

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΟΡΥΞΗ ΝΕΩΝ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ

Αντωνάκος Α.¹, Λαμπράκης Ν.¹, Βουδούρης Κ.²

¹ Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημιούπολη Ρίων, aantonako@yahoo.gr, nlamprakis@upatras.gr

² Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, kvoudour@geo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων για την ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων σε μια περιοχή είναι πολύ σημαντικό θέμα. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των θέσεων αυτών βασισμένη στην πολυκριτηριακή ανάλυση με την χρήση ασαφούς λογικής. Δώδεκα κριτήρια περιελήφθησαν στο τελικό μοντέλο χωρισμένα σε τρεις κύριες κατηγορίες: κριτήρια απόδοσης, κριτήρια ποιότητας και οικονομοτεχνικά κριτήρια. Μέσω της χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός χάρτη κατανομής της καταλληλότητας για την ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στην περιοχή έρευνας καταδεικνύουν ότι η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνδυασμό με τις αρχές της ασαφούς λογικής για τον προσδιορισμό βέλτιστων θέσεων για την ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο τα αποτελέσματα του οποίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις τοπικές αρχές και τα κέντρα λήψεως αποφάσεων για τη διαχείριση των υδατικών πόρων κάθε περιοχής.

THE USE OF MULTICRITERIA ANALYSIS AND GIS FOR THE SELECTION OF SUITABLE SITES FOR THE LOCATION OF NEW PRODUCTION BOREHOLES IN KORINTIA PREFECTURE AREA

Antonakos A.¹, Lambrakis N.¹, Voudouris K.²

¹ Patras University, Geological Department, University Campus, Rion, aantonako@yahoo.gr, nlamprakis@upatras.gr

² Dept. of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, kvoudour@geo.auth.gr

ABSTRACT

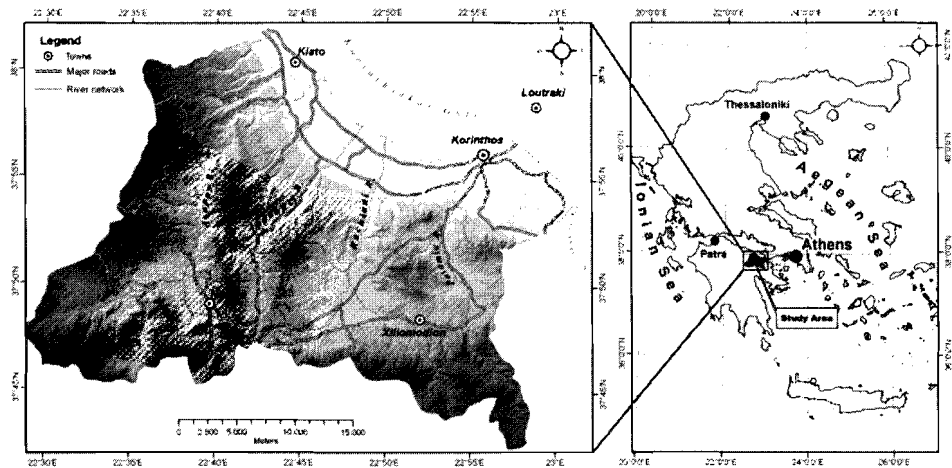
The definition of the most suitable sites for the drilling of new boreholes, in order to exploit the aquifer systems, is a major issue in this area. A method of allocating suitable places for new production boreholes has been developed, based on the multicriteria analysis and fuzzy logic. Twelve criteria-parameters were finally involved in the model, prearranged in three categories: criteria of yield, criteria of quality, and economic-technical criteria. Geographical Information Systems (GIS) have been used, in order to create a classification map of the research area, based on the suitability of each point for the placement of new borehole fields. The study demonstrated that, the method of multicriteria analysis in combination with fuzzy logic is a useful tool, in order to select the best sites for new boreholes drilling in a regional scale. The results could be used from local authorities and decision makers for groundwater resources management.

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας (Σχ. 1) αποτελεί το κεντρικό τμήμα του Νομού Κορινθίας με έκταση περίπου 902 Km² και περιλαμβάνει τις υδρολογικές λεκάνες των ποταμοχειμάρρων Ξηριά, Ράχιανη, Ζαπάντη και Ασωπού (Koukis et al., 1996, Voudouris et al., 2007).

Το ανάγλυφο της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται από τρεις μεγάλες πεδινές ενότητες, την παράκτια περιοχή μεταξύ Κορίνθου και Κιάτου, την περιοχή Αγίου Βασιλείου – Σπαθοβουνίου και την πεδινή περιοχή Νεμέας. Το υπόλοιπο της περιοχής έρευνας μπορεί να χαρακτηριστεί ως λοφώδες-ημιορεινό με μέτριες κλίσεις πρηνών και ομαλές απολήξεις κορυφογραμμών (Zelilidis, 2000; Voudouris et al., 2007).



Σχήμα 1. Χάρτης οριοθέτησης της περιοχής έρευνας.

Το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής έρευνας ανήκει στις γεωτεκτονικές ζώνες Τριπόλεως και Πίνδου στα Δυτικά και την Υποπελαγονική ή ενότητα Τραπεζύνας στα Ανατολικά. Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας καλύπτεται από μεταλλικά ιζήματα Πλειοκαινικής έως και Ολοκαινικής ηλικίας. Πιο αναλυτικά στην περιοχή εμφανίζονται Πλειοκαινικές μάργες, Καλάβρια συνεκτικά κροκαλοπαγή, Τυρρήνιες θαλάσσιες αναβαθμίδες, ελουβιακές αποθέσεις από ερυθρές άμμους και χαλαρά κροκαλοπαγή και τέλος πρόσφατες αλουβιακές αποθέσεις και αποθέσεις κοίτης ποταμών (Doutsos & Piper, 1990; Keraudren & Sorel, 1987).

