

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

Κουργιαλάς Ν. Νεκτάριος* ^{(1),(2)} και Καρατζάς Π. Γεώργιος ⁽²⁾

⁽¹⁾ ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ-ΕΘΙΑΓΕ, Ινστιτούτο Ελιάς Υποτροπικών Φυτών και Αμπέλου, Εργ. Υδατικών Πόρων, Αρδεύσεων & Περιβαλλοντικής Γεωπληροφορικής, Αγροκήπιο 73100 Χανιά – Ελλάδα.

⁽²⁾ Πολυτεχνείο Κρήτης – Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνειούπολη 73100 Χανιά – Ελλάδα

*E-mail: kourgialas@nagref-cha.gr

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Αναλυτικά και αριθμητικά εργαλεία προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν σε περιβάλλον GIS για να καθορίσουν χάρτες μορφής raster των διαφόρων παραγόντων που εμπλέκονται στην επικινδυνότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Οι προτεινόμενοι παράγοντες-θεματικοί χάρτες ενσωματώνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να μειωθεί η αβεβαιότητα στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα, δεκαπέντε παράγοντες-θεματικοί χάρτες δημιουργήθηκαν και συνδυάστηκαν σε περιβάλλον GIS. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, τις χρήσεις γης, τη συσσώρευση επιφανειακής απορροής, τις σημειακές πηγές ρύπανσης, την απόσταση από τα ποτάμια συστήματα, την απόσταση από τα οδικά δίκτυα, τις κατοικημένες περιοχές, τις προστατευόμενες περιοχές, τις ζώνες υφαλμύρισης, τις αρδευόμενες περιοχές, την ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος, το εδαφικό βάθος, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τη γεωλογία, και τη ταχύτητα διήθησης των υπογείων υδάτων. Η περιοχή μελέτης, η Κρήτη, χωρίστηκε σε πέντε περιοχές που χαρακτηρίζονται από πέντε διαφορετικούς βαθμούς επικινδυνότητας ρύπανσης των υπόγειων υδάτων: πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή. Ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας προκύπτει μέσω του γραμμικού συνδυασμού των θεματικών χαρτών και την επιλογή των κατάλληλων βαρών. Ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας προσδιορίζει τις περιοχές υψηλού κινδύνου ρύπανσης των υπογείων υδάτων στο Υδατικό Διαμέρισμα (Υ.Δ.) Κρήτης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επαληθεύτηκε από διαφορετικούς ρύπους που εντοπίστηκαν στα υπόγεια ύδατα (γεωτρήσεις – πηγάδια) του Υ.Δ. Κρήτης. Σύμφωνα με τον τελικό χάρτη επικινδυνότητας ρύπανσης των

υπογείων υδάτων, 828 km² (9.47%) και 1981 km² (24.06%) του Υ.Δ. της Κρήτης βρίσκονται σε πολύ υψηλό και υψηλό κίνδυνο ρύπανσης αντίστοιχα.

Λέξεις - κλειδιά: Εκτίμηση επικινδυνότητας, ρύπανση υπογείων υδάτων, GIS, Κρήτη.

1. Εισαγωγή

Η διαχείριση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα λόγω της χωρικής ετερογένειας των υδροφορέων και των διαφορετικών φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος (Civita, 2010). Από την άλλη μεριά, η αποκατάσταση της ρύπανσης αλλά και η χωροχρονική παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπογείων υδάτων είναι δαπανηρές και χρονοβόρες διαδικασίες. Ο βέλτιστος τρόπος διαχείρισης του κινδύνου ρύπανσης των υπογείων υδάτων είναι ο προσδιορισμός της χωρικής κατανομής των περιοχών εκείνων που κινδυνεύουν περισσότερο (Mimi and Assi, 2009).

