ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

7.1. Η έννοια της τρωτότητας

Τρωτότητα ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα (vulnerability) υπόγειων νερών ή υδροφορέων είναι η ευαισθησία ή η επιδεκτικότητα απέναντι στους ρύπους.

Η έννοια της τρωτότητας εισήχθη για πρώτη φορά από τον Margat το 1968 στη Γαλλία 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.

Έκτοτε ο ορισμός της τρωτότητας άλλαξε. Οι Olmer & Rezac (1974) ορίζουν την τρωτότητα «ως τον βαθμό έκθεσης των υπόγειων νερών σε κίνδυνο υποβάθμισης από φυσικές ουσίες». Οι Villumsen et al. (1983) θεωρούν την ποιότητα των υπόγειων νερών ως δείκτη τρωτότητας και δίνει έμφαση στη δυναμική των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν αυτή. 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 έννοια της τρωτότητας βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό. Συνεπώς κάποιες περιοχές είναι πιο ευάλωτες από κάποιες άλλες. ***Η τρωτότητα σχετίζεται με την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφορέα κάτω από συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης σε μια περιοχή, με καθορισμένα χαρακτηριστικά του ρύπου και της ευαισθησίας του υδροφορέα***. Έτσι 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.

Αντίθετα ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) είναι η ευκολία με την οποία ένας ρύπος μεταναστεύει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα και είναι χαρακτηριστικό των γεωλογικών συνθηκών, της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης και

ανεξάρτητη των χρήσεων γης και των χαρακτηριστικών του ρύπου. Με βάση τους ανωτέρω ορισμούς προκύπτει ότι, η τρωτότητα δεν ταυτίζεται με την ευαισθησία (τρωτότητα ≠ ευαισθησία).

Η τρωτότητα διακρίνεται σε: ειδική (specific) που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών και σε γενική ή ιδιοτρωτότητα (intrinsic) που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο ρυπαντή. Σύμφωνα με τους Rao and Alley (1996) η ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) ταυτίζεται με τη γενική τρωτότητα (intrinsic vulnerability).

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

Η ακόρεστη ζώνη παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της ρύπανσης, λόγω της βραδείας κίνησης του νερού και λόγω διαφόρων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν, όπως: προσρόφηση και ανταλλαγή κατιόντων, χημικές αντιδράσεις, μείωση παθογόνων μικρο-οργανισμών κ.ά (βλ. παράγραφο 5.9). Ο βαθμός εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από τη λιθολογία της, την κοκκομετρία, το πάχος, τα χαρακτηριστικά του ρύπου και τη συγκέντρωσή του κ.λπ. Στην εδαφική ζώνη και ιδιαίτερα στη ζώνη των ριζών μεγάλες ποσότητες χημικών στοιχείων εξασθενούν και αποδομούνται από μικροοργανισμούς.

Συμπερασματικά η έννοια της τρωτότητας πρέπει να αντιμετωπίζεται σε τρία στάδια (Στουρνάρας, 1997):

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

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

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

Σε πολλές χώρες συντάσσονται χάρτες τρωτότητας σε κλίμακα νομού ή περιφερειακή κλίμακα ή σε ολόκληρη τη χώρα, στους οποίους φαίνονται οι περιοχές με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Οι χάρτες αυτοί είναι μια ειδική κατηγορία υδρογεωλογικών χαρτών και επειδή είναι χρονο-εξαρτώμενοι απαιτούν

ενημέρωση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Οι πληροφορίες για την ποιότητα των νερών συλλέγονται κυρίως από σταθμούς ελέγχου (monitoring stations), που εγκαθίστανται κατόπιν υδρογεωλογικής έρευνας και αναγνώρισης των αιτιών ρύπανσης.

Πίνακας 7.1: Πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών (Καλλέργης, 2000).

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

Οι χάρτες τρωτότητας συνδυάζονται με χάρτες χρήσεων γης, ποιότητας νερού, πυκνότητας πληθυσμού κ.ά και αποτελούν πολύτιμα εργαλεία στη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση και τη νομοθεσία σε όλα τα επίπεδα της δημόσιας διοίκησης. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται τελευταία με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και του διεθνούς κώδικα χρωμάτων, όπου οι επιμέρους χάρτες είναι τα θεματικά επίπεδα. Η συλλογή δεδομένων τροφοδοτεί τη βάση και η επεξεργασία γίνεται με τα λογισμικά Arc/Info, Map/Info κ.ά.

Η ***διακινδύνευση ενός υδροφορέα*** (risk pollution) R στη ρύπανση είναι συνάρτηση της τρωτότητάς του (vulnerability) και της πιθανότητας (hazard) εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης σε μια περιοχή. Η συνάρτηση υπολογισμού της διακινδύνευσης είναι η κάτωθι:

$$R= V \times H$$

όπου: R=η διακινδύνευση, V=η τρωτότητα του υδροφορέα και H=η πιθανότητα να συμβεί ένα επιβλαβές επεισόδιο σε μια περιοχή σε κάποια χρονική περίοδο.

Η εκτίμηση της πιθανότητας H (hazard) είναι δύσκολη και για το λόγο αυτόν εφαρμόζονται μέθοδοι τεχνικής νοημοσύνης, όπως η ασαφής λογική (fuzzy logic) (Uricchio et al., 2004). Έτσι επιπλέον από τους χάρτες τρωτότητας σε μια περιοχή κατασκευάζονται και χάρτες διακινδύνευσης των υπόγειων νερών στη ρύπανση.

7.2. Εκτίμηση της τρωτότητας με βάση υδρογεωλογικά κριτήρια

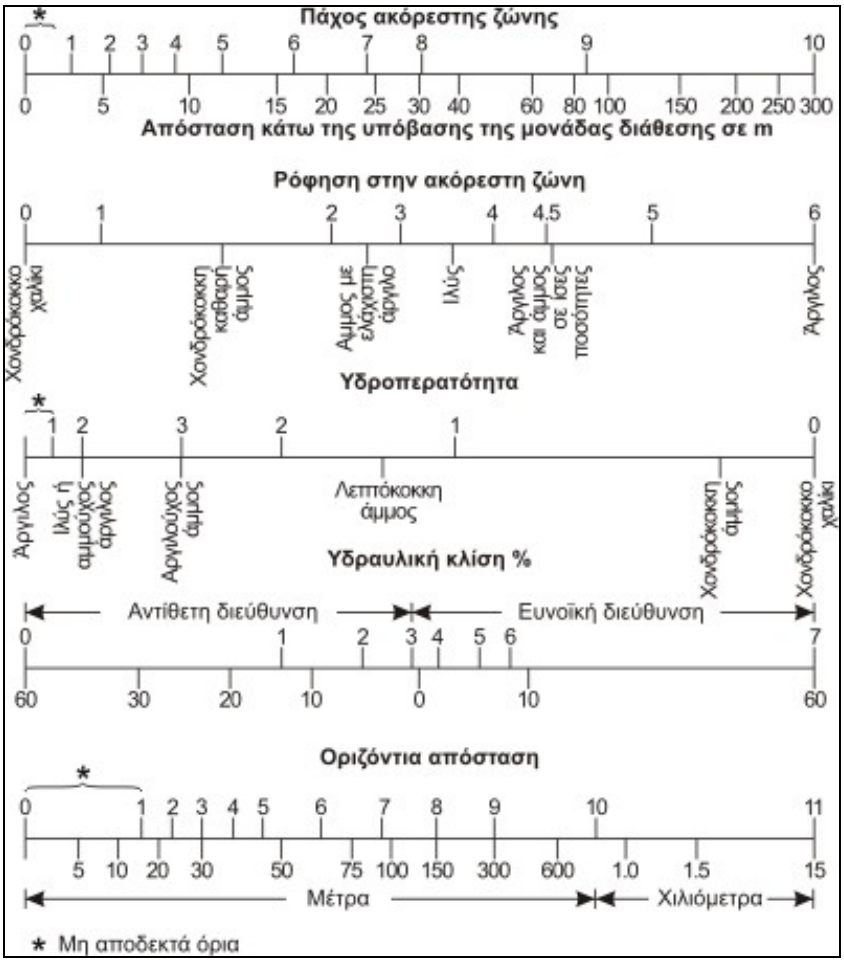
Για την ποσοτικοποίηση της τρωτότητας έχουν εισαχθεί διάφορα πρότυπα που βασίζονται σε διάφορα υδρογεωλογικά κριτήρια όπως: είδος υδροφορέων, πάχος ακόρεστης ζώνης, ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού, κοκκομετρία, συντελεστή υδροπερατότητας, τοπογραφία κ.ά. Τα κυριότερα πρότυπα για την εκτίμηση της τρωτότητας των υδροφόρων οριζόντων που έχουν εισαχθεί είναι των: LeGrand, Evans και Dienemann.

Ο ***LeGrand*** (1964) εισήγαγε την έννοια του δυναμικού ρύπανσης των υδροφόρων οριζόντων με κριτήρια: πάχος ακόρεστης ζώνης, υδροπερατότητα, υδραυλική κλίση της πιεζομετρικής επιφάνειας, οριζόντια απόσταση από την πηγή ρύπανσης, προσρόφηση και απορρόφηση στην ακόρεστη ζώνη. Σύμφωνα με το διάγραμμα LeGrand (Σχ. 7.1), καθώς και το σύνολο της βαθμολογίας σε μια περιοχή, αυτή χαρακτηρίζεται:

- πολύ χαμηλής τρωτότητας (>12 βαθμοί)
- μέτριας τρωτότητας (8-12 βαθμοί)

- μεγάλης τρωτότητας (4-8 βαθμοί) και
- πολύ μεγάλης τρωτότητας (<4 βαθμοί).

Ο LeGrand το έτος 1983 πρότεινε ένα πιο σύνθετο πρότυπο για την εκτίμηση της τρωτότητας, που λαμβάνει υπόψη και το είδος της πηγής ρύπανσης.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα εκτίμησης της τρωτότητας ελεύθερων αλλουβιακών υδροφόρων (LeGrand, 1964, από Καλλέργη, 2000).

Ο ***Evans*** (1987) εισήγαγε τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographical Information System, GIS) στην αξιολόγηση της τρωτότητας. Για το λόγο αυτόν πολλαπλασιάζεται κάθε παράγοντας που επιδρά στην πιθανή ρύπανση (χαρακτηριστικά ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, λιθοφασικά χαρακτηριστικά των υλικών της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, υδραυλική αγωγιμότητα, φυτοκάλυψη, τοπογραφία κ.λπ.) με ένα συντελεστή βαρύτητας.

Έτσι προκύπτει ένας τελικός ***δείκτης δραστικότητας*** (drastic index), η τιμή του οποίου καθορίζει το δυναμικό ρύπανσης για τον εξεταζόμενο υδροφόρο ορίζοντα. Όσο μεγαλύτερες τιμές έχει ο δείκτης δραστικότητας, τόσο υψηλότερο είναι το δυναμικό ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Οι σχηματισμοί της ακόρεστης ζώνης, που καλύπτουν τον υδροφόρο ορίζοντα, συμβάλλουν σημαντικά στην προστασία του υδροφορέα. Οι κατεισδύοντες ρύποι φιλτράρονται και αποδομούνται εντός αυτής. Η σπουδαιότητα της ακόρεστης ζώνης κρίνεται ανάλογα με το πάχος, τη λιθολογική σύσταση, την πλευρική εξάπλωση και την υδροπερατότητα των υλικών της.

