

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ, ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Γκεμιτζή Α.<sup>1,2</sup>, Πεταλάς Χ.<sup>1</sup>, Τσιχριντζής Β.Α.<sup>1</sup>, Πισινάρας Β.<sup>1</sup>, Γεωργιάδης Π.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη, [agkemitz@env.duth.gr](mailto:agkemitz@env.duth.gr), [xpetalas@env.duth.gr](mailto:xpetalas@env.duth.gr), [tsihrin@otenet.gr](mailto:tsihrin@otenet.gr), [vpsinar@env.duth.gr](mailto:vpsinar@env.duth.gr)

<sup>2</sup> Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Δ/ση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Μητροπολίτη Χρυσοστόμου 1β, 65101 Καβάλα, [yr-remth@otenet.gr](mailto:yr-remth@otenet.gr)

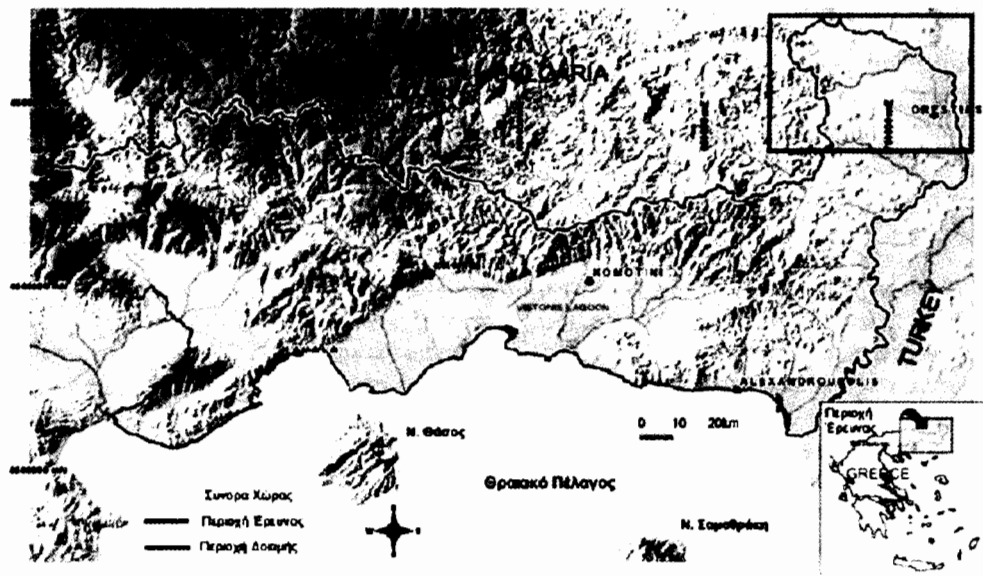
## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο καθορισμός της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων στη ρύπανση αποτελεί τα τελευταία χρόνια αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, με στόχο τον εντοπισμό περιοχών οι οποίες παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο ρύπανσης. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια μέθοδο εκτίμησης της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων συνδυάζοντας κριτήρια που αφορούν στις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα, με κριτήρια που σχετίζονται με τις εξωτερικές επιδράσεις στο σύστημα, και αφορούν κυρίως την κοινωνική και οικονομική κατάσταση της περιοχής, τόσο για σημειακές όσο και για μη σημειακές πηγές ρύπανσης, σε περιφερειακή κλίμακα. Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων, ενώ η Πολυκριτηριακή Ανάλυση σε συνδυασμό με την Ασαφή Λογική καθόρισαν τον τρόπο συνδυασμού των δεδομένων στο τελικό αποτέλεσμα. Εκτός από την τυπική διαδικασία καθορισμού βαρών για τα διάφορα κριτήρια, εφαρμόστηκε μια δεύτερη βαθμονόμηση των κριτηρίων, αυτή τη φορά σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel by pixel basis), έτσι ώστε να καταστεί δυνατός ο έλεγχος του βαθμού αυστηρότητας που χρησιμοποιήθηκε στο τελικό αποτέλεσμα και να ληφθούν υπόψη οι τοπικές ιδιαιτερότητες των υδροφορέων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο ηπειρωτικό τμήμα της περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, σε μια έκταση 14.000 km<sup>2</sup>. Η μεθοδολογία δοκιμάστηκε και βαθμονομήθηκε με βάση μετρημένες συγκεντρώσεις νιτρικών στα υπόγεια νερά της περιοχής του Άρδα, στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Έτσι προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με την ευαισθησία της μεθόδου στον τρόπο βαθμονόμησης και συνάθροισης των κριτηρίων.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων τα τελευταία χρόνια αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, επειδή με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται περιοχές όπου πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία των υπόγειων υδροφορέων στη ρύπανση. Ο όρος τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων περιλαμβάνει δύο βασικές παραμέτρους: την ιδιοτρωτότητα (in-

trinsic vulnerability) και την ειδική τρωτότητα (specific vulnerability) (Gogu et al. 2000). Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην τρωτότητα των υπογείων υδάτων από ρύπους που προέρχονται από ανθρωπίνες δραστηριότητες, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ενδογενή υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, ενώ είναι ανεξάρτητη από τη φύση των ρύπων. Ο δεύτερος όρος καθορίζεται για κάποιον συγκεκριμένο ρύπο ή για μια ομάδα ρύπων.



Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές καθορισμού της τρωτότητας των υπογείων υδάτων. Οι πιο γνωστές είναι οι εξής: η μέθοδος DRASTIC (Aller et al. 1987), η μέθοδος GOD (Foster 1987), η μέθοδος AVI (Stempvoort et al. 1993), η μέθοδος SINTACS (Civita 1994), η μέθοδος ISIS (Civita et al. 1995), η Ιρλανδική μέθοδος (Daly et al. 2002), η Γερμανική μέθοδος (Von Hoyer et al. 1998) και η μέθοδος EPIK (Doerfliger et al. 1999). Σύγκριση των παραπάνω μεθόδων καθορισμού τρωτότητας έχει γίνει από τους Gogu (2000) και Gogu et al. (2003), και έδειξε ότι υπάρχει ένα μεγάλο εύρος στα παραγόμενα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις τα αποτελέσματα αυτά δεν βρίσκονται σε συμφωνία. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή η τρωτότητα των υπογείων υδροφορέων δεν είναι μια μετρήσιμη ποσότητα, ενώ η επιλογή μεταξύ των διαφόρων μεθόδων καθορισμού της είναι συχνά δύσκολη. Σε πρόσφατες μελέτες (Dixon et al. 2002, Dixon 2004), γίνεται πάντως κάποια απόπειρα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των μεθόδων καθορισμού τρωτότητας με δεδομένα ποιότητας υπογείων υδάτων, ενώ επιχειρείται και ανάλυση της ευαισθη-

σίας.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων που αναπτύχθηκε από τους Gemitzi et al. (2005), στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (Σχ. 1). Στην εργασία τους αυτή (Gemitzi et al. 2005), οι παραπάνω ερευνητές ανέπτυξαν μια μέθοδο καθορισμού της τρωτότητας των υπογείων υδροφορέων στη ρύπανση, σε περιφερειακή κλίμακα, η οποία λαμβάνει υπόψη τα ενδογενή υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων, καθώς και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους, όπως είναι η κατανομή του πληθυσμού και η συγκέντρωση ρυπογόνων δραστηριοτήτων (π.χ., ΒΙ.ΠΕ., Χ.Υ.Τ.Α., οδικές αρτηρίες, αλυκές, αεροδρόμια, λιμάνια, δεξαμενές πετρελαίου, κ.α.). Επιπλέον παράμετροι όπως η παρουσία γεωθερμικών πεδίων ή περιοχών διείσδυσης του θαλασσινού νερού, εισέρχονται στην υπολογιστική διαδικασία, εμπλουτίζοντας τη μέθοδο με παράγοντες οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων και ενσωματώνοντάς τα στους υπολογισμούς περιφερειακής κλίμακας.

Η περιοχή εφαρμογής της παραπάνω μεθόδολογίας είναι εκτεταμένη, με εμβαδό 14.000 km<sup>2</sup> περίπου. Στην περιοχή αυτή απαντώνται όλα τα είδη υδροφορέων, δηλ. υπό πίεση, ελεύθεροι, καρστικοί και ρωγμώδεις. Η μέθοδος δεν επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο τύπο υδροφορέα, όπως άλλες μέθοδοι όπως π.χ. η μέθοδος EPIK (Doerflinger et al. 1998), η οποία έχει αναπτυχθεί ειδικά για καρστικούς υδροφορείς (Gogu et al. 2000). Επίσης, διάφορες δραστηριότητες όπως η αγροτική, η βιομηχανική, αστικές δραστηριότητες, κ.α., λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης, εκθέτοντας τους υδροφορείς σε ένα μεγάλο εύρος ρύπων.

Η τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) σε συνδυασμό με την τεχνική της πολυκριτηριακής ανάλυσης και της ασαφούς λογικής χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των στοιχείων και την παραγωγή επιπέδων πληροφορίας που συνδέονται με τους παράγοντες που εξετάζονται. Η διαδικασία περιλαμβάνει μετατροπή της κλίμακας μέτρησης κάθε επί μέρους επιπέδου πληροφορίας σε συγκρίσιμες τιμές και συνάθροιση των επί μέρους παραγόντων για την κατασκευή των ενδιάμεσων και τελικών χαρτών τρωτότητας υπογείων υδροφορέων.

Η διαδικασία συνάθροισης των παραγόντων περιλαμβάνει τη διάκρισή τους σε τρεις ομάδες και απόδοση συντελεστών βάρους σε κάθε ομάδα ξεχωριστά, ακολουθώντας τη διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης AHP (Analytical Hierarchy Process) (Saaty 1977, Pavlikakis & Tsihrintzis 2003). Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ένα βήμα παραπέρα από την τυπική μέθοδο AHP. Έτσι αποδίδεται ένα δεύτερο σύνολο συντελεστών βάρους, οι οποίοι ονομάζονται συντελεστές βαρών προτεραιότητας (Order Weights), οι οποίοι εφαρμόζονται σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel), κατά τη σειρά προτεραιότητας των παραγόντων σε κάθε σημείο (Eastman 2003), μεταβάλλοντας έτσι το βαθμό στον οποίο οι συντελεστές βάρους των παραγόντων επηρεάζουν τη διαδικασία συνάθροισης. Η εφαρμογή της μεθόδου συνάθροισης των συντελεστών βαρών προτεραιότητας (Ordered Weighted

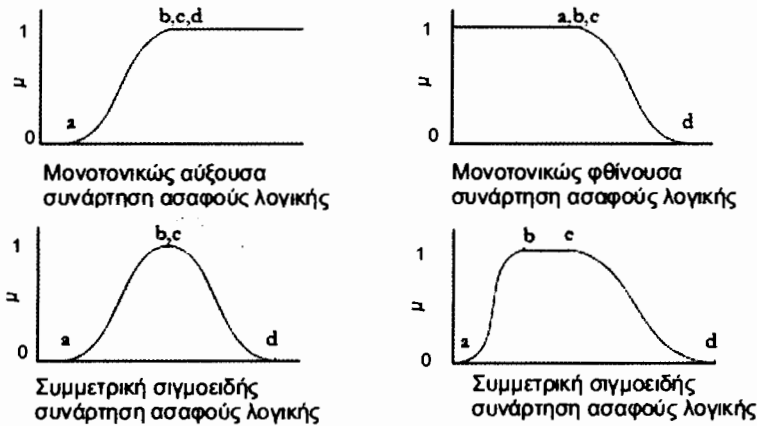
Averaging) παρουσιάστηκε από τον Eastman (2003), χρησιμοποιώντας μια υποθετική περίπτωση χωροθέτησης. Στην εργασία αυτή γίνεται μια πρώτη προσπάθεια εφαρμογής αυτής της σχετικά νέας και πειραματικής τεχνικής σε μια πραγματική περίπτωση.

Για κάθε μια από τις τρεις ομάδες κριτηρίων ένα ενδιάμεσος χάρτης τρωτότητας των υπογείων υδροφορέων κατασκευάστηκε. Αυτοί οι τρεις χάρτες συνδυάστηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους για να παραχθεί ο συνθετικός χάρτης τρωτότητας. Για να διαπιστωθεί η ευαισθησία και η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδολογίας, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μετρημένες τιμές νιτρικών σε γεωτρήσεις της περιοχής του ποταμού Άρδα (Σχ. 1). Αυτή η σύγκριση ελαχιστοποιεί την υποκειμενικότητα της μεθόδου και την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική.

## 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Αρχικά η περιοχή μελέτης διακριτοποιήθηκε σε στοιχειώδεις υποπεριοχές διαστάσεων 60 m x 60 m. Αρχικά όλοι οι παράγοντες ποσοτικοποιήθηκαν σε επίπεδο byte με εύρος τιμών από 0 ως 255, το οποίο προσφέρει τη μέγιστη δυνατή διαφοροποίηση κατά την ανάλυση δεδομένων σε επίπεδο byte, ενώ απαιτεί το μισό υπολογιστικό όγκο από αυτόν που χρειάζονται τα κανονικά αρχεία ακεραίων δύο byte (Eastman 2003).