Η γεωγραφική οριοθέτηση των γεωλογικών σχηματισμών καθώς και μια χαρακτηριστική γεωλογική τομή εγκάρσια στην περιοχή έρευνας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

Από υδρογεωλογικές άποψης μπορούμε να διακρίνουμε έξι κύριες υδρογεωλογικές ενότητες (Κουμαντάκης et al., 1999; Voudouris et al., 2000b; Antonakos & Lambrakis, 2007):

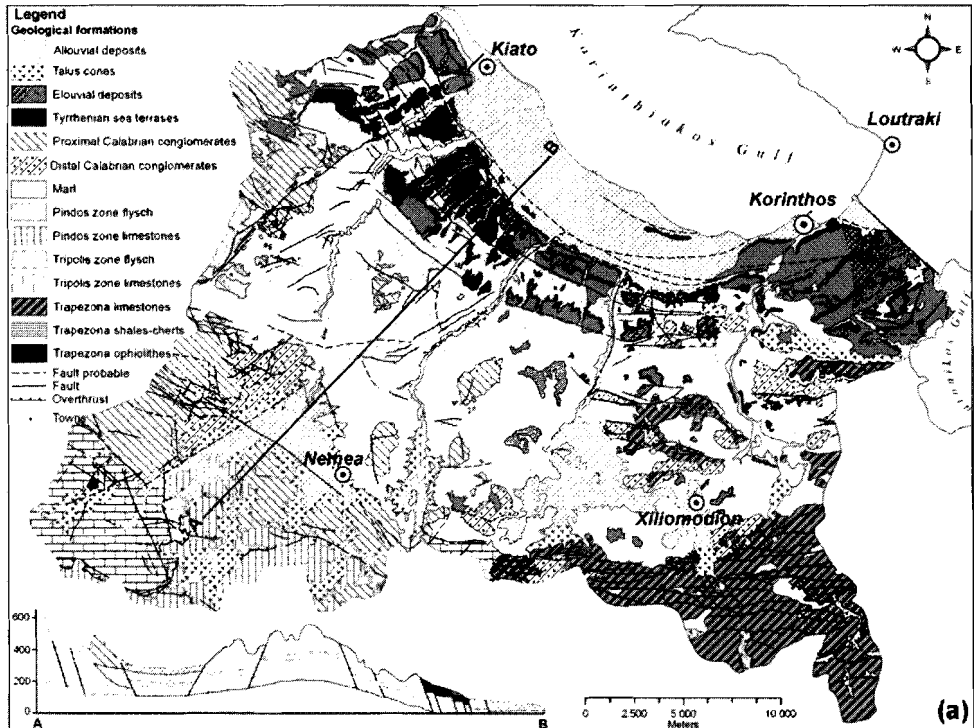
- Τους ανθρακικούς υδροφορείς του αλπικού υποβάθρου
- Τους υδροφορείς που αναπτύσσονται εντός των αδρομερών ενστρώσεων των Πλειοκαινικών μαργών
- Τους υδροφορείς των Καλάβριων κροκαλοπαγών
- Τους υδροφορείς που αναπτύσσονται εντός του ελουβιακού μανδύα και των Τυρρήνιων αναβαθμίδων
- Τους υδροφορείς των πρόσφατων αλουβιακών αποθέσεων
- Οι σχηματισμοί του φλύσχη των ζωνών Πίνδου και Τριπόλεως, καθώς οι σχηματισμοί της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης της Υποπελαγονικής ζώνης και τέλος ο σχηματισμός των πλειοκαινικών μαργών, οι οποίοι μπορεί να θεωρηθούν ως πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή έρευνας για την περίοδο 1975-2005 ανέρχεται σε 594 mm ύψος, το οποίο αντιστοιχεί σε $535,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ όγκο νερού από βροχόπτωση. Βάση του ισοζυγίου

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

κατά Thornthwaite and Mather (1955), τα $360,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ (67,5%) από αυτά επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα λόγω εξατμισοδιαπνοής, $102,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (19,1%) κατεισδύουν και εμπλουτίζουν τους υπόγειους υδροφόρους και τα υπόλοιπα $71,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (13,4%) απορρέουν επιφανειακά μέσω των κύριων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (Nikolaou et al., 1997; Antonakos & Lambrakis, 2007; Voudouris et al., 2007).

Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας καλύπτεται από καλλιέργειες (αμπέλια, εσπεριδοειδή, ελαιώνες), ενώ ένα μεγάλο τμήμα της πεδινής παράκτιας ζώνης καλύπτεται από πυκνό αστικό και ημιαστικό ιστό. Η κατανομή αυτή των χρήσεων γης εισάγει ισχυρές περιβαλλοντικές πιέσεις στους υδατικούς πόρους (επιφανειακούς και υπόγειους) της περιοχής έρευνας (Voudouris et al., 2000a; Stamatis & Voudouris, 2003; Voudouris et al., 2004).



Σχήμα 2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας.

2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΝΟΡΥΞΗΣ ΝΕΩΝ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.

2.1 Γενικά

Ένα από τα κρίσιμότερα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει μια υδρογεωλογική έρευνα αναφέρεται στην υπόδειξη κατάλληλων θέσεων για τη δημιουργία νέων έργων υδρομάστευσης του υπόγειου νερού. Τα κριτήρια για την επιλογή αυτή είναι πολλά και κατά κανόνα ανεξάρτητα μεταξύ τους, δεδομένου ότι στην επιλογή αυτή παίζουν ρόλο παράγοντες που αφορούν την απόδοση των υδροφόρων οριζώντων (υδραυλικά χαρακτηριστικά, τροφοδοσία κ.ά), την υφιστάμενη αλλά και την αναμενόμενη στο μέλλον ποιότητα του υπογείου νερού, αλλά και οικονομοτεχνικά στοιχεία όπως η ευκολία προσπέλασης η το αναμενόμενο βάθος διάτρησης.

Τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα κριτήρια έχουν γεωγραφική έκφραση αφού μπορούν να αποδοθούν με τη μορφή χωρικών κατανομών είτε διακριτών, είτε συνεχών.

Στην παρούσα έρευνα επιχειρείται να συνδυαστούν όλα τα πιθανά κριτήρια επιλογής μέσω μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS με απώτερο σκοπό τη δημιουργία ενός χάρτη κατάταξης της περιοχής έρευνας με βάση την καταλληλότητα του κάθε σημείου για την τοποθέτηση νέων υδρομαστευτικών έργων.

