

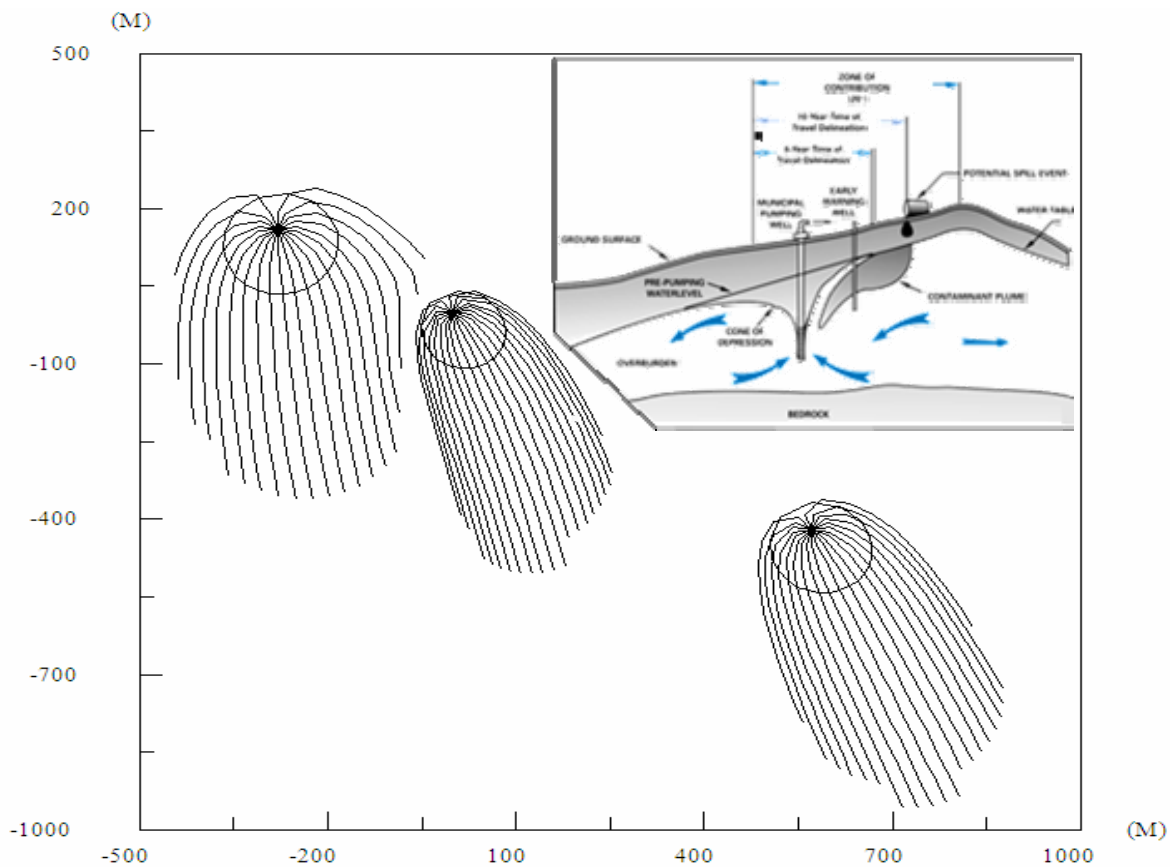


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική»

Ζώνες Προστασίας Έργων Υδροληψίας

Wellhead Protection Areas



Δρανδάκη Μαρία

Υπεύθυνος Καθηγητής:

κ. Γεώργιος Καρατζάς

Χανιά, Ιούλιος 2008

Ζώνες προστασίας έργων υδροληψίας

Wellhead Protection Areas

Περίληψη

Ο καθορισμός ζωνών προστασίας γύρω από έργα υδροληψίας (WHPA) αποτελεί απαραίτητο μέτρο για την προστασία του αντλούμενου νερού και της δημόσιας υγείας. Η διαφύλαξη της ποιότητας του νερού, ως πολύτιμου αγαθού, είναι ιδιαίτερο μέλημα για κάθε πολιτεία, που σε συνεργασία με το κατάλληλο επιστημονικό προσωπικό ορίζει τα μέτρα προστασίας και τον τρόπο σχεδιασμού των WHPA για το εκάστοτε έργο. Ταυτόχρονα, η αξιολόγηση των πηγών παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το μέγεθος του υγιεινολογικού κινδύνου και χρειάζεται να γίνεται με βάση τις προδιαγραφές που ορίζει ο Π.Ο.Υ. σε τακτά χρονικά διαστήματα. Σχετικά με το σχεδιασμό των WHPA έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι μέσω της εφαρμογής διάφορων προγραμμάτων. Το μοντέλο "WHPA version 2.2" της EPA αποτελεί ένα εύχρηστο και φιλικό προς τον χρήστη εργαλείο για αυτόν το σκοπό. Στη συγκεκριμένη εργασία, εφαρμόζεται το αναλυτικό υπομοντέλο RESSQC για τον WHPA σχεδιασμό τριών υδρογεωτρήσεων στην περιοχή της Αγιάς στα Χανιά. Έχοντας ως κριτήριο τον «χρόνο διαδρομής», στόχος είναι ο ακριβέστερος δυνατός προσδιορισμός της «ζώνης των 50 ημερών» και η μελέτη της πιθανής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πηγαδιών αυτών.

1. Εισαγωγή

Το νερό είναι στοιχείο ζωτικής σημασίας, που συνδέεται άρρηκτα με όλες τις πτυχές και εκφάνσεις του ανθρώπινου βίου και πολιτισμού. Η εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων πόσιμου ύδατος σωστής ποιότητας αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα. Το υπόγειο ύδωρ καλύπτει ένα

σημαντικό ποσοστό παροχής πόσιμου ύδατος, αλλά η ποιότητά του απειλείται σήμερα από τις ποικίλες ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες αυξάνουν τον κίνδυνο ρύπανσης και μόλυνσης αυτού.

Η στενή σχέση του νερού με τη ζωή και τις ζωτικές ανθρώπινες λειτουργίες το κατέστησε ιερό σύμβολο σε πολλές θρησκείες και πολιτισμούς. Ο πρωτόγονος άνθρωπος θεοποίησε το ευεργετικό αυτό στοιχείο που έδιωχνε τις ξηρασίες και αναζωογονούσε τον φυσικό κόσμο, επιφέροντας την ευφορία και την αναγέννηση. Μεγάλοι πολιτισμοί, όπως ο αρχαίος ελληνικός που συνδεόταν στενά με τη θάλασσα, έθεσαν το ύδωρ στο επίκεντρο κοινωνικών δραστηριοτήτων και λατρευτικών τελετών. Στην ορθόδοξη λατρεία με το μυστήριο της βάπτισης το νερό λειτουργεί ως μέσο αναγέννησης του ανθρώπου, ενώ με τον αγιασμό εξαγιάζεται ανακαινίζοντας όλο τον κόσμο. Το «ὕδωρ τὸ ζῶν» (Ιω. 4,10-14) ανακουφίζει την πνευματική δίψα και την αναζήτηση της ανθρώπινης ψυχής για το νόημα της ζωής.

Επομένως, η σημασία της ύπαρξης νερού καλής ποιότητας καταδεικνύεται πολλαπλώς τόσο στην πρακτική όσο και στη πνευματική διάσταση της ζωής. Ο βαθμός της ατομικής και συλλογικής προσπάθειας για την προστασία του και τη διασφάλισή της τελικής παρεχόμενης ποιότητας, που φτάνει προς κατανάλωση, αντανακλά και το επίπεδο του πολιτισμού και την ποιότητα ζωής μιας κοινωνίας.

Σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/2001 («Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης»), το παρεχόμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις, ώστε να θεωρείται πόσιμο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η απόφαση αυτή συντάχθηκε με «στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας από τις δυσμενείς επιπτώσεις που οφείλονται στη

ρύπανση ή/ και μόλυνση του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, διασφαλίζοντας ότι είναι υγιεινό και καθαρό». Προκειμένου, λοιπόν, το νερό που παρέχεται για ανθρώπινη κατανάλωση να ανταποκρίνεται στις αναφερόμενες απαιτήσεις και στα πλαίσια προστασίας της δημόσιας υγείας είναι αναγκαίο να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των πηγών υδροληψίας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Καταλυτικό ρόλο παίζουν οι ζώνες προστασίας γύρω από τα σημεία υδροληψίας, που έχουν οριστεί σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν. 1650/86 για το περιβάλλον και του Ν. 1739/87 για τη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η ανάδειξη της αναγκαιότητας των ζωνών προστασίας υδροληψίας (WHPA) γύρω από οποιαδήποτε υδροληπτικό έργο υπόγειου ύδατος. Αρχικά γίνεται αναφορά στους τρόπους υγιεινολογικής προστασίας και αξιολόγησης ενός έργου υδροληψίας, καθώς και της γύρω περιοχής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρόποι για τον καθορισμό και σχεδιασμό των WHPA. Τελικά γίνεται εφαρμογή του μοντέλου “WHPA version 2.2” για τρεις ενεργές υδρογεωτρήσεις στην περιοχή της Αγιάς στα Χανιά, οι οποίες βρίσκονται υπό την εποπτεία του ΟΑΔΥΚ. Χρησιμοποιείται το υπομοντέλο RESSQC, οπότε ο WHPA σχεδιασμός γίνεται βάσει του κριτηρίου «χρόνος διαδρομής», ενώ τα αποτελέσματα εξάγονται μελετώντας τη ζώνη προστασίας των 50 ημερών.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1.Ορισμοί

Σύμφωνα με την SDWA (Safe Drinking Water Act) η ζώνη προστασίας γύρω από ένα σημείο υδροληψίας (π.χ. πηγή, υδρογεώτρηση) ορίζεται ως η περιοχή του εδάφους και του υπεδάφους γύρω από το σημείο υδροληψίας, μέσω της οποίας ενδέχεται να εισχωρήσουν ουσίες, οι οποίες θα επηρεάσουν την ποιότητα του αντλούμενου νερού.

Παράλληλα, σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/01, ως «πόσιμο νερό» νοείται το νερό που χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση, είτε με προηγούμενη επεξεργασία είτε όχι, οποιαδήποτε και αν είναι η προέλευσή του, είτε πρόκειται για το νερό που διατίθεται για ανθρώπινη κατανάλωση είτε πρόκειται για νερό που χρησιμοποιείται σε μία επιχείρηση τροφίμων με σκοπό την παρασκευή, κατεργασία, συντήρηση και διάθεση στην αγορά προϊόντων είτε πρόκειται για νερό που επηρεάζει τον τελικό βαθμό υγιεινότητας των τροφίμων και των ποτών.

2.2.Υγιεινολογική προστασία της περιοχής των έργων υδροληψίας ποσίμου νερού

Η υγιεινολογική προστασία των σημείων υδροληψίας και της περιοχής περιμετρικά αυτών αποσκοπεί στην εξασφάλιση της καλής ποιότητας του αντλούμενου νερού, ώστε οι τιμές των μικροβιολογικών και φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του να εμπίπτουν εντός των ορίων που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΚΥΑ Υ2/2600/01). Κύριος στόχος είναι να αποτραπεί η επιβάρυνση των υπογείων υδάτων με ανεπιθύμητους οργανικούς ή ανόργανους ρύπους επιφανειακής προέλευσης.

2.2.1. Προστασία του έργου υδροληψίας

Τα βασικά μέτρα για την προστασία του έργου υδροληψίας είναι (Καλλέργης Γ., 2000):

- i) Η εκτέλεση λεπτομερειακής υδρογεωλογικής μελέτης από εξειδικευμένο υδρογεωλόγο, ώστε η αρχική επιλογή της θέσης του έργου να γίνεται με κριτήριο όχι μόνο την βέλτιστη απόδοση του έργου αλλά και την υγιεινολογική του προστασία από υφιστάμενες ή μελλοντικές δραστηριότητες στην περιοχή που υδρομαστεύεται άμεσα ή έμμεσα από το έργο. Το μέτρο αυτό αν και είναι προληπτικό, αποβαίνει συχνά δαπανηρό, καθώς τα απαιτούμενα ερευνητικά έργα κοστίζουν αρκετά. Εντούτοις, το κόστος αυτό είναι τελικά πολύ μικρότερο από το κοινωνικό κόστος ή από το κόστος των έργων εξυγίανσης που θα απαιτηθούν εάν ενδεχομένως το νερό ρυπανθεί.
- ii) Η πρόληψη της μόλυνσης του υδροφόρου κατά τις εργασίες κατασκευής του έργου υδροληψίας.
- iii) Η κατάλληλη κατασκευή του έργου υδροληψίας, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση του υδροφόρου από επιφανειακά ή άλλα ακατάλληλα νερά.
- iv) Η απολύμανση του έργου υδροληψίας.