Το μηδέν αποδίδεται στις λιγότερο τρωτές περιοχές, ενώ το 255 στις περισσότερες τρωτές περιοχές, μετατρέποντας έτσι τις διαφορετικές μονάδες μέτρησης των διαφόρων παραγόντων, ο οποίοι αποτελούν επίπεδα πληροφορίας στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, σε συγκρίσιμες τιμές, χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ασαφούς λογικής. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν είτε μονοτονικά αύξουσες, είτε μονοτονικά φθίνουσες σιγμοειδείς ("s-shaped") συναρτήσεις ασαφούς λογικής, οι οποίες καθορίστηκαν για κάθε έναν από τους υπό εξέταση παράγοντες. Οι συναρτήσεις αυτού του τύπου (σιγμοειδείς) είναι ίσως οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στη θεωρία της ασαφούς λογικής (Eastman 2003),



Σχήμα 2. Σιγμοειδείς συναρτήσεις ασαφούς λογικής

προσφέροντας μια βαθμιαία μετάβαση από τη μη συμμετοχή (non-membership) η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή 0, στην πλήρη συμμετοχή (complete membership) που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή 1. Η σιγμοειδής συνάρτηση ορίζεται από τέσσερις παραμέτρους (a: η τιμή της συνάρτησης αυξάνεται πέραν του μηδενός, b: η συνάρτηση γίνεται ίση με 1, c: η συνάρτηση φθίνει κάτω από το 1, d: η συνάρτηση γίνεται 0) (Σχ. 2), ενώ εκφράζεται ως:

$$\mu(x) = \cos^2 a \quad (1)$$

όπου, για την περίπτωση μιας μονοτονικά φθίνουσας συνάρτησης:

$$a = \frac{x - c}{d - c} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (1a)$$

όταν  $x < c$ ,  $\mu(x) = 1$

Για την περίπτωση μιας μονοτονικά αύξουσας συνάρτησης:

$$a = \frac{1 - (x - a)}{b - a} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (1b)$$

όταν  $x > b$ ,  $\mu(x) = 1$ .

Δώδεκα παράγοντες περιλαμβάνονται στην υπολογιστική διαδικασία, οι οποίοι διακρίνονται σε τρεις κύριες ομάδες, ανάλογα με τον τρόπο που επηρεάζουν την τρωτότητα των υπόγειων υδρο-

φορέων στη ρύπανση. Συγκεκριμένα οι παράγοντες που εξετάστηκαν είναι οι ακόλουθοι: (1) Είδος υδροφορέα, (2) Βάθος εντοπισμού υδροφόρου οριζοντα (Depth to water table), (3) Υδραυλική αγωγιμότητα, (4) Επιφανειακή απορροή, (5) Χρήσεις γης (μη σημειακές πηγές ρύπανσης), (6) Σημειακές ρυπογόνες δραστηριότητες (σημειακές πηγές ρύπανσης), (7) Εγγύτητα σε ποτάμια, (8) Εγγύτητα σε κύριες οδικές αρτηρίες, (9) Εγγύτητα σε οικισμούς, (10) Παρουσία περιβαλλοντικά προστατευόμενων περιοχών, (11) Παρουσία γεωθερμικών πεδίων, και (12) Παρουσία ζωνών θαλάσσιας διείσδυσης.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τους παράγοντες 1 ως 3, οι οποίοι σχετίζονται με τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, ενώ δεν εξαρτώνται από εξωτερικές επιδράσεις στο σύστημα και άρα χαρακτηρίζουν την ιδιοτροπότητα των υδροφορέων. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τους παράγοντες 4 ως 10, οι οποίοι σχετίζονται με την κοινωνικοοικονομική κατάσταση και την ανάπτυξη μιας περιοχής, αντικατοπτρίζοντας έτσι την επίδραση των εξωγενών και ανθρωπογενών δυνάμεων στο υδροφόρο σύστημα, περιγράφοντας έτσι την ειδική τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων. Σε αυτήν τη δεύτερη ομάδα, περιλαμβάνεται επίσης και ο παράγοντας που περιγράφει τη συγκέντρωση της επιφανειακής απορροής, επειδή θε-

ωρείται ένας εξωτερικός παράγοντας στο υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει τους παράγοντες 11 και 12, οι οποίοι είναι σχετικοί με την παρουσία ειδικών γεωλογικών συνθηκών, όπως περιοχές που επηρεάζονται από τη θαλάσσια διείσδυση ή περιοχές που εμφανίζουν γεωθερμικά πεδία. Στην παρούσα εργασία, αυτές οι τρεις διακριτές κατηγορίες εξετάζονται ξεχωριστά, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία τριών ενδιάμεσων χαρτών τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων στη ρύπανση.

Στην κάθε ομάδα αποδίδονται συντελεστές βάρους σε κάθε παράγοντα, ανάλογα με το πόσο σημαντικός θεωρείται ο εκάστοτε παράγοντας. Για να γίνει όμως η διαδικασία απόδοσης βαρών πιο αντικειμενική, οι παράγοντες σε κάθε ομάδα εξετάζονται κατά ζεύγη, σύμφωνα με την τεχνική που αναπτύχθηκε από τον Saaty (Saaty 1977), και είναι γνωστή ως Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP) (Pavlikakis & Tsihrintzis 2003). Στη διαδικασία πολυκριτηριακής ανάλυσης που ακολουθείται εδώ, χρησιμοποιείται ένας γραμμικός συνδυασμός των παραγόντων, όπου είναι απαραίτητο οι συντελεστές βάρους για τους διαφόρους παράγοντες να έχουν άθροισμα 1. Σύμφωνα με τη μέθοδο του Saaty (1977), οι συντελεστές βάρους των παραγόντων μπορούν να υπολογιστούν παίρνοντας το κύριο χαρακτηριστικό διάνυσμα (principal eigenvector) του αντίστροφου ενός τετραγωνικού πίνακα. Ο πίνακας αυτός έχει τιμές που προκύπτουν από τη σύγκριση κατά ζεύγη των παραγόντων. Η σύγκριση κατά ζεύγη αφορά στη σχετική σπουδαιότητα δύο παραγόντων που εμπλέκονται στον υπολογισμό κάποιας συγκεκριμένης ποσότητας, που στην παρούσα περίπτωση είναι η τρωτότητα. Μπορεί επίσης να υπολογιστεί ένας δείκτης συνοχής, γνωστός ως λόγος συνοχής (consistency ratio, CR) (Saaty 1977), ο οποίος παρουσιάζει την πιθανότητα απόδοσης των τιμών στον πίνακα συγκρίσεων με τυχαίο τρόπο. Σύμφωνα με τον Saaty (1977), οι πίνακες με τιμή  $CR > 0.1$  πρέπει να επαναυπολογιστούν.

Επιπρόσθετα, στην παρούσα εργασία, ένα α-

κόμα σύνολο συντελεστών βάρους, οι συντελεστές βάρους προτεραιότητας, εφαρμόζονται σε κάθε ομάδα παραγόντων ακολουθώντας τη διαδικασία που είναι γνωστή ως συνάθροιση συντελεστών βάρους προτεραιότητας (Ordered Weighted Average, OWA), (Eastman 2003). Οι συντελεστές βάρους προτεραιότητας είναι αρκετά διαφορετικοί από τους συντελεστές βάρους των παραγόντων, επειδή δεν εφαρμόζονται στους ξεχωριστούς παράγοντες, αλλά εφαρμόζονται σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) ανάλογα με την τιμή που έχει ο κάθε παράγοντας στη συγκεκριμένη θέση (εικονοστοιχείο). Έτσι σε πρώτη φάση εφαρμόζονται οι συντελεστές βάρους σε κάθε παράγοντα. Στη συνέχεια ελέγχεται σε κάθε εικονοστοιχείο η τιμή του κάθε παράγοντα και καθορίζεται η αλληλουχία των συντελεστών βάρους προτεραιότητας. Ο παράγοντας με τη μικρότερη τιμή στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο παίρνει τον συντελεστή βάρους προτεραιότητας 1, ο παράγοντας με την αμέσως υψηλότερη τιμή παίρνει τον δεύτερο συντελεστή βάρους προτεραιότητας, κ.ο.κ. Αυτή η διαδικασία προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής των υπολογισμών, ανάλογα με το πόση αυστηρότητα επιθυμείται να περιέχεται στο τελικό αποτέλεσμα, δηλ. αν τα εικονοστοιχεία της περιοχής μελέτης ωθούνται να λάβουν τιμές από τους παράγοντες με χαμηλές τιμές ή με υψηλές τιμές αντίστοιχα.

Παίρνοντας ως παράδειγμα την ομάδα παραγόντων 1, που περιέχει τους παράγοντες που σχετίζονται με την ιδιοτρωτότητα του υδροφορέα, δηλ. το είδος του υδροφορέα, την υδραυλική αγωγιμότητα και το βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα, η απόδοση συντελεστών βάρους προτεραιότητας μπορεί να έχει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Στην πρώτη περίπτωση το βάρος κατανέμεται εξίσου σε όλους τους παράγοντες ανεξάρτητα από την αλληλουχία τους. Τα αποτελέσματα βρίσκονται ακριβώς στη μέση μεταξύ ρίσκου και αυστηρότητας. Στη δεύτερη περίπτωση, ο παράγοντας με τη χαμηλότερη τιμή, δηλαδή αυτός που παρουσιάζει τη μικρότερη τρωτότητα, λαμβάνει όλο βά-

**Πίνακας 1.** Παράδειγμα απόδοσης συντελεστών βάρους προτεραιότητας.

| Μέτριο επίπεδο ρίσκου – Μετρίως αυστηρή απόφαση |                 |                       |                                     |
|---|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Παράγοντες                                      | Είδος υδροφορέα | Υδραυλική αγωγιμότητα | Βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα |
| Βάρη προτεραιότητας                             | 0.33            | 0.33                  | 0.33                                |
| Θέση  | 1 <sup>η</sup>  | 2 <sup>η</sup>        | 3 <sup>η</sup>                      |
| Υψηλό επίπεδο ρίσκου – Καθόλου αυστηρή απόφαση  |                 |                       |                                     |
| Παράγοντες                                      | Είδος υδροφορέα | Υδραυλική αγωγιμότητα | Βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα |
| Βάρη προτεραιότητας                             | 1               | 0                     | 0                                   |
| Θέση  | 1 <sup>η</sup>  | 2 <sup>η</sup>        | 3 <sup>η</sup>                      |
| Χαμηλό επίπεδο ρίσκου – Πολύ αυστηρή απόφαση    |                 |                       |                                     |
| Παράγοντες                                      | Είδος υδροφορέα | Υδραυλική αγωγιμότητα | Βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα |
| Βάρη προτεραιότητας                             | 0               | 0                     | 1                                   |
| Θέση  | 1 <sup>η</sup>  | 2 <sup>η</sup>        | 3 <sup>η</sup>                      |

ρος, ανεξάρτητα από τους συντελεστές βάρους που είχαν αρχικά αποδοθεί. Το αποτέλεσμα εμπειριέχει υψηλό ποσοστό κινδύνου, επειδή όλα τα εικονοστοιχεία στην περιοχή μελέτης, παίρνουν την τιμή του παράγοντα με τη χαμηλότερη τρωτότητα. Ο ενδιάμεσος χάρτης τρωτότητας που θα παραχθεί με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ πιθανό να έχει υποεκτιμημένες τιμές τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων, επειδή παίρνει τιμές από τον παράγοντα με τη χαμηλότερη βαθμολογία. Σε αντίθεση, η τρίτη περίπτωση, παρουσιάζει την επίδραση της απόδοσης όλου του βάρους στον παράγοντα με την υψηλότερη τιμή. Έτσι το κάθε εικονοστοιχείο παίρνει τιμές από τον παράγοντα με την μεγαλύτερη τρωτότητα, με ένα παραγόμενο αποτέλεσμα πολύ συντηρητικό. Με αυτόν τον τρόπο, εκτεταμένες περιοχές λαμβάνουν υπερεκτιμημένες τιμές τρωτότητας, οδηγώντας σε μια πολύ αυστηρή προσέγγιση χωρίς ρίσκο αλλά και χωρίς ευελιξία. Η εξώθηση των συντελεστών βάρους προτεραιότητας προς τον παράγοντα με τη μικρότερη ή τη μεγαλύτερη τιμή έχει ως αποτέλεσμα όλες τις πιθανές περιπτώσεις ανάμεσα στο ρίσκο και την αυστηρότητα.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας απόδοσης βαρών προτεραιότητας αποτελεί και η δυνατότητα εστίασης σε παράγοντες τοπικής μόνο σημασίας. Έτσι ενώ ο παράγοντας θαλάσσιας διείδυσης είναι καθοριστικός για την ποιότητα των υπογείων υδάτων κοντά στην ακτή, δεν έχει απολύτως καμία σημασία για περιοχές που

βρίσκονται στην ενδοχώρα. Η μεθοδολογία αυτή προσφέρει έτσι την ευελιξία εναλλαγής της σπουδαιότητας των παραγόντων σε κάθε εικονοστοιχείο ξεχωριστά.