2.2 Επιλογή κριτηρίων

Η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε στην υπάρχουσα διεθνή γνώση και εμπειρία γύρω από το ζήτημα, αλλά και στις ιδιαίτερες υδρολογικές, υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες της περιοχής έρευνας, ενώ καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε να μην παραλειφθεί κάποιος σημαντικός παράγοντας για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Τα κριτήρια επιλογής διακρίθηκαν σε τρεις κατηγορίες:

- Κριτήρια απόδοσης
- Κριτήρια ποιότητας
- Κριτήρια οικονομοτεχνικά

Η επίδραση της πρώτης κατηγορίας κριτηρίων έγκειται στο γεγονός ότι μια θέση για να ενδείκνυται για ανόρυξη ενός υδρομαστευτικού έργου πρέπει να εξασφαλίζει μια ικανοποιητική απόδοση, σε σχέση με τις γειτονικές θέσεις, τις ιδιαιτερότητες της περιοχής, και τις ανάγκες του αποδέκτη του έργου. Η απόδοση ενός υδρομαστευτικού έργου καθορίζεται, πέραν της τεχνικής του αρτιότητας, κυρίως από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και την τροφοδοσία του προς εκμετάλλευση υδροφορέα. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά μπορούν να προσεγγιστούν με τη χρήση ενός μεγέθους όπως η μεταβιβαστικότητα η οποία αποδίδει τον συνδυασμό της υδραυλικής αγωγιμότητας και του κορεσμένου πάχους του υδροφόρου. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις μεταβιβαστικότητας ή ειδικής απόδοσης στην περιοχή έρευνας δεν ήταν αρκετά πυκνές, κρίθηκε σκόπιμο ως ένα επιπλέον κριτήριο απόδοσης, να χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα των υφιστάμενων υδρομαστευτικών έργων, η οποία και αυξάνεται σε περιοχές όπου υπάρχει διαπιστωμένη υψηλή απόδοση από τα παρακείμενα έργα.

Η τροφοδοσία ενός υδροφορέα μπορεί να είναι άμεση μέσω του κατεισδύοντος νερού της βροχής ή επαγωγική μέσω παρακείμενων σωμάτων επιφανειακού νερού όπως ποτάμια ή λίμνες. Έτσι ως κριτήρια για την επάρκεια της τροφοδοσίας του υδροφορέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο η ποσότητα κατεισδύοντος νερού όσο και η απόσταση από επιφανειακά σώματα νερού.

Με τους παραπάνω συλλογισμούς καταλήγουμε σε τέσσερα κύρια κριτήρια απόδοσης:

- Μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα (όπως προσδιορίζεται από αντλητικές δοκιμασίες)
- Αποδοτικότητα υδροφόρου (όπως προσδιορίζεται από την πυκνότητα των υδρομαστευτικών έργων)
- Απευθείας τροφοδοσία του υδροφορέα (όπως προσδιορίζεται από την ποσότητα της κατείσδυσης)
- Επαγωγική τροφοδοσία υδροφορέα (όπως καθορίζεται από την απόσταση από επιφανειακά σώματα νερού).

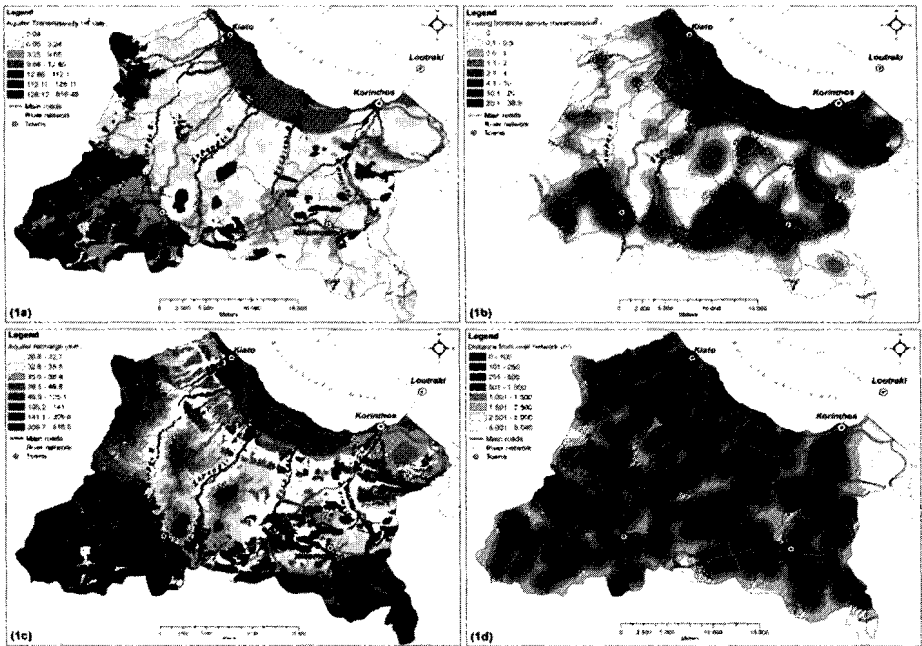
Η επίδραση της δεύτερης κατηγορίας κριτηρίων έγκειται στο γεγονός, ότι ένα υδρομαστευτικό έργο για όποια χρήση και αν προορίζεται, πρέπει να έχει μια εξασφαλισμένη ποιότητα νερού, που να το καθιστά κατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση. Εκτός από την υφιστάμενη κατάσταση θα πρέπει εάν είναι δυνατόν να λαμβάνεται υπ' όψη και η μελλοντική ποιοτική κατάσταση του υπόγειου νερού, με βάση εκτιμήσεις για την εξέλιξη της ποιοτικής κατάστασης των υδροφόρων.

Η υφιστάμενη ποιοτική κατάσταση του υπόγειου νερού, μπορεί να αποδοθεί με τη χρήση ενός γενικού δείκτη της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού, όπως τα συνολικά διαλυμένα στερεά ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα ή και με επιμέρους δείκτες, όπως η συγκέντρωση συγκεκριμένων στοιχείων. Για παράδειγμα στην περιοχή έρευνας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ή των χλωριόντων. Για την περιοχή έρευνας κρίθηκε καταλληλότερη η χρήση ενός γενικότερου δείκτη όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεδομένου ότι η ποιοτική υποβάθμιση οφείλεται σε πολλούς παράγοντες και εκφράζεται κατά τόπους με διαφορετικούς ποιοτικούς δείκτες.