Για παράδειγμα, κατά την κατασκευή μιας υδρογεώτρησης θα πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω:

- Η υδροληψία θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον από βάθος 4 – 5 m ή βαθύτερα, ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες. Το ανώτερο αυτό τμήμα θα πρέπει οπωσδήποτε να τσιμεντώνεται ακόμη και όταν εκεί υπάρχει υδροφόρο στρώμα. Η τσιμεντόνωση γίνεται μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

- Θα πρέπει να αποκλείεται η επικοινωνία ανάμεσα στο τμήμα της υδρογεώτρησης όπου γίνεται η υδροληψία και στο τμήμα της τυφλής σωλήνωσης με την ύπαρξη κενού μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της σωλήνωσης.
- Στην κεφαλή της γεώτρησης πρέπει να αφαιρείται το έδαφος και να τοποθετείται πλάκα από τσιμέντο πάχους τουλάχιστον 0,5 m και ακτίνας περίπου τριπλάσιας από τη διάμετρο της διάτρησης. Η πλάκα αυτή θα πρέπει πρακτικά να είναι η προς την επιφάνεια συνέχεια του τμήματος της γεώτρησης. Συνήθως γίνεται διάτρηση μεγάλης διαμέτρου στα πάνω μέτρα τα οποία τσιμεντώνονται και στη συνέχεια μετά το πήξιμο του τσιμέντου γίνεται επαναδιάτρηση αυτού του τμήματος.
- Θα πρέπει να εξασφαλίζεται στεγανότητα στο επιφανειακό τμήμα της υδρογεώτρησης, όπου τοποθετείται η αντλία.

Οι ερευνητικές εργασίες που πρέπει να προηγούνται του καθορισμού των κριτηρίων για την προστασία των έργων υδροληψίας περιλαμβάνουν, ενδεικτικά, τα παρακάτω:

- ✓ τον καθορισμό της λεκάνης τροφοδοσίας των έργων υδροληψίας με γεωλογικά και μορφολογικά κριτήρια
- ✓ τη σύνταξη χάρτη κλίμακος 1:1.000 ή 1:3.000, με τους διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς που απαντούν στην ευρύτερη περιοχή των έργων υδροληψίας και σε βάθος τουλάχιστον 6 m
- ✓ τη σύνταξη ισοπιεζομετρικού χάρτη της πιο πάνω περιοχής
- ✓ την εκτίμηση της ταχύτητας ροής του νερού και της υδροπερατότητας

- ✓ την επισήμανση των σημείων εκείνων που ενδεχομένως θα μπορούσαν να προκαλέσουν ρύπανση ή μόλυνση (εργοστάσια, σταθμοί υγρών καυσίμων, ορυχεία, λατομεία, οδοί κ.λπ.).

2.2.2. Προστασία της περιοχής υδροληψίας

Σημειώνεται ότι όσα αναφέρονται παρακάτω αφορούν στα υδροφόρα εδάφη με χαλαρούς σχηματισμούς. Οι καρστικοί υδροφόροι ή οι υδροφόροι σε ρωγματωμένα πετρώματα θα πρέπει να προστατεύονται στο σύνολό τους, δηλαδή τα μέτρα προστασίας χρειάζεται να περιλαμβάνουν ολόκληρη την υδρογεωλογική λεκάνη.

Η προστασία της περιμέτρου υδροληψίας πρέπει να βασίζεται (Καλλέργης Γ., 2000):

- στον προσδιορισμό της προέλευσης του νερού και της περιμέτρου τροφοδοσίας του έργου και στον καθορισμό της υδροπερατότητας του υδροφορέα και των στρωμάτων των υπερκειμένων αυτού
- στην καταγραφή όλων των πιθανών αιτιών ρύπανσης ή μόλυνσης του υπόγειου νερού, που βρίσκονται στην περίμετρο της λεκάνης απορροής:
 - φυσικά αίτια: πλευρικές μεταγγίσεις, απώλειες από υδρορεύματα, μεταγγίσεις και ταπεινώσεις από υπόγεια φυσικά έγκοιλα ή από καταβόθρες ή από κοιτάσματα, αποθέσεις αλατιού, γύψου, ανυδρίτη κ.τ.λ.
 - τεχνητά αίτια: διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες (σκουπιδότοποι, νεκροταφεία, βόθροι, λίπανση εδαφών για γεωργικούς σκοπούς, στάβλοι, μεταλλευτικά ή λατομικά έργα κ.τ.λ.).

Προφανώς, ο κίνδυνος μόλυνσης του υδροφόρου είναι τόσο μεγαλύτερος όσο πιο κοντά στο υδροληπτικό έργο ή σε ελεύθερα τμήματα του υδροφόρου βρίσκεται η ρυπογόνος εστία. Ανάλογα καθορίζονται, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, οι απαραίτητες ζώνες προστασίας γύρω από κάθε σημείο υδροληψίας. Γενικά υπάρχουν τρεις ομάδες πιθανών ρύπων του υπόγειου νερού:

- οι παθογόνοι μικροοργανισμοί (π.χ. E.coli)
- οι χημικοί ρύποι (π.χ. νιτρικά, φωσφορικά, παρασιτοκτόνα)
- τα ραδιενεργά κατάλοιπα (π.χ. τρίτιο ^3H)

Στους πίνακες 1, 2, 3 και 4 του Παραρτήματος φαίνονται οι εκάστοτε παράμετροι και τα αντίστοιχα όρια, σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/01.

Μερικά προληπτικά μέτρα που μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα ρύπανσης είναι (Καλλέργης Γ., 2000):

- η πλήρωση με άργιλο εκσκαφών, κοιλοτήτων και καταβοθρών
- η απαγόρευση απόθεσης κοπριάς και γενικά ακαθαρσιών
- η απαγόρευση απόρριψης αποβλήτων ή λυμάτων
- η απαγόρευση κατασκευής ή επέκτασης του δικτύου λυμάτων ή αποβλήτων κ.λπ.

Σημειώνουμε ότι η κοπριά, που συχνά χρησιμοποιείται στη γεωργία για λίπανση, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ρύπους των υπόγειων νερών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος προστασίας των πηγών του Μονάχου (*Pantokratoras A., 2000*). Η εταιρεία ύδρευσης της πόλης ξεκίνησε το 1992 ένα πρωτοποριακό πιλοτικό πρόγραμμα προστασίας των πηγών υπογράφοντας συμφωνία με τους αγρότες, ώστε όλες οι δραστηριότητές τους στην περιοχή να είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Χαρακτηριστικά έχει καθοριστεί μέγιστος αριθμός ζώων ανά νοικοκυριό και δεν

επιτρέπεται η χρήση τεχνητών ζωοτροφών και η χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων στις καλλιέργειες, παρά μόνο κοπριά από τα ζώα της περιοχής. Τα δε παραγόμενα οικολογικά προϊόντα διακινούνται από το συνεταιρισμό των αγροτών που μετέχουν στο πρόγραμμα. Παράλληλα, η εταιρεία ύδρευσης ενισχύει οικονομικά τους αγρότες με χρήματα που προέρχονται από ειδικό τέλος, το οποίο επιβάλλεται στους καταναλωτές του νερού. Το μέτρο έγινε αποδεκτό, καθώς η μη προστασία των πηγών θα οδηγούσε σε ρύπανση του νερού, το οποίο στη συνέχεια για να καταστεί πόσιμο θα έπρεπε να υποστεί πολύπλοκη επεξεργασία με τη χρήση χημικών ουσιών.

2.3. Αξιολόγηση των έργων υδροληψίας

Η αναγκαιότητα της υγειονομολογικής αξιολόγησης των πηγών είναι προφανής για τη μείωση του κινδύνου κατανάλωσης ακατάλληλου νερού. Η θέσπιση προστατευτικών μέτρων για τα έργα υδροληψίας εμποδίζει την άμεση μόλυνση της πηγής και ο βαθμός προστασίας εξαρτάται από το είδος του παθογόνου ρύπου και από τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Η άμεση μόλυνση της πηγής υπόγειου νερού λόγω ανεπαρκούς προστασίας έχει συσχετιστεί πολλές φορές με την εξάπλωση επιδημικών νόσων τόσο στις αναπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Συνεπώς, πρόκειται για ένα φλέγον θέμα που δεν αφορά μόνο τις χώρες του τρίτου κόσμου, όπου σαφώς καταστρατηγείται κάθε μέτρο υγιεινής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται (Olson *et al.* 2002) η επιδημία στο Wyoming στις Άλπεις, που προκλήθηκε λόγω μόλυνσης του νερού από την E.Coli O157: H7 σε μία ανεπαρκώς προστατευόμενη πηγή. Μελέτες είχαν δείξει ότι τα ποικίλα κρούσματα αιμολυτικού συνδρόμου οφείλονταν στο ότι η

εν λόγω πηγή ήταν ευάλωτη στη μόλυνση από επιφανειακά ύδατα. Γενικότερα στις αναπτυσσόμενες χώρες η κατανάλωση νερού που προέρχεται από υδροληπτικά έργα χωρίς επαρκή προστασία συνδέεται με οξεία διαρροϊκά σύνδρομα.

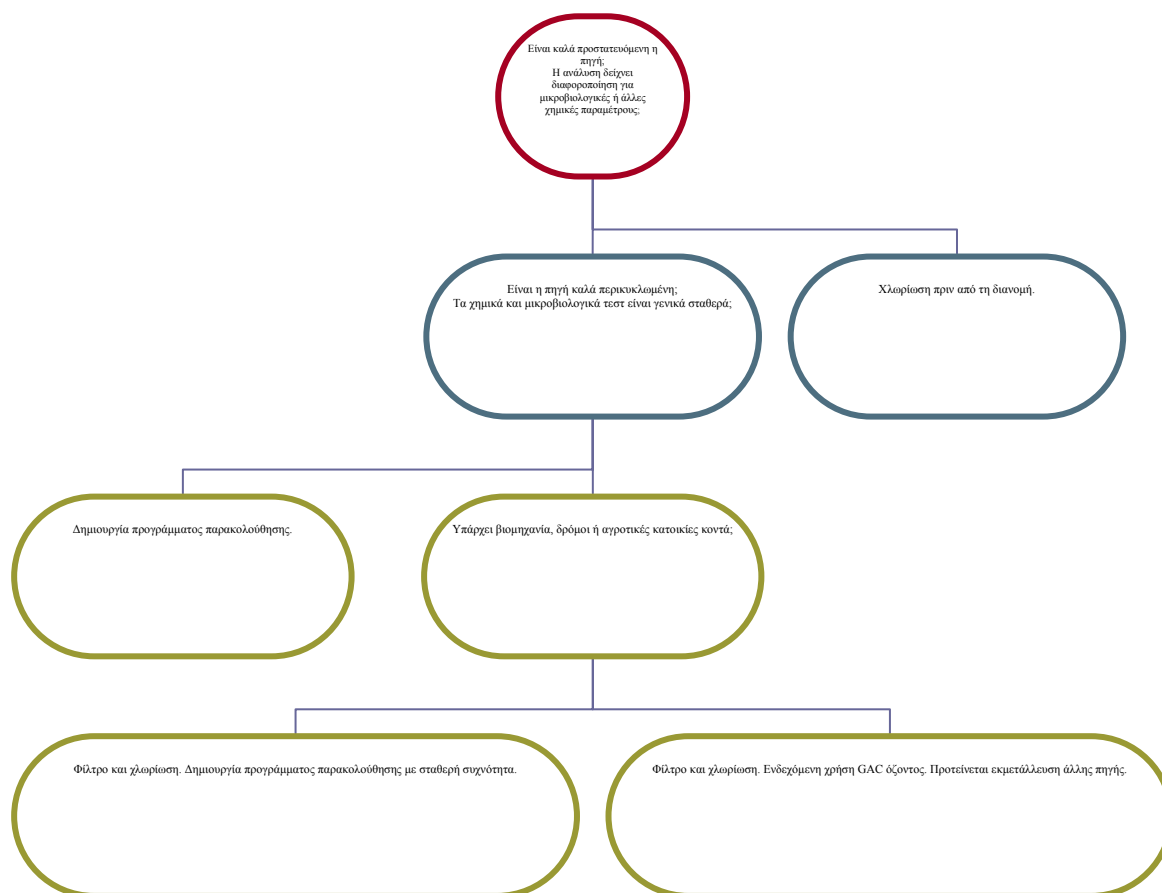
Έτσι, η υγιεινολογική αξιολόγηση των έργων υδροληψίας χρειάζεται να είναι συνεχής καθ' όλο το χρόνο εκμετάλλευσης του έργου, ώστε να διατηρείται στα σωστά επίπεδα η ποιότητα του νερού και να εξασφαλίζεται ανά πάσα στιγμή η προστασία της δημόσιας υγείας. Μέτρα για την υγιεινολογική προστασία του έργου πρέπει να λαμβάνονται τόσο κατά τη φάση της κατασκευής του όσο και κατά τη λειτουργία και τη συντήρησή του. Απαραίτητα μέτρα για το σκοπό αυτό είναι (*chapter 18*):

- ✦ το σφράγισμα παλαιότερων πηγαδιών που πλέον δε χρησιμοποιούνται
- ✦ την κατασκευή φραχτών και χαντακιών στην άμεση περιοχή γύρω από το έργο με ασφαλή υλικά. Για παράδειγμα ανεπαρκής σύνδεση των σωλήνων, λανθασμένη επιλογή του υλικού για την επένδυση της γεώτρησης και για την πλήρωση των κενών, άστοχη τοποθέτηση χαλικιών, επιτρέπουν τη διαρροή ρύπων προς τα υπόγεια ύδατα. Επιπρόσθετα, παραλείψεις στη συντήρηση των φραχτών και των χαντακιών αυξάνουν την πιθανότητα επιμόλυνσης από επιφανειακά ύδατα.