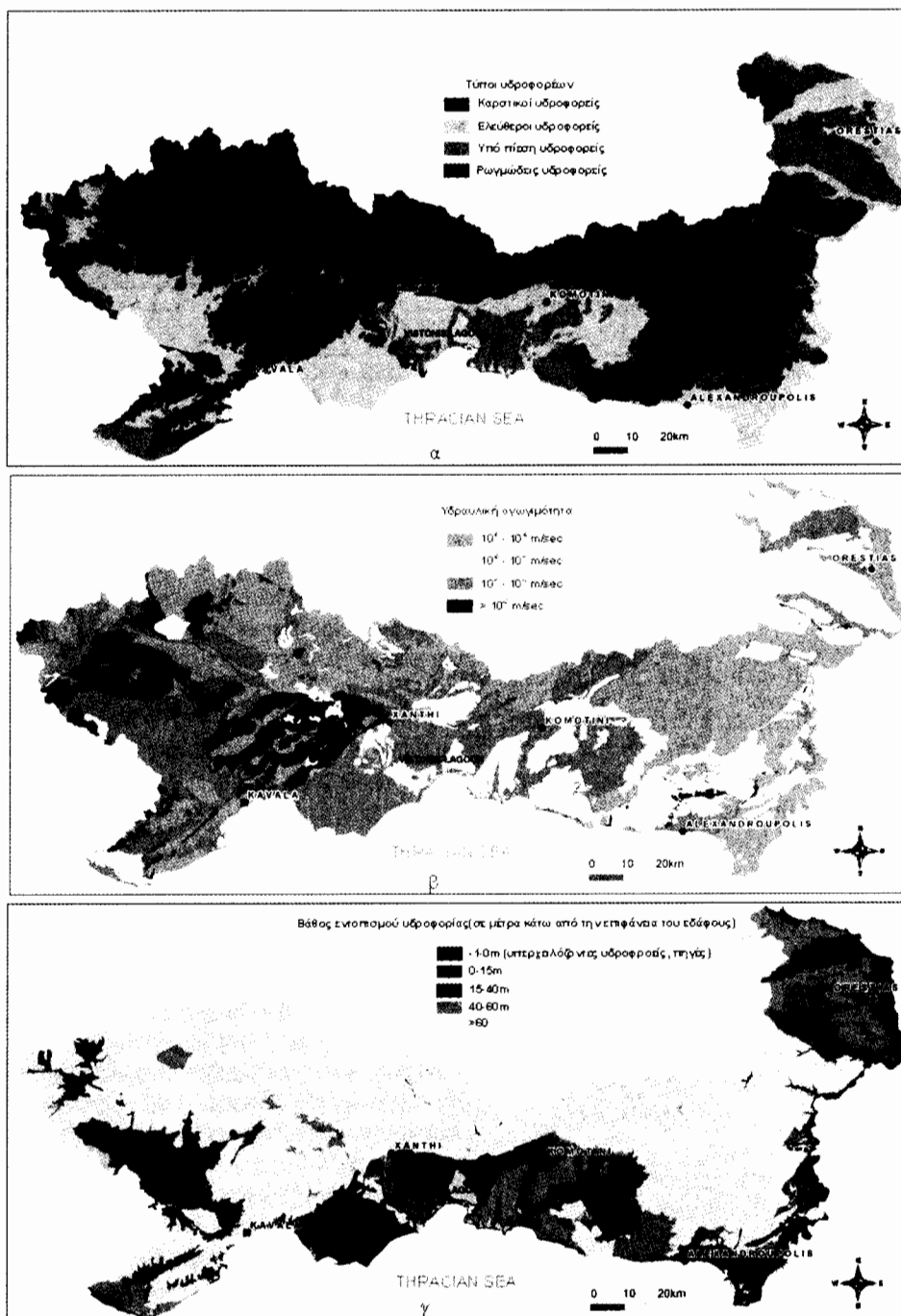
Για να εφαρμοστεί η προαναφερθείσα μεθοδολογία, όλοι οι παράγοντες εισήχθησαν ως επίπεδα πληροφορίας στο πρόγραμμα Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) MapInfo Professional 7.8. Τα ψηφιδωτά δεδομένα (raster data) υπέστησαν επεξεργασία με το πρόγραμμα Vertical Mapper 3.1, ενώ η ποσοτικοποίηση των παραγόντων μέσω των συναρτήσεων ασαφούς λογικής και η εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης έγινε με το πρόγραμμα GIS Idrisi Kilimanjaro.

### 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Ομάδα παραγόντων 1 – Καθορισμός της ιδιοτρωτότητας των υδροφορέων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ομάδα 1 περιλαμβάνει παράγοντες που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων, δηλ. το είδος του υδροφορέα, την υδραυλική αγωγιμότητα και το βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα (Σχ. 3).

*Παράγοντας 1 – Είδος υδροφορέα:* Τέσσερις διακριτές κατηγορίες υδροφορέων εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης: οι ελεύθεροι, οι υπό πίεση, οι καρστικοί (ανθρακικοί) και οι ρωγμώδεις υδροφορείς (υδροφορείς σε πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα) (Σχ. 3α). Ενώ οι περισσότεροι παράγοντες μπορούν αυτομάτως να μετατρα-



Σχήμα 3. Παράγοντες που σχετίζονται με τις υδραυλικές ιδιότητες των υδροφορέων

τούν στην επιθυμητή κλίμακα με τη χρήση κάποιας μαθηματικής συνάρτησης, η ποσοτικοποίηση των κατηγοριοποιημένων δεδομένων, όπως είναι οι τύποι των υδροφορέων, σε μια κοινή κλίμακα, βασίζεται κυρίως στην εμπειρία σε σχέση με τη σχετική τους τρωτότητα στη ρύπανση. Η απόδοση τιμών τρωτότητας στους διάφορους τύπους υδροφορέων, βασίστηκε στην παραδοχή ότι η πιο τρωτοί τύποι υδροφορέων είναι οι καρστικοί, οι οποίοι έλαβαν την υψηλότερη τιμή (255). Οι ελεύθεροι υδροφορείς είναι οι επόμενοι πιο τρωτοί και έλαβαν τιμή 155, ενώ ακολουθούν οι υπό πίεση υδροφορείς με τιμή 75. Οι ρωγμώδεις υδροφορείς θεωρήθηκαν οι λιγότερο τρωτοί τύποι και έλαβαν τη μικρότερη τιμή (0). Οι καρστικοί υδροφορείς καταλαμβάνουν το 13.3% της περιοχής μελέτης (1808 km<sup>2</sup>), ενώ περιλαμβάνουν καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους και μάρμαρα διαφόρων ηλικιών, από το μέσο Μεσοζωικό ως το Ηώκαινο. Η καρστικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας με συνέπεια η τρωτότητα στη ρύπανση να είναι ιδιαιτέρως υψηλή. Οι ελεύθεροι υδροφορείς καταλαμβάνουν το 25.2% της περιοχής μελέτης (3427 km<sup>2</sup>) και αποτελούνται από πορώδεις σχηματισμούς κυρίως των νεώτερων αλλουβιακών αποθέσεων, Τεταρτογενούς ως άνω Μειοκαίνου ηλικίας. Επειδή δεν προστατεύονται από κάποιον στεγανοποιητικό σχηματισμό, οποιοσδήποτε ρύπος ελευθερώνεται στην επιφάνεια μπορεί εύκολα να φτάσει στα υπόγεια νερά. Γι' αυτό το λόγο οι ελεύθεροι υδροφορείς θεωρούνται ως οι δεύτεροι πιο τρωτοί τύποι υδροφορέων. Οι υπό πίεση υδροφορείς καταλαμβάνουν το 13.7% (1863 km<sup>2</sup>) της περιοχής μελέτης, ενώ επειδή προστατεύονται από κάποιο στεγανοποιητικό στρώμα, οι ρύποι δεν φτάνουν εύκολα στο υπόγειο νερό. Αποτελούνται κυρίως από ιζηματογενείς και μεταιζηματογενείς σχηματισμούς, ηλικίας από άνω Μεσοζωικό ως Πλειόκαινο. Οι λιγότερο τρωτοί σχηματισμοί είναι οι ρωγμώδεις, οι οποίοι δεν μπορούν να θεωρηθούν ως τυπικοί υδροφορείς, υπό την έννοια ότι δεν αποτελούν υδροφόρους σχηματισμούς. Το νερό κυκλοφορεί μέσω των ρηγμάτων και των ρωγμών

που υπάρχουν λόγω των τεκτονικών γεγονότων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν. Στην περιοχή μελέτης οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιλαμβάνουν ρωγμώδεις υδροφορείς καταλαμβάνουν το 47.8% της έκτασης (6500 km<sup>2</sup>), ενώ απαντώνται κυρίως στο βόρειο ορεινό τμήμα. Αποτελούνται από παλιά πετρώματα που συνθέτουν την Ελληνική ενδοχώρα, Παλαιοζωικής ή και παλαιότερης ηλικίας. Τα είδη των πετρωμάτων που δομούν τους ρωγμώδεις υδροφορείς είναι: γνεύσιοι, αμφιβολίτες, λεπτινίτες, γρανοδιορίτες, μιγματίτες, μεταβασίτες, υπερβασικά πετρώματα. Επειδή έχουν υποστεί την προαλπική τεκτονική καθώς και την αλπική παραμόρφωση, εμφανίζονται ρηγματωμένοι.

*Παράγοντας 2 – Υδραυλική αγωγιμότητα:* Για τον καθορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κάθε σχηματισμού, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από περίπου 2000 γεωτρήσεις. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από διάφορες πηγές, όπως είναι το IΓ-ME (Βεργής 2000, Παπαδόπουλος et al. 2002), το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης και παλαιότερες μελέτες στην περιοχή (Πεταλάς 1997, Πεταλάς et al. 2001, Διαμαντής 1993, Πανίλας 1998, Πλιάκας et al. 1999), όπως και δεδομένα από ιδιώτες γεωτρυπανιστές. Σε περίπου 50 γεωτρήσεις είχαν εκτελεστεί δοκιμαστικές αντλήσεις και υπολογίστηκαν οι υδραυλικές παράμετροι των αντίστοιχων υδροφορέων. Σε περιοχές όπου δεν υπήρχαν δεδομένα, η υδραυλική αγωγιμότητα ορίστηκε βάσει βιβλιογραφικών αναφορών (Fetter 1994), του είδους του γεωλογικού σχηματισμού, του μεγέθους των κόκκων και του βαθμού διαγένεσης. Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που αποδόθηκαν είναι οι εξής:  $10^{-7}$  ως  $10^{-9}$  m/s για μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, μιγματίτες, μεταβασίτες, αμφιβολίτες, μη καρστικοποιημένα μάρμαρα),  $10^{-8}$  ως  $10^{-7}$  m/s για αργίλους και μάργες,  $10^{-6}$  m/s για φλυσχοειδείς σχηματισμούς,  $10^{-5}$  ως  $10^{-3}$  m/s για άμμους ανάλογα με το λεπτόκοκκο ποσοστό τους,  $10^{-2}$  m/s ως  $10^{-3}$  m/s για χαλίκια και κροκαλοπαγή,  $10^{-2}$  ως  $10^{-1}$  m/s για καρστικοποιημένα μάρμαρα και ασβεστόλιθους (Σχ. 3β). Για τη μετατροπή των τιμών αυτών στην κλίμακα 0 – 255, χρησιμοποιήθηκε μια



μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση ασαφούς λογικής. Τα σημεία καμπής της συνάρτησης ορίστηκαν ως εξής:  $10^{-1}$  όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 1 (μέγιστη τρωτότητα) και  $10^{-9}$  όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0 (ελάχιστη τρωτότητα).

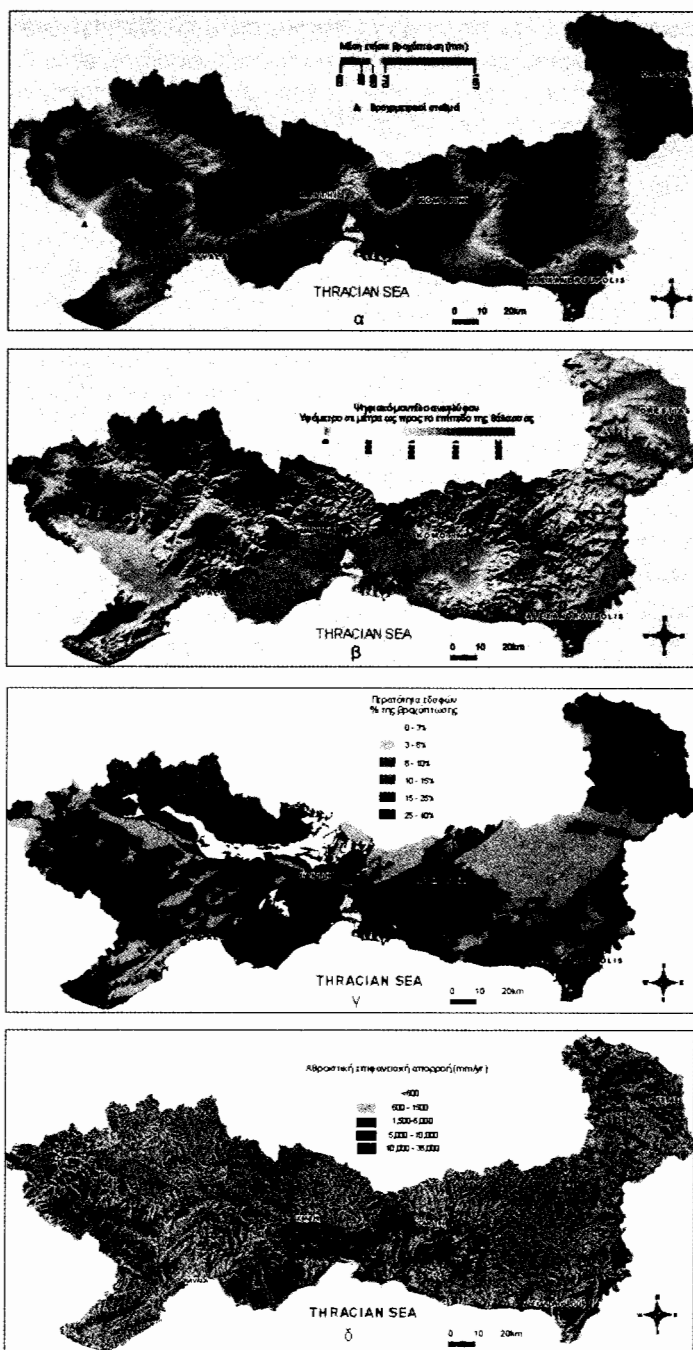
*Παράγοντας 3 – Βάθος εντοπισμού υδροφόρου ορίζοντα:* Ο παράγοντας αυτός ορίστηκε χρησιμοποιώντας τις γεωτρήσεις της προηγούμενης παραγράφου. Επιπλέον, δεδομένα από 168 πηγές ενσωματώθηκαν στη βάση δεδομένων. Οι θέσεις των πηγών θεωρήθηκαν ως σημεία όπου το βάθος εντοπισμού υδροφορίας είναι ίσο με 0. Αρνητικές τιμές αυτού του παράγοντα, δηλαδή -1, δείχνουν περιοχές όπου η στάθμη των αρτεσιανών υδροφορέων ανέρχεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (υπερχειλίζουν). Μια περιμετρική ζώνη 500 μέτρων χαράχτηκε γύρω από κάθε γεώτρηση και πηγή, ενώ η τιμή του βάθους εντοπισμού νερού σε όλη αυτή τη ζώνη ορίστηκε ίση με το βάθος στο αντίστοιχο σημείο. Στους ρωγμώδεις υδροφορείς, όπου δεν εντοπίζεται συνήθως υδροφόρος ορίζοντας όπως συμβαίνει με τους κοκκώδεις υδροφορείς, αποδόθηκε μια αυθαίρετη, σχετικά υψηλή τιμή βάθους εντοπισμού υδροφορίας ίση με 100, έτσι ώστε να συνεχιστούν οι υπολογισμοί (Σχ. 3γ). Μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση ασαφούς λογικής χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των παραπάνω τιμών στην κλίμακα 1 – 255. Τα σημεία καμπής τοποθετήθηκαν στο 0 όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 1 (υψηλή τιμή τρωτότητας) και 100 όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0 (κατώτατη τιμή τρωτότητας). Τιμές μεγαλύτερες του 100 παίρνουν την ίδια τιμή συνάρτησης, δηλαδή 0, επειδή θεωρήθηκε ότι πέραν των εκατό μέτρων το βάθος δεν έχει επιπλέον επίπτωση στην τρωτότητα των υπογείων υδάτων. Στις περιοχές όπου παρατηρείται υπερχείλιση των αρτεσιανών υδροφορέων, αποδόθηκε μια αυθαίρετη τιμή ίση με 25 (χαμηλή τρωτότητα), στην κλίμακα του 0 – 255, επειδή για αυτήν την ιδιάζουσα περίπτωση η υδραυλική κλίση οδηγεί το νερό έξω από τον υδροφόρο, ελαχιστοποιώντας έτσι την περίπτωση ρύπανσης των υπογείων υδάτων σε περίπτωση απελευθέρωσης κάποιου ρύπου.