Ο χωρικός προσδιορισμός των πιο επικίνδυνων περιοχών ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι πολυκριτηριακό/πολυδιάστατο φαινόμενο, γεγονός που κάνει τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) πολύ χρήσιμα εργαλεία λήψης αποφάσεων και προσδιορισμού περιοχών με επικινδυνότητα ρύπανσης (Kourgialas and Karatzas, 2014). Για το χωρικό προσδιορισμό της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων, διάφοροι μέθοδοι επικάλυψης των θεματικών επιπέδων έχουν δημιουργηθεί και προταθεί τα τελευταία χρόνια όπως οι μέθοδοι επικάλυψης θεματικών επιπέδων DRASTIC, η μέθοδος GOD, η μέθοδος AVI, η μέθοδος SINTACS, και η μέθοδος EPIK (Draoui et al., 2008). Με βάσει αυτές τις μεθόδους πολλά διαφορετικά κριτήρια-θεματικοί χάρτες συνδυάζονται σε περιβάλλον GIS προκειμένου να προκύψει ο τελικός χάρτης προσδιορισμού της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων.

Στην πολυκριτηριακή ανάλυση η επιλογή και ο προσδιορισμός των βαρών για κάθε εμπλεκόμενο θεματικό επίπεδο-κριτήριο υπόκειται στις περισσότερες των περιπτώσεων στην κρίση ειδικών στη λήψη αποφάσεων (Malczewski, 2006, Chenini et al., 2010). Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη μέθοδο για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων με βάση την αλληλεπίδραση μεταξύ γεωγενών και ανθρώπινων παραγόντων χρησιμοποιώντας αναλυτικά και αριθμητικά εργαλεία προσομοίωσης σε περιβάλλον GIS. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε

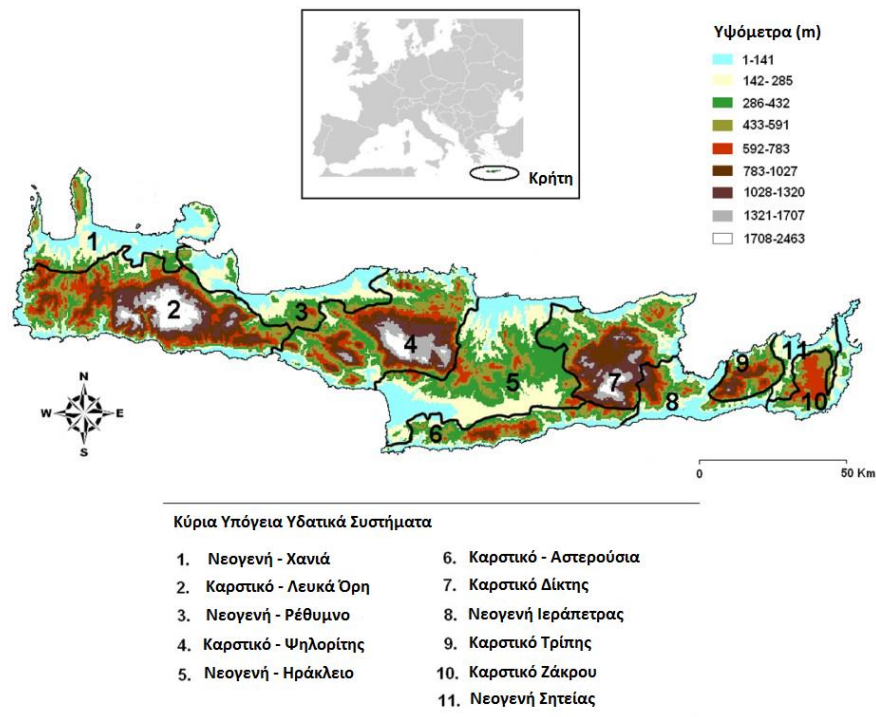
στο Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης και ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων επαληθεύτηκε από διαφορετικούς ρυπαντές που εντοπίστηκαν σε διάφορα πηγάδια και γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Περιοχή Μελέτης

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και το πέμπτο μεγαλύτερο της Μεσογείου, καλύπτοντας έκταση 8300 km². Το Υ.Δ. Κρήτης χωρίζεται σε τέσσερις Νομούς (Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου). Η πεδινή ζώνη, με υψόμετρο μικρότερο των 200 μέτρων, καλύπτει το 40% της συνολικής έκτασης του Νησιού. Το Υ.Δ. Κρήτης χαρακτηρίζεται από σύνθετη γεωλογική δομή (νεογενείς αποθέσεις, αδιαπέρατα γεωλογικά στρώματα, και καρστικές γεωλογικές δομές) με 11 συνολικά κύρια υπόγεια υδατικά συστήματα, όπου το κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από την δική του υδρογεωλογική συμπεριφορά (Kourgiyalas and Karatzas, 2014). Πέντε από αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται ως νεογενή και τα υπόλοιπα έξι ως καρστικά (Εικόνα 1).