Η υιοθέτηση μέτρων προστασίας για ένα έργο υδροληψίας σίγουρα δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που μπορούν ενδεχομένως να οδηγήσουν στη μόλυνση του αντλούμενου νερού. Έτσι, ο αρχικός σχεδιασμός του έργου είναι αποφασιστικός για τον σωστό καθορισμό της προστασίας του. Η γνώση των υδρογεωλογικών

παραμέτρων και της χρήσης γης στην ευρύτερη περιοχή, καθώς και η εκτίμηση της υπάρχουσας ποιότητας του υπόγειου νερού αποτελούν βασικά στοιχεία.

Η επιτόπια επιθεώρηση, όταν γίνεται με τυποποιημένο και μετρήσιμο τρόπο, προσφέρει αξιόπιστα στοιχεία για την υγιεινολογική αξιολόγηση του εκάστοτε έργου υδροληψίας. Συχνά προκύπτουν προβλήματα κατά την αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς τρόπους επιθεώρησης και αξιολόγησης ενός έργου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα μιας γρήγορης μεθόδου αξιολόγησης υπεδάφιας πηγής νερού (Γιαννούλης *et al.* 2005).



Το πλήρες ερωτηματολόγιο για την υγιεινολογική αξιολόγηση μιας πηγής, σύμφωνα με τα πρότυπα του Π.Ο.Υ. (Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας), είναι το επόμενο (*chapter 18, Γιαννούλης et al., 2005*). Σημειώνεται ότι για κάθε τύπο πηγής νερού η αναλογία ή το ποσοστό των σημείων που καταγράφονται ως θετικά δίνουν ένα μέγεθος του υγιεινολογικού κινδύνου.

Πίνακας 1: Ερωτηματολόγιο επιτόπιας υγιεινολογικής αναγνώρισης των πηγών

Τύπος έργου υδροληψίας: Προστατευόμενη πηγή	
I. Γενικά στοιχεία	
1. Τοποθεσία:	
2. Κωδικός έργου:	
3. Ημερομηνία επιτόπιας αναγνώρισης:	
4. Έγινε λήψη δείγματος νερού;..... No δείγματος: βαθμολόγηση κολοβακτηριδίων:	
II. Διαγνωστικές πληροφορίες για την εκτίμηση του κινδύνου	
1. Είναι η φυσική πηγή νερού απροστάτευτη (χωρίς να υπάρχει λιθοδομή, τοιμεντένιος τοίχος ή υδατοστεγής δεξαμενή); Είναι, δηλαδή, ανοιχτή στην επιφανειακή μόλυνση;	N/O
2. Η λιθοδομή προσφέρει ελαττωματική προστασία στην πηγή;	N/O
3. Είναι διαβρωμένη και ανθυγιεινή η περιοχή πίσω από τον τοίχο συγκράτησης των επιφανειακών υδάτων;	N/O
4. Υπάρχει κίνδυνος υπερχείλισης της δεξαμενής από ακάθαρτα νερά (π.χ. λάσπη);	N/O
5. Υπάρχει περιοχή γύρω από την πηγή χωρίς φράκτη;	N/O
6. Μπορούν ζώα να πλησιάσουν σε απόσταση μικρότερη των 10m από την πηγή;	N/O
7. Υπάρχουν αποχωρητήρια εντός 30m από την πηγή ή σε παρακείμενο λόφο;	N/O
8. Λιμνάζουν τα επιφανειακών νερά σε σημείο υψηλότερα της πηγής;	N/O
9. Υπάρχει έλλειψη ενός χαντακιού εκτροπής των επιφανειακών νερών ή, αν αυτό υπάρχει, είναι μη λειτουργικό;	N/O
10. Υπάρχουν άλλες πηγές ρύπανσης υψηλότερα της πηγής (π.χ. κοιμητήρια, σταθμοί διαχείρισης στερεών αποβλήτων κ.α.);	N/O
Συνολική βαθμολογία κινδύνου (σύνολο θετικών απαντήσεων)	
III. Αποτελέσματα και Συστάσεις	
Τα ακόλουθα σημαντικά σημεία κινδύνου σημειώθηκαν:	
Υπογραφή Επιθεωρητού Υγείας:.....	

Στη συνέχεια το μέγεθος του υγιεινολογικού κινδύνου (αποτέλεσμα του ερωτηματολογίου) ταξινομείται σε διαφορετικά επίπεδα σχετικού κινδύνου σύμφωνα με τον Πίνακα 2 (Γιαννούλης et al.).

Πίνακας 2: Ταξινόμηση επιπέδων σχετικού κινδύνου ανάλογα με τη βαθμολογία υγιεινολογικού κινδύνου από την επιτόπια αναγνώριση

Συνολική βαθμολογία κινδύνου	Κίνδυνος
0	κανένας παρατηρούμενος κίνδυνος
1-3	μικρός κίνδυνος
4-6	μεσαίος κίνδυνος
7-9	μεγάλος κίνδυνος

Η ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κινδύνου γίνεται σε συνάρτηση με τα αποτελέσματα των μικροβιολογικών αναλύσεων για τη δεδομένη πηγή. Συνήθεις δείκτες στις μικροβιολογικές αναλύσεις είναι τα ολικά κολοβακτηρίδια, τα κολοβακτηρίδια κοπρανώδους προέλευσης και η E.Coli. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται ένα τυπικό σχήμα ταξινόμησης που βασίζεται σε αυξανόμενους βαθμούς του μεγέθους της μόλυνσης.

Πίνακας 3: Ταξινόμηση του κινδύνου με κωδικούς χρωμάτων ανάλογα με τα επίπεδα κολοβακτηριδίων

αριθμός αποικιών ανά 100ml	κατηγορίες	επίπεδο κινδύνου
0	A (μπλε)	δεν υπάρχει
1 – 10	B (πράσινο)	μικρός κίνδυνος
10 – 100	C (κίτρινο)	μεσαίος κίνδυνος
100 – 1000	D (πορτοκαλί)	μεγάλος κίνδυνος
> 1000	E (κόκκινο)	πολύ μεγάλος κίνδυνος

Το τελικό πόρισμα βγαίνει μετά από συνδυασμό των παραπάνω στοιχείων, όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

		Βαθμολόγηση κινδύνου με βάση την επιτόπια υγεινολογική αναγνώριση									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9-10
Κατηγορία κινδύνου με βάση την εξέταση ΚΚΠ	E										
	D										
	C										
	B										
	A										
		↓									
Κίνδυνος υδατογενούς επιδημίας	Δεν παρατηρήθηκε	Χαμηλός			Ενδιάμεσος προς υψηλός			Πολύ υψηλός			
		↓									
Προτεραιότητα προληπτικών δράσεων	Δεν απαιτείται	Χαμηλή			Υψηλή			Επείγουσα			

Είναι προφανές ότι η αξιολόγηση ενός έργου υδροληψίας θα πρέπει να γίνεται σε τακτά και μικρά χρονικά διαστήματα, καθώς οι παράγοντες κινδύνου είναι συχνά εποχιακοί, μη προβλέψιμοι και μη στατικοί. Αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, ανάλογα με την ανάπτυξη της περιοχής και τη συντήρηση του έργου.

2.4.Καθορισμός των ζωνών προστασίας

(WHPA σχεδιασμός)

Η προστασία των υπόγειων υδάτων απαιτεί τη λήψη μέτρων τόσο στο ίδιο το έργο υδροληψίας όσο και στην ευρύτερη περιοχή του υδροφορέα. Οι περισσότερες χώρες έχουν αναπτύξει διάφορες πολιτικές προστασίας των υπόγειων πηγών και καθορισμού των ζωνών προστασίας. Είναι προφανές ότι τέτοιες διαδικασίες ενέχουν πολλούς περιορισμούς και απαγορεύσεις χρήσεων, δραστηριοτήτων και επεμβάσεων στη σχετική περιοχή. Για το λόγο αυτό δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον WHPA σχεδιασμό ώστε αφενός να επιτυγχάνεται η επιθυμητή προστασία κι αφετέρου να μη δεσμεύονται περιττές εκτάσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά.

Διεθνείς επιστημονικοί οργανισμοί έχουν διατυπώσει οδηγίες για τις ενδεικτικές διαστάσεις των ζωνών προστασίας και τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες ή μη δραστηριότητες. Εντούτοις, ο τρόπος καθορισμού των WHPA και το κύριο κριτήριο ιεράρχησης των ζωνών διαφέρει από χώρα σε χώρα ανάλογα με την ισχύουσα νομοθεσία και τα επικρατούντα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Βέβαια, οι βασικές αρχές και οι στόχοι είναι γενικώς αποδεκτά.

Οι ζώνες προστασίας εκτείνονται κυρίως στα ανάντη και σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη διαφόρων επιπέδων προστασίας (απόλυτη, μικροβιολογική, χημική). Ο αριθμός των ζωνών διαφέρει από χώρα σε χώρα, αλλά συνήθως είναι τρεις. Τα κυριότερα κριτήρια που συχνά χρησιμοποιούνται για τον WHPA σχεδιασμό είναι (*chapter 18*):

- η απόσταση από το σημείο του έργου

- η **πτώση της στάθμης** του υδροφόρου ορίζοντα σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, ως αποτέλεσμα της παρουσίας πηγαδιών άντλησης
- ο **χρόνος διαδρομής** για να φτάσει ένα μόριο του νερού / ένας ρύπος από κάποιο σημείο της υδρομαστευόμενης περιοχής προς το σημείο υδροληψίας
- η **αυτοκαθαριστική ικανότητα** του εδάφους
- η ύπαρξη **περιοριστικών παραγόντων** που επηρεάζουν την υπόγεια ροή (π.χ. ένα ποτάμι).

Παράλληλα έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι για τον WHPA υπολογισμό, ανάλογα με τα κριτήρια, το κόστος και την ευκολία εφαρμογής τους, το βαθμό πολυπλοκότητάς τους, το βαθμό αβεβαιότητας, το πλήθος των δεδομένων υδρογεωλογικών παραμέτρων.

Έτσι έχουμε τις παρακάτω μεθόδους:

- arbitrary fixed radius
- calculated fixed radius
- simplified variable shapes
- analytical methods
- hydrogeological mapping
- computer assisted analytical and flow and transport modeling.

Οι προσεγγίσεις βάσει του «χρόνου διαδρομής» θεωρούνται ιδιαίτερα ρεαλιστικές και είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες, καθώς ενσωματώνουν εμπειρικά στοιχεία που σχετίζονται με την αποφυγή μικροβιακής (π.χ. οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, μετά από διαδρομή στον υδροφορέα διάρκειας το πολύ 50 ημερών πεθαίνουν) ή χημικής μόλυνσης, ανάλογα βέβαια και με την αυτοκαθαριστική ικανότητα του εδάφους.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από τις δεδομένες υδρογεωλογικές παραμέτρους της μελετούμενης περιοχής, από το κόστος και την ευκολία εφαρμογής κάθε μεθόδου, από τους περιορισμούς που τίθενται στη χρήση γης και από τις δεδομένες απαιτήσεις προστασίας (π.χ. γεώτρηση σε δασική περιοχή ή γεώτρηση σε αστική περιοχή ή περιοχή κοντά σε ενδεχόμενες εστίες μόλυνσης). Η υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης μεθόδου παγκοσμίως θα ήταν λανθασμένη κίνηση, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις δε θα είχαμε σωστό προσδιορισμό των WHPA. Άλλοτε δε θα προσέφερε επαρκή προστασία και άλλοτε θα δεσμευόταν υπερβολικά μεγάλη έκταση, που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί διαφορετικά χωρίς τις συνακόλουθες απαγορεύσεις και δεσμεύσεις στις χρήσεις γης και στις δραστηριότητες.