Ομάδα Παραγόντων 2 – Καθορισμός τρωτότητας υπογείων υδροφορέων σε σχέση με εξωτερικές επιδράσεις

Η ομάδα παραγόντων 2 περιλαμβάνει τους παρακάτω εξωγενείς στο υπόγειο υδροφόρο σύστημα παράγοντες: την επιφανειακή απορροφή, τις μη σημειακές χρήσεις γης, την εγγύτητα στις σημειακές χρήσεις γης, την εγγύτητα στα κύρια ποτάμια, την εγγύτητα στις κατοικημένες περιοχές, τις περιβαλλοντικά προστατευόμενες περιοχές, και την εγγύτητα στο εθνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο (Σχ. 4, 5, 6, 7).

*Παράγοντας 4 – Επιφανειακή απορροφή:* Κάθε εικονοστοιχείο στην περιοχή μελέτης λαμβάνει κάποια ποσότητα κατακρημνισμάτων (Σχ. 4α). Η ρουτίνα RUNOFF είναι ένα ειδικό εργαλείο που περιλαμβάνεται στο GIS πρόγραμμα Idrisi Kilimanjaro, που υπολογίζει τη συγκέντρωση των κατακρημνισμάτων σε κάθε εικονοστοιχείο με βάση το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM) (Eastman 2003) (Σχ. 4β), και αποτελεί μια τροποποίηση του αλγόριθμου που περιγράφεται από τους Jenson και Domingue (Jenson & Domingue 1998). Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των κατακρημνισμάτων σε κάποιο εικονοστοιχείο, τόσο πιο μεγάλη είναι η τρωτότητα των υπογείων υδροφορέων στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο. Μια απλή ανάλυση με το πρόγραμμα RUNOFF συγκεντρώνει τα κατακρημνίσματα σε επίπεδο εικονοστοιχείου, θεωρώντας ότι μια μονάδα κατακρημνισμάτων πέφτει σε κάθε στοιχειώδη υποπεριοχή. Στην παρούσα εργασία, δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου στην παραπάνω ρουτίνα οι μέσες ετήσιες ποσότητες κατακρημνισμάτων από 82 μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται διασκορπισμένοι σε όλο το εύρος της περιοχής μελέτης, για τη χρονική περίοδο 1966 – 2001. Εκτός από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, η ρουτίνα τροφοδοτήθηκε με ένα επίπεδο πληροφορίας σχετικά με τη διαπερατότητα των επιφανειακών σχηματισμών (Σχ. 4γ), έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η περατότητα των εδαφών και να προσαρμολοστούν οι αντίστοιχοι υπολογισμοί (Σχ. 4δ) (Eastman 2003).

Μια μονοτονικά αύξουσα σιγμοειδής συνάρτη-



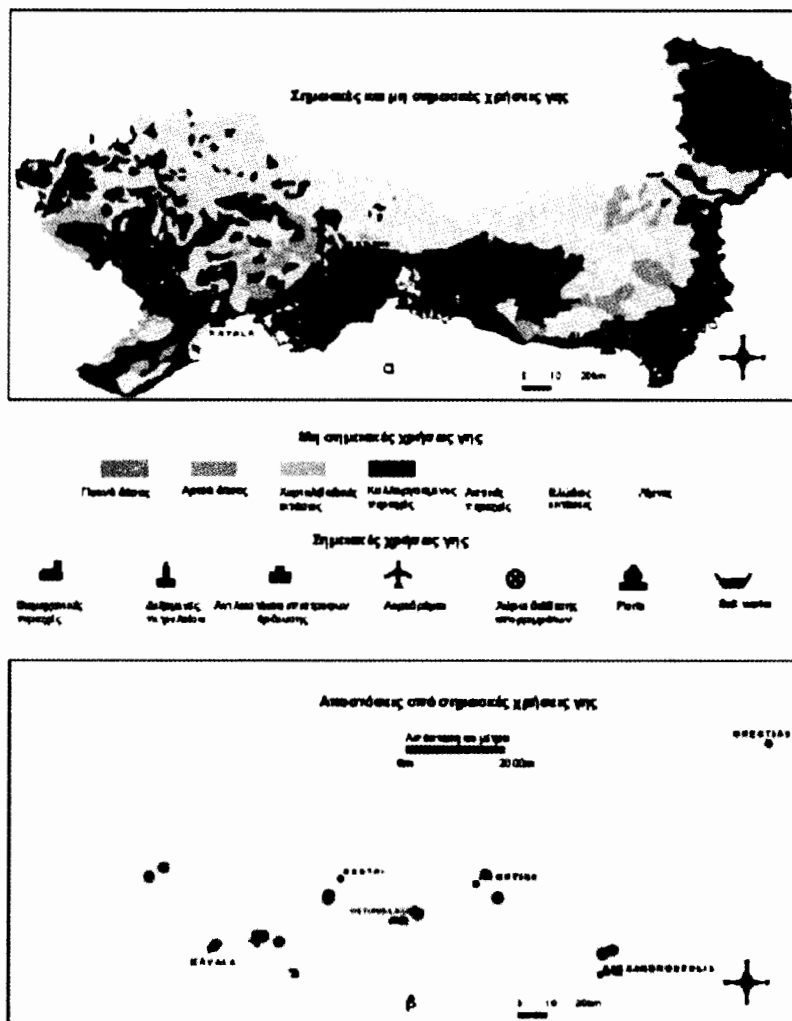
**Σχήμα 4.** α) Κατανομή κατακρημισμάτων στην περιοχή μελέτης, β) Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, γ) Περατότητα σχηματισμών, δ) Ετήσια αθροιστική επιφανειακή απορροή

ση ασαφούς λογικής εφαρμόστηκε για τη μετατροπή της αθροιστικής επιφανειακής απορροής στην κλίμακα 0 – 255. Τα σημεία καμπής της συνάρτησης ορίστηκαν: 600 mm/yr όπου η συνάρτηση γίνεται 0, και 35,000 mm/yr, όπου η συνάρτηση γίνεται 1. Η τιμή των 35,000 mm/yr, αν πολλαπλασιαστεί με το εμβαδό του εικονοστοιχείου, δηλαδή με 3600 m<sup>2</sup>, αντιστοιχεί σε μια μέση παροχή 345 m<sup>3</sup>/d. Το πρώτο και το δεύτερο σημείο καμπής επιλέχθηκαν μετά από την κατηγοριοποίηση των τιμών αθροιστικής απορροής σε 16 κατηγορίες, έτσι ώστε κάθε κατηγορία να περιλαμβάνει ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων. Το ανώτερο σημείο της πρώτης κλάσης δηλαδή τα 600 mm/yr (περίπου 6% της περιοχής μελέτης) και το κατώτερο σημείο της τελευταίας κλάσης, δηλαδή τα 35,000 mm/yr (έξοδοι λεκανών) (ανώτερο 6% της περιοχής μελέτης), καθορίστηκαν ως σημεία καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης. Τα εικονοστοιχεία με αθροιστική απορροή χαμηλότερη των 600 mm/yr ή υψηλότερη των 35,000 mm/yr, θεωρήθηκαν ότι λαμβάνουν την ίδια τιμή τρωτότητας με το πρώτο και το δεύτερο σημείο καμπής αντίστοιχα και έλαβαν τιμές συνάρτησης 0 (ελάχιστη τρωτότητα) και 1 (μέγιστη τρωτότητα), αντίστοιχα.

*Παράγοντας 5 – Μη σημειακές χρήσεις γης:* Αυτός ο παράγοντας περιλαμβάνει όλα τα είδη χρήσεων γης, που αντίθετα π.χ. με τη βιομηχανική χρήση, καταλαμβάνουν εκτεταμένες περιοχές. Έξι διακριτές κατηγορίες χρήσης γης εισήχθησαν στην υπολογιστική διαδικασία: πυκνά δάση, αραιά δάση, χορτολιβαδικές εκτάσεις, υδάτινα σώματα, αγροτικές εκτάσεις, και αστικές εκτάσεις (Σχήμα 5α). Όπως και στην περίπτωση του είδους του υδροφορέα, η μετατροπή των κατηγοριοποιημένων δεδομένων, όπως είναι οι χρήσεις γης, συνεπάγεται την απόδοση τιμών με βάση την εμπειρία (Eastman 2003), σε σχέση με τη σχετική τους τρωτότητα στη ρύπανση των υπογείων υδάτων. Στην κλίμακα 0 – 255, τιμή τρωτότητας 255 αποδόθηκε στις αγροτικές και αστικές χρήσεις γης, επειδή θεωρήθηκαν ως εξίσου ρυπογόνες δραστηριότητες, με τη μεγαλύτερη επίδραση στα υπόγεια νερά από οποιαδήποτε άλλη μη σημειακή ανθρώπινη

δραστηριότητα. Τιμή 150 αποδόθηκε στις χορτολιβαδικές εκτάσεις, όπου λαμβάνει χώρα η πλειονότητα των κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων. Τιμή 30 αποδόθηκε στα αραιά δάση και 0 στα πυκνά δάση και τα επιφανειακά υδάτινα σώματα, που αποτελούν τις λιγότερο τρωτές περιοχές από άποψη χρήσεων γης.

*Παράγοντας 6 – Εγγύτητα σε σημειακές χρήσεις γης:* Οι σημειακές χρήσεις γης περιλαμβάνουν δραστηριότητες που μπορεί να προκαλέσουν ρύπανση των υπογείων υδάτων, αν δεν παρθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Οι παρακάτω κύριες σημειακές ανθρώπινες δραστηριότητες διακρίνονται στην περιοχή μελέτης: χώροι διάθεσης απορριμμάτων, βιομηχανικές περιοχές, αεροδρόμια, δεξαμενές πετρελαίου, λιμάνια, αλυκές, και αντλιοστάσια επιστροφών από άρδευση (Σχ. 5α). Οι εγκαταστάσεις όπως τα πρατήρια υγρών καυσίμων, σπηκικοί βόθροι, καθώς και οι μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, θεωρούνται ότι αποτελούν τμήμα του αστικού ιστού και δεν εξετάζονται ξεχωριστά. Όλες οι παραπάνω δραστηριότητες δεν θεωρείται ότι έχουν την ίδια επίδραση στα υπόγεια νερά, για παράδειγμα τα στραγγίσματα από τους χώρους διάθεσης απορριμμάτων έχουν πολύ μεγαλύτερη ρυπαντική ικανότητα από τις επιστροφές των αρδεύσεων. Για αυτόν το λόγο αποδόθηκε διαφορετική βαρύτητα σε κάθε μια από τις παραπάνω δραστηριότητες. Έτσι οι χώροι διάθεσης απορριμμάτων έλαβαν βάρος 1000, οι ΒΙ.ΠΕ. 750, τα λιμάνια, τα αεροδρόμια, οι δεξαμενές πετρελαίου, οι αλυκές και τα αντλιοστάσια επιστροφών άρδευσης 500. Κατόπιν κατασκευάστηκε ένα αρχείο κανάβου, το οποίο αναπαριστά σε κάθε εικονοστοιχείο τη μέση απόστασή του από μια σειρά σημείων στην περιοχή μελέτης, σταθμισμένη ανάλογα με τη βαρύτητα του κάθε σημείου που βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένη ακτίνα έρευνας (Northwood Technologies Inc. 2001) (Σχ. 5β). Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ακτίνα 2000 μέτρων, επειδή αυτή αντιστοιχεί σε χρόνο διάδρομής 5 ετών, παίρνοντας ως μέση ταχύτητα υπογείου νερού 1.1 m/day (Wyssling et al. 1979), ενώ θεωρήθηκε επίσης ότι είναι η μέγιστη ακτίνα



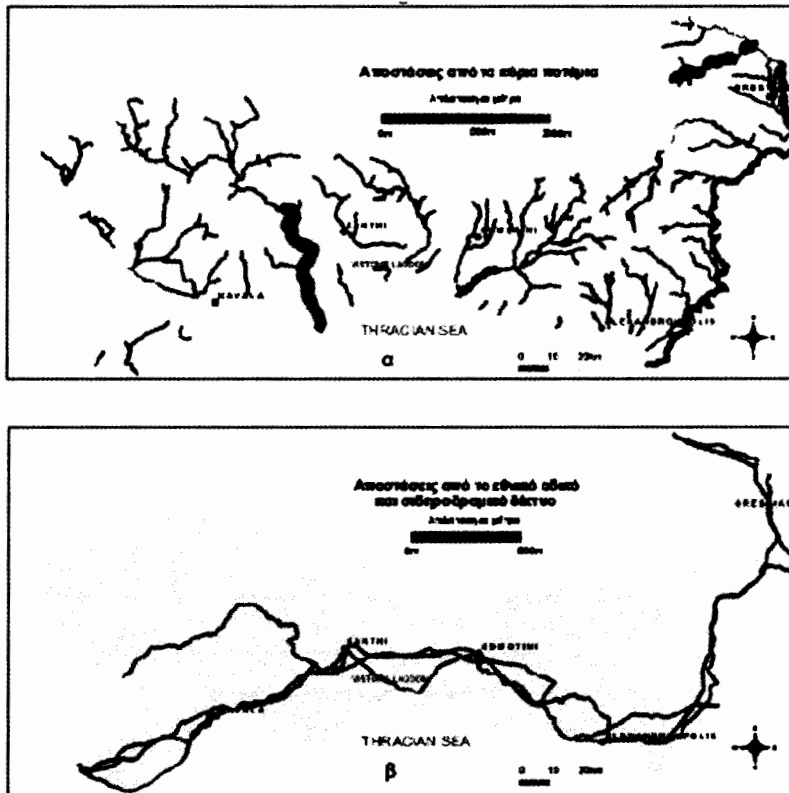
Σχήμα 5. α) Σημειωμένες και μη σημειωμένες χρήσεις γης, β) Εγγύτητα στις σημειωμένες χρήσεις γης

επίδρασης των παραπάνω δραστηριοτήτων στα υπόγεια νερά.

Μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση εφαρμόστηκε για να μετατραπούν οι υπολογισθείσες αποστάσεις σε κλίμακα 0–255. Τα σημεία καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης θεωρήθηκαν: 0 μέτρα όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 1 και 2000 μέτρα όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0. Οι αποστάσεις μεγαλύτερες των 2000 μέτρων από τις σημειωμένες δραστηριότητες, θεωρήθηκε ότι έχουν την ίδια ελάχιστη τιμή συνάρτησης, δη-

λαδή 0, επειδή δεν αναμένεται τρωτότητα στην ρύπανση των υπογείων υδάτων σε τέτοιες αποστάσεις.

*Παράγοντας 7 – Εγγύτητα στα κύρια ποτάμια:* Κάθε ποτάμι αποτελεί έναν δυνητικό αποδέκτη επεξεργασμένων ή ανεπεξέργαστων λυμάτων. Έτσι οι υδροφορείς πλησίον ποταμών και ειδικά αυτοί που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τα ποτάμια, έχουν αυξημένη πιθανότητα ρύπανσης. Οι αποστάσεις από τα κύρια ποτάμια υπολο-

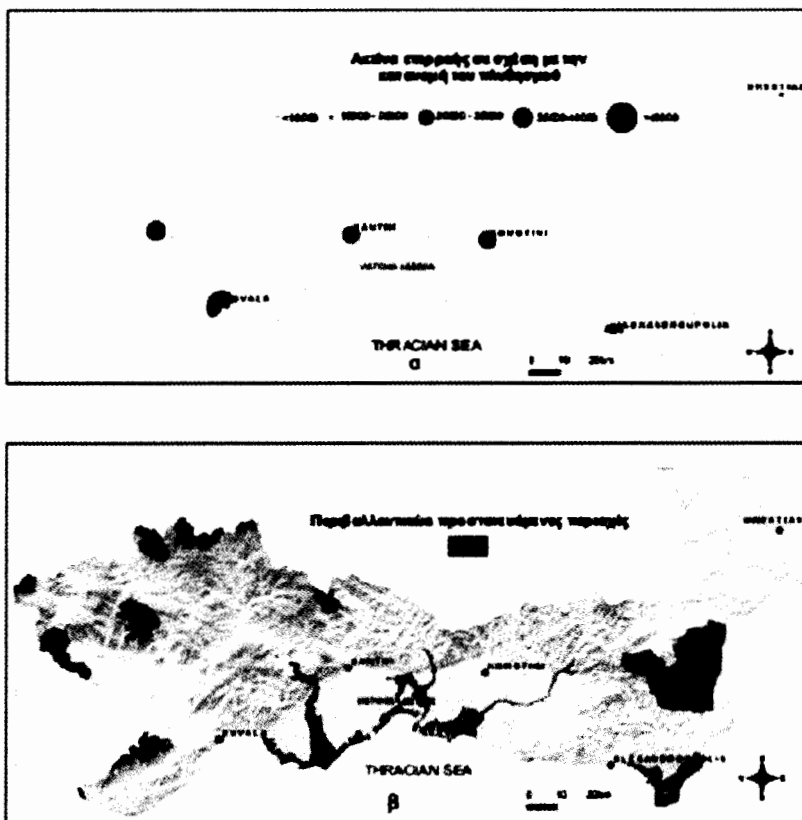


**Σχήμα 6.** Εγγύτητα στα α) κύρια ρέματα, β) εγγύτητα στο εθνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο

γίστηκαν και μετατράπηκαν σε κλίμακα 0 - 255, χρησιμοποιώντας μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδή συνάρτηση. Τα σημεία καμπής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαφορετικά για τα τρία μεγάλα ποτάμια της περιοχής μελέτης, δηλαδή για τον Έβρο, τον Άρδα και το Νέστο, τα οποία έχουν υδραυλική επικοινωνία με τους παρακείμενους υδροφορείς (Βεργής 2000, Παπαδόπουλος et al. 2002) και διαφορετικά για τα ποτάμια μικρότερης σημασίας, όπου δεν υπάρχουν ενδείξεις υδραυλικής επικοινωνίας με παρακείμενους υδροφορείς. Έτσι τα σημεία καμπής για την πρώτη περίπτωση ορίστηκαν σε 0 μέτρα, όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 1 (μέγιστη τρωτότητα) και 1000 μέτρα, όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0 (ελάχιστη τρωτότητα). Αποστάσεις μεγαλύτερες των 1000 μέτρων από τις κοίτες των ποταμών αυτών θεωρή-

θηκαν ότι έχουν την ίδια τιμή συνάρτησης, δηλαδή 0. Με τον ίδιο τρόπο ορίστηκαν τα σημεία καμπής για τη δεύτερη κατηγορία ποταμών και ρεμάτων: 0 μέτρα, όπου η σιγμοειδής συνάρτηση γίνεται ίση με 1 και 500 μέτρα, όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0 (Σχ. 6α).

*Παράγοντας 8 – Εγγύτητα σε οικισμούς:* Κατά την ανάλυση των μη σημειακών χρήσεων γης, εξετάστηκε η κατηγορία χρήσης γης που αφορά στα αστικά κέντρα. Εκτός όμως από την παρουσία κάποιου αστικού κέντρου, η τρωτότητα των υπογείων υδάτων επηρεάζεται και από τον αριθμό των κατοίκων, καθώς και από την απόσταση από τα αστικά κέντρα. Αυτές είναι δύο παράμετροι που δεν συμπεριλήφθηκαν στον παράγοντα χρήσεων γης. Έτσι χαράχτηκε μια ζώνη επιρροής γύρω από



**Σχήμα 7.** α) Ακτίνα επιρροής των αστικών κέντρων σε σχέση με την κατανομή πληθυσμού, β) περιβαλλοντικά προστατευόμενες περιοχές

κάθε οικισμό, με ακτίνα ανάλογη του πληθυσμού του, σύμφωνα με τα δεδομένα της απογραφής του 2001 της Ε.Σ.Υ.Ε. (Σχ. 7α). Σε κάθε ζώνη επιρροής αποδόθηκε η τιμή των κατοίκων του συγκεκριμένου οικισμού, έτσι τα αστικά κέντρα με υψηλότερο πληθυσμό θεωρήθηκαν ότι επηρεάζουν τα υπόγεια νερά και σε μεγαλύτερη απόσταση και σε μεγαλύτερο βαθμό.

Μια μονοτονικά αύξουσα σιγμοειδής συνάρτηση ασαφούς λογικής χρησιμοποιήθηκε για να αποδοθεί η αυξανόμενη τρωτότητα που συνεπάγεται ο μεγαλύτερος αριθμός κατοίκων, σε κλίμακα 0 - 255. Τα σημεία καμπής που χρησιμοποιήθηκαν ορίστηκαν στους 56000 κατοίκους (η πόλη με τον μεγαλύτερο πληθυσμό στην περιοχή μελέτης), όπου η συνάρτηση ισούται με 1 (μέγιστη τρωτότητα) και 0 κάτοικοι όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με

0 (η τρωτότητα ελαχιστοποιείται στις ακατοίκητες περιοχές).

*Παράγοντας 9 – Περιοχές που προστατεύονται από εθνικές ή διεθνείς περιβαλλοντικές συνθήκες:* Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει υγροβιότοπους διεθνούς ενδιαφέροντος, όπως το Δέλτα του Έβρου, το Δέλτα του Νέστου, καθώς και τις λίμνες Βιστωνίδα και Ισμαρίδα. Πολλές περιοχές ανήκουν στο Ευρωπαϊκό Δίκτυο Natura 2000, σε Εθνικά Πάρκα (Υπουργικές Αποφάσεις Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 1986, Pavliakakis & Tsihrintzis 2000, 2005), αποτελούν Εθνικά Δάση, ή περιλαμβάνονται στη Συνθήκη Ramsar του 1971 (Σχ. 7β) και συνεπώς τελούν υπό καθεστώς περιβαλλοντικής προστασίας. Οι περισσότερες βιομηχανικές και αγροτικές δραστηριότητες απαγορεύονται σε αυ-

τές τις περιοχές, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ως παράγοντας προστασίας για τα υπόγεια νερά. Στην περίπτωση αυτή, δύο κατηγορίες διακρίνονται στην περιοχή μελέτης: στην πρώτη ανήκουν οι περιοχές που προστατεύονται σύμφωνα με τις παραπάνω συνθήκες και λαμβάνουν τιμή 0 (ελάχιστη τρωτότητα), ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν όλες οι υπόλοιπες περιοχές και λαμβάνουν βαθμολογία 255 (μέγιστη τρωτότητα), για τον συγκεκριμένο παράγοντα.

**Παράγοντας 10 – Εγγύτητα σε εθνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο:** Οι εθνικές οδοί και το σιδηροδρομικό δίκτυο είναι οι κύριες διαδρομές μεταφοράς των επικίνδυνων χημικών και έτσι αποτελούν δυνητικές πηγές ρύπανσης των υπογείων υδάτων στην περίπτωση ατυχήματος. Για το λόγο, αυτό χαράχτηκε μια ζώνη επιρροής 500 μέτρων εκατέρωθεν του εθνικού οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου στην περιοχή μελέτης (Σχ. 6β). Μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση εφαρμόστηκε για να μετατρέψει τις αποστάσεις στην κλίμακα 0 - 255. Τα σημεία καμπής ορίστηκαν στα 0 μέτρα (μέγιστη τρωτότητα), όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 1, και στα 500 μέτρα (μέγιστη απόσταση επιρροής σε περίπτωση ατυχήματος), όπου η συνάρτηση γίνεται ίση με 0 (ελάχιστη τρωτότητα).

**Ομάδα Παραγόντων 3 – Καθορισμός τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων σε σχέση με τις ειδικές γεωλογικές συνθήκες**

Η ομάδα παραγόντων 3 περιλαμβάνει δύο παράγοντες που σχετίζονται με την παρουσία ειδικών γεωλογικών συνθηκών, οι οποίες επηρεάζουν τοπικά το σύστημα των υπόγειων υδάτων. Αυτοί οι παράγοντες είναι η παρουσία γεωθερμικών πεδίων και η παρουσία ζώνης διείσδυσης θαλασσινού νερού, που αποτελούν συχνά φαινόμενα στην περιοχή μελέτης (Σχ. 8).

**Παράγοντας 11 – Παρουσία γεωθερμικών πεδίων:** Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν αρκετά γεωθερμικά πεδία, που επηρεάζουν τόσο τη θερμοκρασία όσο και τη χημεία των υπογείων υδάτων (Σχήμα 8α). Οριοθετήθηκαν έτσι τα γνωστά γεωθερμικά πεδία και έλαβαν τιμή 255, ενώ χαράχτη-

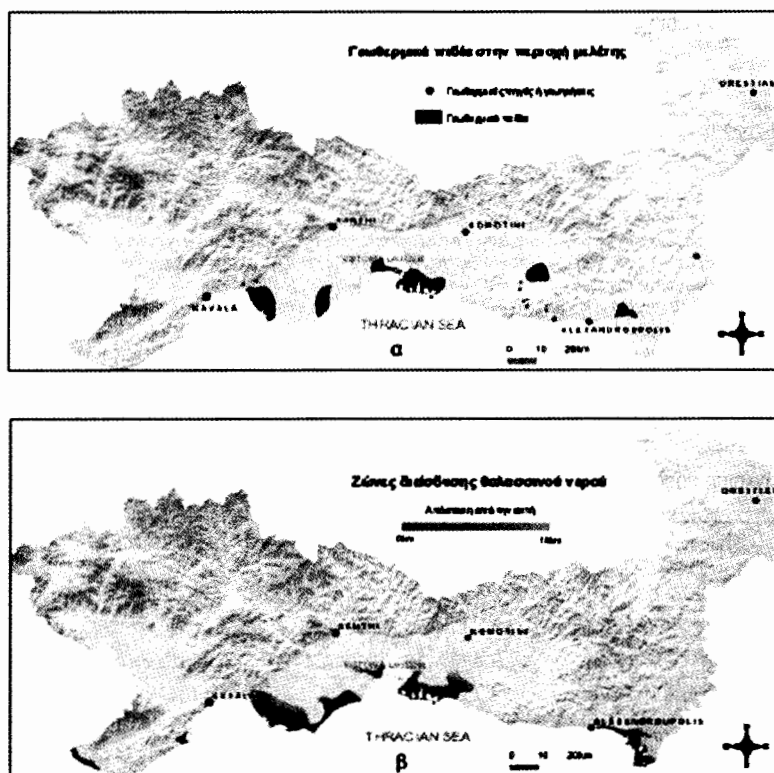
κε ζώνη επιρροής 500 μέτρων γύρω από κάθε γνωστή γεωθερμική γεώτρηση ή πηγή. Μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση εφαρμόστηκε για να μετατρέψει αυτές τις αποστάσεις σε κλίμακα 0 - 255. Τα σημεία καμπής ορίστηκαν στα 0 μέτρα, όπου η συνάρτηση ισούται με 1 (μέγιστη τρωτότητα) και στα 500 μέτρα, όπου η συνάρτηση ισούται με 0 και η τρωτότητα ελαχιστοποιείται και γίνεται ανεξάρτητη της απόστασης.