Με βάση τα χαρακτηριστικά της ακόρεστης ζώνης διακρίνονται:

α) ***ευνοϊκές συνθήκες προστασίας***, όταν επικρατούν υλικά με μεγάλη ικανότητα αυτοκαθαρισμού και πλευρική εξάπλωση, όπως: άργιλοι, πηλοί, λεπτόκοκκοι άμμοι, ελάχιστου πάχους 2,5 m, με συντελεστή υδροπερατότητας μικρότερο από αυτόν της λεπτόκοκκης άμμου, καθώς επίσης μεσόκοκκοι και χονδρόκοκκοι άμμοι και αμμοχάλικες ελάχιστου πάχους 4 m με συντελεστή υδροπερατότητας μικρότερο από αυτό της μεσόκοκκης άμμου (DVGW, Arbeitsblatt W 101, 1995, Καλλέργης, 2000).

β) ***μέτριες συνθήκες προστασίας***, όταν τα υλικά της προαναφερόμενης περίπτωσης εμφανίζονται στην ακόρεστη ζώνη με μικρότερα πάχη και ο υδροφορέας παρουσιάζει καλές ιδιότητες αυτοκαθαρισμού, δηλ. το ενεργό μέγεθος των κόκκων είναι <0,4 mm, η ταχύτητα ροής <3 m/d και ο χρόνος παραμονής του νερού στον υδροφόρο >30 ημέρες.

γ) ***δυσμενείς συνθήκες προστασίας***, όταν δεν πληρούνται οι προδιαγραφές των δύο προαναφερόμενων περιπτώσεων, όπως αυτό συμβαίνει σε υδροφόρους με δευτερογενές πορώδες, καρστικοί και μη υδροφορείς, καθώς επίσης και σε χαλαρούς αδρομερείς υδροφόρους σχηματισμούς, έστω και αν υπάρχουν εμφανίσεις αργιλικών φακών

Το πρότυπο του ***Dienemann*** (1956) στηρίζεται κυρίως στην ***ικανότητα αυτοκαθαρισμού*** της ακόρεστης ζώνης και λαμβάνει υπόψη το πάχος, τη λιθολογία και την κοκκομετρική της σύσταση. Μεγάλη ικανότητα αυτοκαθαρισμού έχουν τα λεπτόκοκκα υλικά (ενεργό μέγεθος κόκκων <0,4 mm) μεγάλου πάχους (>6 m). Αντίθετα ασήμαντη ικανότητα αυτοκαθαρισμού έχουν τα υλικά με ενεργό μέγεθος κόκκων >0,4 mm και ταχύτητα του νερού >3 m/d (καρστικοί υδροφόροι, ελεύθεροι υδροφόροι αδρομερών υλικών κ.λπ.).

Κατά ***Rehse*** (1977) το δυναμικό αυτοκαθαρισμού της ακόρεστης ζώνης στους αλλουβιακούς σχηματισμούς εκτιμάται με βάση το δείκτη καθαρισμού, ο οποίος προκύπτει από το πάχος των διαφόρων οριζόντων. Βασική προϋπόθεση είναι η παρουσία αργιλικών οριζόντων ή λεπτόκοκκων σχηματισμών με έντονη συμμετοχή του αργιλικού υλικού. Εναλλαγές υδροπερατών και υδατοστεγανών στρωμάτων ακόμα και μικρού πάχους, αυξάνουν το βαθμό ικανότητας αυτοκαθαρισμού.

Έτσι ο δείκτης αυτοκαθαρισμού (MI) προκύπτει από τη σχέση:

$$MI=D_1.I_1+D_2.I_2+D_3.I_3+ \ldots+D_nI_n$$

όπου D_1, D_2,…D_n τα πάχη των διαφόρων οριζόντων της ακόρεστης ζώνης και I_1, I_2, …I_n ο αντίστοιχος δείκτης, που ισούται με 1/D (Πίν. 7.2).

Αν MI≥1,0 ο αυτοκαθαρισμός στην ακόρεστη ζώνη είναι πλήρης και ταυτίζεται με αυτόν που γίνεται στον υδροφόρο ορίζοντα εντός 50 ημερών. Όταν MI<1,0 τότε ο καθαρισμός δεν έχει ολοκληρωθεί και απαιτείται επιπλέον χρόνος παραμονής στον υδροφόρο ορίζοντα ίσος με: T (ημέρες)=50 (1-MI). Στους υπολογισμούς συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη οι ανώτεροι ορίζοντες από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι βάθους 5 m.

Πίνακας 7.2: Δείκτες αυτοκαθαρισμού διαφόρων σχηματισμών (Σταμάτης, 2001).

Είδος σχηματισμού	**Πάχος D (m)**	**Δείκτης I=1/D**
Εδαφικός ορίζοντας με 5-10% humus και 5-10% άργιλο	1,2	0,8
Άργιλος, άμμος με υψηλό ποσοστό αργίλου	2,0	0,5
Αργιλώδης πηλός, πηλός	2,5	0,4
Πηλώδης άμμος, άμμος με χαμηλό ποσοστό αργίλου	3,0-4,5	0,33-0,22
Άμμος λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη	6,0	0,017
Άμμος μεσόκκοκη έως χονδρόκοκκη	10,0	0,1
Άμμος χονδρόκοκκη	15,0	0,07
Χαλίκια με συμμετοχή άμμου και αργίλου	8,0	0,13
Χαλίκια με υψηλή περιεκτικότητα άμμου	12,0	0,08
Χαλίκια λεπτόκοκκα έως μεσόκοκκα και πολύ άμμο	25,0	0,04
Χαλίκια μεσόκοκκα έως χονδρόκοκκα και χαμηλή περιεκτικότητα άμμου	35,0	0,03
Κροκάλες, λίγα χαλίκια και άμμος	50,0	0,02

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε:

- Μέθοδοι βαθμονόμησης (rating methods).

Περιλαμβάνουν μεθόδους δεικτών (index methods) και υβριδικές μεθόδους (hybrid methods), που συνδυάζουν μεθόδους δεικτών με στατιστικές μεθόδους.

- Στατιστικές μέθοδοι (statistical methods) και
- Μέθοδοι 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). Μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί σύνθετη ανάλυση συσχέτισης (λογιστική ανάλυση συσχέτισης, logistic regression analysis), που ενσωματώνει τα αποτελέσματα μερικών παραμέτρων και προβλέπει τις πιθανότητες εμφάνισης της ρύπανσης.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του υπόγειου νερού (νόμος Darcy και εξίσωση της συνέχειας). Το MODFLOW και το MT3D είναι αρκετά δημοφιλείς κώδικες που επιλύουν τις εξισώσεις ροής και τις εξισώσεις εξέλιξης των ρύπων, αντίστοιχα, και συχνά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τρωτότητας.

Οι κυριότερες τεχνικές και μέθοδοι βαθμονόμησης είναι οι εξής: **DRASTIC** (Aller et al., 1987), **GOD** (Foster, 1987), **AVI** (Van Stempvoort et al., 1992), **SINTACS** (Civita, 1994), **ISIS** (Civita & Regibus, 1995), **DASTI** (Ben Kabbour et al., 2004).

Σύγκριση των παραπάνω μεθόδων έγινε από τους Corniello et al. (1997), Gogu et al. (2003) και προέκυψε μεγάλο εύρος στα παραγόμενα αποτελέσματα. Οι ανωτέρω μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας χρησιμοποιούν ένα αριθμό παραμέτρων που κυμαίνεται από 2 (AVI) έως 7 (DRASTIC, SINTACS).

Η μέθοδος DRASTIC, τροποποιημένη, έχει εφαρμοσθεί στον ελληνικό χώρο (Βουδούρης & Μανδηλαράς, 2005, Γκεμιτζή κ.ά, 2005, Panagopoulos et al., 2005) και περιγράφεται παρακάτω. Η μεθοδολογία **DRASTIC** (Aller et al., 1987) ανήκει στις μεθόδους δεικτών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών με βάση υδρογεωλογικές παραμέτρους. Το μοντέλο DRASTIC θεωρεί ότι: 1) κάθε ρύπος εισάγεται από την επιφάνεια του εδάφους, 2) ο ρύπος εισάγεται στο υπόγειο νερό από την κατείσδυση του νερού της βροχόπτωσης και 3) ο ρύπος έχει την ταχύτητα του νερού.

Η λέξη **DRASTIC** προκύπτει από τα ακρονύμια των: D (**D**epth) βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, R (**R**echarge) ενεργή κατείσδυση, A (**A**quifer) υδροφορέας, S (**S**oil) έδαφος, T (**T**opography) κλίση αναγλύφου, I (**I**mpact of the vadose zone) επίδραση της ακόρεστης ζώνης, C (Hydraulic **C**onductivity of the aquifer) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή υδροπερατότητας.

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

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

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

Η βαρύτητα κάθε παραμέτρου φαίνεται στον κάτωθι Πίνακα 7.3, απ΄ όπου προκύπτει ότι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα (5) είναι το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, η επίδραση της ακόρεστης ζώνης και το έδαφος (στην ειδική περίπτωση των φυτοφαρμάκων), γιατί θεωρούνται οι πλέον σημαντικοί.

Οι τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται από 1 (ελάχιστο δυναμικό ρύπανσης) έως 10 (μέγιστο δυναμικό ρύπανσης). Η τεχνική DRASTIC είναι ευέλικτη και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να την τροποποιήσει προσθέτοντας παραμέτρους ή αλλάζοντας τις τιμές βαρύτητας (Al-Adamat et al., 2003). Στη μελέτη περίπτωσης 1 (παράγραφος 7.5) παρουσιάζεται μια τροποποιημένη εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC στον ελληνικό χώρο.

Πίνακας 7.3: Βαρύτητα κάθε παραμέτρου στη μεθοδολογία DRASTIC.

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

Η τρωτότητα των ***καρστικών*** συστημάτων εξαρτάται βασικά από το χρόνο παραμονής του νερού στα διαφορετικά τμήματα του υδροφόρου (Doerfliger et al., 1999):

1. Το ***ενδοκάρστ*** περιλαμβάνει το υπόγειο καρστ, όπου η ταχύτητα ροής είναι υψηλή στους καρστικούς αγωγούς. Ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο καρστικών αγωγών συνεπάγεται υψηλή τρωτότητα.

2. Το ***επικάρστ***, αν εμφανίζεται, είναι κοντά στην επιφάνεια και αποτελεί τμήμα της ακόρεστης ζώνης του καρστικού υδροφορέα. Παίζει σημαντικό ρόλο στην κατείσδυση από την επιφάνεια στον υδροφόρο ορίζοντα και συνεπώς επηρεάζει την προστατευτική λειτουργία της ακόρεστης ζώνης. Στη ζώνη αυτή μέρος των νερών αποθηκεύεται και απελευθερώνεται αργά (χαμηλή τρωτότητα) και το υπόλοιπο συγκεντρώνεται γρήγορα στο δίκτυο αγωγών του ενδοκάρστ (υψηλή τρωτότητα). Όσο άμεσα συνδέεται το επικάρστ με το δίκτυο αγωγών, τόσο υψηλή είναι η τρωτότητα του καρστικού υδροφορέα.

3. Το ***προστατευτικό κάλυμμα***, το οποίο αντιπροσωπεύει τα ιζήματα που υπέρκεινται των ασβεστολίθων (περιλαμβάνει το έδαφος, τεταρτογενείς και άλλες μη καρστικές αποθέσεις). Στο κάλυμμα αυτό ο χρόνος παραμονής του νερού εξαρτάται από το πάχος του καλύμματος και την υδραυλική αγωγιμότητα. Το έδαφος και οι άλλοι γεωλογικοί

σχηματισμοί έχουν σημαντική ικανότητα εξασθένησης (attenuation capacity) που σχετίζεται με παραμέτρους όπως: υφή, δομή, παρουσία οργανικής ύλης και αργιλικών ορυκτών, υδραυλική αγωγιμότητα, βαθμός κορεσμού κ.λπ. Όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του προστατευτικού καλύμματος, τόσο πιο χαμηλή είναι η τρωτότητα.