Το κλίμα της Κρήτης είναι μεσογειακό με υγρό και σχετικά ψυχρό χειμώνα καθώς και με ξηρά-ζεστά καλοκαίρια. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι από τη συνολική βροχόπτωση, περίπου το 65% χάνεται ως εξατμισοδιαπνοή, το 21% μετατρέπεται σε απορροή και μόνο το 14% επαναφορτίζει τα υπόγεια ύδατα. Οι γεωργικές καλλιέργειες στο νησί καταλαμβάνουν έκταση περίπου 3205 km². Τα κύρια ρυπαντικά φορτία στην περιοχή μελέτης σχετίζονται με τις γεωργικές δραστηριότητες. Η εντατικοποίηση της γεωργίας και η αλόγιστη, σε πολλές περιπτώσεις, χρήση αγροχημικών έχει οδηγήσει στην αντίχλευση NO₃⁻ σε ορισμένες περιοχές της Κρήτης σε επίπεδα πάνω από τα επιτρεπτά για το πόσιμο νερό φτάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις τα 99.2 mg/l. Επίσης συγκεντρώσεις SO₄⁻² της τάξης των 1570 mg/l έχουν εντοπιστεί στα υπόγεια ύδατα ορισμένων περιοχών. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε εκτεταμένα τμήματα της παράκτιας ζώνης παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρισης με συγκεντρώσεις Cl⁻ που φθάνουν τα 3340 mg/l (Water Resources Department of the Prefecture of Crete, 2009).



Εικόνα 1. Τα κύρια υπόγεια υδατικά συστήματα και η τοπογραφία του Υ.Δ. Κρήτης

2.2. Μεθοδολογία

Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων στο Υ.Δ. Κρήτης, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον GIS ο τελικός χωρικός χάρτης διαβάθμισης της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Ο τελικός αυτός χάρτης προέκυψε από το συνδυασμό 15 επιμέρους θεματικών χαρτών (παραγόντων) που σχετίζονται άμεσα με τη ρύπανση των υπογείων υδάτων. Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι (Kourgialas and Karatzas 2014): (1) Βροχόπτωση (rainfall), (2) Χρήσεις γης (non-concentrated land uses), (3) Συσσώρευση επιφανειακής απορροής (runoff accumulation), (4) Πηγές ρύπανσης (point source contamination), (5) Απόσταση από τα ποτάμια (proximity to rivers), (6) Απόσταση από το οδικό δίκτυο (proximity to highways), (7) Κατοικημένες περιοχές (residential areas), (8) Προστατευόμενες περιοχές (protected areas), (9) Ζώνες υφαλμύρισης (saltwater zones), (10) Αρδευόμενες εκτάσεις (artificial drainage), (11) Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος (soil water capacity), (12) Εδαφικό βάθος (soil depth), (13) Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (depth to water table), (14) Γεωλογία (geology), και (15) Ταχύτητα διήθησης των υπογείων υδάτων (seepage velocity).

Η επιλογή των παραπάνω παραγόντων βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες και τη διεθνή βιβλιογραφία (Ravbar and Goldscheider, 2007). Η προτεινόμενη μέθοδος προσπαθεί να ενσωματώσει σε μια γραμμική αλγεβρική συνάρτηση όλους εκείνους τους παράγοντες που σχετίζονται με τη χαρτογράφηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάζει παράγοντες που σχετίζονται με την τρωτότητα (vulnerability) και τον κίνδυνο (hazard) ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Οι λόγοι επιλογής των παραπάνω μεταβλητών-παραγόντων καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