**Παράγοντας 12 – Παρουσία ζώνης διείσδυσης θαλασσινού νερού:** Σε περιοχές κοντά στην ακτή και όπου οι γεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, η θαλάσσια διείσδυση έχει εντοπιστεί ακόμη και σε απόσταση 10 χιλιομέτρων από την ακτή. Οι περιοχές διείσδυσης θαλασσινού νερού οριοθετήθηκαν για την περιοχή μελέτης, σύμφωνα με δεδομένα γεωτρήσεων (Πεταλάς 1997) (Σχ. 8β). Η επίδραση όμως της διείσδυσης της θάλασσας θεωρείται ότι ελαχιστοποιείται ανάλογα με την απόσταση από την ακτή. Έτσι εφαρμόστηκε μια μονοτονικά φθίνουσα σιγμοειδής συνάρτηση ασαφούς λογικής με σημεία καμπής που ορίστηκαν στα 0 μέτρα από την ακτή (μέγιστη τρωτότητα) όπου η συνάρτηση ισούται με 1, και στα 10 χιλιόμετρα από την ακτή (ελάχιστη τρωτότητα), όπου η συνάρτηση γίνεται 0 και η τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων ελαχιστοποιείται και γίνεται ανεξάρτητη της απόστασης από την ακτή.

#### 4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά από την ποσοτικοποίηση όλων των παραγόντων σε μια κοινή κλίμακα (0 - 255), αποδίδονται συντελεστές βάρους σε όλους τους παράγοντες κάθε ομάδας παραγόντων, σύμφωνα με τη μέθοδο AHP (Saaty 1977, Pavlikakis & Tshrintzis, 2003), και ακολούθως αποδίδονται συντελεστές βαρών προτεραιότητας στους παράγοντες κάθε ομάδας, σύμφωνα με τη μέθοδο OWA (Eastman 2003, Gemitzi et al. 2005).

Για τη συνάθροιση των πληροφοριών από τους διάφορους παράγοντες χρησιμοποιείται ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (Voogd 1983), όπου οι τιμές των διαφόρων παραγόντων πολλα-



**Σχήμα 8.** Παράγοντες των τοπικών γεωλογικών συνθηκών: α) παρουσία γεωθερμικών πεδίων, β) παρουσία ζώνης θαλασσίας διείσδυσης

πλασιάζονται με τον συντελεστή βάρους του συγκεκριμένου παράγοντα και μετά αθροίζονται για να προκύψει η τιμή της τρωτότητας:

$$S = \sum w_i \chi_i \quad (2)$$

όπου  $S$  = τιμή τρωτότητας  $w_i$  = συντελεστής βάρους παράγοντα  $i$ ;  $\chi_i$  = τιμή του παράγοντα  $i$ .

Η όλη διαδικασία απόδοσης συντελεστών βαρών στους παράγοντες και συντελεστών βαρών προτεραιότητας επαναλαμβάνεται μια φορά για κάθε ομάδα παραγόντων. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τρεις ενδιάμεσοι χάρτες τρωτότητας. Ο τελικός συνθετικός χάρτης τρωτότητας προκύπτει επαναλαμβάνοντας την όλη διαδικασία για μια ακόμη φορά, έχοντας ως παράγοντες τώρα τους τρεις ενδιάμεσους χάρτες τρωτότητας.

*Απόδοση βαρών και συνάθροιση παραγόντων στην Ομάδα 1:* Οι συντελεστές βαρών των παραγόντων, καθώς και οι συντελεστές βαρών προτεραιότητας για την Ομάδα 1, παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Οι συντελεστές βάρους προτεραιότητας που αποδόθηκαν δείχνουν ένα μέσο ποσοστό κινδύνου, ενώ η ώθηση των βαρών προτεραιότητας προς τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη τιμή τρωτότητας δείχνει μια αυστηρή απόφαση. Ο ενδιάμεσος χάρτης ιδιοτρωτότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 10α.

*Απόδοση βαρών και συνάθροιση παραγόντων στην Ομάδα 2:* Οι συντελεστές βαρών των παραγόντων καθώς και οι συντελεστές βαρών προτεραιότητας για την Ομάδα 2 παρατίθενται στον Πίνακα 3.



**Πίνακας 2.** Σύγκριση παραγόντων κατά ζεύγη για την ομάδα 1.

|                                     | Είδος υδροφορέα | Υδραυλική αγωγιμότητα | Βάθος εντοπισμού υδροφόρου οριζόντα | Υπολογισθέντες συντελεστές βάρους |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Είδος υδροφορέα                     | 1               | 5                     | 3                                   | 0.6370                            |
| Υδραυλική αγωγιμότητα               | 1/5             | 1                     | 1/3                                 | 0.1047                            |
| Βάθος εντοπισμού υδροφόρου οριζόντα | 1/3             | 3                     | 1                                   | 0.2583                            |

9: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι εξαιρετικά πιο σημαντικός  
7: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι πάρα πολύ πιο σημαντικός  
5: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι πολύ πιο σημαντικός  
3: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι μετρίως πιο σημαντικός  
1: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι εξίσου σημαντικός  
1/3: σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι μετρίως λιγότερο σημαντικός  
1/5: : σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι πολύ λιγότερο σημαντικός  
1/7: : σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι πάρα πολύ λιγότερο σημαντικός  
1/9: : σε σχέση με τον παράγοντα της στήλης, ο παράγοντας της γραμμής είναι εξαιρετικά λιγότερο σημαντικός  
Δείκτης συνοχής = 0.03 (< 0.1 αποδεκτός)

|                      |                |                |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| Βάρη Προτεραιότητας: | 0.2            | 0.3            | 0.5            |
| Θέση:                | 1 <sup>η</sup> | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> |

**Πίνακας 3.** Σύγκριση παραγόντων κατά ζεύγη για την ομάδα 2.

|              | Παράγ. 1 | Παράγ. 2 | Παράγ. 3 | Παράγ. 4 | Παράγ. 5 | Παράγ. 6 | Παράγ. 7 | Υπολογισθέντα βάρη |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|
| Παράγοντας 1 | 1        | 3        | 5        | 3        | 5        | 3        | 7        | 0.3606             |
| Παράγοντας 2 | 1/3      | 1        | 3        | 1        | 3        | 1        | 5        | 0.1541             |
| Παράγοντας 3 | 1/5      | 1/3      | 1        | 1/3      | 1/3      | 1/3      | 3        | 0.0546             |
| Παράγοντας 4 | 1/3      | 1        | 3        | 1        | 5        | 1        | 5        | 0.1739             |
| Παράγοντας 5 | 1/5      | 1/3      | 3        | 1/5      | 1        | 1/3      | 3        | 0.0728             |
| Παράγοντας 6 | 1/3      | 1        | 3        | 1        | 3        | 1        | 5        | 0.1541             |
| Παράγοντας 7 | 1/7      | 1/5      | 1/3      | 1/5      | 1/3      | 1/5      | 1        | 0.0299             |

Παράγοντας 1: Αθροιστική επιφανειακή απορροή, Παράγοντας 2: Μη σημακές χρήσεις γης, Παράγοντας 3: περιβαλλοντικά προστατευόμενες περιοχές, Παράγοντας 4: Εγγύτητα σε σημακές χρήσεις γης, Παράγοντας 5: Εγγύτητα σε οικισμούς, Παράγοντας 6: Εγγύτητα σε κύρια ρέματα, Παράγοντας 7: Εγγύτητα στο εθνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο.  
Δείκτης συνοχής = 0.05 (αποδεκτός)

|                      |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Βάρη Προτεραιότητας: | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.15           | 0.2            | 0.25           |
| Θέση:                | 1 <sup>η</sup> | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> | 4 <sup>η</sup> | 5 <sup>η</sup> | 6 <sup>η</sup> | 7 <sup>η</sup> |

Οι συντελεστές βάρους προτεραιότητας που αποδόθηκαν δείχνουν ένα μέσο ποσοστό κινδύνου, ενώ η ώθηση των βαρών προτεραιότητας προς τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη τιμή τρωτότητας δείχνει μια αυστηρή απόφαση (οι τρεις παράγοντες με τις υψηλότερες τιμές μοιράζονται το 50% του βάρους, ενώ όλοι οι υπόλοιποι μοιράζονται εξίσου το βάρος). Ο ενδιάμεσος χάρτης τρωτότητας σε σχέση με τους εξωγενείς παράγοντες παρουσιάζεται στο Σχήμα 10β.

*Απόδοση βαρών και συνάθροιση παραγόντων στην Ομάδα 3:* Οι παρακάτω συντελεστές βαρών αποδόθηκαν στην Ομάδα 3 (οι παράγοντες θεωρούνται εξίσου σημαντικοί):

Παρουσία γεωθερμικών πεδίων: 0.5

Παρουσία ζώνης διείδυσης θαλασσινού νερού: 0.5.

Οι παρακάτω συντελεστές βαρών προτεραιότητας αποδόθηκαν στην Ομάδα 3:

Βάρη προτεραιότητας: 0.4      0.6

Θέση: 1<sup>η</sup>      2<sup>η</sup>

Τα βάρη προτεραιότητας που αποδόθηκαν στην Ομάδα 3, φανερώνουν μέτριο επίπεδο κινδύνου και αυστηρή απόφαση, αφού το βάρος ωθείται προς τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη τιμή τρωτότητας. Το Σχήμα 10γ δείχνει τον ενδιάμεσο χάρτη τρωτότητας με βάση τους παράγοντες της τρίτης ομάδας.

*Απόδοση βαρών και συνάθροιση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων:* Τα ενδιάμεσα αποτελέσματα συναθροίστηκαν για να προκύψει ο τελικός συνθετικός χάρτης τρωτότητας των υπογείων υδάτων στη ρύπανση. Δύο διαδικασίες συνάθροισης εκτελέστηκαν και προέκυψαν δύο ξεχωριστοί

**Πίνακας 4.** Σύγκριση παραγόντων κατά ζεύγη για την τελική διαδικασία συνάθροισης.

|                                    | Ομάδα παραγόντων 1 | Ομάδα παραγόντων 2 | Ομάδα παραγόντων 3 | Υπολογισθέντα βάρη |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ομάδα παραγόντων 1                 | 1                  | 1                  | 3                  | 0.4286             |
| Ομάδα παραγόντων 2                 | 1                  | 1                  | 3                  | 0.4286             |
| Ομάδα παραγόντων 3                 | 1/3                | 1/3                | 1                  | 0.1429             |
| Δείκτης συνοχής = 0.00 (βέλτιστος) |                    |                    |                    |                    |
| Βάρη προτεραιότητας:               | 0.2                | 0.3                | 0.5                |                    |
| Θέση:                              | 1 <sup>η</sup>     | 2 <sup>η</sup>     | 3 <sup>η</sup>     |                    |

**Πίνακας 5.** Σύγκριση παραγόντων κατά ζεύγη για την τελική διαδικασία συνάθροισης μετά από σύγκριση με πραγματικά δεδομένα.

|  | Ομάδα παραγόντων 1 | Ομάδα παραγόντων 2 | Ομάδα παραγόντων 3 | Υπολογισθέντα βάρη |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ομάδα παραγόντων 1                       | 1                  | 5                  | 7                  | 0.7306             |
| Ομάδα παραγόντων 2                       | 1/5                | 1                  | 3                  | 0.1884             |
| Ομάδα παραγόντων 3                       | 1/7                | 1/3                | 1                  | 0.0810             |
| Δείκτης συνοχής = 0.06 (< 0.1 αποδεκτός) |                    |                    |                    |                    |
| Βάρη προτεραιότητας:                     | 0.1                | 0.4                | 0.5                |                    |
| Θέση:                                    | 1 <sup>η</sup>     | 2 <sup>η</sup>     | 3 <sup>η</sup>     |                    |

χάρτες τρωτότητας για την περιοχή μελέτης. Οι ενδιάμεσοι χάρτες τρωτότητας που προέκυψαν από την εξέταση των τριών ομάδων παραγόντων, χρησιμοποιήθηκαν ως παράγοντες στην τελική συνάθροιση. Τα αποτελέσματα της τρωτότητας που προέκυψαν κατηγοριοποιήθηκαν σε 5 διακριτές ομάδες όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6 (στήλες 3 και 4) και στα Σχήματα 9 και 10δ.