Σε μια πρώτη προσέγγιση το πάχος του προστατευτικού καλύμματος και η υδραυλική του συμπεριφορά θεωρείται βασική παράμετρος, που καθορίζει την τρωτότητα του καρστικού υδροφορέα (Doerfliger et al., 1999). Κατά τη διάρκεια της βασικής ροής η τρωτότητα είναι σχετικά χαμηλή, γιατί τα νερά παραμένουν για πολύ χρόνο στον υδροφόρο. Αντίθετα κατά την υγρή περίοδο το νερό της βροχόπτωσης κατεισδύει στους αγωγούς του επικάρστ και στη συνέχεια κινείται στο καρστικό δίκτυο αγωγών. Το νερό αυτό φθάνει σχετικά γρήγορα στις πηγές και οι διαδικασίες αυτοκαθαρισμού είναι μη αποτελεσματικές, με συνέπεια να εμφανίζει αυξημένη τρωτότητα.

Η μεθοδολογία που έχει εισαχθεί για τη μελέτη της τρωτότητας των καρστικών υδροφόρων και τον καθορισμό ζωνών προστασίας λέγεται **EPIK**, από τα ακρονύμια των λέξεων: E (**E**pikarst) επικάρστ, P (**P**rotective cover) προστατευτικό κάλυμμα, I (**I**nfiltraton conditions) συνθήκες κατείσδυσης, K (**K**arst network development) ανάπτυξη καρστικού δικτύου.

Τα κριτήρια για την ποσοτική εκτίμηση των ανωτέρω παραμέτρων, καθώς και η κατηγοριοποίησή τους αναφέρονται κατωτέρω (Doerfliger et al., 1999):

Επικάρστ

E_1: Καλά ανεπτυγμένο (δολίνες, καταβόθρες, εμφανίσεις με μεγάλη ρηγμάτωση κ.λπ.)

E_2: Μέτρια ανεπτυγμένο (διαδοχικές δολίνες, εμφανίσεις με μέτρια ρηγμάτωση)

E_3: Μικρό ή απουσία επικάρστ (απουσία καρστικών μορφολογικών φαινομένων και χαμηλή πυκνότητα ρηγμάτωσης)

Προστατευτικό κάλυμμα

P_1: παρουσία εδάφους με πάχος 0-20 cm

P_2: παρουσία εδάφους με πάχος 20-100 cm

P_3: παρουσία εδάφους με πάχος 100-200 cm

P_4: παρουσία εδάφους με πάχος >200 cm

Συνθήκες κατείσδυσης

Σχετίζονται με τον τρόπο εμπλουτισμού του καρστικού υδροφορέα και διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες χωρίς να περιλαμβάνουν ποσοτικά στοιχεία: 1) σημειακή

κατείσδυση, 2) διάχυτη κατείσδυση, 3) ενδιάμεση κατηγορία όπου η επιφανειακή απορροή είναι σημαντική και 4) η υπόλοιπη λεκάνη απορροής.

Ο σημειακός και ο διάχυτος εμπλουτισμός έχουν διαφορετική επίπτωση στην τρωτότητα. Η επιφανειακή απορροή τείνει να συγκεντρώνει τη ροή του νερού, συμβάλλοντας σε υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας. Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής εξαρτάται από το είδος της βλάστησης και την κλίση του αναγλύφου. Απότομες κλίσεις και απουσία βλάστησης συμβάλλουν σε υψηλή διακινδύνευση τρωτότητας, γιατί υπάρχει απορροή για κατείσδυση στις κατάντη χαμηλές περιοχές.

Η κατηγοριοποίηση γίνεται ως εξής:

I_1: Σημειακή. Μόνιμη ή παροδική επιφανειακή τροφοδοσία μιας καταβόθρας από ένα υδρόρευμα-λεκάνες απορροής των ανωτέρω υδρορευμάτων

I_2: Περιοχές της λεκάνης απορροής της περίπτωσης I_1 με κλίση >10% για καλλιεργούμενες περιοχές και 25% για λιβάδια και βοσκότοπους

I_3: Περιοχές της λεκάνης απορροής της περίπτωσης I_1 με κλίση <10% για καλλιεργούμενες περιοχές και 25% για λιβάδια και βοσκότοπους. Περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο που συγκεντρώνουν επιφανειακά νερά

I_4: Η υπόλοιπη λεκάνη απορροής

Καρστικό δίκτυο

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 μέσο τροφοδοτούμενη από καρστικό υδροφορέα.

Ο προσδιορισμός των ανωτέρω παραμέτρων γίνεται με εμπειρικές μεθόδους, με παρατηρήσεις υπαίθρου, με έρευνα πεδίου (ιχνηθετήσεις, γεωφυσικές μεθόδους, ανόρυξη γεωτρήσεων, κ.λπ). Με βάση την ανωτέρω κατάταξη των παραμέτρων στη μεθοδολογία EPIK προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές (Πίν. 7.4), όπου ***χαμηλή τιμή της παραμέτρου υποδηλώνει υψηλή ευαισθησία στη ρύπανση*** (Doerfliger et al., 1999):

Πίνακας 7.4: Τιμές των παραμέτρων με βάση τα χαρακτηριστικά τους στη μέθοδο EPIK.

Επικάρστ			Προστατευτικό κάλυμμα				Κατείσδυση				Καρστικό δίκτυο		
E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Έτσι γίνεται οριοθέτηση της λεκάνης τροφοδοσίας ενός υδροληπτικού έργου (πηγής ή γεώτρησης). Ακολούθως γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων **E, P, I** και **K** για κάθε μονάδα επιφανείας της λεκάνης. Υπολογίζεται ο παράγοντας προστασίας (protection factor) με πρόσθεση των τιμών των παραμέτρων και με βάση τις τιμές αυτές κατατάσσεται η τρωτότητα σε κάθε μοναδιαία επιφάνεια. Έτσι μπορεί να υπολογισθεί ο παράγοντας προστασίας (Fp) ως εξής:

$$Fp=\alpha.E_i + \beta.P_j + \gamma.I_k + \delta.K_l$$

όπου α, β, γ και δ είναι η βαρύτητα κάθε παραμέτρου και E_i, P_j, I_k, K_l είναι οι τιμές των παραμέτρων για κάθε μοναδιαία επιφάνεια. Κάθε παράμετρος έχει ένα συντελεστή βαρύτητας που φαίνεται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Σχετική βαρύτητα κάθε παραμέτρου στη μέθοδο EPIK.

Επικάρστ (E)	Προστατευτικό κάλυμμα (P)	Κατείσδυση (I)	Καρστικό δίκτυο (K)
α	β	γ	δ
3	1	3	2

Οι κατηγορίες τρωτότητας είναι 4 με αντίστοιχες τιμές του παράγοντα προστασίας:

1) Πολύ υψηλή τρωτότητα ($Fp \leq 19$). Απαιτείται προστασία στη ζώνη S_1, που προστατεύει από την κατευθείαν διείσδυση των ρύπων στο υπόγειο νερό.

2) Υψηλή τρωτότητα ($20<Fp<25$). Απαιτείται προστασία στη ζώνη S_2, που προστατεύει από μικροβιολογικούς ρύπους και δίνει χρόνο για παρεμβάσεις σε περίπτωση ατυχήματος.

3) Μέτρια τρωτότητα ($Fp>25$). Απαιτείται προστασία που να αντιστοιχεί στη ζώνη S_3, που παρέχει επιπλέον προστασία.

4) Χαμηλή τρωτότητα (παρουσία προστατευτικού καλύμματος P_4 με μεγάλη ικανότητα αυτοκαθαρισμού). Απαιτείται προστασία στο υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης τροφοδοσίας της πηγής ή της γεώτρησης.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα COST 620 (2003) για την εκτίμηση και χαρτογράφηση της γενικής τρωτότητας (intrinsic vulnerability) σε καρστικούς υδροφόρους εισάγονται τέσσερις (4) παράγοντες (http://capella.unine.ch/chyn/php/publica_intro.php):

1) παράγοντας **O:** υπερκείμενα στρώματα (overlying layers)

2) παράγοντας **C:** συγκέντρωση ροής (concentration of flow)

3) παράγοντας **P:** βροχομετρικό καθεστώς (precipitation regime)

4) παράγοντας **K:** ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου (karst network development)

Ο πρώτος παράγοντας (**O**) σχετίζεται με την προστατευτικότητα των υπερκείμενων στρωμάτων του υδροφόρου ορίζοντα (έδαφος, υπέδαφος, μη καρστικά πετρώματα, ακόρεστη καρστική ζώνη) και εξαρτάται από τα πάχη και τις υδραυλικές ιδιότητες αυτών.

Ο δεύτερος παράγοντας (**C**) αναγνωρίζει ότι σε μια καρστική περιοχή τα υπερκείμενα προστατευτικά στρώματα μπορεί να διαπερασθούν από απορρέοντα νερά, τα οποία συγκεντρώνονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μετά εισέρχονται στο καρστικό υδροφόρο σύστημα π.χ. διαμέσου μιας δολίνας ή μιας καταβόθρας.

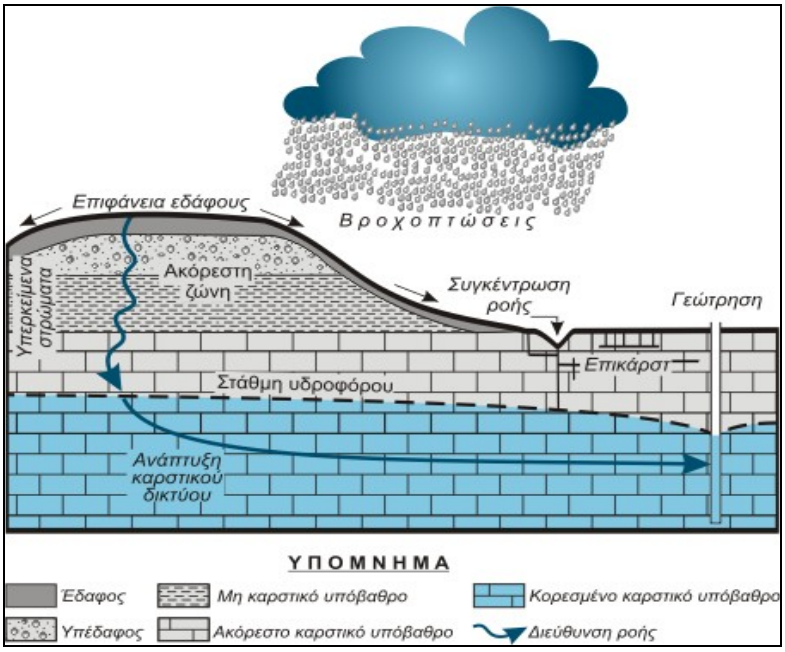
Ο τρίτος παράγοντας (**P**) λαμβάνει υπόψη τα ετήσια κατακρημνίσματα της περιοχής, καθώς και την ένταση αυτών. Υψηλές εντάσεις επιταχύνουν τη μεταφορά των ρύπων και συνεπώς αυξάνουν την τρωτότητα.