Σύμφωνα με τον Καλλέργη Γ (2000) έχουμε την οριοθέτηση των εξής ζωνών προστασίας:

- I. **Ζώνη απόλυτης προστασίας:** αποτελεί ουσιαστικά την άμεση γειτνίαση του έργου υδροληψίας και σκοπεύει στην προστασία του έργου από κάθε επιφανειακή επίδραση. Απαγορεύεται οποιαδήποτε δραστηριότητα, ενώ επιτρέπεται η δασοκάλυψη ή η κάλυψη με γρασίδι. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη έκταση πρέπει να απαλλοτριώνεται, να περιφράζεται και να προστατεύεται από την κατάκλιση επιφανειακών νερών.
- II. **Ζώνη μικροβιολογικής προστασίας:** προστατεύει το έργο υδροληψίας από ενδεχόμενη μικροβιακή μόλυνση. Περιλαμβάνει όλη την περιοχή που υδρομαστεύει ένα πηγάδι άντλησης για 50 ημέρες κι ως εκ τούτου ονομάζεται και «ζώνη των 50 ημερών». Σημειώνεται ότι τα μικρόβια έχουν χρόνο ζωής μέσα στον υδροφορέα περίπου 50 ημέρες, συνεπώς η προστασία της ζώνης αυτής συνεπάγεται και τη μικροβιολογική προστασία. Απαιτείται πλήρης ή μερική

απαλλοτριώση, ενώ απαγορεύεται κάθε κατασκευαστική δραστηριότητα, οικιστική/τουριστική εγκατάσταση, λατόμευση, απόθεση σκουπιδιών/βιομηχανικών ή χημικών προϊόντων, διάθεση αστικών/βιομηχανικών αποβλήτων, λειτουργία χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων, χρήση ζωικών λιπασμάτων. Επιτρέπεται η χάραξη πεζοδρομών/δρόμων και οι γεωργικές καλλιέργειες με φυσική λίπανση.

III. Ζώνη ευρύτερης προστασίας: φθάνει μέχρι τον υδροκρίτη της υπόγειας υδρογεωλογικής λεκάνης και προστατεύει το έργο υδροληψίας από χημικούς και ραδιενεργούς ρύπους. Απαγορεύεται η κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων /χωματερών/ διυλιστηρίων πετρελαιοειδών /σταθμών βενζίνης, η παραγωγή ανεπεξέργαστων αποβλήτων, η μεταφορά καυσίμων, η απόθεση ραδιενεργών και τοξικών υλικών, η εφαρμογή πυρηνικών δραστηριοτήτων.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται ενδεικτικά διαφορές στον WHPA καθορισμό μεταξύ διαφόρων χωρών.

χώρα	1 ^η ζώνη	2 ^η ζώνη	3 ^η ζώνη
Αυστραλία	50 m	10 yrs	whole catchment
Αυστρία	<10 m	60 days	whole catchment
Γερμανία	10-30 m	50 days	whole cathcment
Δανία	10 m	60 days ή 300 m	10-20 yrs
Ελβετία	10 m	individually defined	double size of middle zone
Ιρλανδία	100 days or 300 m	-	whole catchment or 1000 m
Μεγάλη Βρετανία	50 days or 50 m minimum	400 days	whole catchment

3. Εφαρμογή του μοντέλου WHPA

3.1. Σύντομη περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο WHPA της EPA (Environmental Protection Agency) είναι ειδικό για τον σχεδιασμό των ζωνών προστασίας γύρω από ένα έργο υδροληψίας (WHPA σχεδιασμός). Μέσω ενός υπολογιστή, ο χρήστης μπορεί εύκολα να εισάγει τις εκάστοτε παραμέτρους του δεδομένου πηγαδιού και της γύρω περιοχής, ενώ λαμβάνει τα αποτελέσματα με τη μορφή εύχρηστων γραφημάτων. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά υποπρογράμματα, η περιγραφή των οποίων γίνεται στον επόμενο πίνακα:

RESSQC	Σχεδιασμός των ζωνών βάσει του κριτηρίου «χρόνος διαδρομής» γύρω από ένα ή περισσότερα πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού σε ομογενείς υδροφορείς με σταθερή και ομοιόμορφη υπόγεια ροή. Η αλληλεπίδραση των πολλαπλών πηγαδιών λαμβάνεται υπόψη.
MWCAP	Σχεδιασμός των ζωνών προστασίας βάσει των κριτηρίων «χρόνος διαδρομής» και «flow boundaries» για ένα ή περισσότερα πηγάδια άντλησης σε ομογενή υδροφορέα με σταθερή και ομοιόμορφη υπόγεια ροή. Η αλληλεπίδραση των πολλαπλών πηγαδιών δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς επίσης και οι επιδράσεις από παρακείμενα ποτάμια ή περιοριστικά εμπόδια.

GPTRAC	<p>Ημι-αναλυτική μέθοδος (semi-analytical): Σχεδιασμός των ζωνών για πηγάδια αντλήσεων με κριτήριο το «χρόνο διαδρομής» σε ομογενή υδροφορέα με σταθερή και ομοιόμορφη υπόγεια ροή. Ο υδροφορέας (περιορισμένος ή ημι-περιορισμένος με διαρροή ή ελεύθερος) μπορεί να έχει απεριόριστη έκταση ή να οριοθετείται από κάποιο ποτάμι είτε από κάποιο περιοριστικό εμπόδιο. Η αλληλεπίδραση μεταξύ πολλαπλών πηγαδιών λαμβάνεται υπόψη.</p> <p>Αριθμητική μέθοδος (numerical option): WHPA σχεδιασμός για πηγάδια άντλησης βασισμένος στη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων / πεπερασμένων διαφορών. Λαμβάνονται υπόψη τυχόν ετερογένειες και ανισοτροπίες του υδροφορέα, καθώς επίσης και η ύπαρξη περιοριστικών ορίων - συνόρων.</p>
MONTEC	<p>Πραγματοποιείται ανάλυση αβεβαιότητας για τον WHPA σχεδιασμό ενός μόνο πηγαδιού άντλησης σε ομογενή και απεριόριστο υδροφορέα (περιορισμένο ή ημι-περιορισμένο)</p>

Σημειώνεται ότι για όλα τα παραπάνω μοντέλα αποδεχόμαστε δύο βασικές υποθέσεις:

1. συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady-state conditions)
2. οριζόντια υπόγεια ροή, δηλαδή η μεταβολή του υδραυλικού ύψους σε συνάρτηση με το βάθος αγνοείται πλήρως (Dupuit's assumption).

3.2. Το μαθηματικό υπόβαθρο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο, μέσα στο οποίο υλοποιείται το αναλυτικό RESSQC μοντέλο. Χρησιμοποιούνται βασικές αρχές της μιγαδικής ανάλυσης και των διαφορικών εξισώσεων (WHPA version 2.2). Οι δύο υποθέσεις που γίνονται αποδεκτές είναι οι εξής:

- ο υδροφορέας θεωρείται ομογενής, ισότροπος και με σταθερό πάχος κορεσμένης ζώνης
- η ροή του υπόγειου ύδατος στον υδροφορέα θεωρείται διδιάστατη, οριζόντια και σε σταθερή κατάσταση (steady state).

Έστω ϕ και ψ δύο συναρτήσεις, όπου:

ϕ : η εξίσωση για την ταχύτητα (velocity potential function)

και ψ : η εξίσωση για τη ροή (stream function)

Κάθε μια από τις δύο αυτές εξισώσεις ικανοποιούν το νόμο του Laplace, οπότε

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1) \quad \text{και}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy για την υπόγεια ροή υδάτων δίνονται από τις σχέσεις:

$$q_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3)$$

$$q_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

Θεωρούμε τις συναρτήσεις ϕ και ψ ως το πραγματικό και φανταστικό μέρος της αναλυτικής συνάρτησης W , η οποία ορίζεται:

$$\underline{W = \phi + i\psi} \quad (5), \text{ όπου } i = \sqrt{-1}.$$

Η μιγαδική συνάρτηση W μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρουσίαση διάφορων διδιάστατων προτύπων ροής. Το πραγματικό μέρος (ϕ)

χρησιμοποιείται για τη χάραξη ισοδυναμικών γραμμών (δηλαδή γραμμών με σταθερό υδραυλικό ύψος h). Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, $\phi = Kh$. Από την άλλη, το φανταστικό μέρος (ψ) χρησιμοποιείται για τη χάραξη των υδατογραμμών (streamlines ή flow lines). Κάθε υδατογραμμή αντιστοιχεί σε μία σταθερή τιμή του ψ .

Αναλυτικές λύσεις για ομοιόμορφη ροή

Η εξίσωση που αφορά την ομοιόμορφη υπόγεια ροή του ύδατος είναι η επόμενη:

$$W = -U \cdot Z \cdot (\cos a - i \cdot \sin a) \quad (6), \text{ όπου}$$

a : η γωνία που σχηματίζει η κατεύθυνση ροής με τον άξονα των τετμημένων (xx')

U : η ταχύτητα του Darcy

$$Z: \text{ η μιγαδική μεταβλητή που ορίζεται ως } \quad Z = x + iy \quad (7)$$

Συνδυάζοντας τις (5), (6), (7) και εξισώνοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη έχουμε:

$$\phi = -U \cdot (x \cos a + y \sin a) \quad (8)$$

$$\psi = U \cdot (x \sin a - y \cos a) \quad (9)$$

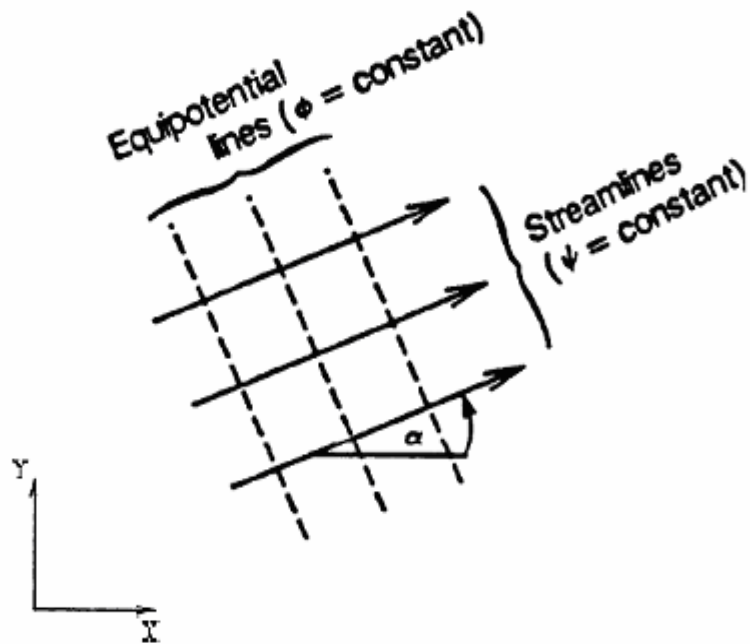
Συνεπώς, από την (8) λαμβάνουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy:

$$q_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = U \cos a \quad (10)$$

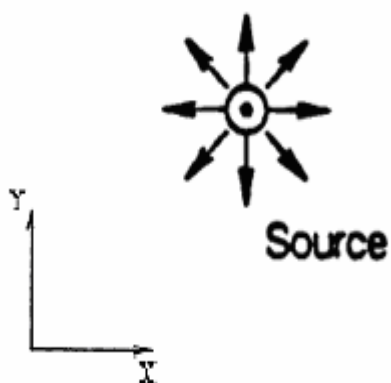
$$q_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = U \sin a \quad (11)$$

Αναλυτικές λύσεις για τα διαγράμματα της ακτινικής ροής στα πηγάδια άντλησης

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα βασικά διαγράμματα ροής για (α) ομοιόμορφη ροή και για (β) ακτινική ροή γύρω από ένα πηγάδι άντλησης.