Η βροχόπτωση ως ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας του υδρολογικού κύκλου, συμβάλλει στη διήθηση και μεταφορά των ρύπων διαμέσου του εδάφους προς τον υπόγειο υδροφορέα. Επίσης, οι διαφορετικές χρήσεις γης ελέγχουν το χρόνο μετακίνησης του ρύπου. Η συσσώρευση επιφανειακής απορροής σχετίζεται άμεσα με το αν ο ρύπος θα παραμείνει αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να διηθηθεί στον υπόγειο υδροφορέα (Almasri, 2008). Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι οι σημειακές πηγές ρύπανσης που συμπεριλαμβάνουν ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση των υπογείων υδάτων αν δεν ληφθούν τα αναγκαία μέτρα προστασίας. Οι κατοικημένες περιοχές αποτελούν επίσης εν δυνάμει κίνδυνο ρύπανσης του υπογείου νερού (EPA, 1994). Σε ποτάμια συστήματα παρατηρείται πολλές φορές ανεξέλεγκτη απόθεση λυμάτων ή αποβλήτων με άμεσο κίνδυνο ρύπανσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Ακόμη, σε πολλές περιπτώσεις τόσο σε κεντρικούς όσο και σε περιφερειακούς οδικούς άξονες διακινούνται επικίνδυνα χημικά/απόβλητα με άμεσο κίνδυνο για ρύπανση σε περίπτωση ατυχήματος (Kourgialas and Karatzas, 2014). Στην παρούσα μεθοδολογία λαμβάνονται επίσης υπόψη οι προστατευόμενες περιοχές [European network Natura 2000 και National Parks (Directive 92/43/EEC)]. Σε εκτεταμένα τμήματα της παράκτιας ζώνης του Υ.Δ. Κρήτης υπάρχουν ζώνες υφαλμύρισης που επιβαρύνουν σημαντικά την ποιότητα του υπογείου νερού. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία λάβαμε επίσης υπόψη το αρδευτικό δίκτυο ως έμμεσο παράγοντα επιβάρυνσης του υπογείου υδροφορέα με ανόργανους κυρίως ρύπους (διάλυση λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων που βρίσκονται στο έδαφος) (Bohlke, 2002). Το εδαφικό βάθος και η ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος διαδραματίζουν επίσης ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην μεταφορά, προσρόφηση ή διάλυση/διάσπαση του ρύπου κατά την πορεία του προς τον υπόγειο υδροφορέα. Ο βαθμός ρύπανσης

των υπογείων υδάτων εξαρτάται και από την υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών δια μέσου των οποίων δύναται να μεταφερθεί ένα ρυπαντικό φορτίο στους υπόγειους υδροφορείς. Επιπλέον, όσο πιο μικρό είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους, τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος ρύπανσής του (Egboka et al., 1989). Τέλος, η ταχύτητα μεταφοράς των υπογείων υδάτων είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την μεταφορά του ρύπου, καθώς όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα μεταφοράς του υπογείου ύδατος, τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος εξάπλωσής του.

Για την δημιουργία των παραπάνω θεματικών χαρτών χρησιμοποιήθηκαν: i) τοπογραφικοί χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:50.000 και 1:5.000, ii) γεωλογικοί χάρτες του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), iii) αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:5.000, οι οποίες συντέθηκαν σε ένα μωσαϊκό αεροφωτογραφιών συνολικής κλίμακας 1:50.000 και χρησιμοποιήθηκαν για να γίνουν διορθώσεις των ψηφιοποιημένων στοιχείων. Επιπρόσθετα, συλλέχθηκαν, αξιολογήθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν δεδομένα πεδίου όπως δεδομένα κατακρημνίσεων, χρήσεων γης, υδρογεωλογικών στρωμάτων, πηγών ρύπανσης, προστατευόμενων περιοχών, αρδευόμενων εκτάσεων, εδαφολογικών χαρτών, καθώς και δεδομένα στάθμης και ποιότητας των υπογείων υδάτων στο Υ.Δ. Κρήτης. Επίσης χρειάστηκε: α) η δημιουργία αναλυτικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), β) ο προσδιορισμός του πορώδους και της μεταβιβασιμότητας των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών, και γ) η χρήση αναλυτικών εργαλείων και αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης σε περιβάλλον GIS.

Αναλυτικότερα, για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διήθησης των υπογείων υδάτων εφαρμόστηκαν αριθμητικές προσεγγίσεις σε περιβάλλον GIS που χρησιμοποιούν τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου (βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, αποτελεσματικό πορώδες, πάχος της κορεσμένης ζώνης και μεταβιβασιμότητα γεωλογικών σχηματισμών). Η βασική εξίσωση για τον προσδιορισμό της ταχύτητας μεταφοράς του υπόγειου ύδατος παρουσιάζεται παρακάτω (ESRI, 2008).

$$V = \frac{q}{n} = \frac{-K\nabla h}{n} = \frac{-T\nabla h}{bn}, \quad (1)$$

όπου:

V = ταχύτητα μεταφοράς του υπόγειου ύδατος, q = ταχύτητα Darcy, n = ενεργό πορώδες του μέσου, K = υδραυλική αγωγιμότητα του μέσου, ∇h = υδραυλική κλίση (head gradient), T = μεταβιβασιμότητα του μέσου, b = πάχος υδροφορέα.

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα ρύπανσης στο Υ.Δ. Κρήτης για κάθε παράγοντα-θεματικό χάρτη ορίζουμε πέντε επίπεδα επικινδυνότητας: Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή και Πολύ Χαμηλή. Τα επίπεδα επικινδυνότητας των διαφορετικών παραγόντων εκφράζονται είτε με αριθμητικές τιμές, για τους παράγοντες Βροχόπτωση, Γεωλογία, Συσσώρευση επιφανειακής απορροής, Κατοικημένες περιοχές, Ζώνες υφαλμύρισης, Εδαφικό βάθος, Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος, Βάθος υδροφόρου ορίζοντα, Ταχύτητα μεταφοράς των υπογείων υδάτων, Απόσταση από τα ποτάμια και το οδικό δίκτυο, είτε περιγραφικά, για τους παράγοντες Χρήσεις γης, Πηγές ρύπανσης, Προστατευόμενες περιοχές, Αρδευόμενες εκτάσεις. Η διακύμανση των αριθμητικών τιμών βασίστηκε στη μέθοδο ταξινόμησης Natural Breaks (Jenks) (Smith, 1986).

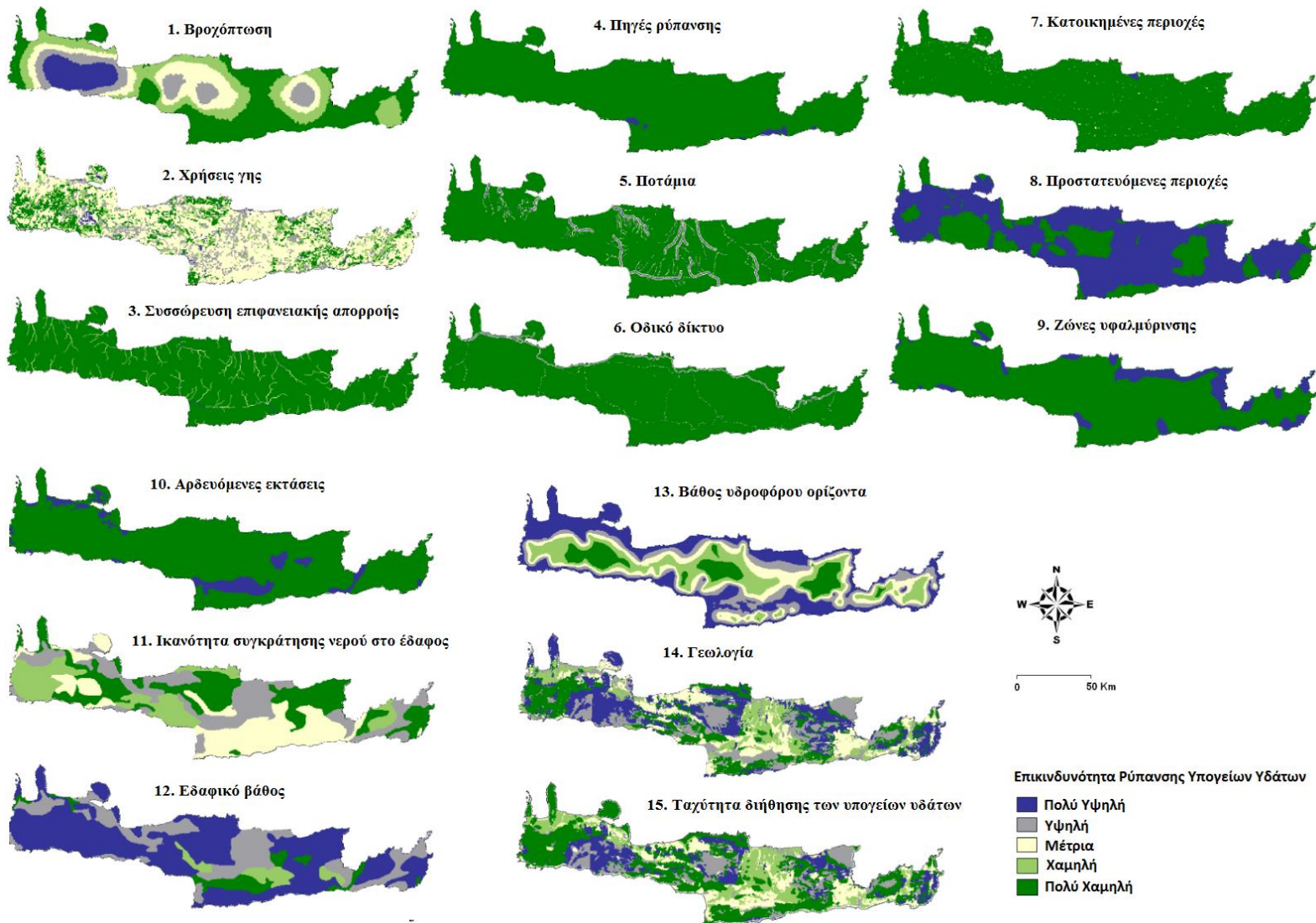
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα, δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα (χάρτες) της επίδρασης του κάθε παράγοντα στην επικινδυνότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων (Εικόνα 2). Οι χάρτες αυτοί συνδυάστηκαν, ανάλογα με το ποσοστό επίδρασης κάθε παράγοντα, με τη μέθοδο της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων σε περιβάλλον GIS. Με βάση την τεχνική της σταθμισμένης επικάλυψης, κάθε χάρτης (παράγοντας) πολλαπλασιάζεται με το ποσοστό συνεισφοράς του, και μετέπειτα όλοι οι χάρτες αθροίζονται αποδίδοντας το τελικό χάρτη επικινδυνότητας S για την περιοχή ενδιαφέροντος (Kourgialas and Karatzas, 2014):

$$S = \sum w_i x_i, \quad (2)$$

όπου:

w_i = συνολικό βάρος - ποσοστό συνεισφοράς του κάθε παράγοντα i και,

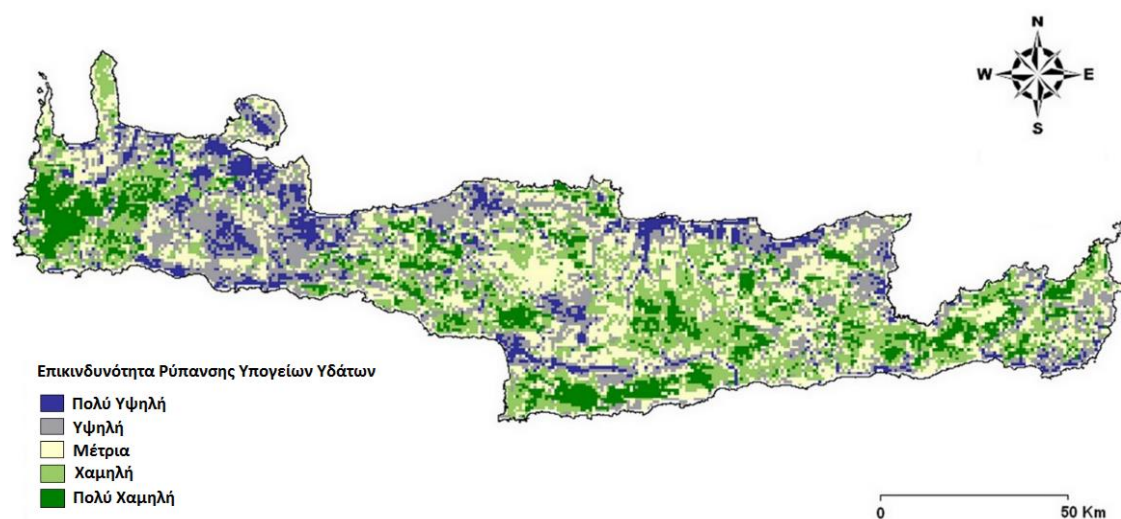
x_i = χάρτης - παράγοντας (factor map) i .