Ο τέταρτος παράγοντας (**K**) περιγράφει το βαθμό καρστοποίησης του υδροφόρου.

Στο πρόγραμμα COST 620 (2003) προτείνεται μια μεθοδολογία για τη χαρτογράφηση της διακινδύνευσης στην τρωτότητα και επιπλέον διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας που περιλαμβάνουν ιχνηθετήσεις, υδρογράμματα και προσομοιώσεις.

Τέλος, ο Goldscheider (2005) για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας σε καρστικούς σχηματισμούς στη Γερμανία προτείνει και εφαρμόζει τη μέθοδο **PI**, που λαμβάνει υπόψη δύο παραμέτρους 1) το προστατευτικό κάλυμμα (Protective cover) και 2) τις συνθήκες κατείσδυσης (Infiltration conditions).

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται ένα εννοιολογικό μοντέλο λειτουργίας ενός καρστικού υδροφορέα και μια προσέγγιση της χαρτογράφησης της τρωτότητας σε αυτόν.



Σχήμα 7.2: Εννοιολογικό μοντέλο λειτουργίας ενός καρστικού υδροφόρου συστήματος (COST 620, 2003 με τροποποιήσεις).

7.3. Ανάλυση της ζώνης ανάκτησης

Στο σχεδιασμό συστημάτων απορρύπανσης υδροφόρων και των ζωνών προστασίας είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί η ζώνη ανάκτησης μιας αντλούμενης γεώτρησης.

Η ***ζώνη ανάκτησης*** ή παγίδευσης ή μάστευσης (capture zone) είναι η περιοχή, η οποία τροφοδοτεί με ρυπασμένο νερό μια γεώτρηση και περιλαμβάνει την περιοχή που αποστραγγίζεται κατά την άντληση, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Ως γνωστό κατά την άντληση μιας γεώτρησης διαμορφώνεται ένας κώνος κατάπτωσης, ο οποίος εκτείνεται σε απόσταση μέχρι την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης (βλ. παράγραφο 1.8).

Η ζώνη ανάκτησης συμπίπτει με τον κώνο κατάπτωσης στην περίπτωση επίπεδων, ισότροπων και ομοιογενών υδροφόρων οριζόντων, καθώς και με την περίμετρο προστασίας των γεωτρήσεων ύδρευσης. Η ζώνη ανάκτησης ελέγχεται από το χρόνο που χρειάζεται το υπόγειο νερό για να κινηθεί από την ανάντη περιοχή στην αντλούμενη γεώτρηση.

Η εξίσωση που περιγράφει τα όρια της ζώνης ανάκτησης σε έναν υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα σε συνθήκες μόνιμης ροής είναι:

$$x = \frac{-y}{\varepsilon\phi(2\pi kiDy/Q)}$$

όπου: x, y= διευθύνσεις

Q=η παροχή άντλησης

k=η υδραυλική αγωγιμότητα

D=το πάχος του υδροφόρου στρώματος

i=η υδραυλική κλίση

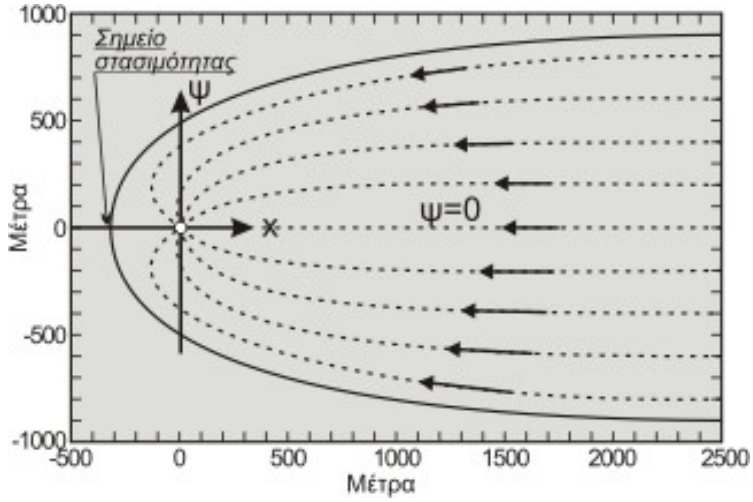
Η γωνία εκφράζεται σε ακτίνια (rad).

Υπάρχουν δύο οριακές συνθήκες στην ανωτέρω εξίσωση (Fetter, 1994):

1) Η απόσταση από την αντλούμενη γεώτρηση μέχρι του ορίου του υπόγειου υδροκρίτη κατάντη, που αναφέρεται ως ***σημείο ηρεμίας ή στασιμότητας*** (stagnation point) είναι:

$$x_o=-Q/(2\pi kDi)$$

όπου x_o είναι η απόσταση από την αντλούμενη γεώτρηση μέχρι το κατάντη άκρο της ζώνης ανάκτησης. Το σημείο στασιμότητας είναι η τομή του υπόγειου υδροκρίτη με το οριζόντιο επίπεδο. Η γεώτρηση θεωρείται ότι βρίσκεται σε σημείο με συντεταγμένες (0, 0) (Σχ. 7.3).



Σχήμα 7.3: Ζώνη ανάκτησης και σημείο ηρεμίας ή στασιμότητας μιας γεώτρησης.

2) Το μέγιστο πλάτος της ζώνης ανάκτησης πάνω ή κάτω από τον άξονα χ, λόγω συμμετρίας, καθώς η απόσταση χ από το άκρο της ζώνης τείνει στο άπειρο είναι:

$$y_{max}=\pm Q/(2kDi)$$

Τα ανωτέρω ισχύουν με την προϋπόθεση ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα σε συνθήκες μόνιμης ροής χωρίς εμπλουτισμό από βροχοπτώσεις, με ασήμαντη κατακόρυφη συνιστώσα και γεώτρηση με φίλτρα σε όλο το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα.

Για τον υπολογισμό της ζώνης ανάκτησης σε ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα απαιτείται η γνώση του φορτίου σε δύο θέσεις κατά μήκος της υπόγειας ροής (Grubb, 1993). Στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις έχουν την εξής μορφή:

$$x=\frac{-y}{\varepsilon\phi(\pi k(h_1^2-h_2^2)y/QL)}$$

$$x_o=-QL/[\pi k(h_1^2-h_2^2)] \text{ και } y_{max}=\pm QL/k(h_1^2-h_2^2)$$

όπου h_1 και h_2 είναι τα φορτία σε δύο θέσεις ανάντη και κατάντη της γεώτρησης που απέχουν απόσταση L και Q, k=αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Εφαρμογή 7.1

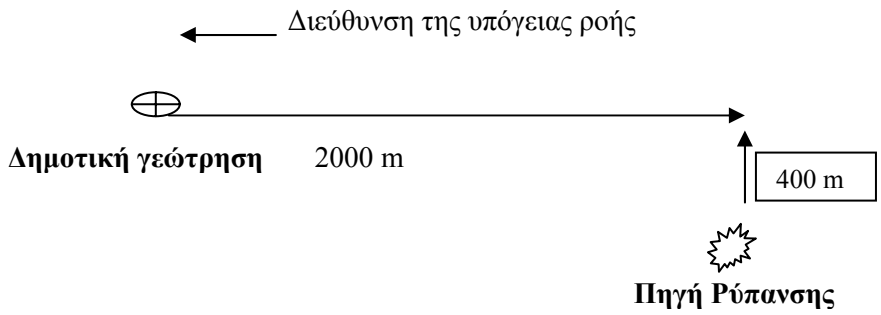
Μια δημοτική γεώτρηση αντλείται με παροχή Q=19250 m^3/day. Ο υδροφόρος είναι υπό πίεση και έχει πάχος D=50 m και υδραυλική αγωγιμότητα k=80 m/day. Η πιεζομετρική επιφάνεια πέφτει περίπου 1 m για 200 m απόσταση. Η θέση μιας πηγής ρύπανσης φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα. Να υπολογισθεί η ζώνη ανάκτησης και να διερευνηθεί αν θα ρυπανθεί η γεώτρηση.

Λύση: Η υδραυλική κλίση είναι ίση με $1/200=5.10^{-3}$
Υπολογίζω το y_{max} από τη σχέση: $y_{max}=\pm Q/(2kDi)$
Αντικαθιστώ και βρίσκω $y_{max}=\pm 480$ m.
Η απόσταση του σημείου ηρεμίας υπολογίζεται από την εξίσωση:
$x_o=-Q/(2\pi kDi)$. Αντικαθιστώ τις τιμές των μεγεθών και έχω $x_o=-150$ m.

Η εξίσωση που περιγράφει τη ζώνη ανάκτησης, η οποία είναι συμμετρική ως προς τον άξονα x είναι: x=-y/εφ(0,0065y). Από τη σχέση αυτή για διάφορες τιμές του x βρίσκουμε αντίστοιχα τις τιμές του y και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

±y	x
100	-130
200	-50
300	+120
400	+670
450	+2045
480	+24000

Η ζώνη ανάκτησης σε απόσταση x=2000 m από την αντλούμενη γεώτρηση εκτείνεται 450 m από τον οριζόντιο άξονα x. Συνεπώς ένα μέρος του ρύπου από την πηγή ρύπανσης θα ρυπάνει τη δημοτική γεώτρηση.



Εφαρμογή 7.2

Να υπολογισθεί η ζώνη ανάκτησης σε μια γεώτρηση που αντλείται με παροχή Q=224,2 m^3/h. Ο υδροφόρος είναι υπό πίεση και έχει πάχος D=22,8 m, υδραυλική αγωγιμότητα k=457,2 m/day και υδραυλική κλίση $i=3.10^{-3}$.

Λύση: Υπολογίζω το y_{max} από τη σχέση: $y_{max}=\pm Q/(2kDi)$
Αντικαθιστώ και βρίσκω $y_{max}=\pm 85,65$ m.
Η απόσταση του σημείου ηρεμίας υπολογίζεται από την εξίσωση:
$x_o=-Q/(2\pi kDi)$. Αντικαθιστώ τις τιμές των μεγεθών και έχω $x_o=-27,3$ m.
Η εξίσωση που περιγράφει τη ζώνη ανάκτησης, η οποία είναι συμμετρική ως προς τον άξονα x είναι: x=-y/εφ(0,0366y). Από τη σχέση αυτή για τις διάφορες τιμές του x βρίσκουμε αντίστοιχα τις τιμές του y.

7.4 Περίμετρος προστασίας

Σε κάθε υδροληπτικό έργο καθορίζεται μια περίμετρος προστασίας για την ποιοτική προστασία του υπό εκμετάλλευση υδροφόρου ορίζοντα.

Τα κριτήρια καθορισμού της περιμέτρου προστασίας ποικίλλουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους κανόνες υγιεινής, τα πρότυπα ποσιμότητας κ.λπ. και περιλαμβάνουν ένα κατάλογο από απαγορευτικές ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων νερών. Οι επιπτώσεις των διαφόρων πηγών

ρύπανσης εξαρτώνται από την απόσταση από το υδροληπτικό έργο, τις ιδιότητες του ρύπου, καθώς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα και τη φύση των υλικών πάνω από αυτόν. Έτσι διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

1) Ευνοϊκές συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα προστατεύεται από την παρουσία υλικών της ακόρεστης ζώνης με μεγάλη ικανότητα αυτοκαθαρισμού.

2) Μέτριες συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα έχει καλές ιδιότητες αυτοκαθαρισμού.

3) Δυσμενείς συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα έχει ελάχιστη ή καθόλου ικανότητα αυτοκαθαρισμού.

Η διακινδύνευση του εκμεταλλευόμενου υδροφόρου ορίζοντα είναι μεγαλύτερη, όσο μικραίνει η απόσταση της πηγής ρύπανσης από το υδροληπτικό έργο. Έτσι η περιοχή προστασίας υποδιαιρείται σε επιμέρους ζώνες, που προσαρμόζονται ανάλογα με την επίδραση που μπορεί να έχει μια πηγή ρύπανσης.

Οι ζώνες προστασίας καθορίζονται με βάση τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και των ανώτερων οριζόντων που τον καλύπτουν, καθώς και την ικανότητα αυτοκαθαρισμού του εδαφικού ορίζοντα και της ακόρεστης ζώνης.

Οι ζώνες προστασίας ενός υδροληπτικού έργου είναι οι ακόλουθες:

1. Ζώνη προστασίας Ι (άμεσης προστασίας ή απαγορευμένη ζώνη)

Η ζώνη αυτή προφυλάσσει τον άμεσο χώρο γύρω από το υδροληπτικό έργο από κάθε μορφή επίδρασης που μπορεί να προκύψει από επιφανειακούς παράγοντες. Στην περίπτωση γεώτρησης περιλαμβάνει τον χώρο γύρω της σε ακτίνα 10-30 m. Στην περίπτωση πηγής περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις, την πλησιέστερη περιοχή ανάντη αυτής (>20 m) και τον χώρο κατάντη (2-5 m).

Στη ζώνη Ι απαγορεύονται οι δραστηριότητες που αναφέρονται στις υποζώνες ΙΙΑ, ΙΙΒ, ΙΙΙΑ και ΙΙΙΒ, καθώς επίσης και η κυκλοφορία οχημάτων, κάθε γεωργική δραστηριότητα και κάθε δραστηριότητα που επιδρά στον εδαφικό ορίζοντα και στην ακόρεστη ζώνη.

2. Ζώνη προστασίας ΙΙ (ζώνη μικροβιολογικής προστασίας ή ζώνη 50 ημερών)

Η ζώνη αυτή έχει σκοπό να προφυλάξει το υδροληπτικό έργο από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, ιδιαίτερα από μια ενδεχόμενη μικροβιακή μόλυνση. Επειδή τα μικρόβια και ιδίως οι παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν χρόνο ζωής στον υδροφόρο ορίζοντα περίπου 50 ημέρες, ονομάζεται ζώνη μικροβιολογικής προστασίας ή ζώνη 50 ημερών. Η

εξαφάνιση των μικροβίων εξαρτάται από την ταχύτητα ροής, τη λιθολογική σύσταση του υδροφορέα, τις διαδικασίες προσρόφησης, το χημισμό του υπόγειου νερού, το πάχος της ακόρεστης ζώνης κ.λπ.

Η ισόχρονη γραμμή 50 ημερών μπορεί να υπολογισθεί με εφαρμογή ιχνηθετών, με τη βοήθεια πιεζομετρικών χαρτών ή με εφαρμογή εμπειρικών τύπων γνωρίζοντας τις υδραυλικές παραμέτρους:

- L_{50}=v.50, όπου L_{50} είναι η απόσταση της γεώτρησης από την περίμετρο προστασίας της ζώνης ΙΙ (m) και v είναι η πραγματική ταχύτητα ροής (m/d).
- $L_{50} = (Q/DS_y\pi)^{1/2}$, όπου Q είναι η αντλούμενη ποσότητα σε 50 ημέρες (m^3), D το πάχος του υδροφόρου στρώματος (m), S_y το ενεργό πορώδες και π=3,14.

Για τον καθορισμό της ζώνης προστασίας ΙΙ σε κοκκώδεις σχηματισμούς απαιτείται ο προσδιορισμός των κάτωθι παραμέτρων:

-Ακόρεστη ζώνη (το πάχος, ο συντελεστής υδροπερατότητας, το ολικό και ενεργό πορώδες)

-Κορεσμένη ζώνη (το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, ο συντελεστής υδροπερατότητας, το ολικό και ενεργό πορώδες, το πάχος και η ταχύτητα ροής).

Στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες πρέπει να αποκλείονται μερικά τμήματα της περιοχής τροφοδοσίας που θεωρούνται ευάλωτα στη ρύπανση, όπως: δολίνες, καταβόθρες, βαθιές καρστικές λεκάνες, ρήγματα και ζώνες διάρρηξης, επιφανειακά ορυχεία, στοές που αποθηκεύουν νερό, τμήματα καρστικών ρεμάτων που κατεισδύουν επιφανειακά νερά κ.λπ.

Ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα (ταχύτητα υπόγειας ροής) υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες:

- Υποζώνη **ΙΙΑ**

Επεκτείνεται από τα όρια της ζώνης Ι μέχρι την ισόχρονη γραμμή των 10 ημερών. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 100 m, ανάντη του υδροληπτικού έργου. Εκατέρωθεν της γεώτρησης επεκτείνεται μέχρι τα όρια της ακτίνας επίδρασης της γεώτρησης, χωρίς να υπερβαίνει τα όρια της ζώνης ανάκτησης.

Στην υποζώνη αυτή απαγορεύονται οι δραστηριότητες που αναφέρονται στις υποζώνες ΙΙΒ, ΙΙΙΑ και ΙΙΙΒ, καθώς και κάθε γεωργική και κατασκευαστική δραστηριότητα.

- Υποζώνη **ΙΙΒ**

Επεκτείνεται από τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 10 ημερών μέχρι τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 50 ημερών. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται κυρίως ότι αναφέρεται στις υποζώνες ΙΙΙΑ και ΙΙΙΒ, καθώς επίσης και οι ακόλουθες δραστηριότητες:

εγκατάσταση εργοστασίων, δημιουργία χώρων αναψυχής, βοσκή ζώων, μεταλλευτικά έργα και εκρήξεις, εγκατάσταση ιχθυοτροφείων, μεταφορά ραδιενεργών υλικών και ρύπων, δημιουργία λατομείων, αποθήκευση ορυκτελαίων και δομικών υλικών, χρησιμοποίηση λιπασμάτων, ανάπτυξη έργων υποδομής με παρεμβάσεις στο έδαφος κ.λπ.

3. Ζώνη προστασίας ΙΙΙ (ζώνη χημικής προστασίας ή επιτηρούμενη ζώνη)

Καλύπτει την απομακρυσμένη περιοχή τροφοδοσίας της γεώτρησης και περιβάλλει τη ζώνη ΙΙ. Η ζώνη αυτή έχει σκοπό να προστατεύσει τον υδροφόρο ορίζοντα από χημικές ουσίες και ραδιενεργά απόβλητα. Σε συνθήκες σταθερής ροής η ζώνη αυτή ταυτίζεται με τη ζώνη ανάκτησης. Η περιοχή τροφοδοσίας μπορεί να εκτιμηθεί με βάση:

- τον πιεζομετρικό χάρτη
- τις υδραυλικές παραμέτρους και τις γενικές υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής
- εμπειρικά από τη σχέση: A_r=Q/I, όπου A_r είναι η περιοχή τροφοδοσίας (km^2), Q=ο ετήσιος αντλούμενος όγκος νερού (m^3/yr) και I=η κατείσδυση (m^3/yr/km^2).

Η ακτίνα της κυκλικής περιοχής τροφοδοσίας δίνεται από τη σχέση: $r=\sqrt{A_r / \pi}$

όπου r είναι η ακτίνα της γεώτρησης και π=3,14.

- με τη χρήση αναλυτικών (RESSQC, MWCAP) ή αριθμητικών μοντέλων (MODFLOW/MODPATH, FLOWPATH).
- Υπολογίζοντας τη ζώνη ανάκτησης (βλ. παράγραφο 7.3).

Υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες:

- Υποζώνη **ΙΙΙΑ**

Επεκτείνεται σε απόσταση μέχρι 2000 m από το υδροληπτικό έργο. Όταν η ταχύτητα του υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερη από 10 m/day και προκύπτει μεγάλη ακτίνα για τη ζώνη ΙΙ, θα πρέπει η υποζώνη ΙΙΙΑ να καλύπτει τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 50 ημερών.

Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται η εγκατάσταση: κτηνοτροφικών μονάδων, διϋλιστηρίων, χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, νεκροταφείων, χώρων διάθεσης λυμάτων και αποβλήτων, βιομηχανιών εφόσον τα απόβλητά τους δεν απορρίπτονται εκτός της υποζώνης ΙΙΙΑ και τέλος η χρήση φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και λιπασμάτων.

- Υποζώνη **ΙΙΙΒ**

Επεκτείνεται μέχρι τα όρια του υπόγειου υδροκρίτη. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται η εγκατάσταση εργοστασίων που αποβάλλουν ραδιενεργές ουσίες, χημικών και μεταλλευτικών εργοστασίων, πυρηνικών αντιδραστηρίων και ελαιοτριβείων. Επίσης

απαγορεύεται η διάθεση στο έδαφος τοξικών ουσιών, φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων, φαινολών κ.λπ., καθώς και η μεταφορά ουσιών που ρυπαίνουν.

Η απόσταση των ορίων ΙΙΙΑ/ΙΙΙΒ δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1000 m.

Στις ιαματικές πηγές υπάρχει αλληλοεξάρτηση μεταξύ της παροχής και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους (Καλλέργης, 2000). Η θέση και τα όρια της ζώνης προστασίας καθορίζονται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες, τη γεωλογική δομή και τον τύπο των ιαματικών πηγών.

Το βάθος προέλευσης του νερού είναι σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό των ζωνών προστασίας των πηγών. Γενικά στις πηγές που προέρχονται από μεγάλο βάθος (>500 m) πρέπει να λαμβάνονται μέτρα μόνο ποσοτικής προστασίας, ενώ στις πηγές που προέρχονται από μικρό βάθος (< 100 m) πρέπει να λαμβάνονται τόσο μέτρα ποσοτικής, όσο και ποιοτικής προστασίας (Σταμάτης, 2001).

Στη ζώνη ποσοτικής προστασίας απαγορεύονται επεμβάσεις στο υπέδαφος σε βάθος μεγαλύτερο από 5 m (εσωτερική ζώνη Α) και σε βάθος μεγαλύτερο από 20 m (εξωτερική ζώνη Β) και γενικά επεμβάσεις που μεταβάλλουν τη στάθμη του υπόγειου νερού, τη διεύθυνση ροής κ.λπ.

Οι ζώνες ποιοτικής προστασίας, στην περίπτωση των ιαματικών πηγών, καθορίζονται όπως και στα υδροληπτικά έργα για άντληση πόσιμου νερού.

Η περίμετρος προστασίας των ιαματικών πηγών πρέπει να επιτηρείται επαρκώς με καταγραφή της ποιότητας και της παροχής των πηγών, την πιθανή υδραυλική επικοινωνία με επιφανειακά ρυπασμένα νερά, πιθανή αποθήκευση επικίνδυνων υλικών και διάθεση υλικών που ενδεχομένως επιβαρύνουν το ιαματικό νερό κ.λπ.

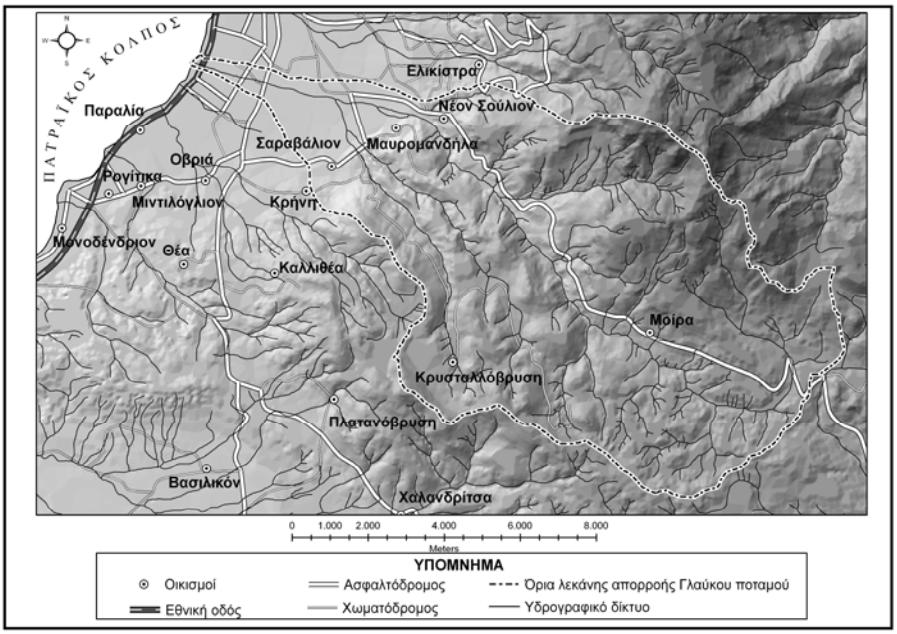
Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών είναι επιβαρυντικά απαιτείται η έγκαιρη διερεύνηση των αιτιών ρύπανσης και η λήψη μέτρων αποκατάστασης της ποιότητας και ποσότητας της ιαματικής πηγής.

7.5 Μελέτη περίπτωσης

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DRASTIC ΣΤΟΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΛΑΥΚΟΥ (ΝΟΜΟΥ ΑΧΑΪΑΣ)

7.5.1. Γεωλογία-Υδρογεωλογία της περιοχής έρευνας

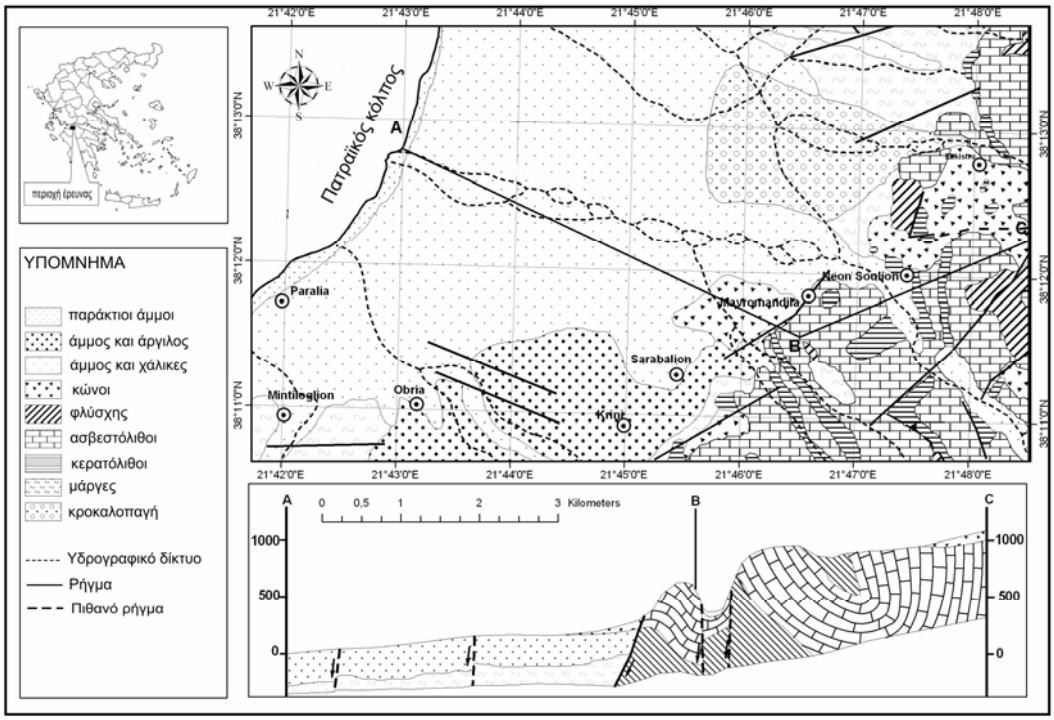
Κατωτέρω παρουσιάζεται μια εφαρμογή της μεθοδολογίας DRASTIC στην εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα του πεδινού τμήματος της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου στο Νομό Αχαΐας. Η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της ταχύτατης αλλαγής των χρήσεων γης, της αστικοποίησης και της εντατικής γεωργίας που εμφανίζει, πλησίον του τρίτου σε μέγεθος πολεοδομικού συγκροτήματος της Ελλάδας. Τα στοιχεία έχουν ληφθεί από ερευνητική εργασία των Βουδούρη & Μανδηλαρά (2004).
Η λεκάνη του Γλαύκου με συνολική έκταση 102 km^2 εκτείνεται ΝΑ/κά της πόλης των Πατρών. Το ορεινό τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από ασβεστόλιθους με ενστρώσεις ραδιολαριτών και φλύσχη, ενώ το πεδινό τμήμα από μεταλπικές αποθέσεις (Σχ. 7.4).



Σχήμα 7.4: Τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου.

Οι μεταλπικές αποθέσεις μπορεί να διακριθούν στην ανώτερη και την κατώτερη ζώνη (Βουδούρης, 1995, Μανδηλαράς κ.ά, 1999): Η ανώτερη ζώνη καλύπτεται επιφανειακά από νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα κροκαλών και λατυπών, ψηφιτών, 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, αργιλοϊλύες 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 υδροφόρους σχηματισμούς του πεδινού τμήματος της λεκάνης με υψηλή δυναμικότητα. Η αύξηση του πάχους των αργιλοπηλιτικών 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 Σχ. 7.5 παρουσιάζεται ένας συνοπτικός γεωλογικός χάρτης της λεκάνης.



Σχήμα 7.5: 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).

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 διείσδυση της θάλασσας σε απόσταση 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 (Μανδηλαράς & Βουδούρης, 2001).

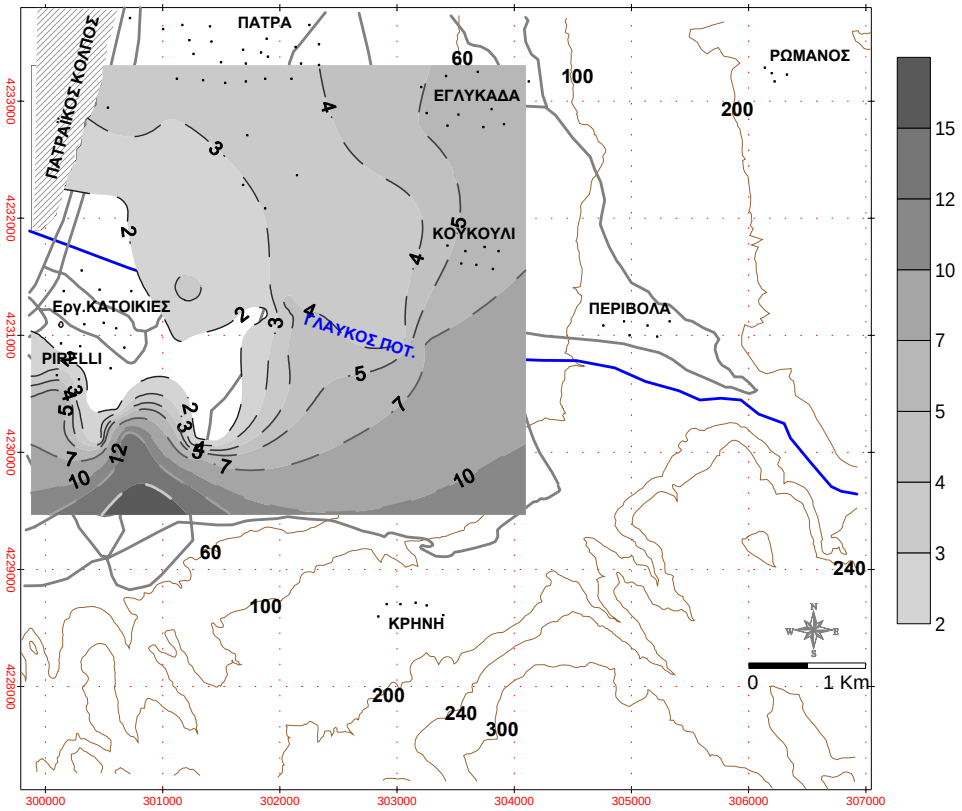
Στο Σχ. 7.6 παρουσιάζεται ένας πιεζομετρικός χάρτης της περιόδου Νοεμβρίου 2001 της προσχωματικής λεκάνης του ποταμού Γλαύκου, όπου διαπιστώνονται θετικές απόλυτες πιεζομετρικές στάθμες έως +15 m α.ε.θ.

7.5.2. Υπολογισμός του δείκτη 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.

Με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου στην προσχωματική λεκάνη του ποταμού Γλαύκου συντάχθηκε χάρτης τρωτότητας (Σχ. 7.14), στον οποίο φαίνονται οι τομείς με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων νερών.

Στα Σχήματα 7.7–7.13 παρουσιάζονται επιμέρους οι χάρτες κατανομής κάθε παραμέτρου επί τη βαρύτητά της, που επηρεάζει χωριστά και συμβάλλει στη διαμόρφωση του δείκτη τρωτότητας DRASTIC (DI).



Σχήμα 7.6: Πιεζομετρικός χάρτης της περιόδου Νοεμβρίου 2001 του προσχωματικού υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου.

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 στο υδροφόρο. Με βάση την πιεζομετρία της περιόδου Νοεμβρίου 2001 (Σχ. 7.4), η στάθμη του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 2 έως 20 m από επιφάνεια εδάφους.

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

D < 3 m → 10 βαθμοί
3 m < D < 5 m → 9 βαθμοί
5 m < D < 8 m → 7 βαθμοί
8 m < D < 12 m → 5 βαθμοί
12 m < D < 20 m → 3 βαθμοί
20 m < D < 40 m → 2 βαθμοί
D > 40 m → 1 βαθμός

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα DrDw παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7.

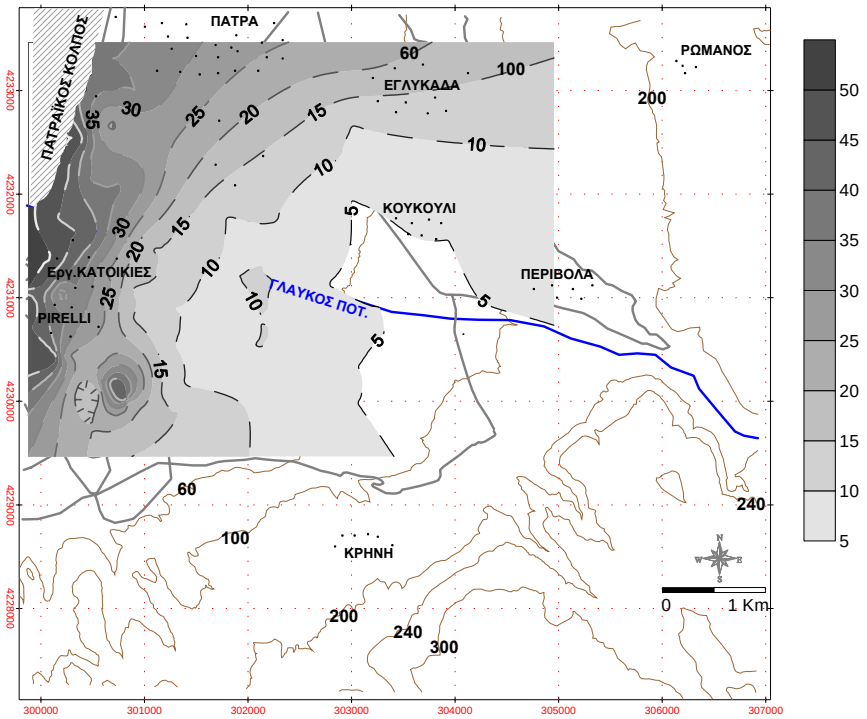
Εμπλουτισμός (R)

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, 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 km^2) δέχεται ετήσια βροχόπτωση 648 mm και το ανώτερο (μέσο υψόμετρο 70 m και έκταση 7,7 km^2) 673 mm.

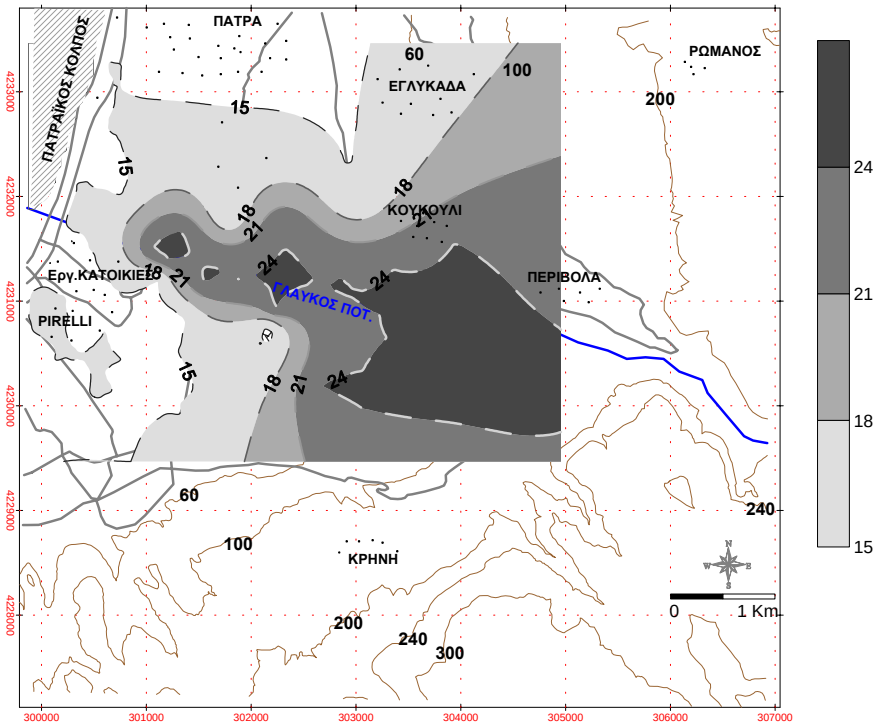
Ο συντελεστής κατείσδυσης είναι συνάρτηση του ύψους βροχής, της κλίσης του αναγλύφου και της περατότητας του εδάφους. Στην παρούσα εφαρμογή, με βάση τη λιθολογία, ο συντελεστής κατείσδυσης εκτιμήθηκε σε 10% του ετήσιου ύψους βροχής στην κατώτερη ζώνη και σε 15% στην ανώτερη ζώνη, λόγω της παρουσίας αδρομερέστερων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

R > 93 mm → 10 βαθμοί
79 mm < R < 93 mm → 8 βαθμοί
66 mm < R < 79 mm → 6 βαθμοί
R < 66 mm → 4 βαθμοί

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα RrRw παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.8.



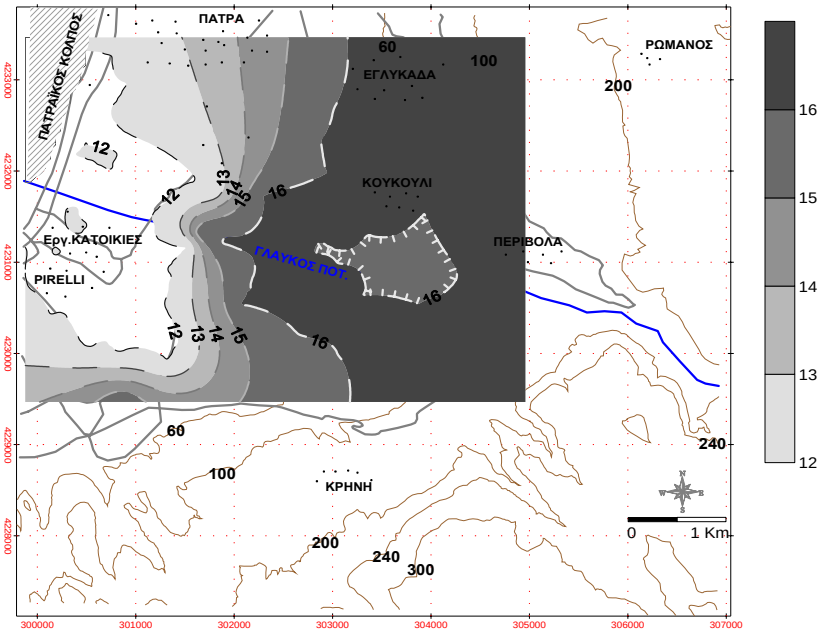
Σχήμα 7.7: Χάρτης του παράγοντα DrDw.



Σχήμα 7.8: Χάρτης του παράγοντα RrRw.

Υδροφόρο μέσο (Α)

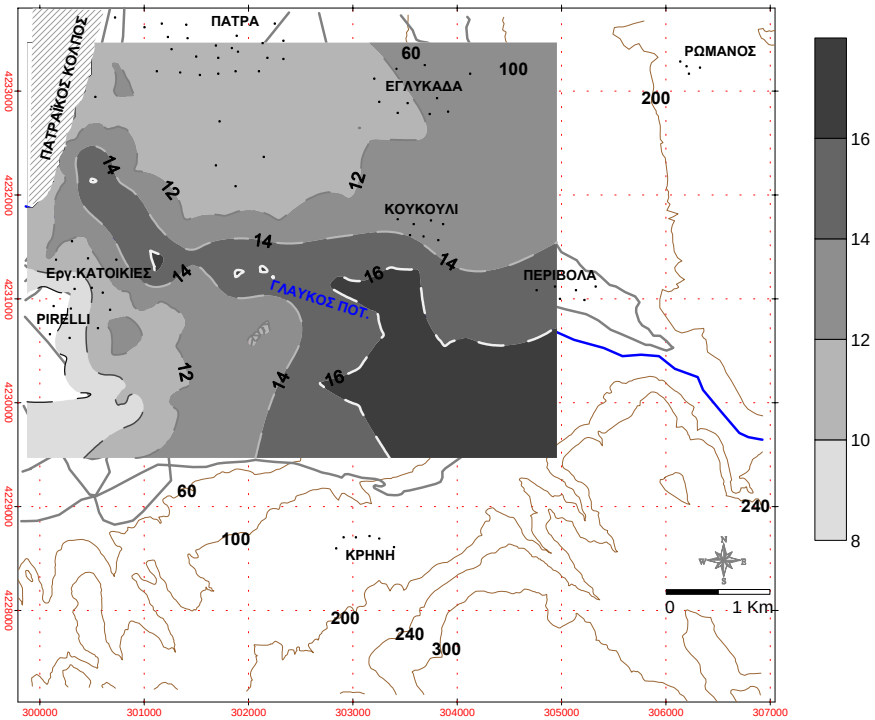
Με βάση τη λιθολογική περιγραφή της περιοχής έρευνας το υδροφόρο μέσο ταξινομήθηκε ως άμμος (βαθμοί 6) και κροκάλες-χάλικες (βαθμοί 8). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 2 και η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα ArAw παρουσιάζεται στο Σχ. 7.9.



Σχήμα 7.9: Χάρτης του παράγοντα ArAw.

Έδαφος (S)

Στην εδαφική ζώνη και ιδιαίτερα στη ζώνη των ριζών το ρυπαντικό φορτίο εξασθενεί και πολλές ουσίες αποικοδομούνται από μικροοργανισμούς. 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 βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 2 και η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα SrSw φαίνεται στο Σχ. 7.10.



Σχήμα 7.10: Χάρτης του παράγοντα SrSw.

Κλίση αναγλύφου (T)

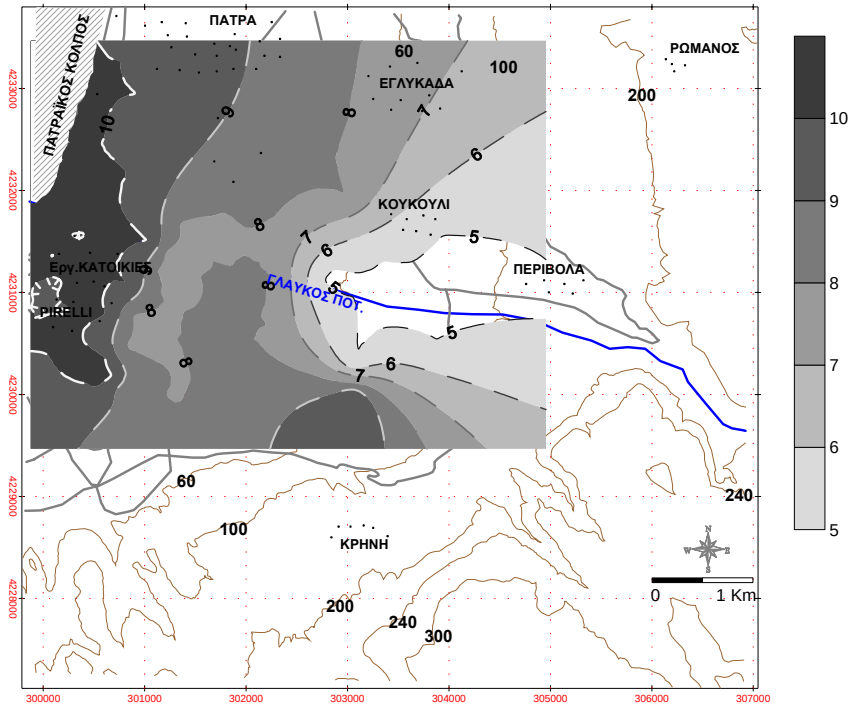
Το ανάγλυφο της περιοχής του υδροφορέα είναι σχετικά ήπιο και ο καθορισμός των κλίσεων έγινε με βάση το ψηφιακό υπόβαθρο του εδάφους. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 1 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

T <1,5 % → 10 βαθμοί

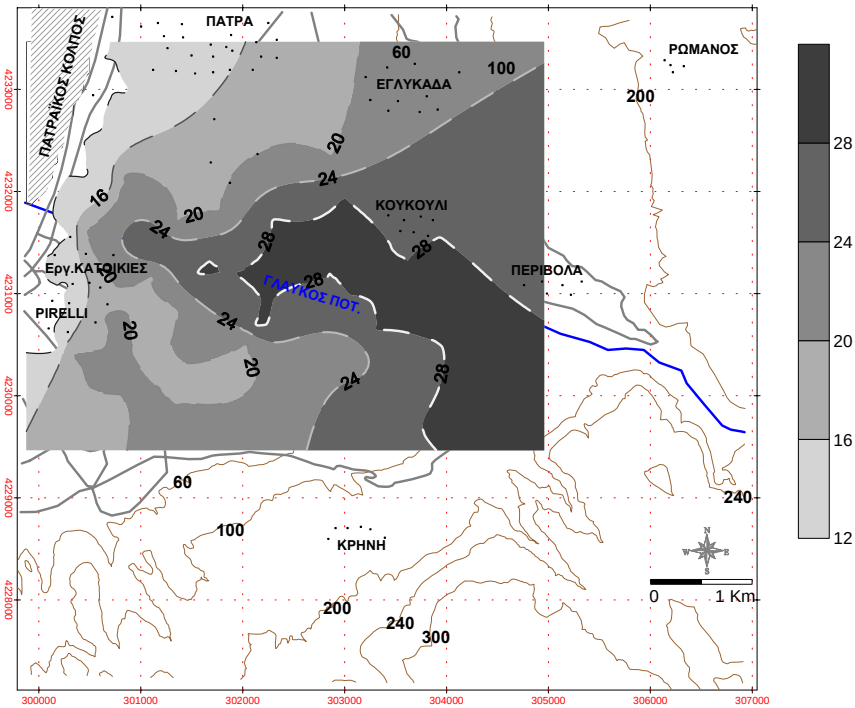
1,5 % < T < 2,0 % → 8 βαθμοί

T > 2,0 % → 5 βαθμοί

Η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα TrTw φαίνεται στο Σχ. 7.11.



Σχήμα 7.11: Χάρτης του παράγοντα TrTw.



Σχήμα 7.12: Χάρτης του παράγοντα IrIw.

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 μικρο-οργανισμών κ.ά.

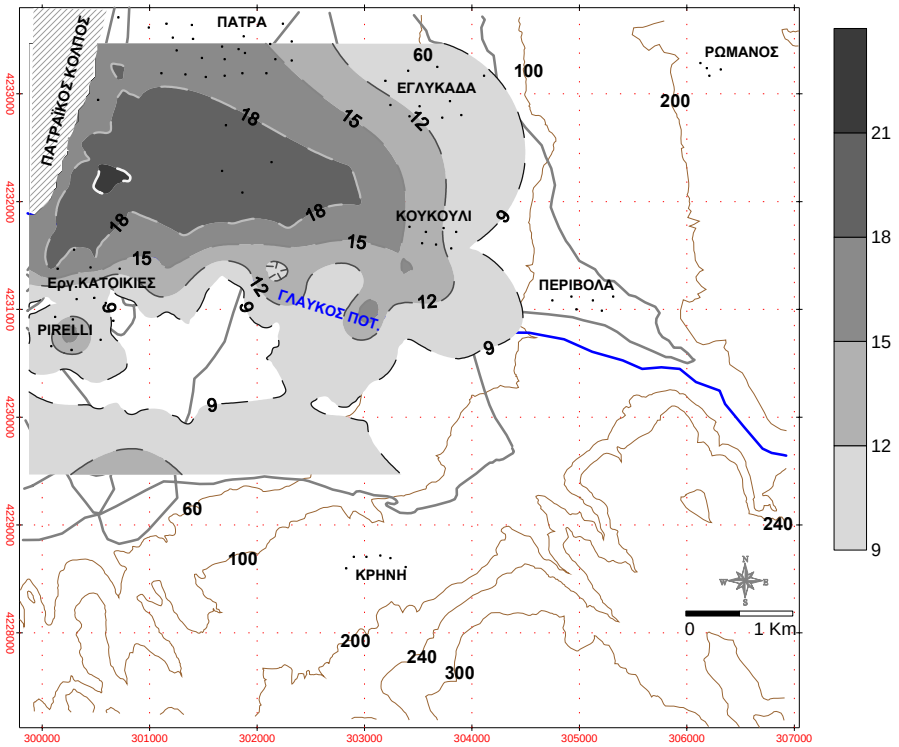
Ο βαθμός εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από τη λιθολογία της, την κοκκομετρία της, το πάχος της, τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τη συγκέντρωσή του κ.λπ. Με βάση τα στοιχεία των λιθολογικών τομών, καθώς και στοιχεία της γεωτρητικής έρευνας (Βουδούρης, 1995), η ακόρεστη ζώνη αποτελείται 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 IrIw φαίνεται στο Σχήμα 7.12.

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 προσδιορίσθηκε από την επεξεργασία των αντλητικών δεδομένων. Η χωρική κατανομή της έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer 8.0, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο kriging. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 3 και η βαθμονόμηση έγινε ως εξής:

$C > 5$ m/h → 7 βαθμοί
$1 > C > 5$ m/h → 6 βαθμοί
$0,5 > C > 1$ m/h → 5 βαθμοί
$C < 0,5$ m/h → 3 βαθμοί

Η γεωγραφική κατανομή των τιμών του παράγοντα CrCw φαίνεται στο Σχ. 7.13.



Σχήμα 7.13: Χάρτης του παράγοντα CrCw.

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 Δ/κό τμήμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στο Α/κό 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).

7.5.3. Δείκτης τρωτότητας

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

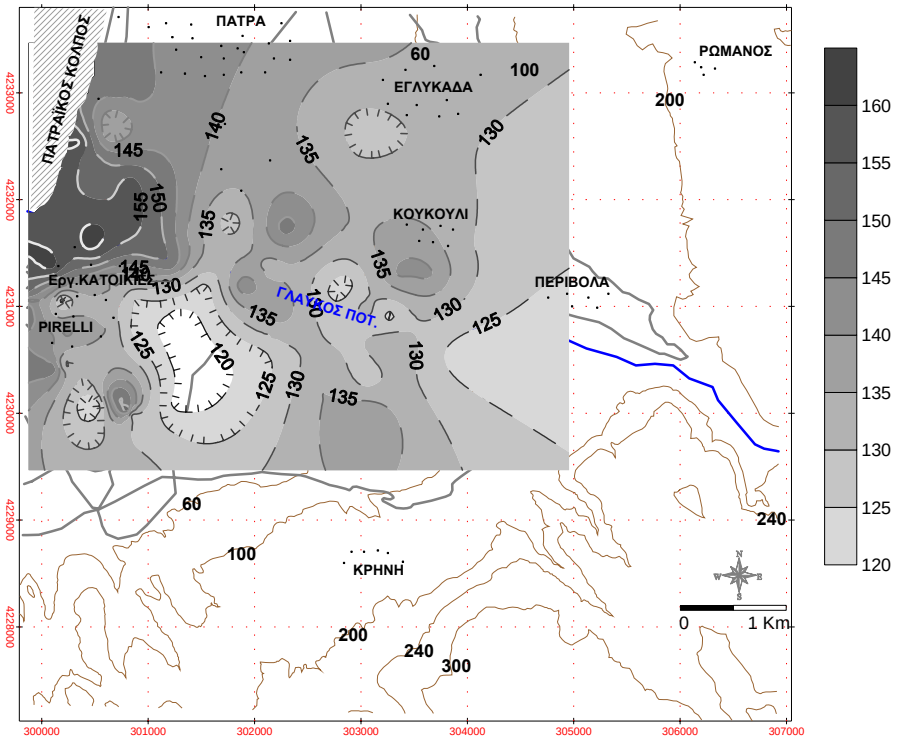
$$MDI=DI + (Lr \times Lw)$$

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 7.14):

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.



Σχήμα 7.14: Χάρτης του δείκτη τρωτότητας DRASTIC (MDI).

Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων του μοντέλου DRASTIC. Από τον Πίνακα αυτόν προκύπτει ισχυρή θετική συσχέτιση (>0,60) μεταξύ των παραμέτρων εδαφικού υλικού-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).

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.

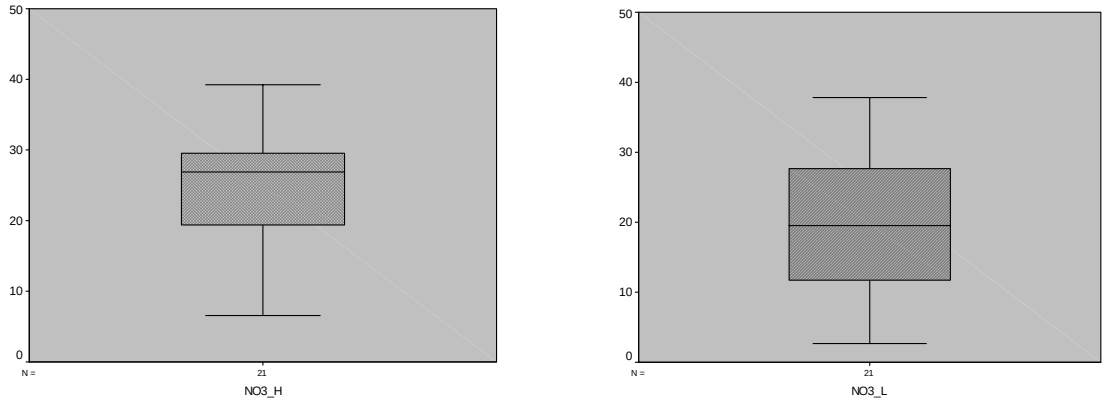
Η συγκέντρωση των νιτρικών στον τομέα με υψηλή διακινδύνευση της τρωτότητας κυμαίνεται μεταξύ 6,6–44,5 mg/L (μέση τιμή 25 mg/L), ενώ στον τομέα με μέση διακινδύνευση μεταξύ 3,5–

37,8 mg/L (μέση τιμή 19 mg/L). Να σημειωθεί ότι, και στους δύο τομείς εφαρμόζονται οι ίδιες καλλιεργητικές πρακτικές.

Στο Σχήμα 7.15 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.

Πίνακας 7.6: 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**



Σχήμα 7.15: Θηκογράμματα (box plots) των συγκεντρώσεων των νιτρικών στους τομείς υψηλής (αριστερά) και μέσης (δεξιά) τρωτότητας του προσχωματικού υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Γλαύκου.

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 νιτρορύπανση (Kolpin, 1997, Voudouris et al., 2004b).

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.

Ερωτήσεις

7.1. Ποιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τρωτότητας;

7.2. Ποιοι υδροφόροι ορίζοντες είναι πιο τρωτοί στην εξωτερική ρύπανση;

7.3. Από τι εξαρτάται η τρωτότητα στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες;

7.4. Ποιες παράμετροι εισάγονται στη μέθοδο DRASTIC; Ποια είναι η βαρύτητα καθεμιάς;

7.5. Τι είναι ζώνη ανάκτησης;

7.6. Ποιες είναι οι κύριες ζώνες προστασίας των υδροληπτικών έργων και πως καθορίζονται;

Ασκήσεις

7.1. Ένας οριζόντιος υπό πίεση υδροφορέας με συντελεστή μεταβιβαστικότητας $T=400\ m^2/h$ και υδραυλική κλίση $i=4.10^{-3}$ αντλείται μέσω μιας γεώτρησης με παροχή $Q=200\ m^3/h$. Να υπολογισθεί η ζώνη ανάκτησης της γεώτρησης και να γίνει ο πίνακας τιμών y για τις διάφορες τιμές του x.

7.2. Ένας ελεύθερος υδροφορέας έχει συντελεστή υδροπερατότητας $k=8\ m/h$ και αντλείται μέσω μιας γεώτρησης με παροχή $Q=150\ m^3/h$. Τα υδραυλικά φορτία σε δύο θέσεις που απέχουν 300 m ανάντη και κατάντη της αντλούμενης γεώτρησης είναι αντίστοιχα $h_1=+55$ m και $h_2=+49$ m. Να υπολογισθεί η ζώνη ανάκτησης της γεώτρησης.