Εικόνα 1: Βασικό διάγραμμα ομοιόμορφης ροής



Εικόνα 2: Βασικό διάγραμμα ακτινικής ροής γύρω από πηγάδι άντλησης

Η ακτινική ροή γύρω από ένα πηγάδι άντλησης με συντεταγμένες (x_0, y_0) μπορεί να περιγραφεί από την επόμενη μιγαδική συνάρτηση:

$$W = -\frac{Q}{2\pi b} \ln(Z - Z_0) \quad (12), \text{ όπου } Z = x_0 + iy_0 \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας τώρα στη (12) τις (5), (7) και (13) λαμβάνουμε τις αναλυτικές εξισώσεις για την ακτινική ροή ως εξής:

$$W = -\frac{Q}{2\pi b} \ln(Z - Z_0) \quad \Leftrightarrow$$

$$\phi + i\psi = -\frac{Q}{2\pi b} \ln\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right]^{1/2} - i\frac{Q}{2\pi b} \tan^{-1}\left[\frac{y-y_0}{x-x_0}\right] \quad \Leftrightarrow$$

Εξισώνοντας, λοιπόν, τα φανταστικά με τα πραγματικά μέρη έχουμε:

$$\phi = -\frac{Q}{4\pi b} \ln\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right] \quad (14)$$

$$\psi = -\frac{Q}{2\pi b} \tan^{-1}\left[\frac{y-y_0}{x-x_0}\right]$$

Από την (14) συμπεραίνουμε ότι οι συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy είναι:

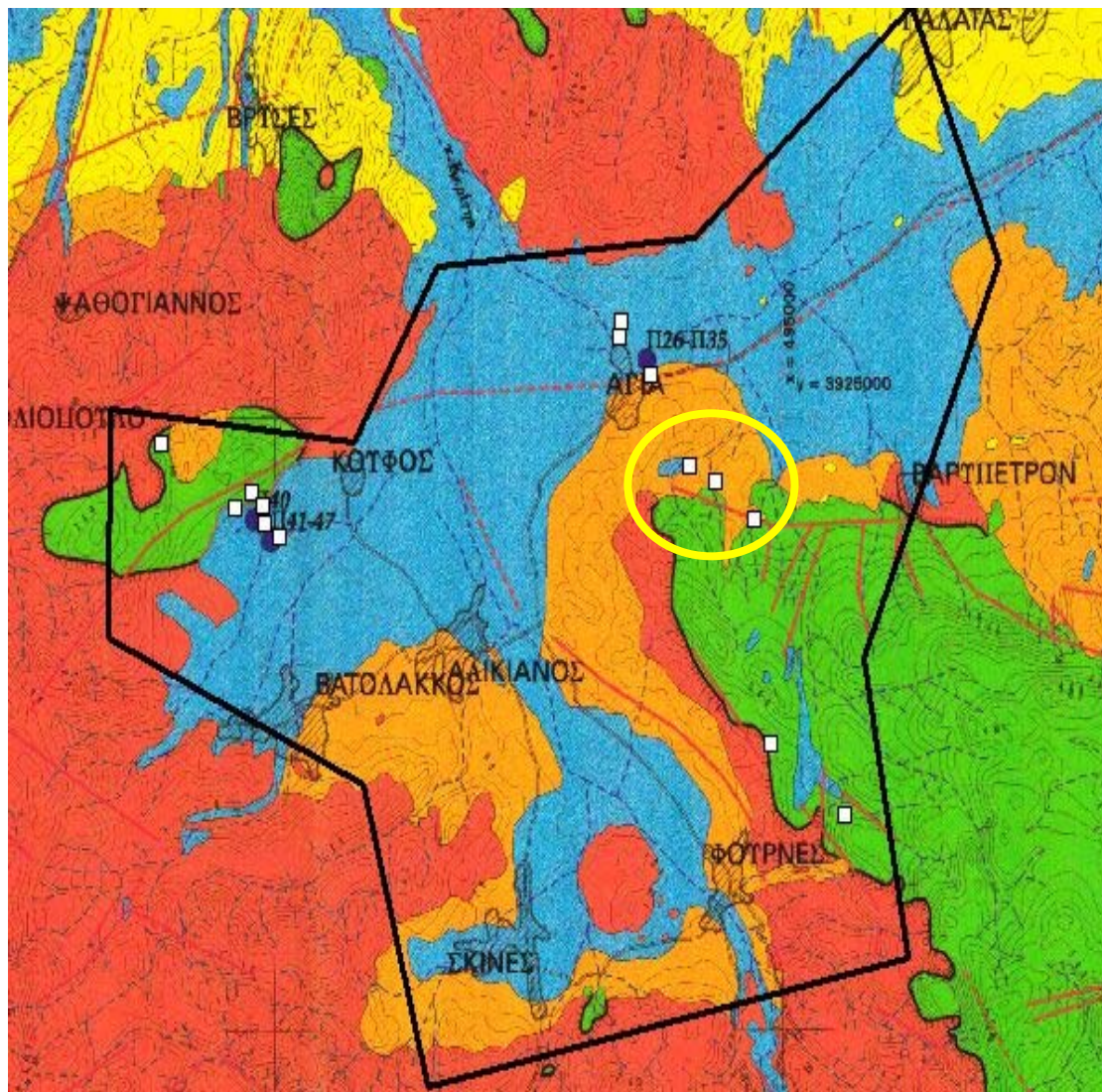
$$q_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{Q}{2\pi b} \left[\frac{(x-x_0)}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \right] \quad (15)$$

$$q_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{Q}{2\pi b} \left[\frac{(y-y_0)}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \right] \quad (16)$$

Οι παραπάνω λύσεις περιγράφουν την ακτινική ροή που ξεκινά από ένα πηγάδι άντλησης με συντεταγμένες (x_0, y_0) .

3.3. Σύντομη περιγραφή της περιοχής της μελέτης

Η γεωλογική και τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής και η υδρογεωλογική συμπεριφορά των διάφορων πετρολογικών σχηματισμών, που συμμετέχουν στη γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης, είναι ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει τις υδρογεωλογικές παραμέτρους για τη συμπεριφορά του υπόγειου ύδατος.



Εικόνα 3: Η ευρύτερη περιοχή γύρω από τις μελετώμενες υδρογεωτρήσεις στην Αγιά.

Στην παρούσα εργασία γίνεται WHPA σχεδιασμός για τρία πηγάδια άντλησης στην περιοχή της Αγιάς στα Χανιά, που βρίσκονται υπό την εποπτεία του ΟΑΔΥΚ.

Πρόκειται για τρεις ενεργές υδρογεωτρήσεις (ΥΓΜ1, ΥΓΜ2 και ΥΓΜ8) σε κοντινή απόσταση και κρίνεται απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ο λιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής, όπου εντός του κύκλου σημειώνονται οι μελετούμενες υδρογεωτρήσεις.

Ο υδροφορέας θεωρείται ελεύθερος (με πτώση στάθμης μικρότερη από 0,1), ομοιογενής και ισότροπος, ενώ δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια ή σύνορα (π.χ. κάποιο ποτάμι), που ενδεχομένως επηρεάζουν την υπόγεια ροή των υδάτων. Οι υδρογεωτρήσεις ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 βρίσκονται σε περιοχή με πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδατοπερατότητας. Από την άλλη, η ΥΓΜ8 βρίσκεται επί καρστικών σχηματισμών υψηλής έως μέτριας υδατοπερατότητας. (Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα, η ΥΓΜ8 βρίσκεται ακριβώς στο όριο μεταξύ των περιοχών με τους παραπάνω σχηματισμούς. Για πληρέστερη ανάλυση λαμβάνονται τελικώς υπόψη όλα τα πιθανά σενάρια.)

Βάσει των παραπάνω, επιλέχθηκε το RESSQC module, μέσω του οποίου γίνεται WHPA σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ως παράμετρο το «χρόνο διαδρομής». Τα απαραίτητα υδρογεωλογικά στοιχεία που πρέπει να εισαχθούν για να τρέξει το μοντέλο αναφέρονται εκτενώς στην τεχνική έκθεση που εκπονήθηκε για τη ΔΕΥΑ Χανίων από το τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό τον τίτλο «Μελέτη Αξιολόγησης Ερευνητικής Γεώτρησης στην Αγιά» (Δεκέμβριος 2006).

Συγκεντρωτικά, οι τιμές των παραμέτρων αυτών φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4

	Παράμετρος	Μονάδες	ΥΓΜ1	ΥΓΜ2	ΥΓΜ8
K	Υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity)	m/d	51,84	51,84	300
b	Πάχος υδροφορέα (aquifer thickness)	m	110		
T	Μεταβιβασιμότητα (transmissivity)	m ² /d	5.700	5.700	33.000
Q	Παροχή άντλησης (pumping rate)	m ³ /d	25.000	14.400	20.000
i	Υδραυλική κλίση (hydraulic gradient)	-	0,008		
	Ακτίνα πηγαδιού (well radius)	m	0,10		
a	Γωνία κατ/νσης ροής (angle of ambient flow)		110°		
n	Πορώδες (porosity)	-	0,40		
	Τύπος υδροφορέα (aquifer type)		ελεύθερος		
	Συντεταγμένες (coordinates)		(-280, 160)	(0, 0)	(570, -420)

3.4.Αποτελέσματα

Παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα που προέκυψαν μετά από εφαρμογή του μοντέλου για τα διάφορα σενάρια. Σημειώνεται ότι το μοντέλο δέχεται μία μόνο τιμή μεταβιβασιμότητας T , δηλαδή θεωρεί ότι τα πηγάδια βρίσκονται σε έδαφος με ενιαία αγωγιμότητα K . Αυτό δεν ισχύει για την περιοχή μελέτης. Έτσι θεωρήθηκαν τα εξής σενάρια:

A. ανεξάρτητη ΥΓΜ1 με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$

B. ανεξάρτητη ΥΓΜ2 με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$

Γ. ανεξάρτητη ΥΓΜ8 με:

$$\Gamma_1. T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$\Gamma_2. T=33.000 \text{ m}^2/\text{d}$$

Δ. αλληλεπίδραση ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$

Ε. αλληλεπίδραση ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 και ΥΓΜ8 με:

$$E_1. T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$E_2. T=33.000 \text{ m}^2/\text{d}$$

Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί, δεδομένου του περιορισμού για την καταχώρηση μίας μόνο τιμής T . Η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται μετρώντας το X_i και Y_i , όπου:

X_i = η απόσταση στον άξονα των τετμημένων, δηλαδή από δυτικά προς ανατολικά, που ορίζεται από τη συγκεκριμένη ζώνη προστασίας (εδώ ζώνη 50 ημερών)

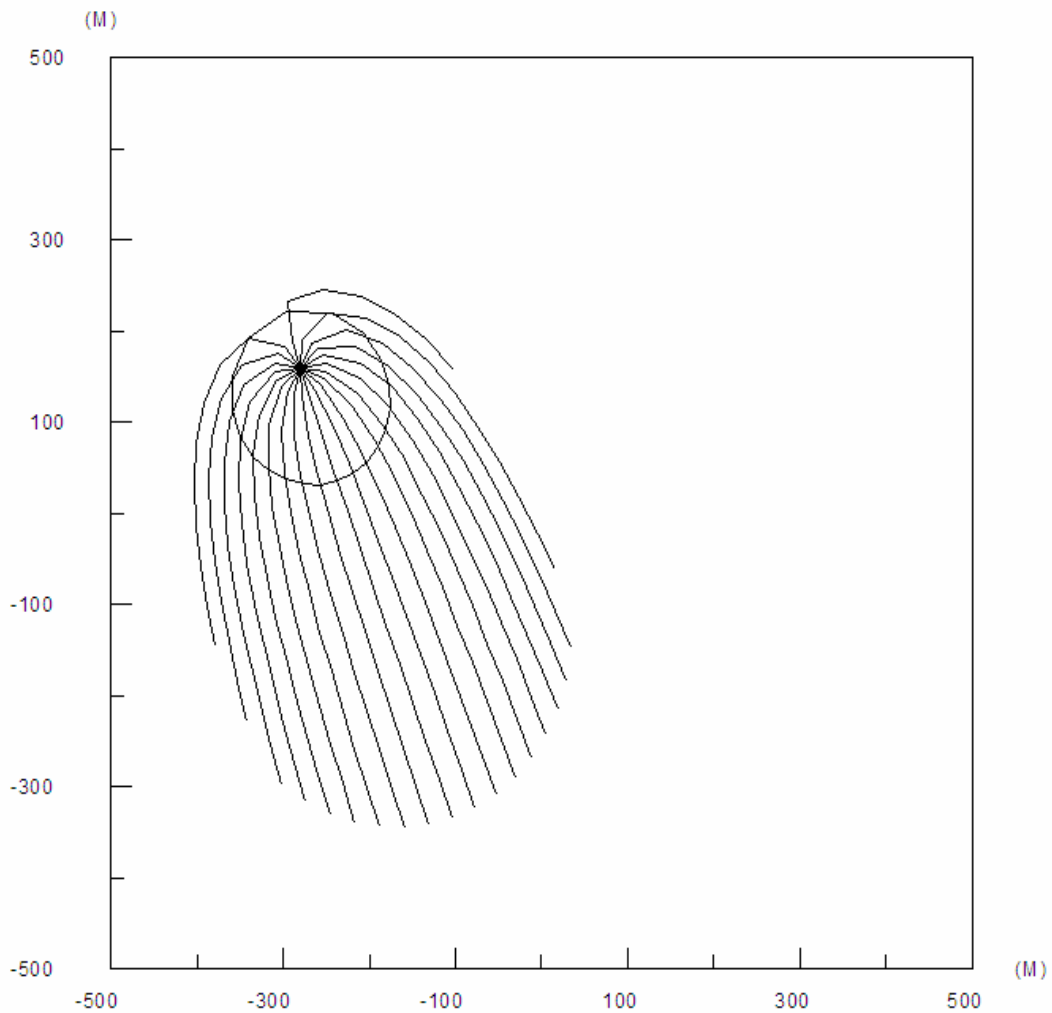
Y_i = η απόσταση στον άξονα των τεταγμένων, δηλαδή από βόρεια προς νότια, που ορίζεται από τη συγκεκριμένη ζώνη προστασίας (εδώ ζώνη 50 ημερών)

3.4.1. Σενάριο Α.

