακτηριστικών του ρύπου και άλλων παραγόντων που μπορεί πιθανά να αυξήσουν το ρυπαντικό φορτίο του συγκεκριμένου ρυπαντή.

Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η μεθοδολογία DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα του πεδινού τμήματος της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου στο Νομό Αχαΐας. Η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της ταχύτατης αλλαγής των χρήσεων γης, της αστικοποίησης και της εντατικής γεωργίας που εμφανίζει, πλησίον του τρίτου σε μέγεθος πολεοδομικού συγκροτήματος της Ελλάδας. Οι υδρογεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης έχουν ερευνηθεί και αναφέρονται σε προηγούμενες εργασίες των ερευνητών: Βουδούρης (1995), Lambrakis et al. (1997), Μανδηλαράς κ.ά (1999), Μανδηλαράς & Βουδούρης (2001), Voudouris et al. (2004a).

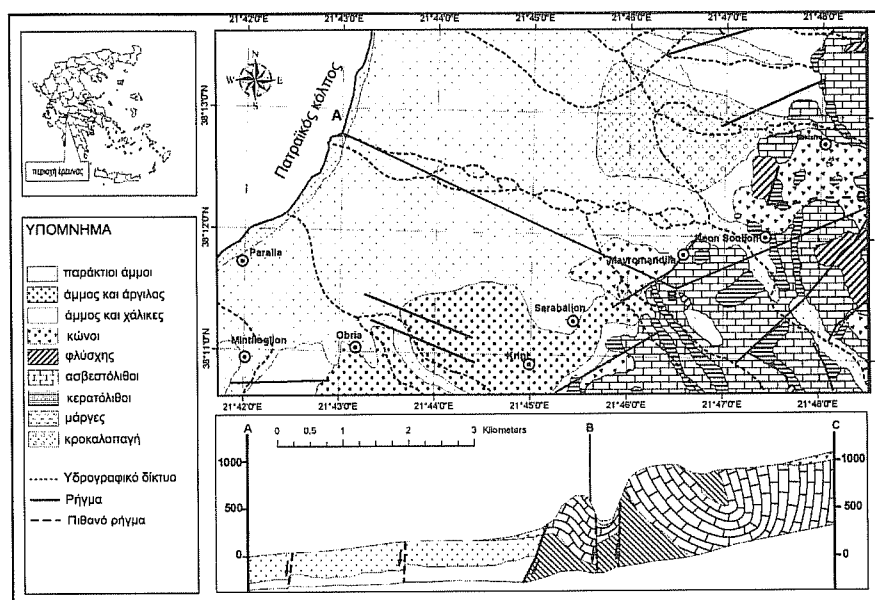
2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η λεκάνη του ποταμού Γλαύκου με συνολική έκταση 102 km² εκτείνεται Νοτιοανατολικά της πόλης των Πατρών. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης ανέρχεται σε 1071 mm (1969-1993) και η μέση ετήσια θερμοκρασία σε 12,6 °C (1955-1997). Το ορεινό τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από ασβεστόλιθους με ενστρώσεις ραδιολαριτών και φλύσχη, ενώ το πεδινό τμήμα, έκτασης 14,5 km², από μεταλλικές αποθέσεις.

Οι μεταλλικές αποθέσεις μπορεί να διακριθούν στην ανώτερη και την κατώτερη ζώνη (Zelilidis et al., 1988, Ρόζος, 1989, Μανδηλαράς κ.ά, 1999): Η ανώτερη ζώνη καλύπτεται

επιφανειακά από νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα κροκαλών και λατυπών, ψηφιδών, άμμων, μαργών και αργίλων και χαλαρών έως συνεκτικών κροκαλοπαγών. Η κατώτερη ζώνη καλύπτεται επιφανειακά από τεταρτογενή ιζήματα, των οποίων το κοκκομετρικό μέγεθος μειώνεται αισθητά προς την έξοδο της λεκάνης, όπου επικρατούν λεπτόκοκκα υλικά (άργιλοι, αργιλοΐλυες και μάργες), σε εναλλαγές με αδρομερέστερα υλικά (άμμοι, ψηφίτες και κροκάλες).

Τα αδρομερέστερα από τα παραπάνω ιζήματα, όπως οι κροκάλες, οι λατύπες και οι ψηφίτες, φιλοξενούν τους κύριους και υψηλής δυναμικότητας υδροφόρους σχηματισμούς του πεδινού τμήματος της λεκάνης. Η αύξηση του πάχους των αργιλοπηλίκων στρωμάτων προς την έξοδο της λεκάνης συμβάλλει στη δημιουργία φαινομένων αρτεσιανισμού στους υποκείμενους αδρομερέστερους υδροφόρους σχηματισμούς. Έτσι ο ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας της ανώτερης ζώνης μεταπίπτει σε επάλληλους υπό πίεση υδροφόρους στην κατώτερη ζώνη. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένας συνοπτικός γεωλογικός χάρτης της λεκάνης, καθώς και μια γεωλογική τομή και στο Σχήμα 2 ένας τοπογραφικός χάρτης.

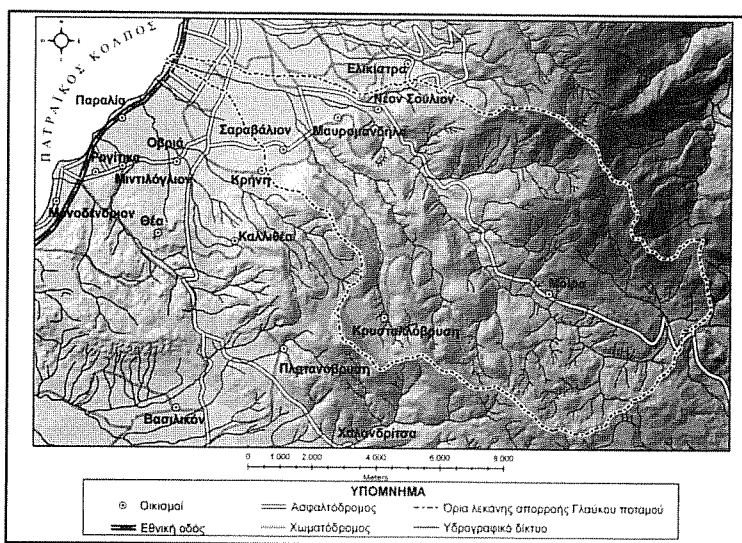


Σχήμα 1. Συνοπτικός γεωλογικός χάρτης και σχηματική γεωλογική τομή της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Γλαύκου (Από Voudouris et al., 2004a).

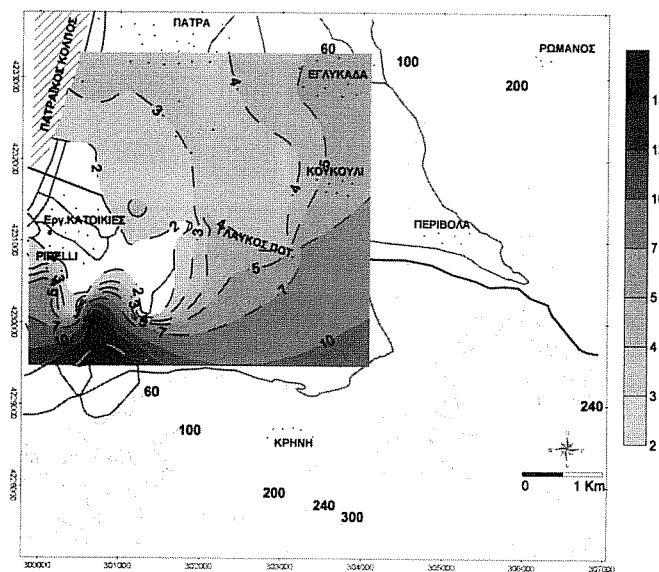
Λόγω των πολλαπλών δραστηριοτήτων το πεδινό τμήμα της λεκάνης δέχεται πολλές περιβαλλοντικές πιέσεις με σημαντικότερες αυτές πάνω στα υπόγεια νερά. Η εντατική εκμετάλλευση του υδροφορέα από τη δεκαετία του 1970, σε συνδυασμό με παρατεταμένες περιόδους ισχυρής ξηρασίας (1989-92), είχε ως αποτέλεσμα την ποσοτική μείωση και την ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών (Lambrakis et al., 1997, Μανδηλαράς & Βουδούρης, 2001). Κατά τα έτη 1991-1992 παρατηρήθηκε σημαντική πτώση στάθμης του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα, που οδήγησε στη μετατροπή των αρτεσιανών υδροφόρων σε ελεύθερους και στην εμφάνιση αρνητικής πιεζομετρίας, καθώς και στη διεύθυνση της θάλασσας σε απόσταση έως 3 km από την ακτή (Βουδούρης, 1995).

Την περίοδο 1994-95 διακόπηκε η άντληση των παράκτιων δημοτικών γεωτρήσεων και σε συνδυασμό με την αποβιομηχάνιση της περιοχής και τη μετεγκατάσταση των βιομηχανιών στη ΒΙ.ΠΕ Πατρών, καθώς και την αύξηση του φυσικού εμπλουτισμού

οδήγησαν στην αναστροφή των δυσμενών επιπτώσεων. Έτσι, την περίοδο Απριλίου 1999 επανεμφανίστηκαν φαινόμενα αρτεσιανισμού στην παράκτια ζώνη, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών (Μανδηλαράς & Βουδούρης, 2001). Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ένας πιεζομετρικός χάρτης της περιόδου Νοεμβρίου 2001 της προσχωματικής λεκάνης του ποταμού Γλαύκου, όπου διαπιστώνονται θετικές απόλυτες πιεζομετρικές στάθμες έως +15 m α.ε.θ.



Σχήμα 2. Τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης του Γλαύκου.



Σχήμα 3. Πιεζομετρικός χάρτης της περιόδου Νοεμβρίου 2001 του προσχωματικού υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε (Zektser et al. 1995, Καλλέργης, 2000, Focazio et al., 2002, Βουδούρης, 2004): 1) Βαθμονόμησης (rating methods): Περιλαμβάνουν μεθόδους δεικτών (index methods) και υβριδικές μεθόδους (hybrid methods), που συνδυάζουν μεθόδους δεικτών με στατιστικές μεθόδους, 2) Στατιστικές (statistical methods) και 3) Προσομοίωσης (simulating models).

Οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν απλή περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων διαφόρων επιλεγμένων ρυπαντών (NO_3 , As), καθώς και ανάλυση συσχέτισης (π.χ. συγκέντρωση νιτρικών ιόντων με το βάθος). Οι μέθοδοι προσομοίωσης επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του υπόγειου νερού.

Η μεθοδολογία DRASTIC (Aller et al., 1987) ανήκει στις μεθόδους δεικτών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών με βάση υδρογεωλογικές παραμέτρους. Η λέξη DRASTIC προκύπτει από τα ακρωνύμια των: D (Depth) βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, R (Recharge) εμπλουτισμός, A (Aquifer media) υδροφόρο μέσο, S (Soil) έδαφος, T (Topography) κλίση αναγλύφου, I (Impact of the vadose zone) επίδραση της ακόρεστης ζώνης, C (Hydraulic Conductivity of the aquifer) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή υδροπερατότητας. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος χρήσεων γης (L), λόγω της σπουδαιότητας που εμφανίζει στην περιοχή έρευνας.

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

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (1)$$

Ο δείκτης r εκφράζει την τιμή της παραμέτρου και ο δείκτης w τη βαρύτητα καθεμιάς.

Η βαρύτητα κάθε παραμέτρου σύμφωνα με τους Aller et al. (1987) παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα είναι το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, η επίδραση της ακόρεστης ζώνης και οι χρήσεις γης, γιατί θεωρούνται οι πλέον σημαντικές. Οι τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται από 1 (ελάχιστο δυναμικό ρύπανσης) έως 10 (μέγιστο δυναμικό ρύπανσης).

Πίνακας 1. Βαρύτητα κάθε παραμέτρου στη μεθοδολογία DRASTIC (Aller et al., 1987).

	Παράμετρος	Βαρύτητα
D	βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού	5
R	εμπλουτισμός	4
A	υδροφόρο μέσο	3
S	έδαφος	2
T	κλίση αναγλύφου	1
I	επίδραση της ακόρεστης ζώνης	5
C	συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	3

Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί από πολλούς ερευνητές σε διάφορες περιοχές: Bachmat & Collin (1987), Ibe et al. (2001), Hrkal (2001), Mclay et al. (2001), Al-Zabet (2002), Bekesi & McConchie (2002). Η μέθοδος DRASTIC θεωρεί ότι (Rosen, 1994): 1) ο ρύπος εισάγεται από την επιφάνεια του εδάφους, 2) ο ρύπος φθάνει στο υπόγειο νερό συμπαρασυρόμενος από το κατεισδύον νερό της βροχόπτωσης, 3) ο ρύπος έχει την ίδια ικανότητα κίνησης μ' αυτήν του νερού και 4) η ελάχιστη επιφάνεια εφαρμογής της μεθόδου είναι 405 στρέμματα.

Με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου στην προσχωματική λεκάνη του Γλαύκου συντάχθηκε χάρτης τρωτότητας (Σχήμα 11), στον οποίο φαίνονται οι περιοχές με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων νερών. Στα Σχήματα 4–10 παρουσιάζονται επιμέρους οι χάρτες κατανομής κάθε παραμέτρου επί τη βαρύτητάς της, που επηρεάζει χωριστά και συμβάλει στη διαμόρφωση του δείκτη τρωτότητας DRASTIC (DI). Ο χάρτης

τρατότητας μπορεί να συνδυασθεί με χάρτες χρήσεων γης, ποιότητας νερού, πυκνότητας πληθυσμού κ.ά και να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση και τη θέσπιση νομοθετικών μέτρων σε όλα τα επίπεδα της διοίκησης.

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ DRASTIC

Ο δείκτης DRASTIC εκτιμήθηκε με βάση τις τιμές κάθε παραμέτρου σε κάθε θέση σημείου νερού (γεωτρήσεις, πηγάδια), για το οποίο υπάρχει λιθολογική τομή, μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού, πάχος της ακόρεστης ζώνης κ.λπ. Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον το ψηφιακό υπόβαθρο του εδάφους για τον υπολογισμό των κλίσεων, καθώς και δεδομένα αντλητικών δοκιμασιών για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

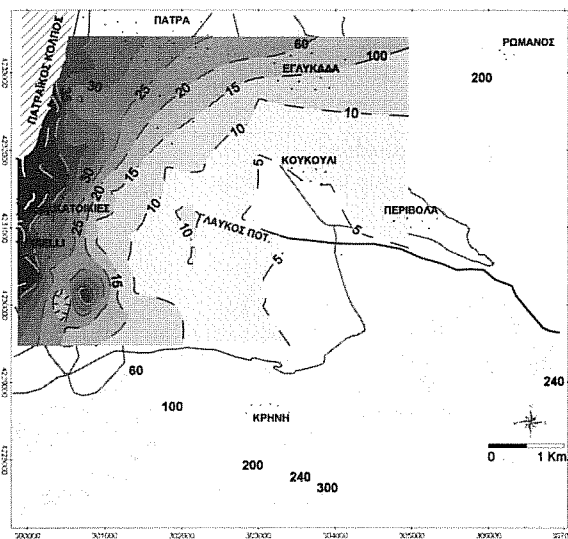
4.1 Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (D)

Το βάθος του υπόγειου νερού είναι σημαντικό γιατί καθορίζει τον χρόνο που ταξιδεύει ένας ρύπος για να φθάσει στον υδροφόρο. Με βάση την πιεζομετρία της περιόδου Νοεμβρίου 2001 (Σχήμα 3), η στάθμη του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 2 έως 55 m α.ε.ε.

Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 5 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

- $D < 3 \text{ m} \rightarrow 10$ βαθμοί
- $3 \text{ m} < D < 5 \text{ m} \rightarrow 9$ βαθμοί
- $5 \text{ m} < D < 8 \text{ m} \rightarrow 7$ βαθμοί
- $8 \text{ m} < D < 12 \text{ m} \rightarrow 5$ βαθμοί
- $12 \text{ m} < D < 20 \text{ m} \rightarrow 3$ βαθμοί
- $20 \text{ m} < D < 40 \text{ m} \rightarrow 2$ βαθμοί
- $D > 40 \text{ m} \rightarrow 1$ βαθμός

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα $D_r D_w$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Χάρτης του παράγοντα $D_r D_w$.

4.2 Εμπλουτισμός (R)

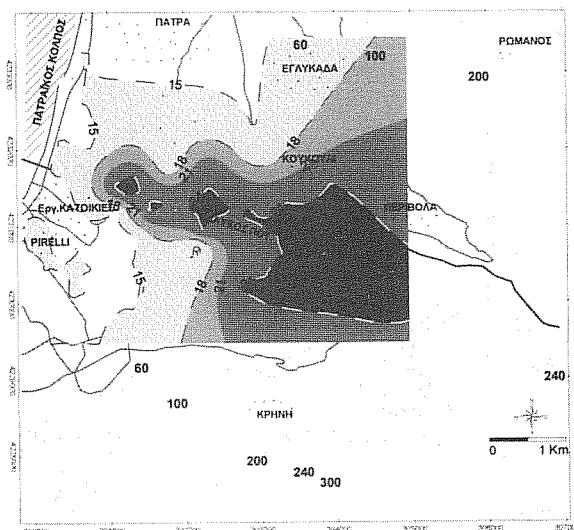
Ο εμπλουτισμός αντιπροσωπεύει την ετήσια ποσότητα του νερού σε mm που κατεισδύει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφόρο. Η βροχοβαθμίδα για τη λεκάνη

του Γλαύκου, με βάση τα στοιχεία των σταθμών: Πάτρας (υψόμετρο 1 m, μέσο ετήσιο ύψος βροχής 638 mm), Κρυσταλλόβρυσης (750 m, 1031 mm), Λεοντίου (740 m, 1038 mm), Γλαύκου ΥΗΣ (180 m, 789 mm) και Γλαύκου φράγματος (380 m, 873 mm) για την περίοδο 1969-1997 είναι +49,1 mm ανά 100 m (Μανδηλαράς & Βουδούρης, 2001). Έτσι το κατώτερο τμήμα του υδροφορέα (μέσο υψόμετρο 20 m και έκταση 6,9 km²) δέχεται ετήσια βροχόπτωση 648 mm και το ανώτερο (μέσο υψόμετρο 70 m και έκταση 7,7 km²) 673 mm.

Ο συντελεστής κατείσδυσης είναι συνάρτηση του ύψους βροχής, της κλίσης του αναγλύφου και της περατότητας του εδάφους. Στην παρούσα εφαρμογή, με βάση τη λιθολογία, ο συντελεστής κατείσδυσης εκτιμήθηκε σε 10% του ετήσιου ύψους βροχής στην κατώτερη ζώνη και σε 15% στην ανώτερη ζώνη, λόγω της παρουσίας αδρομερέστερων υλικών στα ανάντη (Βουδούρης, 1995). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 3 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

$$\begin{aligned} R > 93 \text{ mm} &\rightarrow 10 \text{ βαθμοί} \\ 79 \text{ mm} < R < 93 \text{ mm} &\rightarrow 8 \text{ βαθμοί} \\ 66 \text{ mm} < R < 79 \text{ mm} &\rightarrow 6 \text{ βαθμοί} \\ R < 66 \text{ mm} &\rightarrow 4 \text{ βαθμοί} \end{aligned}$$

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα RrRw παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Χάρτης του παράγοντα RrRw.

4.3 Υδροφόρο μέσο (A)

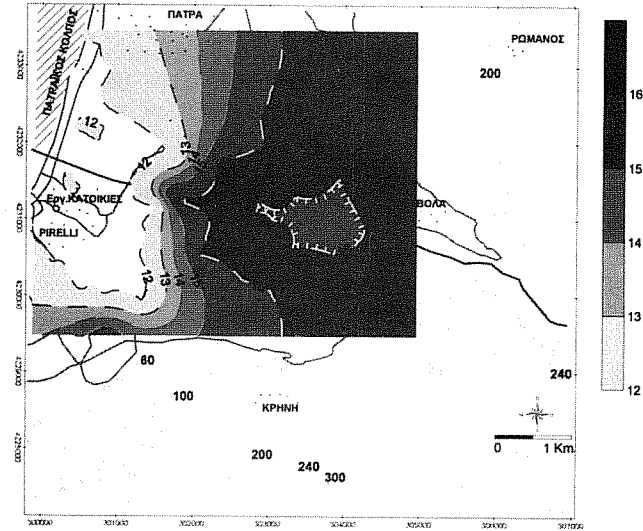
Με βάση τη λιθολογική περιγραφή της περιοχής έρευνας το υδροφόρο μέσο ταξινομήθηκε ως άμμος (βαθμοί 6) και κροκάλες-χάλικες (βαθμοί 8). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 2 και η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα ArAw παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.

4.4 Έδαφος (S)

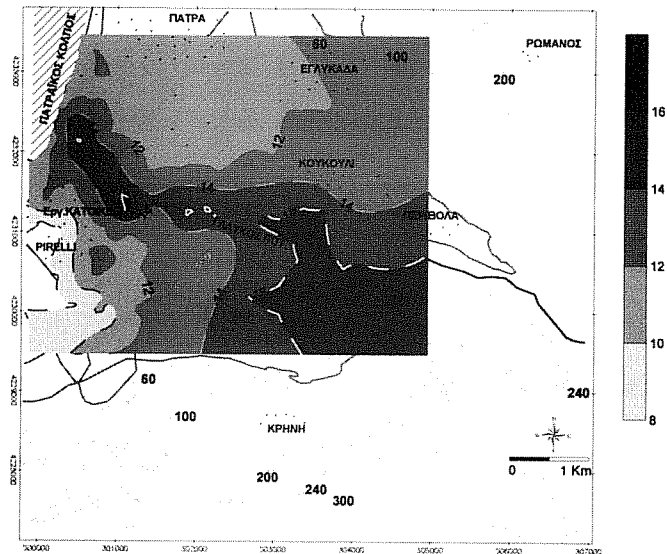
Στην εδαφική ζώνη και ιδιαίτερα στη ζώνη των ριζών το ρυπαντικό φορτίο εξασθενεί και πολλές ουσίες αποικοδομούνται από μικροοργανισμούς.

Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 2. Το έδαφος ταξινομήθηκε σε τρεις κλάσεις: αδρομερή υλικά παρά τον ποταμό Γλαύκο (βαθμοί 8), αμμώδες (βαθμοί 6) και

αργιλοϊλυώδες στην παράκτια ζώνη (βαθμοί 4). Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα SrSw φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 6. Χάρτης του παράγοντα AgAw.



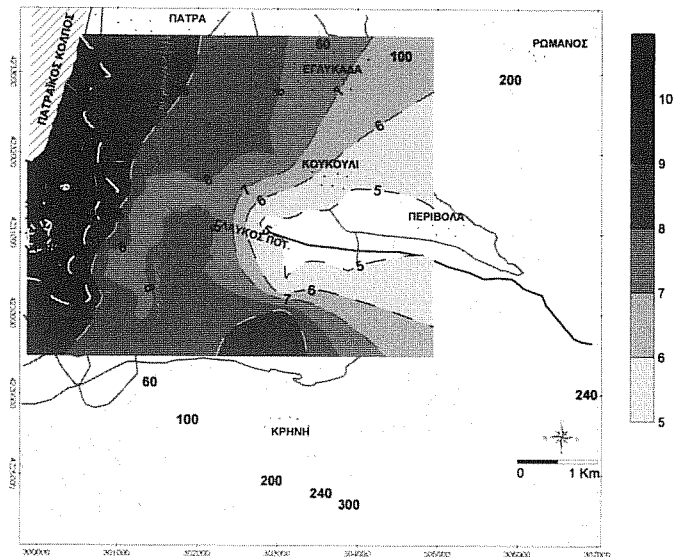
Σχήμα 7. Χάρτης του παράγοντα SrSw.

4.5 Κλίση αναγλύφου (T)

Το ανάγλυφο της περιοχής του υδροφορέα είναι σχετικά ήπιο και ο καθορισμός των κλίσεων έγινε με βάση το ψηφιακό υπόβαθρο του εδάφους. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 1 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

- $T < 1,5 \% \rightarrow 10$ βαθμοί
 $1,5 \% < T < 2,0 \% \rightarrow 8$ βαθμοί
 $T > 2,0 \% \rightarrow 5$ βαθμοί

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα TgTw φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8. Χάρτης του παράγοντα TgTw.

4.6 Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I)

Η ακόρεστη ζώνη παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της ρύπανσης, λόγω της βραδείας κίνησης του νερού καθώς και διαφόρων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σ' αυτήν, όπως: προσρόφηση και ανταλλαγή κατιόντων, χημικές αντιδράσεις, μείωση παθογόνων μικροοργανισμών κ.ά.

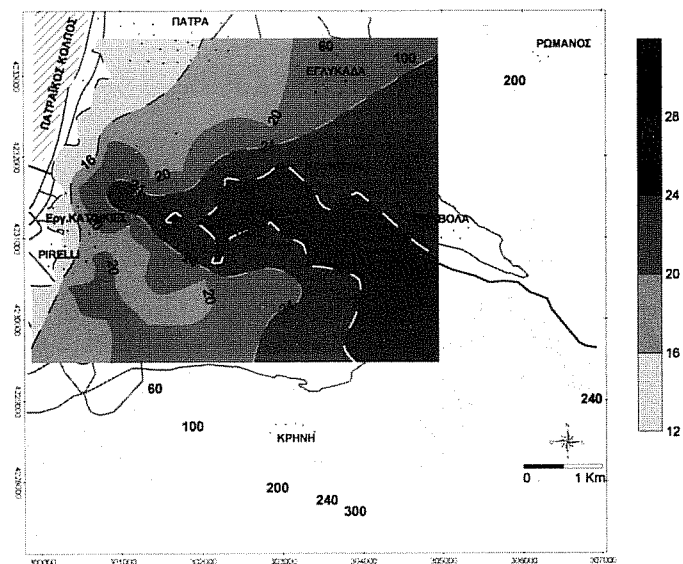
Ο βαθμός εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από τη λιθολογία της, την κοκκομετρία της, το πάχος της, τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τη συγκέντρωσή του κ.λπ. Με βάση τα στοιχεία των λιθολογικών τομών, καθώς και στοιχεία της γεωτρητικής έρευνας (Βουδούρης, 1995), η ακόρεστη ζώνη αποτελείται από ιλυώδη άργιλο (βαθμοί 3), άμμο (βαθμοί 5) και αμμοχάλικες (βαθμοί 7). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 4. Η γεωγραφική κατανομή των τιμών του παράγοντα IgTw φαίνεται στο Σχήμα 9.

4.7 Υδραυλική αγωγιμότητα (C)

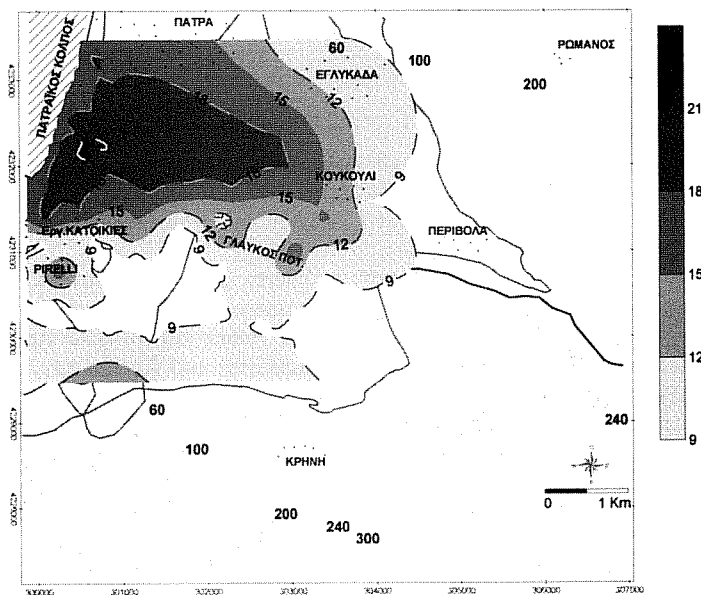
Η υδραυλική αγωγιμότητα ελέγχει την ευκολία κίνησης του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη και κατά συνέπεια και των ρύπων. Η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε από την επεξεργασία των αντλητικών δεδομένων. Η χωρική κατανομή της έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer 8.0, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο kriging (Matheron, 1971, Olea, 1974). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 3 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

- $C > 5 \text{ m/h} \rightarrow 7$ βαθμοί
 $1 > C > 5 \text{ m/h} \rightarrow 6$ βαθμοί
 $0,5 > C > 1 \text{ m/h} \rightarrow 5$ βαθμοί
 $C < 0,5 \text{ m/h} \rightarrow 3$ βαθμοί

Η γεωγραφική κατανομή των τιμών του παράγοντα CrCw φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 9. Χάρτης του παράγοντα Irlw.



Σχήμα 10. Χάρτης του παράγοντα Crw.

4.8 Χρήσεις γης (L)

Η εισαγωγή της παραμέτρου αυτής με βαρύτητα 4 κρίθηκε απαραίτητη, λόγω των έντονων αλλαγών που έχουν γίνει στην περιοχή και σχετίζεται με τη δόμηση, την πυκνότητα σηπτικών βόθρων, τις αρδευόμενες εκτάσεις και τις ακαλλιέργητες περιοχές. Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από έντονη αστικοποίηση, εντατική γεωργία (άμπελοι, λαχανόκηποι,

δενδρώδεις καλλιέργειες), ενώ υπάρχουν διάσπαρτες βιοτεχνικές μονάδες. Η πυκνότητα πληθυσμού στο παράκτιο Δυτικό τμήμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στο Ανατολικό τμήμα. Η παράμετρος αυτή έχει εισαχθεί και από άλλους ερευνητές σε περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (Secunda et al., 1998, Adamat et al., 2003) και η βαθμονόμησή της έγινε ως εξής: δομημένες και αρδευόμενες περιοχές (βαθμοί 8) και μη καλλιεργούμενες περιοχές (βαθμοί 5).

4.9 Δείκτης τρωτότητας

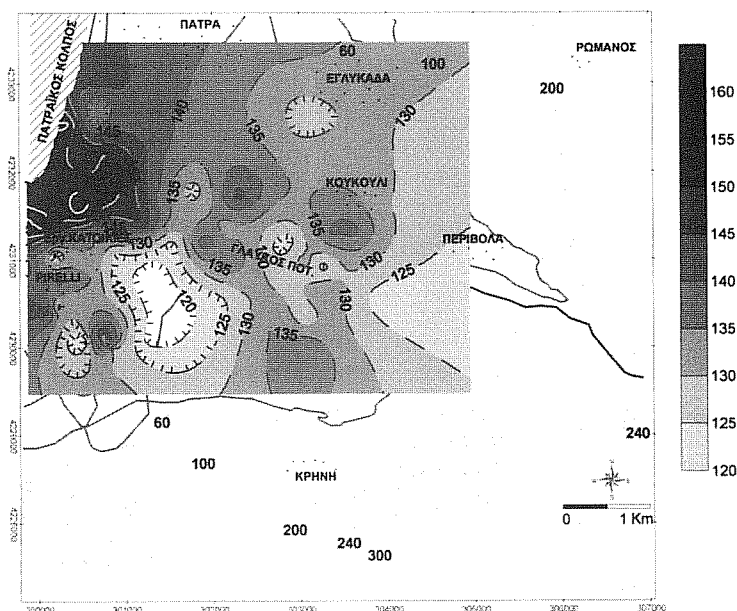
Ο τροποποιημένος δείκτης τρωτότητας DRASTIC (MDI) δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$MDI = DI + (Lr \times Lw) \quad (2)$$

όπου: DI είναι ο δείκτης DRASTIC σύμφωνα με τη σχέση (1), Lr είναι η τιμή της παραμέτρου χρήσεων γης και Lw είναι η βαρύτητα αυτής ίση με 4.

Ο τροποποιημένος δείκτης DRASTIC στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 118 έως 164. Οι υψηλότερες τιμές του δείκτη MDI αντιστοιχούν σε υποπεριοχές (τομείς) με μεγαλύτερη διακινδύνευση τρωτότητας των υπόγειων νερών. Με βάση τις τιμές του τροποποιημένου δείκτη DRASTIC, η περιοχή έρευνας διαιρείται σε δύο τομείς (Σχήμα 11): 1) με μέση διακινδύνευση τρωτότητας (118-140) και 2) με υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας (141-164). Ο τομέας μέσης διακινδύνευσης καλύπτει το Ανατολικό τμήμα της λεκάνης, ενώ ο τομέας υψηλής τρωτότητας το παράκτιο τμήμα.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων του μοντέλου DRASTIC. Από τον Πίνακα αυτόν προκύπτει ισχυρή θετική συσχέτιση (>0.60) μεταξύ των παραμέτρων εδαφικού υλικού και ακόρεστης ζώνης, εμπλουτισμού - εδαφικού υλικού και υδροφόρου μέσου - εμπλουτισμού. Ασθενής συσχέτιση εμφανίζεται όπου συμμετέχει η υδραυλική αγωγιμότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι διάφοροι ερευνητές δεν εισάγουν την παράμετρο της υδραυλικής αγωγιμότητας στον υπολογισμό του δείκτη DRASTIC (Adamat et al., 2003).



Σχήμα 11. Χάρτης του δείκτη τρωτότητας DRASTIC (MDI).

Πίνακας 2. Ανάλυση συσχέτισης των παραμέτρων του μοντέλου DRASTIC.

	D	R	A	S	T	I	C	L
D	1.00							
R	-0.60	1.00						
A	-0.66	0.68	1.00					
S	-0.52	0.64	0.53	1.00				
T	0.35	-0.69	-0.73	-0.57	1.00			
I	-0.52	0.64	0.53	0.98	-0.57	1.00		
C	0.31	-0.11	-0.15	0.22	0.25	0.23	1.00	
L	0.39	-0.62	-0.48	-0.46	0.52	-0.46	0.16	1.00

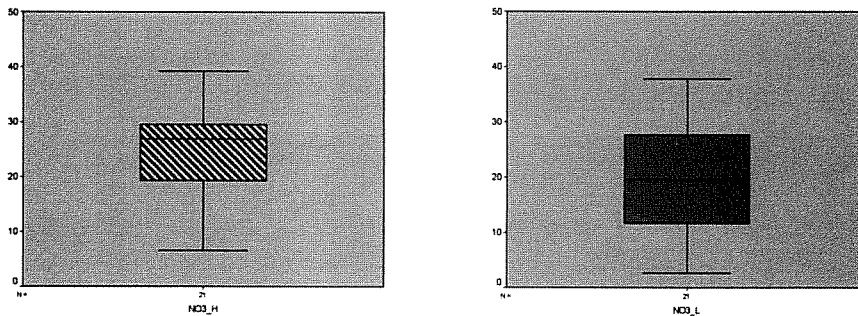
5. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από δείγματα υπόγειου νερού της περιόδου του Νοεμβρίου 2001. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων και των τιμών του τροποποιημένου δείκτη τρωτότητας.

Η συγκέντρωση των νιτρικών στον τομέα με υψηλή διακινδύνευση της τρωτότητας κυμαίνεται μεταξύ 6,6–44,5 mg/l (μέση τιμή 25 mg/l), ενώ στον τομέα με μέση διακινδύνευση μεταξύ 3,5–37,8 mg/l (μέση τιμή 19 mg/l). Να σημειωθεί ότι, και στους δύο τομείς εφαρμόζονται οι ίδιες καλλιεργητικές πρακτικές.

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται τα θηκογράμματα (box plots) των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στους δύο τομείς. Γενικά διαπιστώνεται ότι ο τομέας υψηλής διακινδύνευσης τρωτότητας εμφανίζει σημεία νερού με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων, οι οποίες δεν παρατηρούνται σε σημεία νερού του τομέα με μέση διακινδύνευση.

Πρέπει να σημειωθεί η ύπαρξη ισχυρής συσχέτισης της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με την περατότητα της ακόρεστης ζώνης, η οποία αναγνωρίζεται από πολλούς ερευνητές (McLay et al., 2001). Σε άλλες έρευνες διαπιστώνεται ότι το βάθος του υπόγειου νερού είναι επίσης σημαντικό για τη νιτρορρύπανση (Kolpin, 1997, Voudouris et al., 2004b).



Σχήμα 12. Θηκογράμματα (box plots) των συγκεντρώσεων των νιτρικών στους τομείς υψηλής (αριστερά) και μέσης (δεξιά) τρωτότητας του προσχωματικού υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος DRASTIC εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της τρωτότητας στον προσχωσιγενή υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου. Πέραν των επτά παραμέτρων

χρησιμοποιήθηκε και η παράμετρος χρήσεων γης με βαρύτητα 4, λόγω της σπουδαιότητας που εμφανίζει στην περιοχή.

Ο τροποποιημένος δείκτης DRASTIC κυμαίνεται από 118 έως 164 και διαχωρίζει τον υδροφόρο σε δύο τομείς με μέση διακινδύνευση τρωτότητας (MDI=118-140) και με υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας (MDI=141-164), αντίστοιχα.

Όπως προέκυψε από τον χάρτη τρωτότητας που κατασκευάστηκε, ο τομέας με μέση διακινδύνευση τρωτότητας καλύπτει το Ανατολικό τμήμα της λεκάνης, ενώ ο τομέας με υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας το παράκτιο Δυτικό τμήμα.

Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, με βάση τις χημικές αναλύσεις της περιόδου Νοεμβρίου 2001, είναι υψηλή στον τομέα με υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας, ενώ χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων καταγράφονται στις γεωτρήσεις του τομέα με μέση διακινδύνευση τρωτότητας.

Η μέθοδος DRASTIC είναι χρήσιμη και μπορεί να εφαρμοσθεί σε άλλες παρόμοιες περιοχές. Ο δε χάρτης τρωτότητας μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο στους φορείς της δημόσιας διοίκησης και της τοπικής αυτοδιοίκησης για τη χωροθέτηση χώρων π.χ. χωματερών, Χ.Υ.Τ.Α., βιοτεχνικών πάρκων κ.ά. με σκοπό την αποφυγή της ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών.

Η περαιτέρω συλλογή στοιχείων π.χ. εδαφολογικών, η προσομοίωση της πιεζομετρίας, η καταγραφή των πηγών ρύπανσης και η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών νερών της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου, θα συμβάλλει στην πιο αξιόπιστη εφαρμογή της μεθόδου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L., Baban, S.M.J. 2003. *Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC*. Applied Geography 23 (2003) 303-324.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting*. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency, 163 p.
- Al-Zabet, T. 2002. *Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method*. Environmental Geology (2002) 43:203-208.
- Bachmat, Y., Collin, M. 1987. *Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution*. Proc. And Information No 38. TNO Committee on Hydrogeology Research. Hague. Netherlands, 297-307.
- Bekesi, G., McConchie, J. 2002. *The use of aquifer-media characteristics to model vulnerability to contamination, Manawatu region, New Zealand*. Hydrogeology Journal (2002) 10:322-331.
- Βουδούρης, Κ. 1995. *Υδρογεωλογικές συνθήκες του ΒΔ/κού τμήματος του νομού Αχαΐας*. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Βουδούρης, Κ. 2004. *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος*. Διδακτικές Σημειώσεις, Εργ. Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.
- Focazio, M., Reilly, Th., Rupert, M., Helsel, D. 2002. *Assessing groundwater vulnerability to contamination: Providing Scientifically Defensible information for decision makers*. U.S. Geological Survey Circular 1224. Reston, Virginia.
- Holman, I.P., Palmer, R.C., Leonaviciute, N. 2000. *Using soil and quaternary geological information to assess the intrinsic groundwater vulnerability of shallow aquifers: an example from Lithuania*. Hydrogeology Journal (2000) 8:636-645.

- Hrkal, Z. 2001. Vulnerability of groundwater to acid deposition Jizezské mountains northern Czech Republic: Construction and reliability of a GIS-based vulnerability map. *Hydrogeology Journal* (2001) 9: 348-357.
- Ibe, K.M., Nwankwor, G.I., Onyekuru, S.O. 2001. *Assessment of groundwater vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri, NE Nigeria*. *Environmental Monitoring and Assessment* 67:323-360.
- Καλλέργης, Γ. 2000. *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*. Τόμος Β' ΤΕΕ. Αθήνα.
- Kolpin, D.W. 1997. *Agricultural chemicals in groundwater of the Midwestern United States: relations to land use*. *Journal of Environmental Quality* 26, 1025-1037.
- Lambrakis, N., Voudouris, K., Tiniakos, L., Kallergis, G., 1997. *Impacts of drought and overpumping on the Quaternary aquifers of the Glasfos basin (Patras region, W. Greece)*. *Environmental Geology*, 29 (3/4) February 1997, 209-216.
- Μανδηλαράς, Δ., Βουδούρης, Κ., Λαμπράκης, Ν. 1999. *Διακύμανση της ποιότητας και της στάθμης των υπόγειων νερών στον προσχωσιγενή υδροφόρο ορίζοντα της λεκάνης του Γλαύκου ποταμού (ΒΔ/κή Αχαΐα)*. Πρακτικά 5^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Κύπρος.
- Μανδηλαράς, Δ., Βουδούρης, Κ. 2001. *Ισοζύγιο ύδατος και ποιότητα υπόγειων νερών στον προσχωσιγενή υδροφόρο της λεκάνης του Γλαύκου ποταμού (ΒΔ/κή Αχαΐα)*. Πρακτικά 9^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Αθήνα. Τόμος XXXIV/5, 1827-1834.
- Margat, J. 1968. *Groundwater vulnerability maps, conception-estimation-mapping* (in French). EEC Institut Europeen de l' Eau, Paris, France.
- Matheron, G. 1971. *The theory of regionalized variables and its applications*. Cahier No 5, Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 211.
- McLay, C.D.A, Dragten, R., Sparling, G., Selvarajah, N. 2001. *Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches*. *Environmental Pollution* 115 (2001) 191-204.
- Olea, R. 1974. *Optimal contour mapping using Universal Kriging*. *Jour. of Geoph. Res.* Vol. 79, 695-702.
- Olmer, M., Rezac, B. 1974. *Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale geologists*. Montpellier, France, Memoires, Tome 10, 1.
- Rosen, L. 1994. *A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions*. *Ground Water*, Vol. 32, No 2, 278-285.
- Ρόζος, Δ. 1989. *Τεχνικογεωλογικές συνθήκες στο νομό Αχαΐας-Γεωμηχανικοί χαρακτήρες των πλειοπλειστοκαινικών ιζημάτων*. Διδ. διατριβή. Τμ. Γεωλογίας, Παν. Πατρών.
- Secunda, S., Collin, M.L., Melloul, A. 1998. *Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region*. *Journal of Environmental Management* (1998) 54, 39-57.
- Villumsen, A. 1983. *Mapping of vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution*. Year book 1982, Geological Survey of Denmark, Copenhagen, 17-83.
- Voudouris, K., Mandilaras, D., Antonakos, A. 2004a. *Methods to define the seawater intrusion: examples from South Greece*. Proc. 18th SWIM, Cartagena, Spain (in press).
- Voudouris, K., Panagopoulos, A., Koumantakis, J. 2004b. *Nitrate pollution in the coastal aquifer system of the Korinthos Prefecture, Greece*. *Global Nest: The International Journal*, Vol. 6, No 1, 31-38.
- Zektser, I.S., Belousova, A.P., Dudov, V.Yu. 1995. *Regional assessment and mapping of groundwater vulnerability*. *Environmental Geology* (1995) 25:225-231.
- Zelilidis, A., Koukouvelas, I., and Doutsos, T. 1988. *Neogene paleostress changes behind the foreact fold belt in the Patraikos Gulf area, W. Greece*. *N. Jb. Geol. Palaont. Mh.* 311-325. Stuttgart.