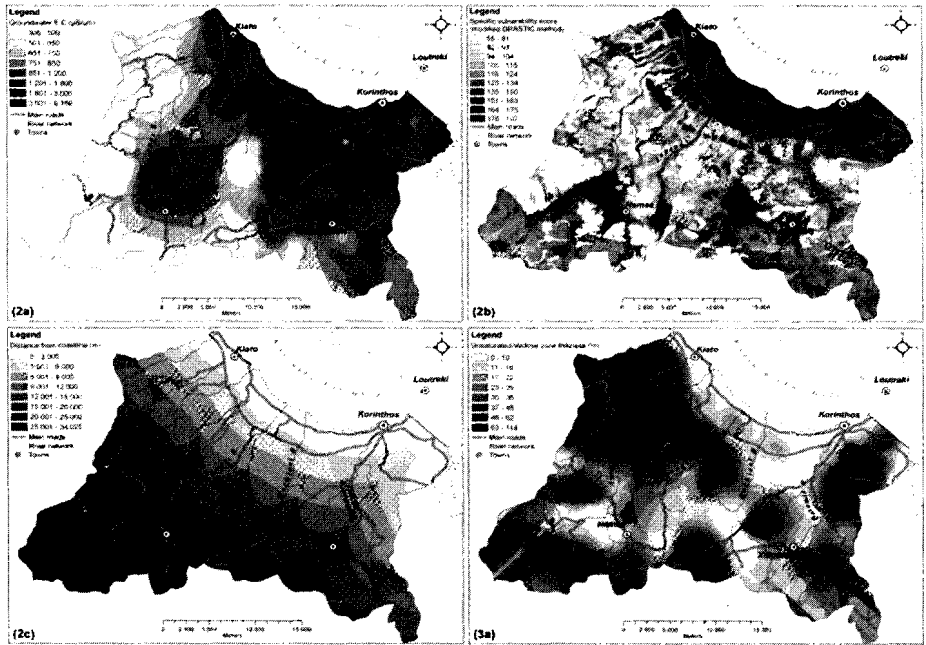
Η μελλοντική ποιοτική κατάσταση του υπόγειου νερού στην περιοχή έρευνας καθορίζεται κυρίως από το δυναμικό μόλυνσης της περιοχής όπως υπολογίστηκε από τις μεθόδους της προηγούμενης παραγράφου αλλά και από το δυναμικό υφαλμύρισης, δεδομένου ότι η υφαλμύριση είναι ένα φαινόμενο που βρίσκεται σε εξέλιξη τόσο στους προσχωματικούς όσο και στους καρστικούς σχηματισμούς της περιοχής έρευνας. Το δυναμικό υφαλμύρισης απουσία άλλων στοιχείων καθορίζεται για την περιοχή έρευνας από την απόσταση από την ακτογραμμή.

Με τους παραπάνω συλλογισμούς επιλέχθηκαν τρία κύρια κριτήρια ποιότητας που είναι:

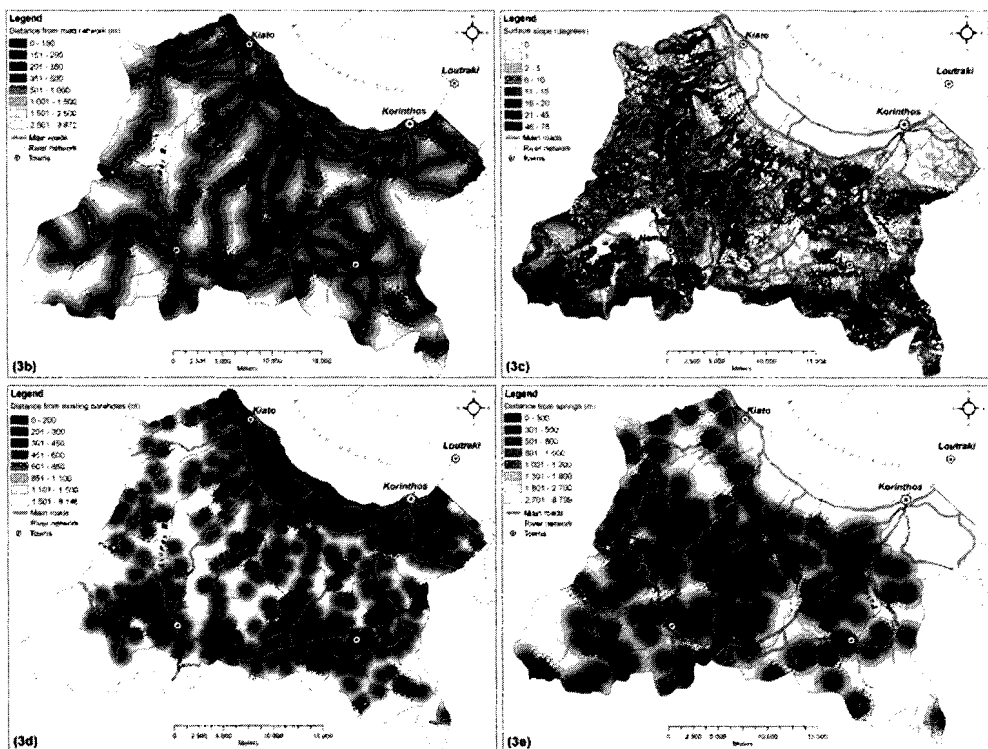
- Υφιστάμενη ποιοτική κατάσταση (όπως εκφράζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα)
- δυναμικό μόλυνσης υδροφόρων (όπως εκφράζεται από την εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου DRASTIC για τον υπολογισμό της τρωτότητας)
- δυναμικό υφαλμύρισης (όπως εκφράζεται από την απόσταση από την ακτογραμμή).



Σχήμα 3. Κατανομή των κριτηρίων απόδοσης στην περιοχή έρευνας.



Η επίδραση της τρίτης κατηγορίας κριτηρίων έγκειται στο γεγονός, ότι η κατασκευή ενός νέου υδρομαστευτικού έργου πρέπει να είναι αφενός οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με εναλλακτικές ευνοϊκές θέσεις βάσει των κριτηρίων απόδοσης και ποιότητας, και αφετέρου συμβατή με περιορισμούς που έχουν να κάνουν με την απόσταση από υφιστάμενα υδρομαστευτικά έργα, τόσο για λόγους τήρησης των νομικών περιορισμών, όσο και για λόγους διατήρησης της ισορροπίας στο υδατικό ισοζύγιο των υδροφορών. Ορισμένοι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός υδρομαστευτικού έργου είναι το βάθος διάτρησης, το οποίο καθορίζεται από το πάχος της ακόρεστης ζώνης για τους ελεύθερους υδροφορείς και το πάχος της αδιαπέρατης οροφής για τους υπό πίεση ή υδροφορείς.



Σχήμα 5. Κατανομή των τεχνικών κριτηρίων στην περιοχή έρευνας.

Ένα επιπλέον στοιχείο που καθορίζει το κόστος κατασκευής είναι η ευκολία προσπέλασης, η οποία καθορίζεται από την απόσταση κάθε σημείου από το υφιστάμενο οδικό δίκτυο και τέλος η μορφολογία του σημείου, δεδομένου ότι σημεία με μεγάλες κλίσεις εδάφους είναι δύσκολα στην προσπέλαση και απαιτούν επιπλέον έργα διαμόρφωσης πριν την ανόρυξη του υδρομαστευτικού έργου. Τέλος το κατά πόσο μια θέση είναι συμβατή από νομικής και υδρογεωλογικής άποψης σε σχέση με τα υφιστάμενα υδρομαστευτικά έργα καθορίζεται από την απόσταση της θέσης τόσο από τα τεχνητά έργα υδρομάστευσης (φρέατα, γεωτρήσεις), όσο και από τις φυσικές εκφορτίσεις των υδροφόρων (πηγές). Με βάση τις παραπάνω παραδοχές επιλέχθηκαν πέντε κριτήρια οικονομοτεχνικής φύσεως που είναι:

- Κόστος ανόρυξης (όπως εκφράζεται από το πάχος της ακόρεστης ζώνης)
- Ευκολία προσπέλασης (όπως εκφράζεται από την απόσταση από το οδικό δίκτυο)
- Μορφολογία (όπως εκφράζεται από την κλίση του εδάφους)
- Απόσταση από υφιστάμενα τεχνικά έργα υδρομάστευσης (απόσταση από φρέατα, γεωτρήσεις)
- Απόσταση από φυσικές εκφορτίσεις των υδροφόρων (πηγές).

Οι κατανομές και των 12 κριτηρίων παρουσιάζονται με τη μορφή χαρτών στα Σχήματα 3 έως 5.

2.3 Διαδικασία κατάρτισης του μοντέλου πολυκριτηριακής ανάλυσης

Η βαρύτητα με την οποία κάθε ένα από τα 12 κριτήρια επηρεάζει την τελική βαθμονόμηση ενός σημείου καθορίζεται από τις εκάστοτε υδρογεωλογικές και οικονομοτεχνικές συνθήκες, αλλά μπορεί να λεχθεί, ότι σε γενικές γραμμές τα κριτήρια απόδοσης και ποιότητας παίζουν καθοριστικότερο ρόλο σε σχέση με τα οικονομοτεχνικά.

Για τον υπολογισμό της τελικής βαθμονόμησης κάθε σημείου όλα τα παραπάνω κριτήρια πρέπει να υπαχθούν σε μια κοινή αριθμητική κλίμακα και να τους αποδοθούν σχετικοί συντελεστές βαρύτητας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, ο απλούστερος εκ των οποίων, είναι η αυθαίρετη μετατροπή κάθε παραμέτρου σε κοινή κλίμακα και η αυθαίρετη απόδοση συντελεστών βαρύτητας, κατά την υποκειμενική κρίση του ερευνητή. Στη συνέχεια όλες οι παράμετροι εισάγονται σε μια απλή γραμμική εξίσωση με συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών, τους συντελεστές βαρύτητας που επιλέχθηκαν.

Η κυριότερη αδυναμία αυτού του συστήματος εκτός από την υποκειμενικότητα επιλογής, που είναι αναπόφευκτη λόγω μη ύπαρξης αντικειμενικών κανόνων, είναι η γραμμικά αυξητική τάση, τόσο των επιμέρους κριτηρίων όσο και του συνδυασμού τους, η οποία δεν μπορεί να ενσωματώσει απότομες μεταβολές τόσο στα επιμέρους κριτήρια όσο και στο αλγεβρικό άθροισμά τους.

Μια εναλλακτική προσέγγιση βασισμένη σε παρόμοια λογική αλλά πολύ πιο ευπροσάρμοστη τόσο στη μετατροπή της κλίμακας των παραμέτρων όσο και στον μεταξύ τους συνδυασμό είναι η προσέγγιση της ασαφούς λογικής. Η βασική αρχή της ασαφούς λογικής είναι η μετατροπή κάθε παραμέτρου που υπεισέρχεται στο πρόβλημα σε μια σχετική κλίμακα από το 0 έως το 1 και η δημιουργία των λεγόμενων ασαφών ζευγών που ορίζονται από μία παράμετρο X και μια συνάρτηση συμμετοχής $\mu(x)$:

$$\{[x, \mu(x)] \forall x \in X\} \quad (1)$$

Η συνάρτηση συμμετοχής $\mu(x)$ έχει τη μορφή:

$$\mu(X) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \mu(x) & \alpha < x < \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases} \quad (2)$$

Όπου: X = η αρχική παράμετρος

x = η τιμές της παραμέτρου X

α, β = η κατώτερη και ανώτερη τιμή της παραμέτρου X

$\mu(x)$ = συνάρτηση του x για την οποία ισχύει $0 < \mu(x) < 1$

Η συνάρτηση $\mu(x)$ μπορεί κατά περίπτωση να υποκαθίσταται από ένα πίνακα μετατροπής με τον οποίο σε κάθε καθορισμένο εύρος τιμών της παραμέτρου X αποδίδεται αυθαίρετα μια τιμή, κυρίως σε περιπτώσεις όπου η μεταβλητή X έχει διακριτές και όχι συνεχείς τιμές.

Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης συμμετοχής για την μετατροπή των παραμέτρων εναπόκειται στην κρίση του ερευνητή, και θα πρέπει να αντικατοπτρίζει τόσο την σχετική βαρύτητα κάθε κλάσεως της παραμέτρου, όσο και τη σχετική βαρύτητα της παραμέτρου στο σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν την τελική βαθμονόμηση. Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να έχουν διάφορες μορφές ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, κυριότερες από τις οποίες είναι οι τραπεζοειδείς, οι τριγωνικές, οι σιγμοειδείς, και άλλες (Σχ. 6) (Tsoukalas & Uhrig, 1997). Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιούνται σιγμοειδείς συναρτήσεις γιατί κρίθηκε ότι ανταποκρίνονται καλύτερα στον τρόπο μεταβολής της επίδρασης των παραμέτρων στην τελική βαθμονόμηση.

Για τη μετατροπή των κατανομών των αρχικών παραμέτρων με αυτές τις εξισώσεις και για την εφαρμογή του συνόλου της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcSDM3, το οποίο αποτελεί επέκταση (extension) του λογισμικού ArcGIS 9.x. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί για τη δημιουργία των ασαφών ζευγών τις παρακάτω σιγμοειδείς συναρτήσεις (Lou & Dimitrakopoulos, 2003):

$$\mu_1(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad \text{η οποία χαρακτηρίζεται "Large"}$$