Μια πρώτη διαδικασία συνάθροισης, χωρίς προσπάθεια ταύτισης των αποτελεσμάτων με πραγματικά δεδομένα, επιχειρήθηκε, χρησιμοποιώντας ίσα βάρη για τις πρώτες δύο ομάδες, και ωθώντας τα βάρη προτεραιότητας προς τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη τρωτότητα. Οι συντελεστές βάρους παραγόντων και τα βάρη προτεραιότητας που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την πρώτη συνάθροιση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων, παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Ο συνθετικός χάρτης τρωτότητας που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 10δ και σε ποσοστά στη στήλη 3 του Πίνακα 6.

Σε μια δεύτερη συνάθροιση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων, έγινε προσπάθεια βαθμονόμησης της μεθόδου συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με μετρημένες τιμές συγκέντρωσης νιτρικών στα υπόγεια νερά 141 γεωτρήσεων στο ΒΑ τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου αναπτύσσεται ένα σύ-

στημα αλλούβιων υδροφορέων (Παπαδόπουλος et al. 2002). Αντί να εξεταστούν οι ακριβείς εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων νιτρικών στα υπόγεια νερά, η σύγκριση εστίασε στην πιθανότητα κατάταξης μιας περιοχής ως ρυπασμένης (Dixon 2004). Οι κατηγορίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε χαμηλή ανθρωπογενή επίδραση (<0.5 mg/L), μέτρια ανθρωπογενή επίδραση (0.5 - 3 mg/L), μετρίως υψηλή ανθρωπογενή επίδραση (3 - 10 mg/L), υψηλή ανθρωπογενή επίδραση (10 - 50 mg/L), και πολύ υψηλή ανθρωπογενή επίδραση (0.5 - 3 mg/L) (Σχ. 9). Τα αποτελέσματα δείχνουν καλύτερη ταύτιση όταν η ομάδα 1, δηλαδή οι παράγοντες που συνδέονται με τις υδραυλικές ιδιότητες των υδροφορέων, λαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό βάρους. Οι συντελεστές βάρους καθώς και τα βάρη προτεραιότητας που αποδόθηκαν σε αυτή τη διαδικασία συνάθροισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Οι συντελεστές βάρων προτεραιότητας που αποδόθηκαν δείχνουν ένα χαμηλό ποσοστό κινδύνου. Η συνάθροιση ωθείται ξεκάθαρα προς τον παράγοντα με τον υψηλότερο βαθμό τρωτότητας.

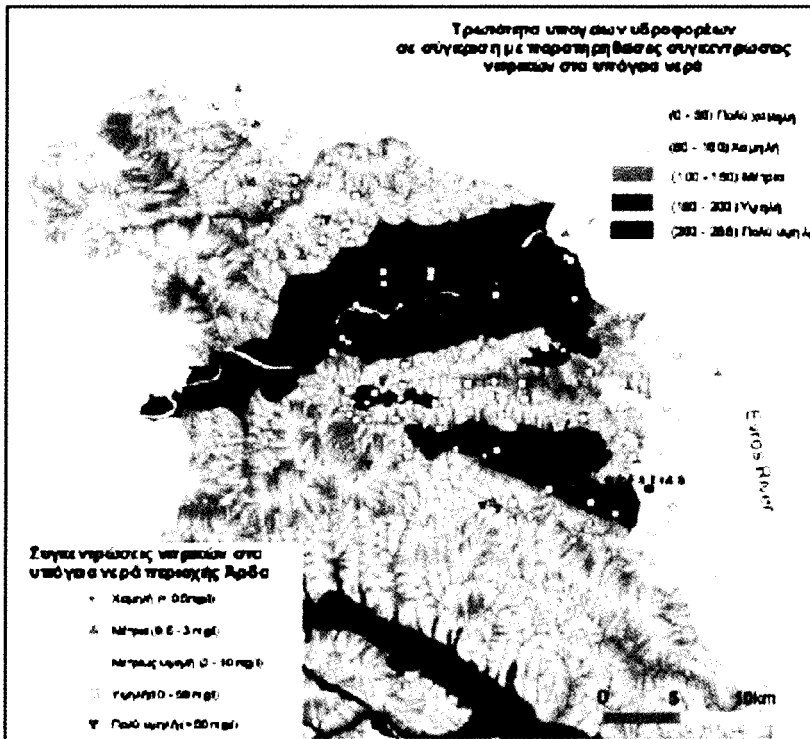
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατίθεται στον Πίνακα 7 και υπό μορφή χάρτη στο Σχήμα 9. Από τον Πίνακα 7 προκύπτει ότι 82 από τις 141 γεωτρήσεις που εξετάστηκαν κατατάσσονται στη

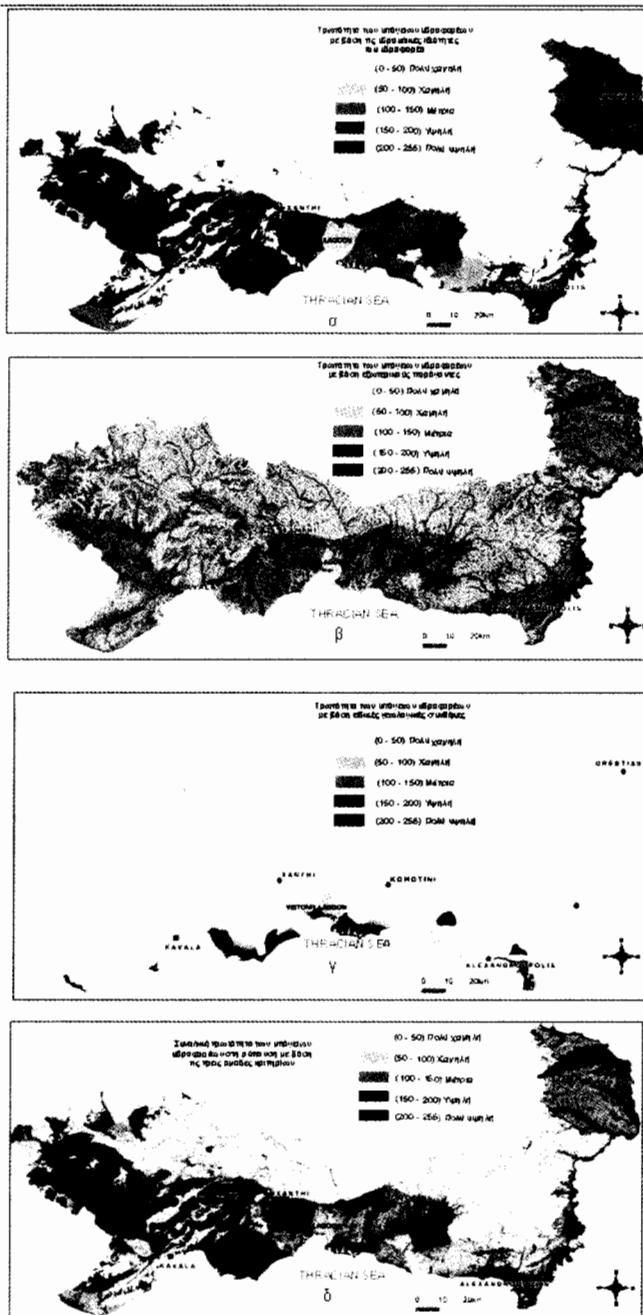
**Πίνακας 6:** Διακριτές κατηγορίες τρωτότητας υπογείων υδάτων στην περιοχή μελέτης.

| Τιμές τρωτότητας υπογείων υδάτων | Κατηγορία τρωτότητας | Ποσοστό της περιοχής μελέτης που ανήκει στη συγκεκριμένη κατηγορία τρωτότητας υπογείων υδάτων |   |
|----------------------------------|----------------------|---|---|
|                                  |                      | Πριν τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα   | Μετά τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα |
| 0 -50                            | Χαμηλή               | 22%   | 11%                                     |
| 50 -100                          | Μέτρια               | 28%   | 35%                                     |
| 100 – 150                        | Μετρίως υψηλή        | 34%   | 31%                                     |
| 150 - 200                        | Υψηλή                | 15%   | 21%                                     |
| 200 - 255                        | Πολύ υψηλή           | 1%  | 2%                                      |

**Πίνακας 7:** Ταύτιση των γεωτρήσεων με 5 κατηγορίες επιπέδων ρύπανσης και κατηγορίες τρωτότητας όπως υπολογίστηκαν με την προτεινόμενη μεθοδολογία για την περιοχή της λεκάνης π. Άρδα.

| Μοντέλο       | Συγκέντρωση νιτρικών στα υπόγεια νερά (mg/L) |                  |                        |                 |                   |
|---------------|--|------------------|------------------------|-----------------|-------------------|
|               | Χαμηλή (< 0.5)                               | Μέτρια (0.5 - 3) | Μετρίως υψηλή (3 - 10) | Υψηλή (10 - 50) | Πολύ υψηλή (> 50) |
| Χαμηλή        | 13   | 6                | 4                      | 3               |                   |
| Μέτρια        | 3  | 11               | 10                     | 2               |                   |
| Μετρίως υψηλή |  | 1                | 20                     | 23              | 5                 |
| Υψηλή         |  |                  |                        | 36              | 2                 |
| Πολύ υψηλή    |  |                  |                        |                 | 2                 |

**Σχήμα 9.** Συνθετικός χάρτης τρωτότητας υπογείων υδάτων μετά από βαθμονόμηση σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα συγκέντρωσης νιτρικών στα υπόγεια νερά της περιοχής π. Άρδα



**Σχήμα 10.** Ενδιάμεσοι και συνθετικός χάρτης τρωτότητας υπογείων υδάτων της περιφέρειας Α.Μ.-Θ. α) σύμφωνα με την ομάδα παραγόντων 1, β) σύμφωνα με την ομάδα παραγόντων 2, γ) σύμφωνα με την ομάδα παραγόντων 3, δ) συνθετικός χάρτης με βάση τις τρεις προηγούμενες ομάδες

σωστή κατηγορία τρωτότητας υπογείων υδάτων (αυτές βρίσκονται στη διαγώνιο του Πίνακα 7), 4 γεωτρήσεις κατατάσσονται μια κατηγορία τρωτότητας υψηλότερη από την παρατηρούμενη (αυτές βρίσκονται κάτω από τη διαγώνιο του Πίνακα 7), 41 γεωτρήσεις κατατάσσονται μια κατηγορία τρωτότητας χαμηλότερη από την παρατηρούμενη (αυτές βρίσκονται επάνω από τη διαγώνιο του Πίνακα 7), 11 γεωτρήσεις κατατάσσονται δύο κατηγορίες χαμηλότερα ενώ 3 γεωτρήσεις κατατάσσονται τρεις κατηγορίες χαμηλότερα.

### 5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων στη ρύπανση που αναπτύχθηκε από τους Gemitz et al. (2005), στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Δώδεκα παράγοντες εξετάστηκαν στην υπολογιστική διαδικασία, οι οποίοι κατατάχθηκαν σε τρεις ομάδες. Για κάθε μια από αυτές τις ομάδες, κατασκευάστηκε ένας ενδιάμεσος χάρτης τρωτότητας υπογείων υδάτων στη ρύπανση, ενώ ο συνδυασμός των τριών αυτών χαρτών οδήγησε στη δημιουργία του τελικού συνθετικού χάρτη τρωτότητας για την περιοχή μελέτης. Στην πρώτη προσπάθεια, ο συνθετικός χάρτης που προέκυψε, δεν ταυτίστηκε με πραγματικά δεδομένα ρύπανσης. Σε μια δεύτερη προσπάθεια, τα παραγόμενα αποτελέσματα τρωτότητας ταυτίστηκαν με πραγματικά δεδομένα, ενώ ο συνθετικός χάρτης που προέκυψε δεν παρουσίαζε σημαντικές διαφορές από τον αρχικό συνθετικό χάρτη, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μεθοδολογία είναι μετρίως ευαίσθητη στην απόδοση βαρών στους παράγοντες καθώς και στη διαδικασία συνάθροισης. Συμπεραίνεται έτσι, ότι η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε παράγει ικανοποιητικώς αντικειμενικά αποτελέσματα, κάτι το οποίο αποδίδεται κυρίως σε τέσσερα πλεονεκτήματα της παρούσας μεθόδου: τη διάκριση των παραγόντων σε τρεις ομάδες, την ποσοτικοποίησή τους σε κοινή κλίμακα, την εφαρμογή της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης

(AHP) κατά την απόδοση συντελεστών βάρους, και τέλος την απόδοση των βαρών προτεραιότητας (OWA) που οδήγησε στην ανάδειξη των τοπικών ιδιαιτεροτήτων, καθιστώντας έτσι τη μέθοδο ιδιαίτερα αποδοτική σε περιφερειακή κλίμακα, όπου εμφανίζονται όλα τα είδη υδροφορέων.

Όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση των παραμέτρων σε μια κοινή κλίμακα, ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή των σημείων καμψής της συνάρτησης ασαφούς λογικής, η οποία στηρίζεται κυρίως στην κατανόηση της φυσικής σημασίας του κάθε παράγοντα. Σχετικά με τις παραμέτρους που περιγράφουν αποστάσεις, το πρώτο σημείο καμψής τοποθετείται στην απόσταση των 0 μέτρων, ενώ το τελευταίο σημείο τοποθετείται στην απόσταση όπου το αποτέλεσμα της δραστηριότητας στα υπόγεια νερά θεωρείται ότι ελαχιστοποιείται. Στην περίπτωση των παραγόντων με μεγάλο εύρος τιμών, όπως είναι η αθροιστική ετήσια επιφανειακή απορροή, εφαρμόστηκε κατηγοριοποίηση των τιμών, βάζοντας ίσο αριθμό εικονοσοικείων σε κάθε κατηγορία (κάθε κατηγορία περιλαμβάνει περίπου το 6% της περιοχής μελέτης), ενώ τα σημεία καμψής τοποθετήθηκαν στο τέλος της πρώτης κατηγορίας, και στην αρχή της τελευταία κατηγορίας.

Η απόδοση συντελεστών βάρους στην υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στη γνώση των χαρακτηριστικών και των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής μελέτης, καθώς και στην εμπειρία των επιστημόνων που εμπλέκονται στην όλη διαδικασία. Παρόλο όμως το γεγονός ότι η απόδοση βαρών στους παράγοντες αποτελεί μια λιγότερο ή περισσότερο υποκειμενική επιλογή, στην παρούσα μεθοδολογία επιχειρήθηκε και αναπτύχθηκε μια διαδικασία απόδοσης συντελεστών βάρους όσο το δυνατό πιο αντικειμενική, εφαρμόζοντας τεχνικές όπως η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης AHP (Saaty 1977, Pavliakakis & Tsihrintzis 2003), καθώς και η απόδοση συντελεστών βάρους προτεραιότητας (Order Weights) (Eastman 2003). Η καλύτερη ταύτιση των υπολογισθέντων ποσοτήτων τρωτότητας με πραγματικά δεδομένα συγκέντρωσης νιτρικών, σε μια υποπεριοχή της περιοχής

μελέτης, επιτεύχθηκε όταν οι παράγοντες που συνδέονται με την ιδιωτικότητα των υδροφορέων έλαβαν το περισσότερο βάρος. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι στην περιοχή ελέγχου επικρατούν κυρίως αγροτικές χρήσεις γης, οι οποίες ρυπαίνουν τους υδροφορείς με σχετικούς ρύπους. Ο κύριος παράγοντας που διαφοροποιεί χωρικά τη ρύπανση στην περιοχή ελέγχου είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα χαμηλή στο ανατολικό τμήμα της περιοχής αυτής, και οδηγεί αντίστοιχα σε χαμηλότερη συγκέντρωση νιτρικών στα υπόγεια νερά.

Είναι επίσης αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι περιοχές που θεωρούνται ως οι πιο τρωτές στη ρύπανση των υπογείων υδάτων, ειδικά εκεί όπου εμφανίζονται καρστικά συστήματα υδροφορέων, στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, δεν εμφανίζουν αντίστοιχα υψηλά ποσοστά ρύπανσης των υπογείων νερών τους. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων είναι μια σχετική, μη μετρήσιμη ποσότητα (Gogu & Dassargues 2000), και ότι δείχνει την πιθανότητα ή τον κίνδυνο εμφάνισης των ρύπων, μετά από την εισαγωγή τους σε σημείο πάνω από τον ανώτερο υδροφόρο (National Research Council 1993, Bekesi et al. 2002). Έτσι θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή η σύγκριση των τιμών τρωτότητας που υπολογίζονται με πραγματικές μετρήσεις, ειδικά σε περιοχές με υψηλές τιμές τρωτότητας, όπου όμως δεν έχει παρατηρηθεί ρύπανση.

Στην παρούσα εργασία, και στις δύο συναθροίσεις που έγιναν, το 60% περίπου της περιοχής μελέτης έχει καταταχθεί στις κατηγορίες μέτριας και μετρίως υψηλής τρωτότητας. Από αυτήν την άποψη η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βρίσκεται πιο κοντά στη μέθοδο DRASTIC (Aller et al. 1987, Βουδούρης & Μανδηλαράς), βάσει της σύγκρισης που παρουσιάστηκε από τους Gogu et al. (2003). Παρόλα αυτά, η μέθοδος DRASTIC και η

μέθοδος EPIK, κατατάσσουν τους καρστικούς υδροφορείς στην κατηγορία μέτριας τρωτότητας (Gogu et al. 2003), ενώ η προτεινόμενη μεθοδολογία τους κατατάσσει στην υψηλή τρωτότητα όπως η Γερμανική μέθοδος (von Hoyer et al. 1998). Ανεξάρτητα πάντως από τις διαφορές που παρουσιάζουν όλες οι παραπάνω μέθοδοι, είναι αλήθεια ότι η επιλογή της μεθόδου υπολογισμού της τρωτότητας αποτελεί μια υποκειμενική απόφαση, η οποία υπαγορεύεται από τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τα υπόγεια υδροφόρα συστήματα. Τα περισσότερα προβλήματα πάντως αναμένεται να ξεπεραστούν όταν οι μέθοδοι καθορισμού τρωτότητας συνδυαστούν με μαθηματική μοντελοποίηση τόσο της ροής όσο και της μεταφοράς ρύπων. Ένας τέτοιος συνδυασμός βέβαια είναι σχεδόν αδύνατος σε περιφερειακή κλίμακα, ειδικά όταν εμπλέκονται καρστικά συστήματα. Τα αποτελέσματα όμως που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής σε περιφερειακό επίπεδο, είναι πολύ χρήσιμα για τη μελλοντική χωροθέτηση ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, για την αστική ανάπτυξη και για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως και για τον εντοπισμό περιοχών ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπου ο συνδυασμός με τη μαθηματική μοντελοποίηση σε λεπτομερέστερη κλίμακα, θα μπορούσε να προσφέρει καλύτερη κατανόηση των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, για την υποστήριξη καθ' όλο το διάστημα που χρειάστηκε η προετοιμασία αυτής της μελέτης.*

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βεργής Ε. 2000. Υδρογεωλογική μελέτη Δυτικής Θράκης και Ανατολικής Μακεδονίας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Περιφερειακή Μονάδα Α.Μ.-Θ.
- Βουδούρης Κ. & Μανδηλαράς Δ. 2004. Εκτίμηση της τρωτότητας των υπογείων νερών με τη μέθοδο DRASTIC: η περίπτωση του αλλοιωματικού υδροφόρου της λεκάνης του Γλαύκου (Ν. Αχαΐας). Υδροτεχνικά, 14.

- Δημάδης Ε., Γκεμιτζή Α. & Κάρμης Π. 2001. Υδρογεωλογική μελέτη ορεινής περιοχής Ν. Ροδόπης – Υδροδότηση οικισμών. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Περιφερειακή Μονάδα Α.Μ.-Θ.
- Διαμαντής Ι. 1993. Διερεύνηση δυνατοτήτων ύδρευσης παράκτιων οικισμών της Θράκης από παράκτιους υδροφορείς. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Ερευνητικό Πρόγραμμα 1989 – 1993.
- Πανίλας Σ. 1998. Υδρογεωλογικά προβλήματα από την εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων με τη μέθοδο της ανοιχτής εκσκαφής: Η περίπτωση του λιγνιτικού κοιτάσματος Δράμας. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.
- Παπαδόπουλος Κ. & Ρωμαΐδης Ι. 2002. Υδρογεωλογική μελέτη λεκάνης ποταμού Άρδα. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Περιφερειακή Μονάδα Α.Μ.-Θ.
- Παπαδόπουλος Κ., Φάβας Ν., Αναστασιάδης Ι., Παπαδόπουλος Π. & Γκεμιτζή Α. 2001. Υδρογεωλογική μελέτη ευρύτερης περιοχής Αλεξ/πολης - Μάρης – Μαρώνειας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Περιφερειακή Μονάδα Α.Μ.-Θ.
- Πεταλάς Χ. 1997. Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη.
- Πεταλάς Χ., Πανίλας Σ., Διαμαντής Ι. & Πλιάκας Φ. 2001. Υπολογισμός και εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων δύο υδροφορέων σε διαφορετικό ιζηματογενές περιβάλλον της Ροδοπικής μάζας. Πρακτικά του 9<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Αθήνα, 1913-1932.
- Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. 1986. Νόμος 1650 για την προστασία του περιβάλλοντος. Φ.Ε.Κ. 160/Α/1986.
- Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. 1996. Κοινή υπουργική απόφαση 5796/23-3-96, Φ.Ε.Κ. 854/Β/16-9-1996.
- Aller L., Bennet T., Lehr H.J., Petty J.R. & Hackett G. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. In: Ada OK, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency Report EPA-600/2-87-035, pp 622.
- Bekesi G. & Mc Conchie J. 2002. The use of aquifer-media characteristics to model vulnerability to contamination, Manawatu region, New Zealand. *Hydrogeology Journal* 10: 322-331.
- Civita M. & De Regibus C. 1995. Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. *Q Geol Appl Pitagora, Bologna*, 3: 63-71.
- Civita M. 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all' inquinamento. *Teoria and pratica (Aquifer vulnerability maps to pollution)*. Pitagora, Bologna.
- Dafis S., Papastergiadou E., Georgiou K., Babaloas D., Georgiadis T., Papageorgiou M., Lazaridou T. & Tsiaousi V. 1997. Directive 92/43/EEC. The Habitats project in Greece: Natura 2000 network. Contract B4-3200/84/756. DG XI. Commission of the European Communities, Goulandris Museum of Natural History – Greek Biotope Wetland Center. pp 932.
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I.C. & Zwahlen F. 2002. Main concepts of the “European approach”, to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10: 340-345.
- Dixon B. 2004. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. *J. Hydrol* 309:17-38.
- Dixon B., Scott H.D., Dixon J.C. & Steele K.F. 2002. Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical Geography* 23: 130-153.
- Doerflinger N., Jeannin P.Y. & Zwahlen F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39: 165-176.
- Doerflinger N. & Zwahlen F. 1998. Praxishilfe: Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK) BUWAL, Bern, pp 56
- Eastman J.R. 2003. IDRISI Kilimanjaro: Guide to Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

- GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University, Worcester, USA, pp 328.
- Eastman J.R. & Jiang H. 1996. Fuzzy measures in multi-criteria evaluation, Proceedings, Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies. May 21-23, Fort Collins, Colorado, 527-534.
- Fetter C.V. 1994. Applied Hydrogeology. 3rd Edition, Macmillan College Publishing Company, New York.
- Foster S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden W, van Waegeningh HG (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proc Inf 38: 69-86.
- Gemitzi A., Petalas C., Tsihrintzis V.A. & Pisinaras V. 2005. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. Environmental Geology (Article in Press).
- Gogu R.C. & Dassargues A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology 39: 549-559.
- Gogu R.C., Hallet.V. & Dassargues A. 2003. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Nblon river basin (Belgium). Environmental Geology 44: 881-892.
- Jenson S.K. & Domingue J.O. 1998. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information systems analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54: 1593-1600.
- National Research Council 1993. Ground water vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Comm Techniques for Assessing Ground Water Vulnerability, Water Sci Technol Board, Comm Geosci Environ Resources, Nat Acad Sci, pp 204.
- Northwood Technologies Inc. 2001. Vertical Mapper: Tutorial. Northwood Technologies Inc. and Marconi Mobile Limited, Canada, pp 133.
- Pavlikakis G.E. & Tsihrintzis V.A. 2003. A quantitative method for accounting human opinion, preferences and perceptions in ecosystem management. Journal of Environmental Management 68: 193-205.
- Pavlikakis G.E. & Tsihrintzis V.A. 2000. Ecosystem management: A review of a new concept and methodology. Water Resources Management 14: 257-283.
- Pavlikakis G.E. & Tsihrintzis V.A. 2005. Perceptions and preferences of the local population in Eastern Macedonia and Thrace National Park in Greece. Landscape and Urban Planning, (article in press).
- Pliakas F., Diamantis I. & Petalas C. 1999. Environmental effects of a proposed groundwater artificial recharge project in Orfanon region of Kavala. Proceedings of the 6th International Conference on Environmental Science and Technology. Pythagorion, Samos, pp 381 - 390.
- Rao M., Sastry S.V.C., Yadar P.D., Kharod K., Pathan S.K., Dhinwa P.S., Majumdar P.S., Sampat Kumar D., Patkar V.N. & Phatak V.K. 1991. A Weighted Index Model for Urban Suitability Assessment - A GIS Approach. Bombay Metropolitan Regional Development Authority, Bombay, India.
- Saaty T.L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology 15: 234-281.
- Van Stempvoort, Ewert L. & Wassenaar L. 1993. Aquifer vulnerability index: GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources 18: 25-37.
- Von Hoyer M. & Sofner B. 1998. Groundwater vulnerability mapping in carbonate (karst) areas of Germany. Federal institute for geosciences and natural resources, Archive no 117854, Hanover, Germany
- Voogd H. 1983. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Pion, London
- Wysling L. 1979. Eine neue Formel zur Berechnung der Zustromungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. Eclogae geol. Helv. 72: 401-406.
- Yager R. 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 8(1): 183-190.



## ABSTRACT

**EVALUATION OF GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION IN THE REGION OF EASTERN MACEDONIA AND THRACE USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, MULTICRITERIA ANALYSIS AND FUZZY LOGIC****Gemitzi A.<sup>1,2</sup>, Petalas C.<sup>1</sup>, Tsihrintzis V.A.<sup>1</sup>, Pisinaras V.<sup>1</sup>, Georgiadis P.<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> *Laboratory of Ecological Eng. and Technology, Dept. of Environmental Eng., Faculty of Engineering, Democritus University of Thrace, 67100, Xanthi, Greece, agkemitz@env.duth.gr, xpetalas@env.duth.gr, tsihrin@otenet.gr, vpsinar@env.duth.gr*

<sup>2</sup> *Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Δ/νση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Μητροπολίτη Χρυσοστόμου 1β, 65101 Καβάλα, gr-renth@otenet.gr*

Evaluation of groundwater vulnerability to pollution has been the subject of extended research over the last few years, aiming at highlighting areas at risk of being polluted. This study presents the application of a groundwater vulnerability evaluation method in the region of Eastern Macedonia and Thrace. The method combines several criteria related to the internal hydraulic properties of the aquifer system, with criteria relevant to external stresses and concern the socioeconomic status of the study area, both for point and non point sources of pollution, at the regional scale. GIS technology was applied for data acquisition and processing, while multicriteria evaluation coupled with fuzzy factor standardization determined the way factors were aggregated in the final result. Besides the typical factor weights assignment process, a second set of weights, order weights, has been applied to factors, on a pixel by pixel basis, thus allowing the control of the level of risk in the vulnerability determination and the enhancement of local site characteristics. The methodology has been tested and calibrated against measured nitrate concentration in wells, in the northwest part of the study area, providing results related to the aggregation and weighting procedure.