Εικόνα 2. Χωρική επικινδυνότητα ρύπανσης υπογείων υδάτων για κάθε ένα παράγοντα (θεματικό χάρτη).

Οι Kourgialas and Karatzas (2014) περιγράφουν αναλυτικά τον τρόπο προσδιορισμού του ποσοστού συνεισφοράς κάθε παράγοντα. Αναλυτικά, τα ποσοστά συνεισφοράς των παραγόντων έχουν ως εξής: Βροχόπτωση (8.28%), Χρήσεις γης (11.83%), Συσσώρευση επιφανειακής απορροής (10.05%), Πηγές ρύπανσης (2.50%), Απόσταση από τα ποτάμια (8.28%), Απόσταση από το οδικό δίκτυο (4.73%), Κατοικημένες περιοχές (6.5%), Προστατευόμενες περιοχές (2.75%), Ζώνες υφαλμύρισης (3.5%), Αρδευόμενες εκτάσεις (3.25%), Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος (5.09%), Εδαφικό βάθος (7.8%), Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (9.46%), Γεωλογία (11.23%), και Ταχύτητα διήθησης των υπογείων υδάτων (4.73%).

Οι παράγοντες (θεματικά επίπεδα) συνδυάστηκαν σύμφωνα με την Εξίσωση 2, σε περιβάλλον Model Builder του GIS. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του τελικού χάρτη επικινδυνότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων για το Υ.Δ. Κρήτης (Εικόνα 3). Σύμφωνα με τον τελικό χάρτη επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων 828 km² (9.47%) και 1981 km² (24.06%) του Υ.Δ. Κρήτης βρίσκονται σε πολύ υψηλή και υψηλή επικινδυνότητα ρύπανσης αντίστοιχα. Επιπλέον, 2298 km² (28.07%), 1964 km² (23.85%) και 1229 km² (14.55%) του Υ.Δ. Κρήτης χαρακτηρίζονται από μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή επικινδυνότητα ρύπανσης αντίστοιχα. Οι περιοχές που εμφανίζουν πολύ υψηλή και υψηλή επικινδυνότητα συγκεντρώνονται κυρίως στο δυτικό τμήμα της Κρήτης με ποσοστό 56%, ενώ στο ανατολικό τμήμα αντιστοιχεί ποσοστό ίσο με 44%.



Εικόνα 3. Τελικός χάρτης επικινδυνότητας ρύπανσης υπογείων υδάτων για το Υ.Δ. Κρήτης.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επαληθεύτηκε για διαφορετικούς ρύπους που εντοπίστηκαν στα υπόγεια ύδατα (γεωτρήσεις – πηγάδια) του Υ.Δ. Κρήτης.

Αναλυτικότερα, ανόργανοι ρυπαντές όπως είναι τα ανιόντα SO_4^{-2} , CL^- , NO_3^- , τα κατιόντα Fe^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , καθώς και μικροβιακοί ρύποι ανιχνεύτηκαν στα υπόγεια ύδατα περιοχών του Υ.Δ. Κρήτης που με βάση τη προτεινόμενη μεθοδολογία χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή επικινδυνότητα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετες υδρογεωλογικά περιοχές και να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων βοηθώντας τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στο δύσκολο έργο της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει επίσης τη δυνατότητα δημιουργίας ενός δυναμικού και ολοκληρωμένου εργαλείου προσομοίωσης σε περιβάλλον GIS για τη διαχείριση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε μορφή χαρτών με συντεταγμένες που θα καταδεικνύουν τις περιοχές υψηλής επικινδυνότητας ρύπανσης και θα συμπεριλαμβάνουν συνοπτικές πληροφορίες σχετικά με μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης του κινδύνου. Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία καθίσταται επίσης δυνατή η εκτίμηση-πρόβλεψη της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων σε σχέση με τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες ή την αλλαγή των χρήσεων γης.

Assessing groundwater contamination risk using analytical and numerical approaches in GIS – The water district of Crete, Greece

Nektarios N. Kourgialas ^{(a), (b)}*, **George P. Karatzas** ^(b)

^(a) Hellenic Agricultural Organization (H.A.O.-DEMETER), National Agricultural Research Foundation (N.AG.RE.F.) - Institute for Olive Tree, Subtropical Crops and Viticulture (Water Recourses, Irrigation & Environmental Geoinformatics Lab.), Agrokypio, 73100 Chania, Greece.

^(b) School of Environmental Engineering - Technical University of Crete, Polytechnioupolis, 73100 Chania, Greece.

*corresponding author: kourgialas@nagref-cha.gr

Abstract

This paper presents an integrated GIS modeling method for assessing groundwater contamination risk. Analytical and numerical tools within a GIS framework were used to define the raster maps of various factors interfering along the contaminant pathway from source to groundwater. In the proposed methodology, fifteen factors were considered in order to estimate the spatial distribution of the groundwater contamination risk areas improving the accuracy in the results. The study area, the

island of Crete in Greece, was divided into five regions characterized by different degrees of groundwater risk ranging from very low to very high. The developed methodology was validated for different contaminants that were detected in groundwater on the island of Crete.

Βιβλιογραφία

- Almasri, M. 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management* 88:577-593.
- Bohlke, J.K. 2002. Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal* 10:153–179.
- Chenini, I., Mammou, A.B., and M. EL. May. 2010. Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resour. Manage.* 24: 921–939.
- Civita, M.V. 2010. The combined approach when assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination. *J. Water Resource and Protection* 2:14-28.
- Corine Land Cover 2000 for Greece, European Environmental Agency.
- Council Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. European Commission, Brussels.
- Draoui, M., Vias, J., Andreo, B., Targuisti, K. and J. Stitou El Messari. 2008. A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology* 54: 455-463
- Egboka, B.C.E., Nwankwor, G.I., Orajaka, I.P., and A.O. Ejiofor. 1989. Principles and Problems of Environmental Pollution of Groundwater Resources with Case Examples from Developing Countries. *Environmental Health Perspectives* 83: 39-68.
- EPA. 1994. Potential Groundwater Contamination from Intentional and Nonintentional Stormwater Infiltration. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/SR-94/051.
- ESRI. 2008. ArcView 9.2 User Manuals, Environmental System Research Institute, 380 New York Street, Redlands, CA, 92373 USA.
- Kourgialas, N.N., and G.P. Karatzas. 2014. Groundwater Contamination Risk Assessment in Crete, Greece using Numerical Tools within a GIS Framework. *Hydrological Science Journal* DOI: 10.1080/02626667.2014.885653.
- Malczewski, J. 2006. GIS based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* 20(7): 703-726.
- Mimi, Z.A., and A. Assi. 2009 Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study. *Journal of Hydrology* 364: 298-310.
- Ravbar, N., and N. Goldscheider. 2007. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica* 36/3: 397-411.
- Smith, R.M. 1986. Comparing traditional methods for selecting class Intervals on choropleth maps. *The Professional Geographer* 38(1): 62-67.
- Water Resources Department of the Prefecture of Crete. 2009. Sustainable management of water resources in Crete - Telemetric system of groundwater (in Greek). Region of Crete Information Bull., (<http://www.region-crete.gr>).