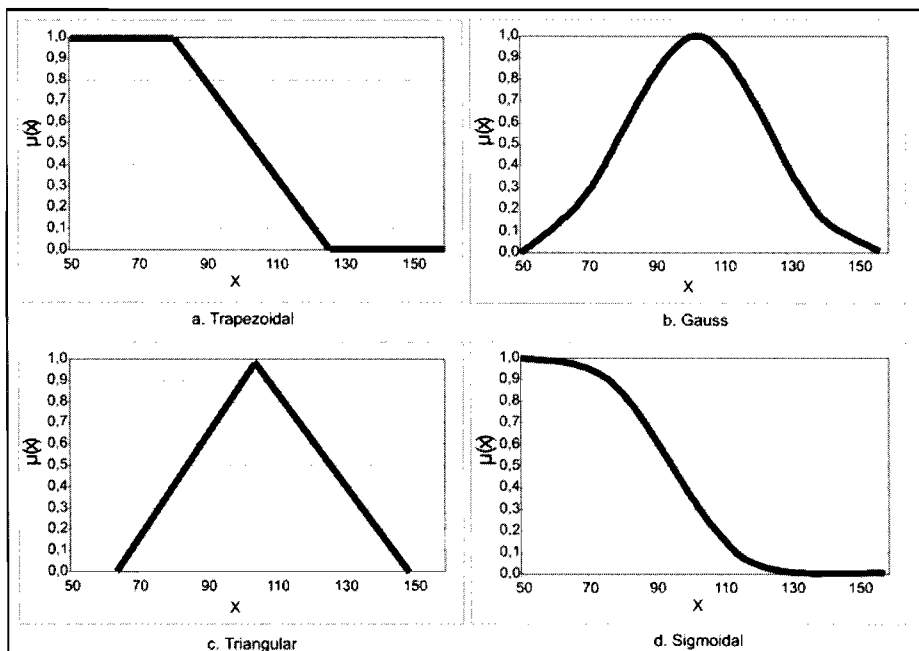
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

$$\mu_2(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}}$$

η οποία χαρακτηρίζεται "Small"

Όπου f_1 = δείκτης διασποράς των τιμών x

f_2 = κεντρικό σημείο των τιμών x , το σημείο δηλαδή όπου $\mu(x) = 0,5$



Σχήμα 6. Γραφικές παραστάσεις των διαφόρων τύπων συναρτήσεων συμμετοχής.

Για τη μεγιστοποίηση της ευελιξίας μετατροπής των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν και δύο παράγωγα των παραπάνω συναρτήσεων ανά περίπτωση:

$$\mu_3(x) = [\mu_1(x)]^2 \quad \text{η οποία χαρακτηρίζεται "Very large"}$$

$$\mu_4(x) = \sqrt{\mu_1(x)} \quad \text{η οποία χαρακτηρίζεται "Somewhat large"}$$

$$\mu_5(x) = [\mu_2(x)]^2 \quad \text{η οποία χαρακτηρίζεται "Very Small" και}$$

$$\mu_6(x) = \sqrt{\mu_2(x)} \quad \text{η οποία χαρακτηρίζεται "Somewhat Small"}$$

$$H^{OR} = \max(H^1, H^2, \dots, H^n)$$

2. Το αραιότερο δόνημα ή σασφές «Η», το οποίο υπολογίζεται από τη συνάρτηση

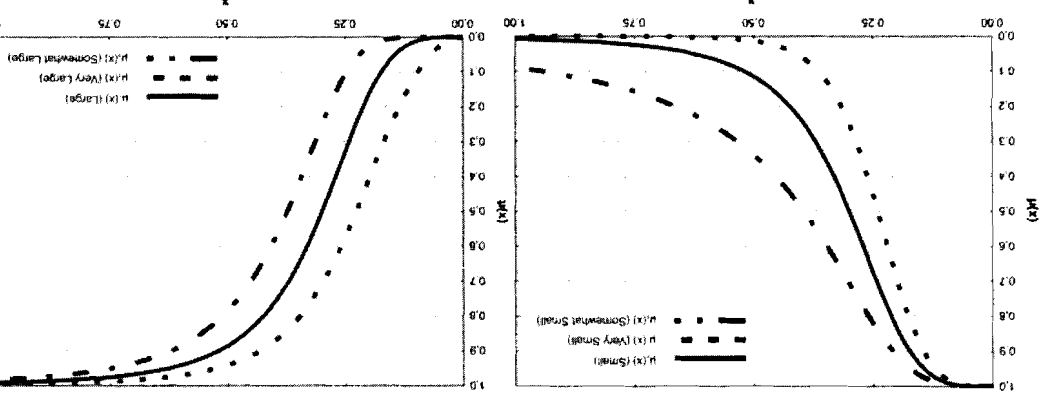
$$H^{AND} = \min(H^1, H^2, \dots, H^n)$$

1. Το κατεστραμένο γινόμενο ή σασφές «ΚΑΙ» το οποίο υπολογίζεται από τη συνάρτηση (Tsoukalas & Uhrig, 1997; Bonham-Carter, 1994):
 Για τον συνδυασμό των σασφών κατανομή των τετραγώνων ή τετράγωνων βεβαιολογία της υπέρχου των διαφόρων μεθόδων τελετών, σημειώνονται εκ των οποίων είναι οι ακρόατοι παραπάνω παραμέτρων μεταρρύθμιση σε σασφές.
 Με τη βοήθεια των GIS και των συναρτήσεων συμπεριφοράς οι αρχικές κατανομές όλων των

Παράμετρος	Συνάρτηση	Δείκτης	Κεντρικό σημείο f_2
Μεταβαστικότητα υδροφόρου (m ² /day)	$\mu_1(x)$	1	5
Κατέδραση (m)	$\mu_1(x)$	4	250
Απόσταση από κεντρικούς κάδους του υδροφόρου δικτύου (m)	$\mu_5(x)$	1	500
Ηλεκτρική αγωγιμότητα υπέρχου νερού (μS/cm)	$\mu_2(x)$	5	1000
Δυναμική πόληνη υδροφόρων	$\mu_5(x)$	5	80
Απόσταση από την ακτογραμμή (m)	$\mu_4(x)$	4	1000
Πάχος ακρόατης ζώνης (m)	$\mu_6(x)$	4	30
Απόσταση από οδικό δίκτυο (m)	$\mu_6(x)$	3	1000
Κλίση εδάφους (m/δρς)	$\mu_5(x)$	5	10
Απόσταση από υδροφόρο υδρομετεωρικό έργο (m)	$\mu_1(x)$	5	500
Απόσταση από πηλές (m)	$\mu_1(x)$	5	1000
Πυκνότητα υδρομετεωρικών έργων (έργα/κμ ²)	$\mu_1(x)$	3	10

Πίνακας 1. Είδη και χαρακτηριστικοί δείκτες των συναρτήσεων συμπεριφοράς των παραμέτρων του μοντέλου.

Σχήμα 7. Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των σασφών στην περιοχή έρευνας.



Στο σχήμα 7 παραπορουσιάζονται τα διαγράμματα των σιγμοειδών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για να ακολουθεί η παραβέντα τα είδη και οι δείκτες των συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την σασφά των παραμέτρων του μοντέλου. Τέλος στο σχήμα 8 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμπεριφοράς για όλα τις παραμέτρους.

3. Το αλγεβρικό γινόμενο το οποίο υπολογίζεται από τη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_p = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

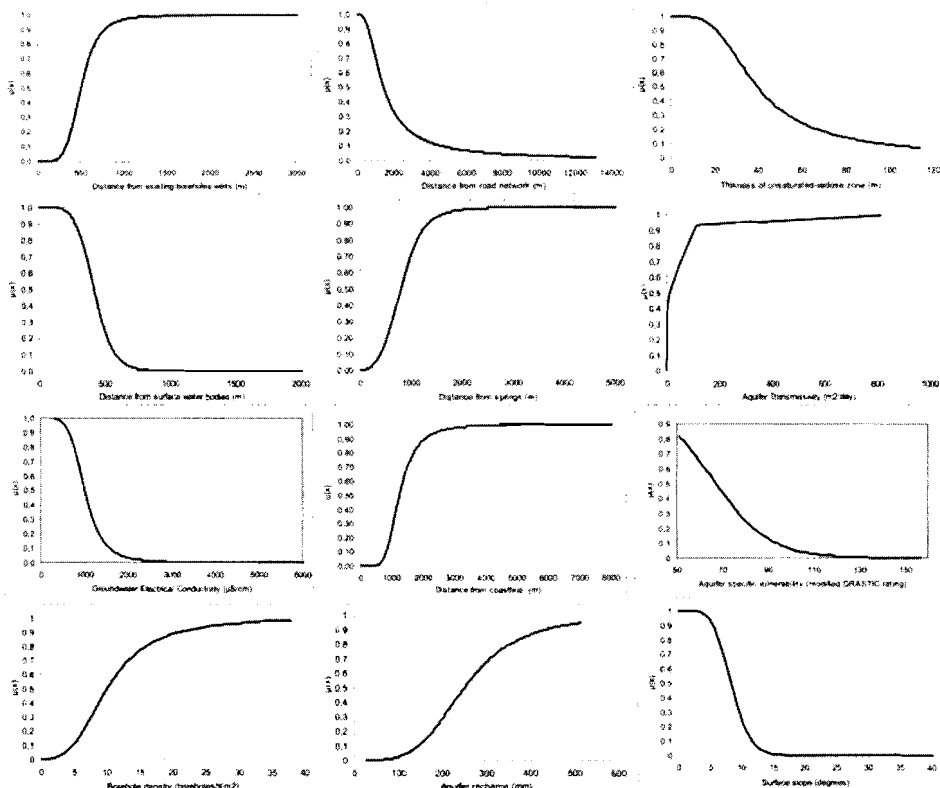
4. Το αλγεβρικό άθροισμα το οποίο υπολογίζεται από τη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

5. Ο τελεστής γ (γάμμα), ο οποίος υπολογίζεται από τη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_\gamma = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^\gamma \cdot \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{1-\gamma}$$

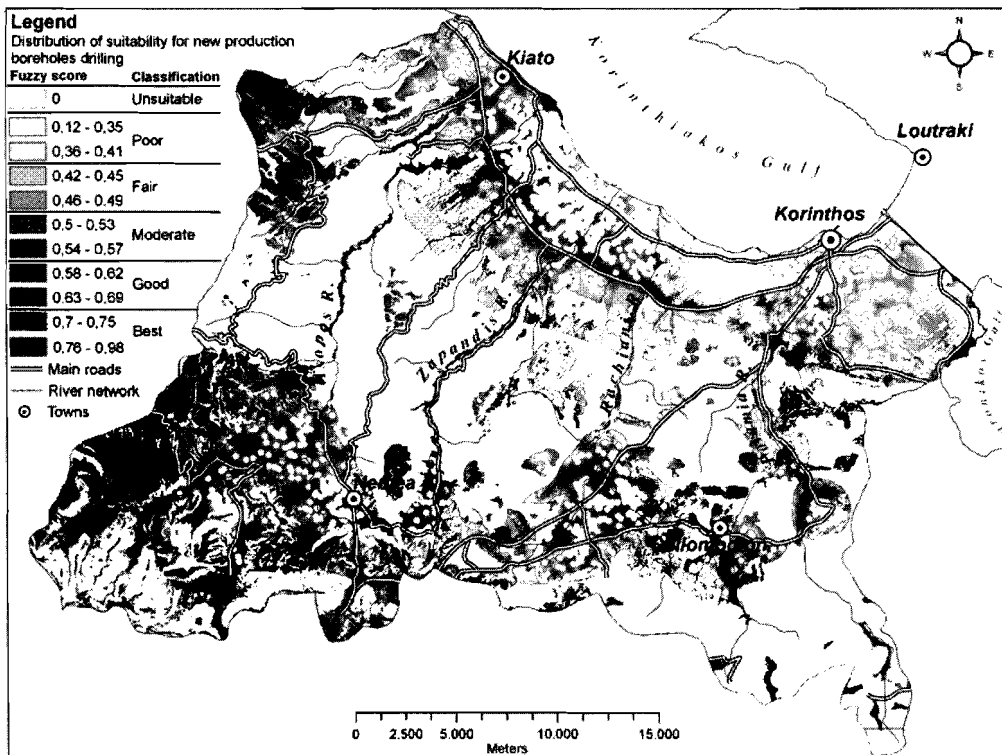
Η επιλογή ενδιάμεσων τιμών του συντελεστή γάμμα περιορίζει την αυξητική τάση του αλγεβρικού γινομένου και τη μειωτική τάση του αλγεβρικού αθροίσματος και παράγει ένα ισορροπημένο τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 8. Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των σασφών ζευγών στην περιοχή έρευνας.

παράδειγμα στην απόσταση από υφιστάμενα έργα υδροληψίας και στην απόσταση από πηγές, όπου πρέπει να συνηγορούν και οι δύο συνθήκες, για την καταλληλότητα της θέσης.

Με τη χρήση των δύο αυτών τελεστών δημιουργήθηκαν 7 συνδυαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική βαθμονόμηση, οι οποίοι συνδυάστηκαν με έναν τελεστή «γάμμα» με $\gamma=0,95$. Το συνολικό οργανόγραμμα εφαρμογής των ασαφών τελεστών παρουσιάζεται στο Σχήμα 9, ενώ στο χάρτη του Σχήματος 10 παρουσιάζεται η κατανομή της τελικής βαθμονόμησης θέσεων για την ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων.



Σχήμα 10. Χάρτης κατανομής καταλληλότητας για την ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως παρατηρείται στον χάρτη κατανομής της καταλληλότητας μεγάλες εκτάσεις της περιοχής έρευνας έχουν τιμή 0, είναι δηλαδή εντελώς ακατάλληλες για ανόρυξη νέων υδρομαστευτικών έργων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιοχές αυτές ένας ή περισσότεροι από τους παράγοντες που συμμετέχουν καθιστούν τη θέση ακατάλληλη, π.χ. ο παράγοντας απόδοση για τις περιοχές όπου εμφανίζονται οι μάργες ή ο παράγοντας ποιότητα για μεγάλα τμήματα της παράκτιας περιοχής.

Συνάγεται λοιπόν ότι η επιλογή της μεθόδου της ασαφούς λογικής και του συνδυασμού τελεστών που χρησιμοποιήθηκαν καταφέρνουν να επικεντρώσουν τα αποτελέσματα σε θέσεις κατάλληλες από κάθε άποψη για την ανόρυξη νέων έργων υδρομαστευτικού, βαθμονομώντας περαιτέρω τις θέσεις αυτές με βάση την ικανοποίηση των βέλτιστων συνθηκών.

Όπως προκύπτει οι βέλτιστες θέσεις στην περιοχή έρευνας τοποθετούνται στους σχηματισμούς των κροκαλοπαγών δυτικά της περιοχής Νεμέας και περίξ των οικισμών Κρουονέρι και Σούλι, καθώς και σε όλες τις προσχωματικές λεκάνες και τις περιοχές πλησίον της κοίτης των ποταμών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποιες θέσεις με υψηλή καταλληλότητα που εντοπίζονται στην ανώτερη ζώνη του παράκτιου προσχωματικού υδροφορέα, δεδομένης της μεγάλης ζήτησης νερού

στην ευρύτερη περιοχή και την απουσία κατάλληλων περιοχών, λόγω της υποβαθμισμένης ποιότητας του υπόγειου νερού αλλά και της πυκνότητας των υφιστάμενων έργων.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης με τη χρήση ασαφούς λογικής διαθέτει μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Με αλλαγές στο είδος και τους δείκτες των συναρτήσεων συμμετοχής αλλά και επιλογή διαφορετικού συνδυασμού τελεστών μπορεί το τελικό αποτέλεσμα να διαμορφωθεί ανάλογα με τις προτεραιότητες της έρευνας. Εάν για παράδειγμα αναζητούσαμε τις καταλληλότερες θέσεις για έργα υδρομάτευσης που προορίζονται για ύδρευση θα αυξάναμε την επίδραση των παραγόντων ποιότητας και θα μειώναμε στο ελάχιστο την επίδραση των οικονομοτεχνικών παραγόντων. Επίσης θα μπορούσε εάν επρόκειτο για συγκεκριμένους αποδέκτες να προστεθεί και ο παράγοντας της απόστασης από τους τελικούς αποδέκτες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Πατρών για την οικονομική υποστήριξη της παρούσας έρευνας μέσω του προγράμματος Καραθεοδωρή 2003-2006 με τίτλο «Μελέτη των μηχανισμών ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών του Νομού Κορινθίας από φυσικές διεργασίες και ανθρωπογενείς δραστηριότητες με τη χρήση υδροχημικών-ισοτοπικών μεθόδων σε συνεργασία με προηγμένες τεχνικές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και μοντέλων προσομοίωσης»

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Antonakos A., Lambrakis N., 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates based on the DRASTIC model, *Journal of Hydrology*, Vol. 333 (3-4): 288-304.
- Bonham-Carter, Graeme F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists*, New York, Pergamon.
- Doutsos, T., and Piper, D.J.W., 1990. Listric faulting, sedimentation, and morphological evolution of the Quaternary eastern Corinth rift, Greece: first stages of continental rifting. *Geol. Soc. Am. Bull.* 102, 812-829.
- Keraudren, B., and Sorel, D., 1987. The terraces of Corinth (Greece): A detailed record of eustatic sea-level variations during the last 500,000 years. *Mar. Geol.* 77, 99-107.
- Koukis, G., Nikolaou, N., Pirgiotis, L., 1996. Runoff and proposed storage works in the county of Korinthos. *Proc. 2nd Panellenic Conference, Geotechnical chamber of Greece, Larissa*, Vol. II, 910-924.
- Κουμαντάκης Ι., Παναγόπουλος Α., Βουδούρης, Κ., Σταυρόπουλος Ξ., 1999. Υδρογεωλογική έρευνα τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων της παραλιακής και ημιλοφώδους ζώνης Νομού Κορινθίας. Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος. Τομέας Γεωλογικών Σπουδών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργιών, ΕΜΠ.
- Luo, X., Dimitrakopoulos, R., 2003. Data-driven fuzzy analysis in quantitative mineral resource assessment. *Computer Geosciences* 29, 3-13.
- Stamatis, G., Voudouris, K., 2003. Marine and human activity influences on the groundwater quality of southern Korinthos area (Greece). *Hydrological processes*, 17, 2327-2345.
- Thorntwaite, CW. and Mather, J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Vol. 10, No 3, CW Thorntwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, New Jersey, USA.
- Tsoukalas, L.H., and Uhrig, R.E., 1997. *Fuzzy and neural approaches in engineering*: New York, John Wiley and Sons, Inc., 587 p.
- Voudouris K., Panagopoulos, A. and Daniil, D., 2000a. Implications to surface water quality of Korinthos Prefecture from anthropogenic activities, *Proc. Int. Conf. Protection and Restoration of the Environment V*, Thassos, Greece, July 2000.
- Voudouris, K., Panagopoulos, A., Koumantakis, J., 2000b. Multivariate statistical analysis in the assessment of hydrochemistry of the northern Korinthia Prefecture alluvial aquifer system, Peloponnese, Greece. *Natural Resources Research* 9, 135-143.
- Voudouris K., Panagopoulos, A., Koumantakis, J., 2004. Nitrate pollution in the coastal aquifer system of the Korinthos Prefecture (Greece). *Global Nest: The International Journal*, Vol. 6, No 1, 31-38.
- Voudouris, K., Mavrommatis, T., Antonakos, A., 2007. Hydrologic balance estimation using GIS in Korinthia prefecture, Greece. *Advances in Science and Research* 1, 1-8.
- Zellidis, A., 2000. Drainage evolution in a rifted basin, Corinth graben Greece. *Elsevier. Geomorphology* 35, 69-85.