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε την ανεξάρτητη ΥΓΜ1 με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$. Μετά την εφαρμογή του μοντέλου λαμβάνουμε το γράφημα 1. Έχουμε:

$$X_i = 215 \text{ m}$$

$$Y_i = 195 \text{ m}$$



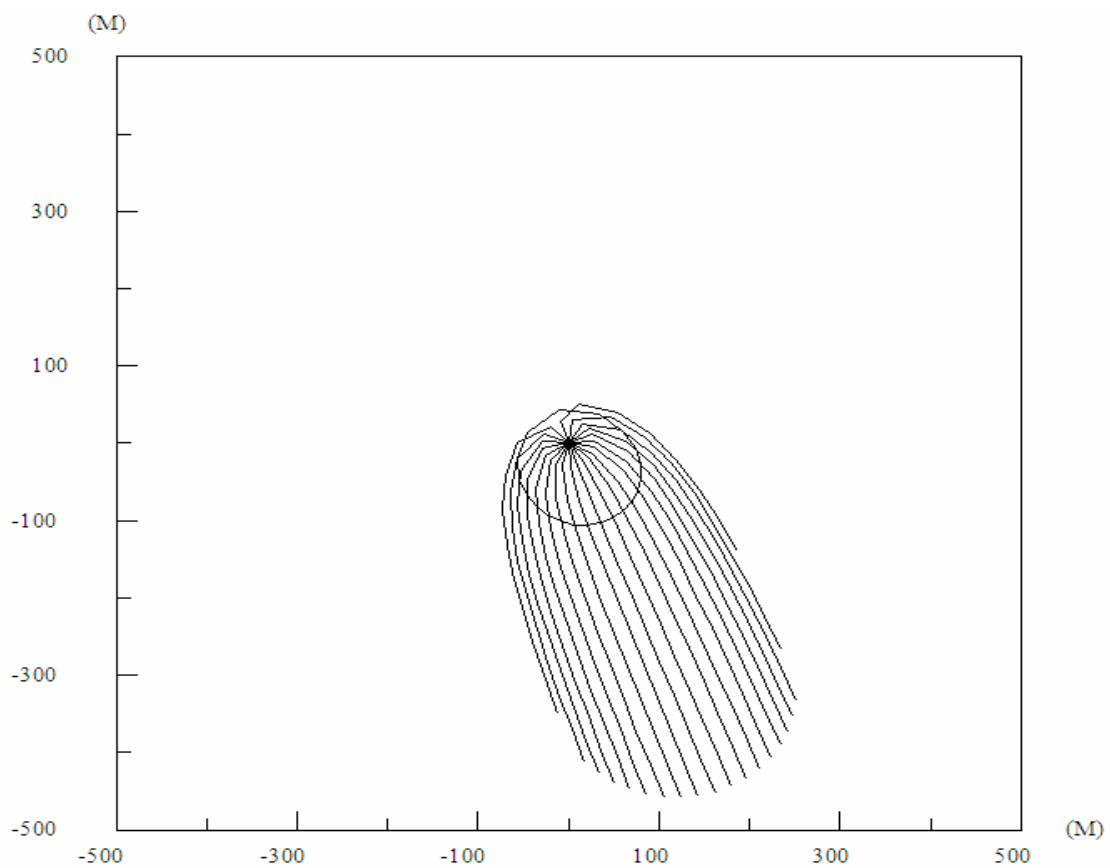
Γράφημα 1: ΥΓΜ1 (new1)

3.4.2. Σενάριο Β.

Στο σενάριο αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται για την υποτιθέμενη ανεξάρτητη ΥΓΜ2 με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$. Τα αποτελέσματα παρίστανται στο επόμενο γράφημα. Έχουμε:

$$X_i = 72 \text{ m}$$

$$Y_i = 157 \text{ m}$$



Γράφημα 2: ΥΓΜ2 (new2)

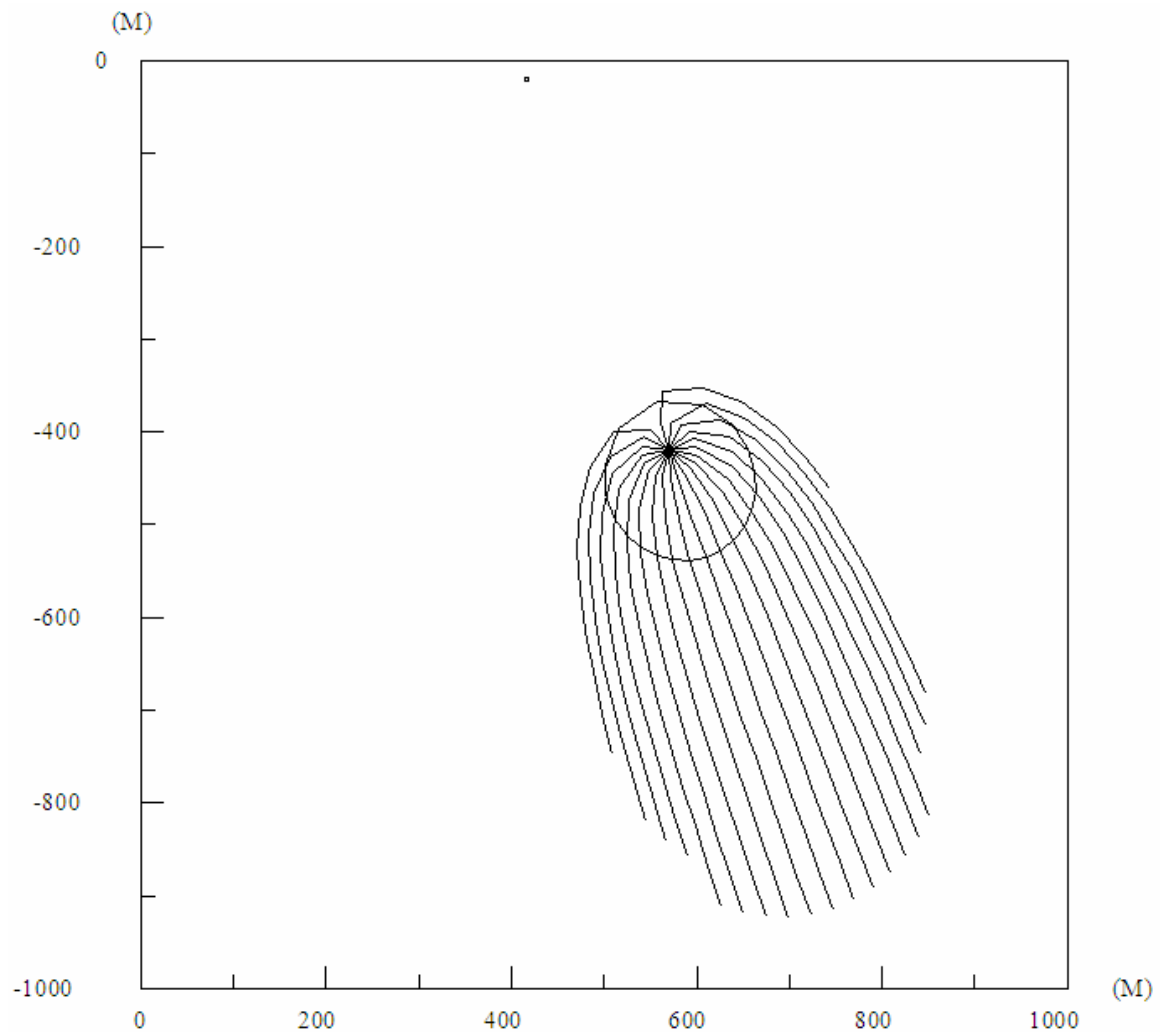
Παρατηρούμε ότι η ζώνη προστασίας για την ΥΓΜ1 είναι ευρύτερη από την αντίστοιχη για την ΥΓΜ2, καθώς, αν και τα υδρογεωλογικά στοιχεία είναι ίδια, εντούτοις η παροχή άντλησης είναι σχεδόν διπλάσια στην ΥΓΜ1 συγκριτικά με την ΥΓΜ2. Έτσι, είναι αναμενόμενο να απαιτείται μεγαλύτερη ζώνη προστασίας.

3.4.3. Σενάριο Γ1.

Θεωρούμε την περίπτωση που η ΥΓΜ8 βρίσκεται σε έδαφος με $T=5.700$ m^2/d . Σημειώνουμε ότι το σενάριο αυτό είναι αρκετά πιθανό και δεν πρέπει να παραληφθεί, καθώς ο ακριβής προσδιορισμός του εδάφους στην ΥΓΜ8 είναι δύσκολος, αφού αυτή βρίσκεται στα όρια μεταξύ δύο περιοχών με πολύ διαφορετικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Έχουμε:

$$X_i = 175 \text{ m}$$

$$Y_i = 175 \text{ m}$$



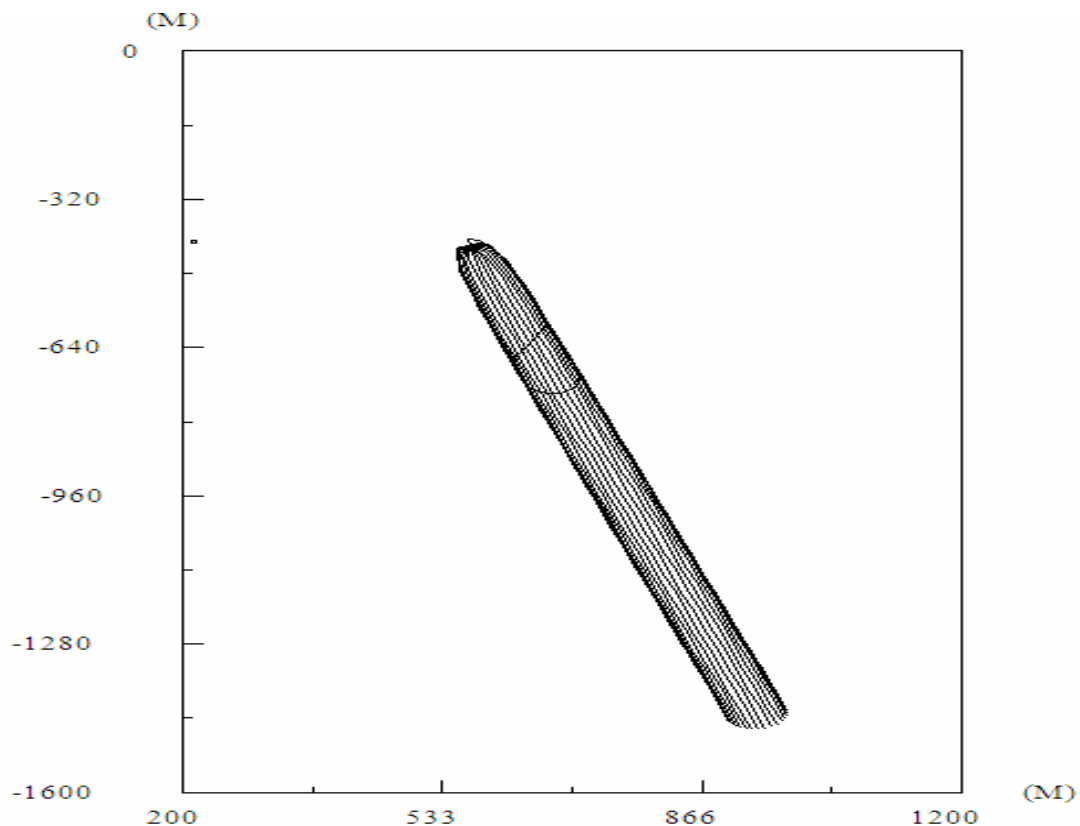
Γράφημα 3: ΥΓΜ8 σε $T=5700$ (αρχείο new8t5700)

3.4.4. Σενάριο Γ2.

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε την ΥΓΜ8 για έδαφος με $T=33.000 \text{ m}^2/\text{d}$. Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$X_i = 168 \text{ m}$$

$$Y_i = 328 \text{ m}$$

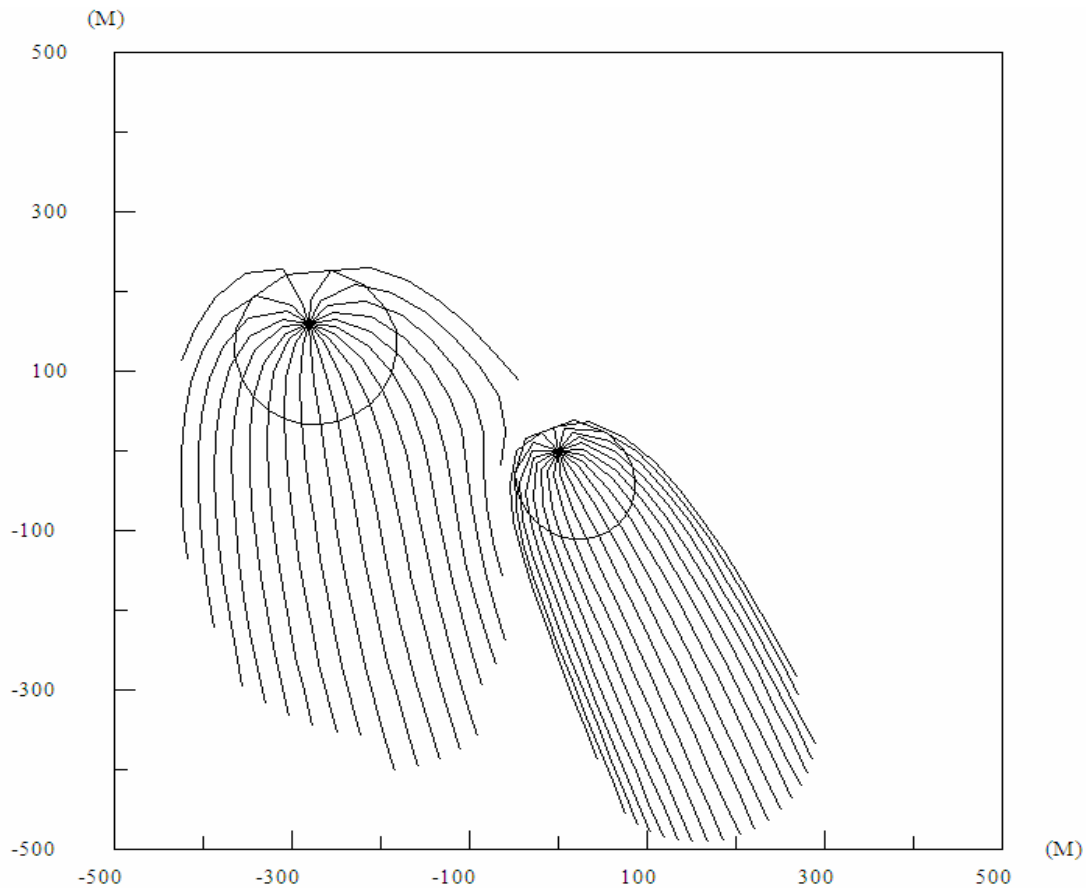


Γράφημα 4: ΥΓΜ8(αρχείο new8T) Επιπλέον αλλαγή: 180 μέρες όχι 360 (new8t33000)

Είναι προφανές ότι στο σενάριο αυτό η ζώνη προστασίας γύρω από την ΥΓΜ8 είναι πολύ πιο εκτεταμένη από το προηγούμενο σενάριο, καθώς η μεταβιβασιμότητα T έχει πολλαπλασιαστεί. Σημειώνουμε πως για εποπτικούς λόγους θέσαμε ως εξώτατο όριο τη ζώνη των 180 ημερών (time limit for simulation). Διαφορετικά, το γράφημα θα έβγαине ακόμη πιο εκτεταμένο και δε θα ήταν εύκολο να μελετηθεί. Το ίδιο όριο βάζουμε και στο Σενάριο E2, όπου ξανά $T=33.000 \text{ m}^2/\text{d}$.

3.4.5. Σενάριο Δ.

Θεωρούμε την περίπτωση των πηγαδιών ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 σε έδαφος με $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$. Γίνεται ταυτόχρονη μελέτη των δύο αυτών πηγαδιών και εξετάζεται η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.



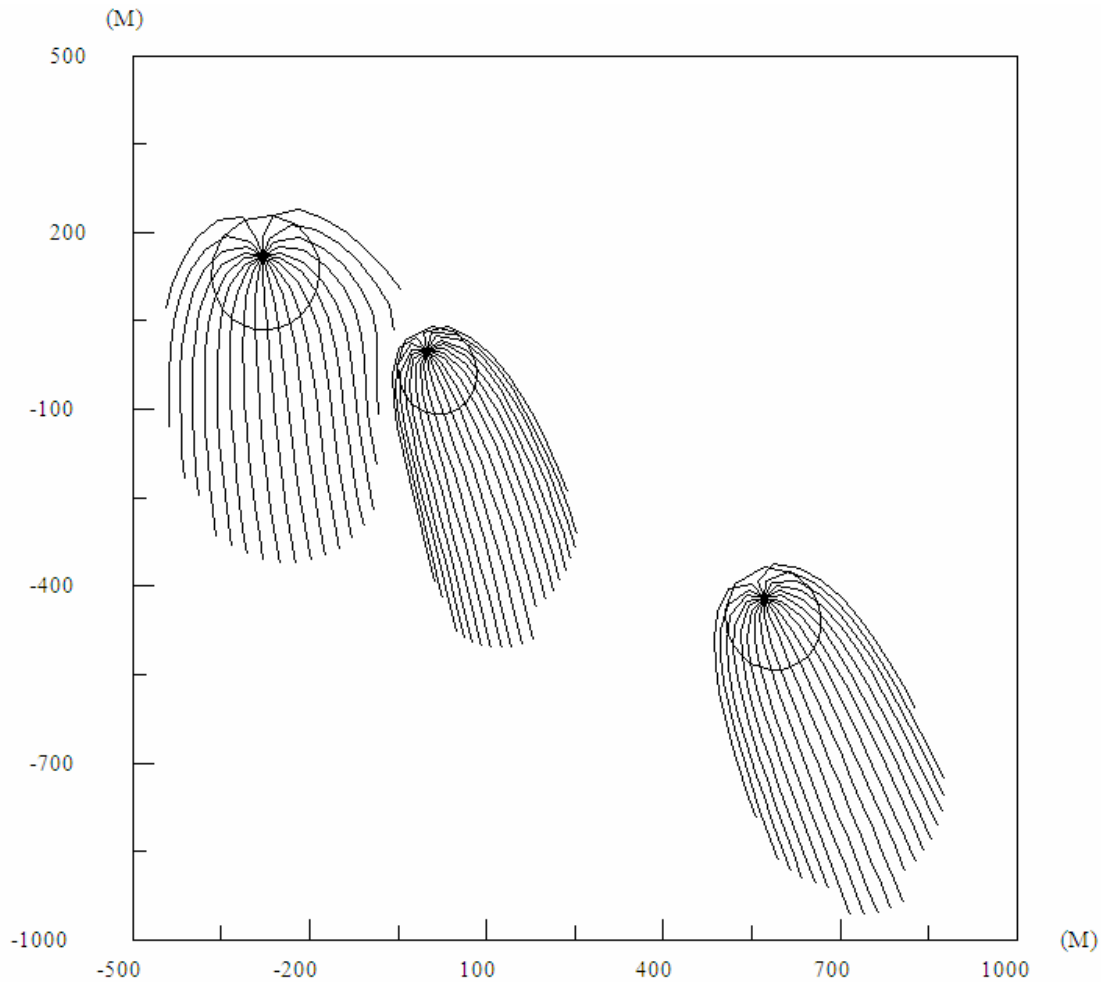
Γράφημα 5: ΥΓΜ1κΥΓΜ2 (new12)

Συγκρίνοντας το γράφημα 5 με τα γραφήματα 1 και 2, όπου θεωρούνται μεμονωμένες οι υδρογεωτρήσεις, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεταβολή στα όρια της ζώνης των 50 ημερών τόσο για την ΥΓΜ1 όσο και για την ΥΓΜ2. Συνεπώς, η λειτουργία του ενός πηγαδιού δεν επηρεάζει τη λειτουργία του άλλου.

Βέβαια παρατηρείται κάποια αλλαγή της ροής σε ζώνες με μεγαλύτερο χρόνο διαδρομής για την ΥΓΜ1, καθώς η ΥΓΜ2 βρίσκεται στα ανάντη της ΥΓΜ1. Έτσι, η άντληση νερού από την ΥΓΜ2 αλλοιώνει την πορεία της ροής γύρω από την ΥΓΜ1 και περιορίζει τη ζώνη εγκλωβισμού της.

3.4.6. Σενάριο Ε1.

Εν προκειμένω εξετάζεται η περίπτωση και των τριών υδρογεωτρήσεων για $T=5.700 \text{ m}^2/\text{d}$.

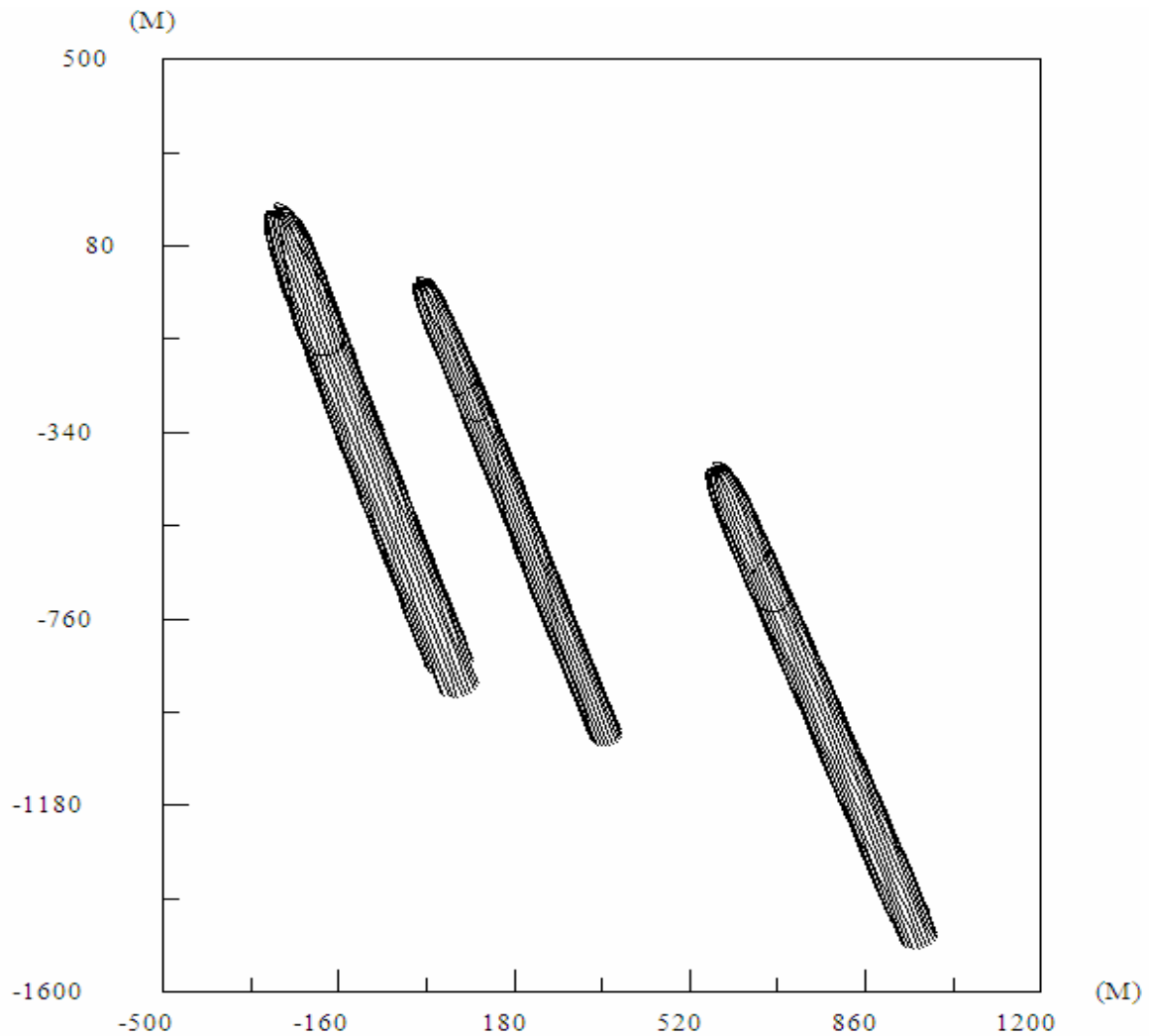


Γράφημα 6: ΥΓΜ1κΥΓΜ2κΥΓΜ8 σε $T=5700$ (new128t5700)

Παρατηρούμε ξανά ότι οι ζώνες προστασίας των 50 ημερών και για τα τρία πηγάδια παραμένουν ίδιες, όπως όταν θεωρούνται ως απομονωμένα. Εντούτοις, η ζώνη εγκλωβισμού και κατ' επέκταση η ζώνη των 360 ημερών (ή μεγαλύτερες) περιορίζονται. Η ύπαρξη πηγής άντλησης στα ανάντη ενός άλλου πηγαδιού άντλησης περιορίζει προφανώς την ευρύτερη υδρομαστευόμενη περιοχή του δεύτερου πηγαδιού. Σημειώνεται ότι αυτό θα ήταν πιο εμφανές αν θεωρούσαμε ως εξώτατο όριο (time limit for simulation) ζώνη με μεγαλύτερο χρόνο διαδρομής (π.χ. δύο έτη).

3.4.7. Σενάριο E2.

Στην τελευταία περίπτωση μελετώνται και τα τρία πηγάδια σε έδαφος με $T_a=33.000\text{m}^2/\text{d}$. Το σενάριο αυτό δεν είναι σε καμμία περίπτωση ρεαλιστικό, αλλά εφαρμόζεται για την πληρότητα της εργασίας.



Γράφημα 7: ΥΓΜ1κΥΓΜ2κΥΓΜ8 σε $T=33000$ (αρχείο new128t33000) Επιπλέον αλλαγή: 180 μέρες όχι 360

Παρατηρούμε ότι οι ζώνες προστασίας και για τα τρία πηγάδια είναι πολύ πιο εκτεταμένες σε σχέση με το σενάριο E1 ως προς τον κατακόρυφο άξονα (άξονας των y). Από την άλλη, η έκτασή τους ως προς τον οριζόντιο άξονα περιορίζεται κι επομένως και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση δεν είναι εμφανής.

4. Συμπεράσματα

- ✘ Η χάραξη ζωνών προστασίας (WHPA) γύρω από τα σημεία υδροληψίας αποτελεί ουσιαστικό μέτρο για την εξασφάλιση κατάλληλης ποιότητας αντλούμενου νερού για τη δημόσια υγεία.
- ✘ Διεθνείς επιστημονικοί οργανισμοί έχουν διατυπώσει οδηγίες για τις ενδεικτικές διαστάσεις των WHPA και για τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες ή μη δραστηριότητες.
- ✘ Οι ζώνες προστασίας εκτείνονται κυρίως στα ανάντη και σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη διάφορων επιπέδων προστασίας.
- ✘ Ο τρόπος καθορισμού των WHPA και ο αριθμός τους διαφέρει από χώρα σε χώρα ανάλογα με την ισχύουσα νομοθεσία και τα επικρατούντα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.
- ✘ Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον WHPA σχεδιασμό, αλλά οι προσεγγίσεις μέσω του «χρόνου διαδρομής» θεωρούνται ιδιαίτερα ρεαλιστικές και χρησιμοποιούνται συχνά.
- ✘ Παράλληλα, η αξιολόγηση ενός έργου υδροληψίας πρέπει να είναι συνεχής και να γίνεται με τυποποιημένο και μετρήσιμο τρόπο σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, καθώς οι παράγοντες κινδύνου είναι συχνά εποχιακοί, μη προβλέψιμοι και μη στατικοί. Η άμεση μόλυνση της πηγής υπογείου νερού λόγω ανεπαρκούς προστασίας έχει συσχετιστεί πολλές φορές με την εξάπλωση επιδημικών νόσων.
- ✘ Το “WHPA version 2.2” δημιουργήθηκε για λογαριασμό της EPA και αποτελεί ένα εύχρηστο μοντέλο για WHPA σχεδιασμό. Περιλαμβάνει τέσσερα υποπρογράμματα και ο χρήστης επιλέγει το καταλληλότερο για την εκάστοτε περίπτωση.

- ✘ Εφαρμόζοντας το αναλυτικό RESSQC μοντέλο έγινε WHPA σχεδιασμός στην περιοχή της Αγιάς για τρεις υδρογεωτρήσεις που βρίσκονται υπό την εποπτεία του ΟΑΔΥΚ.
- ✘ Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ως παράμετρο το «χρόνο διαδρομής». Καθορίστηκε η ζώνη προστασίας των 50 ημερών και ταυτόχρονα φάνηκε ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη αλληλεπίδραση μεταξύ των πηγαδιών τουλάχιστον μέχρι τη ζώνη των 360 ημερών / ενός έτους.
- ✘ Βάσει των αποτελεσμάτων μπορούμε να ισχυριστούμε ότι για τη μελέτη των υδρογεωτρήσεων ΥΓΜ1, ΥΓΜ2 και ΥΓΜ8 και για τη χάραξη των ζωνών προστασίας είναι σωστό να μελετάμε ξεχωριστά τις ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 από την ΥΓΜ8, καθώς η μεταξύ τους αλληλεπίδραση δε φαίνεται σημαντική.
- ✘ Με άλλα λόγια, για τις ΥΓΜ1 και ΥΓΜ2 μπορούμε να λάβουμε υπόψη μας το σενάριο Δ. Από την άλλη, για την ΥΓΜ8, αφού επιλέξουμε την πιο πιθανή τιμή μεταβιβασιμότητας, θα θεωρήσουμε το σενάριο Γ₁ ή Γ₂.

5. Βιβλιογραφία

- Olsen S.J., Miler G., Breuer T., Kennedy M., Higgins C., Walford J., McKee G., Fox K., Bibb W., Mead P. (2002), "A waterborne outbreak of Escherichia Coli O157:H7 Infections and Hemolytic Uremic syndrome: Implications for Rural Water Systems" *Emerging Infectious Diseases*, 8(4): 370-375
- WHO (1997), "Guidelines for drinking – water quality, Volume 3: Surveillance and control of community water supplies, WHO, Geneva
- US EPA (1993), *Wellhead protection: a guide for small communities*, US EPA, Washington, USA
- US EPA (1994), "Ground Water and Wellhead Protection, Handbook, EPA/625/R-94/001
- Chave P., Howard G., Schijven J., Appleyard S., Fladerer F., Schimon W. (2006), "Groundwater Protection Zones", World Health Organization, Chapter 17 ("Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources"), London, UK.
- Howard G., Godfrey S., Boonyakarnkul T. (2006), "Wellhead protection and sanitary completion", World Health Organization, Chapter 18 ("Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources"), London, UK
- US EPA (1993), "WHPA Version 2.2"
- Νικολαΐδης Ν., Καρατζάς Γ. (2006), «Τεχνική Έκθεση ΔΕΥΑ Χανίων: Μελέτη Αξιολόγησης Ερευνητικής Γεώτρησης στην Αγυιά», Χανιά
- Bhatt K. (1993), "Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values", *Journal of Hydrology*, 149: 1-8
- Fotopoulou E., Latinopoulos P., Theodosiou N. (2000), "Delineation of wellhead protection areas for water supply", 8th Greek National Conf. EYE, Athens, Greece pp.393-399

- Theodossiou N., Latinopoulos P., Fotopoulou E. (2005), "Application of Monte Carlo Analysis in the delineation of Wellhead Protection Areas", 9th International Conf on Environmental Science and Technology, Rhodes island, Greece
- ΚΥΑ (Κοινή Υπουργική Απόφαση – Joint Ministerial Decision) Υ2/2600/2001, «Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης»
- ΚΥΑ (Κοινή Υπουργική Απόφαση – Joint Ministerial Decision) ΔΥΓ2/94097/2007, «Παρακολούθηση ποιότητας πόσιμου ύδατος, λειτουργίας συστημάτων ύδρευσης και λήψη μέτρων για την προστασία της δημόσιας υγείας»
- Παντοκράτορας Α. (2000), «Απεταξάμην το χλώριο. Δύο προϋποθέσεις: Προστασία γύρω από την υδροληψία και άριστο δίκτυο», Ενημερωτικό δελτίο ΤΕΕ, τεύχος 2136
- Bosdogianni A., "Drinking Water Quality – Legislation – Implementation Problems"
- Theodossiou N., Latinopoulos P., Karatzas G., Maria E., "Delineation of Capture Zones in groundwater aquifers as a tool for the application of the "Polluter-Pays" principle" ", VIII Protection and Restoration of the Environment Conference, CD, 2006
- Γιαννούλης Ν., Κωνσταντίνου Ι., Αλμπάνης Τ. (2005), «Αξιολόγηση και προστασία πηγών υπογείων υδάτων», 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Υδρογεωλογίας, Αθήνα
- Καλλέργης Γ.Α. (2000), Εφαρμοσμένη περιβαλλοντική υδρογεωλογία, τόμος Β, Εκδόσεις ΤΕΕ, Αθήνα
- Grubb S. (1993), "Analytical Model for Estimation of Steady State Capture Zones of Pumping Wells in Confined and Unconfined Aquifers", Ground Water. v. 31, no.1 pp 27-32

- Rahman M., Shalid Sh. (2004), "Modeling Groundwater Flow for the Delineation of Wellhead Protection Area around a Water-well at Nachole of Bangladesh", *Journal of Spatial Hydrology*. v. 4. no. 1
- Fadlelmawla A.A., Dawoud M.A. (2005), "An approach for delineating drinking water wellhead protection areas at th Nile Delta, Egypt", *Journal of Environmental Management*, v.79. pp 140-149
- Σταμάτης Γ., Βουδούρης Κ. (2000), Καθορισμός περιμέτρου προστασίας υδροληπτικών έργων υδροφορέα μεταλλικών νερών λεκάνης Λουτρακίου βάσει υδρογεωλογικών κριτηρίων. Ορυκτός Πλούτος – *Mineral Wealth* 116/2000
- Καρατζάς Γ. (2007), «Ρύπανση και Εξυγίανση Υπόγειων Υδάτων», Σημειώσεις Παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

6. Παράρτημα

Πίνακας 5: Μικροβιολογικές παράμετροι (ΚΥΑ Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή (αριθμός/100 ml)
Escherichia coli (E.coli)	0
Εντερόκοκκοι	0

Πίνακας 6: Χημικές παράμετροι (ΚΥΑ Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή	Μονάδα
Ακρουλαμίδιο	0,10	μg/l
Αντιμόνιο	5,0	μg/l
Αρσενικό	10	μg/l
Βενζόλιο	1,0	μg/l
Βενζο-α-πυρένιο	0,01,	μg/l
Βόριο	1,0	mg/l
Βρώμικα	10	μg/l
Κάδμιο	5,0	μg/l
Χρώμιο	50	μg/l
Χαλκός	2,0	mg/l
Κυανιούχα	50	μg/l
1,2 – δихλωροαιθάνιο	3,0	μg/l
Επιχλωροδρίνη	0,10	μg/l
Φθοριούχα	1,5	mg/l
Μόλυβδος	10	μg/l
Υδράργυρος	1,0	μg/l
Νικέλιο	20	μg/l
Νιτρικά	50	mg/l
Νιτρώδη	0,50	mg/l
Παρασιτοκτόνα	0,10	μg/l
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0,50	μg/l
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0,10	μg/l
Σελήνιο	10	μg/l
Τετραχλωροαιθέριο και Τριχλωροαιθέριο	10	μg/l
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100	μg/l
Βινυλοχλωρίδιο	0,50	μg/l

Πίνακας 7: Ραδιενέργεια (ΚΥΑ Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή	Μονάδα
Τρίτιο	100	becquerel/l
Ολική ενδεικτική δόση	0,10	MSv/έτος

Πίνακας 8: Λοιπές παράμετροι (ΚΥΑ Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή	Μονάδα
Αργίλιο	200	Mg/l
Αμμώνιο	0,50	Mg/l
Χλωριούχα	250	Mg/l
Clostridium perfringens (συμπεριλαμβανομένων των σπόρων)	0	Αριθμός/100 ml
Χρώμα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής	
Αγωγιμότητα	2500	μS cm ⁻¹ στους 20°C
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου	≥ 6,5 και ≤ 9,5	Μονάδες pH
Σίδηρος	200	μg/l
Μαγγάνιο	50	μg/l
Οσμή	Αποδεκτή στους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής	
Οξειδωσιμότητα	5	mg/IO ₂
Θειικά	250	mg/l
Νάτριο	200	mg/l
Γεύση	Αποδεκτή στους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής	
Αριθμός αποικιών σε 22° C και 37° C	Άνευ ασυνήθους μεταβολής	
Κολοβακτηριοειδή	0	Αριθμός/100 ml
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	Άνευ ασυνήθους μεταβολής	
Υπολειμματικό χλώριο		mg/l
Θολότητα	Αποδεκτή στους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής	