



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ  
ΥΔΑΤΩΝ VISUAL MODFLOW ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ  
GWM ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ  
ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ

ΔΕΤΤΟΡΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)  
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ  
ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά  
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2012

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα διατριβή, μελετάται το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Το αντικείμενο μελέτης εστιάζει στην περιοχή του Τυμπακίου στο Ηράκλειο Κρήτης και το έντονο πρόβλημα που αντιμετωπίζει. Η κύρια πηγή εσόδων της περιοχής είναι η γεωργία, οπότε οι ανάγκες του νερού, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, αυξάνονται ραγδαία. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα και για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η μοντελοποίηση του.

Σκοπός της εργασίας είναι ο προσδιορισμός του μετώπου της υφαλμύρισης στην παρούσα κατάσταση, καθώς επίσης και η βελτιστοποίηση των αντλήσεων της περιοχής με θεώρηση τεσσάρων εναλλακτικών σεναρίων.

Έγινε χρήση του μοντέλου MODLOW, το οποίο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν θα βοηθήσουν στην εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης. Στη συνέχεια ακολούθησε η βελτιστοποίηση της υφιστάμενης κατάστασης και ο εντοπισμός της βέλτιστης δυνατής κατάστασης. Μέσω σεναρίων που δημιουργήθηκαν, έγινε προσπάθεια για την εύρεση λύσεων στην αντιμετώπιση του προβλήματος και την επαναφορά του συστήματος στη βέλτιστη δυνατή κατάσταση, εφόσον αυτό είναι δυνατό. Για τη βελτιστοποίηση των αντλήσεων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού GWM, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο Simplex.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της παρούσας διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καρατζά για την ευκαιρία που μου έδωσε, καθώς επίσης και την αμέριστη συμβολή του κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Η πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του Δρ. Μανόλη Βαρουχάκη και της Δρ. Ζωής Δόκου, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω για το συνεχές ενδιαφέρον και την άψογη συνεργασία όλα τα μέλη του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη και Λέκτορα Νικόλαο Παρανυχιανάκη για το χρόνο που διέθεσαν στην εργασία μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου αλλά και στους φίλους μου για τη συμπαράσταση τους όλο αυτό το διάστημα.

---

## Περιεχόμενα

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ .....                                         | 7  |
| 1.1 Εισαγωγή .....                                                                 | 7  |
| 1.2 Βασικές έννοιες υπόγειας υδρολογίας .....                                      | 9  |
| 1.3 Διαχείριση υδάτων και αξιοποίηση .....                                         | 13 |
| 1.4 Φορείς διαχείρισης.....                                                        | 15 |
| 1.5 Νομοθεσία .....                                                                | 16 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ .....                                     | 17 |
| 2.1 Θεωρία υφαλμύρισης.....                                                        | 17 |
| 2.2 Τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρισης.....                                      | 18 |
| Τροποποίηση του γενικού σχεδίου άντλησης .....                                     | 18 |
| Τεχνητός εμπλουτισμός.....                                                         | 18 |
| Δημιουργία υπόγειου φράγματος.....                                                 | 18 |
| Φράγμα από άντληση υφάλμυρου νερού κοντά στην ακτή. ....                           | 18 |
| Φράγμα από τεχνητό εμπλουτισμό. ....                                               | 19 |
| 2.3 Εφαρμογές μοντέλων υφαλμύρισης στην Ελλάδα.....                                | 19 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....                                               | 24 |
| 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής.....                                            | 24 |
| 3.2 Μετεωρολογικά στοιχεία .....                                                   | 26 |
| 3.3 Γεωλογία της περιοχής.....                                                     | 28 |
| 3.4 Υδρολιθολογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών .....                         | 31 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ..... | 33 |
| 4.1 Τα μοντέλα υπόγειου νερού .....                                                | 33 |
| 4.2 Ταξινόμηση των μοντέλων .....                                                  | 36 |
| 4.3 Βασικές εξισώσεις .....                                                        | 38 |
| Αριθμητικές Μέθοδοι.....                                                           | 42 |
| Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος.....                           | 45 |
| Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα .....                                              | 45 |
| Ημι-τριδιάστατα μοντέλα .....                                                      | 47 |
| Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα.....                                  | 47 |
| Οριακές συνθήκες .....                                                             | 48 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW .....                                  | 49 |
| 5.1 Εισαγωγή στο μοντέλο MODFLOW .....                                             | 49 |
| 5.2 Υπορουτίνες κώδικα MODFLOW .....                                               | 51 |
| 5.3 Δυνατότητες –Τρόποι επίλυσης μοντέλου MODFLOW .....                            | 52 |
| 5.4 Οριακές συνθήκες.....                                                          | 54 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Συνθήκη 1 <sup>ης</sup> τάξης (τύπος Dirichlet) .....                       | 54  |
| Συνθήκη 2 <sup>ης</sup> τάξης (τύπος Neumann) .....                         | 54  |
| Συνθήκη 3 <sup>ης</sup> τάξης (τύπος Cauchy ή μικτού ορίου) .....           | 54  |
| 5.5 Προετοιμασία του μοντέλου .....                                         | 55  |
| 5.6 Αποτελέσματα.....                                                       | 59  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Η ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ .....          | 62  |
| 6.1 Προσέγγιση μη γραμμικών προβλημάτων .....                               | 66  |
| 6.2 Προσέγγιση γραμμικών προβλημάτων.....                                   | 68  |
| 6.3 Η χρήση της μεθόδου Simplex .....                                       | 68  |
| 6.4 Το μοντέλο GWM (Ground - Water Management).....                         | 70  |
| 6.4.1. Η Αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί.....                    | 71  |
| 6.4.2. Οι συντελεστές απόκρισης .....                                       | 74  |
| 6.4.3. Γενική μορφή προβλήματος διαχείρισης .....                           | 76  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GWM ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....            | 81  |
| 7.1 Βελτιστοποίηση της υφιστάμενης κατάστασης .....                         | 81  |
| 7.2. Βελτιστοποίηση του προβλήματος με τη βοήθεια σεναρίων αναχαίτισης..... | 85  |
| 7.2.1 Σενάριο 1 <sup>ο</sup> .....                                          | 86  |
| 7.2.2 Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....                                          | 87  |
| 7.2.3 Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....                                          | 89  |
| 7.2.4 Σενάριο 4 <sup>ο</sup> .....                                          | 90  |
| 7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Επαλήθευση μεθόδου .....                       | 92  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....                                    | 94  |
| 8.1 Συμπεράσματα.....                                                       | 94  |
| 8.2 Προτάσεις .....                                                         | 96  |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                                                          | 98  |
| Ελληνική Βιβλιογραφία .....                                                 | 98  |
| Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....                                                | 99  |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....                                                             | 102 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αστική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών, σε συνδυασμό με την αύξηση του καταναλωτισμού, υπήρξε η κύρια αιτία δημιουργίας των σύγχρονων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ένα από αυτά τα προβλήματα είναι και το φαινόμενο της υφαλμύρισης, που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή. Η υφαλμύριση, δηλαδή η διείσδυση αλμυρών υδάτων στο εσωτερικό μιας περιοχής, παρατηρείται σε όλους σχεδόν τους παράκτιους υδροφορείς, λόγω της συνεχούς επικοινωνίας με το θαλασσίνο νερό και της διατάραξης της ισορροπίας του συστήματος γλυκού/αλμυρού νερού κάτω από συνθήκες άντλησης μεγάλων ποσοτήτων υπόγειου νερού. Αποτέλεσμα της υπεράντλησης είναι η υποχώρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η διείσδυση της θάλασσας στο εσωτερικό της περιοχής.

Η προσέγγιση του προβλήματος της υφαλμύρισης, εστιάζει στο Δήμο Τυμπακίου, στο Νομό Ηρακλείου όπου το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο. Η διαδικασία ξεκίνησε με την προσομοίωση της υπόγειας ροής στην υφιστάμενη κατάσταση, μέσω του μοντέλου MODFLOW. Στη συνέχεια ακολούθησε η βελτιστοποίηση των αντλήσεων της περιοχής και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο GWM (Ground-Water Management), το οποίο βασίζεται στη μέθοδο Simplex. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εφαρμογή τεσσάρων σεναρίων, για τον εντοπισμό των βέλτιστων δυνατών αντλήσεων, με σκοπό τόσο την ικανοποίηση των αναγκών των κατοίκων σε ύδρευση και σε άρδευση, όσο και την αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρισης.

Αναλυτικά, στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έγινε μια μικρή εισαγωγή για το περιβάλλον και την επιβάρυνση που δέχεται, εστιάζοντας στην αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων. Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εξετάστηκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης με τις εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο και έγινε αναφορά στην υφαλμύριση στον Ελλαδικό χώρο γενικά, αλλά και σε τοπικό επίπεδο. Στη συνέχεια, στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έγινε μια σύντομη περιγραφή στην περιοχή μελέτης καθώς επίσης και των μορφολογικών, γεωλογικών, και κλιματολογικών στοιχείων αυτής. Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έγινε περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν την κίνηση του υπόγειου νερού, από τα οποία επιλέχθηκε το MODFLOW. Η ανάλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιεί και επιλύει ακολουθούν στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Παρουσιάστηκαν ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στο μαθηματικό μοντέλο MODFLOW (χάρτες, αρχικές συνθήκες, οριακές συνθήκες, βροχόπτωση) αλλά και η βαθμονόμηση αυτού. Έγινε παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης η οποία κρίνεται δυσμενής και είναι απαραίτητο να παρθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Στη συνέχεια στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έγινε ανάλυση των μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, καθώς και η ανάλυση του μοντέλου GWM, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο Simplex. Η εφαρμογή του μοντέλου GWM (Ground Water Management) στην περιοχή μελέτης έγινε στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο για την υφιστάμενη κατάσταση. Ακολούθησαν τέσσερα σενάρια για την βελτιστοποίηση των αντλήσεων της περιοχής ενδιαφέροντος, μέσω των οποίων έγινε προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος και επαναφοράς του συστήματος στη βέλτιστη δυνατή κατάσταση. Τέλος στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ολοκληρώθηκε η διατριβή με τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

---

## ***ABSTRACT***

This study examines the saltwater intrusion problem, a naturally occurring phenomenon that is often augmented by human activity through the over-exploitation of the groundwater reserves. Saltwater intrusion occurs in most coastal aquifers due to the constant contact with the saltwater and the imbalance of the freshwater / saltwater that occurs under intense pumping conditions. The present study focuses on the Municipality of Tympaki aquifer in Heraklion, Crete, where the phenomenon is particularly intense. The main source of income in the region is agriculture, an activity that demands large amounts of water, especially during the summer. In the Tympaki basin there are 27 pumping wells with the majority of them located at the centre of the basin.

The purpose of this study is to investigate the current extent of saltwater intrusion as well as to find the optimal pumping scheme, for which the saltwater intrusion will retreat, while meeting the irrigation needs of the region. A mathematical model that simulates the groundwater flow is used, in order to study the size, extent and rate of the phenomenon. MODFLOW was chosen for this purpose, which is a three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Initial conditions, boundary conditions, hydraulic conductivity values and precipitation data for the basin were used in order to perform the model calibration and simulation.

The optimization of the pumping scheme was performed using the GWM (Ground-Water Management) model, which utilizes the Simplex method. The optimization problem at hand is slightly nonlinear because of the nonlinear relation of the free surface groundwater system to the pumping stress. GWM solves the nonlinear problem using a sequential linearization approach. At each step, the aquifer is considered confined and the response matrix of the system is calculated for an initial set of pumping rates. The Simplex method is then used in order to solve this linear problem and compute the optimal pumping rates for the 27 pumping wells. The calculated pumping rates are used as initials for the next step of the algorithm and new response coefficients are calculated. The process is terminated when the difference between two successive solutions is less than a user-specified convergence value.

The Ghyben-Herzberg equation was used to identify the position of the saltwater intrusion front for the aquifer of interest. Considering the aquifer depth at sea level to be 100 m, it was estimated that the seawater intrusion extends in coastal regions with hydraulic heads between 100 and 102.5 m. Initially, the optimal pumping rates that meet the water demand in the region while preventing further intrusion were calculated. Four additional scenarios were then considered in order to investigate the possibility of retraction of the saltwater intrusion front towards the shoreline. These scenarios seek to maximize pumping activity while allowing the saltwater intrusion front to retreat towards the shoreline in pre-specified locations that fall between the worst case scenario (current conditions) and best case scenario (zero pumping activity).

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί το βασικότερο αγαθό για την ύπαρξη ζωής πάνω στη γη, σαν φυσική πρώτη ύλη υπάρχει στη διατροφή όλων των οργανισμών αλλά συμμετέχει και σε κάθε σχεδόν παραγωγική διαδικασία. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της χρήσης του νερού γίνεται παρέμβαση σε δυο κύρια χαρακτηριστικά του, την ποιότητα και την ποσότητα, γεγονός που οδηγεί σε πολυάριθμα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η αστική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών, σε συνδυασμό με την αύξηση του καταναλωτισμού, υπήρξε η κύρια αιτία δημιουργίας των σύγχρονων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η μεγάλη αύξηση του πληθυσμού, η έντονη αστικοποίηση, η μηχανοποίηση της γεωργίας, η συνεχής εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η παραγωγή όλο και περισσότερων αγαθών αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα, τα οποία συμβάλλουν στην αύξηση των παραγόμενων αποβλήτων αλλά και στην υπερκατανάλωση των φυσικών πόρων (π.χ. υδάτινοι αποδέκτες). Γενικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι κοινό παράγοντα σε όλα τα παραπάνω αποτελεί η μη ορθολογική διαχείριση των υδάτων, με αποτέλεσμα την ποσοτική μείωση αλλά και την ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων λόγω υφαλμύρισης, ευτροφισμού, νιτρορύπανσης κλπ.

Οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι αρκετές και γι' αυτό το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε παίρνει όλο και μεγαλύτερες διαστάσεις. Συνοψίζοντας έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση, επεξεργασία και απόρριψη ουσιών: Χ.Υ.Τ.Α, χωματερές, απόβλητα ορυχείων, υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, νεκροταφεία, χώροι ανοικτής καύσης, υπόγειες δεξαμενές και φρέατα αποχέτευσης
- Πηγές που γίνονται δίοδοι ρυπασμένου ύδατος προς τους υδροφορείς: φρέατα παραγωγής, φρέατα μετρήσεων και παρατηρήσεων, εκσκαφές δομικών έργων
- Πηγές που δημιουργούνται από το αποτέλεσμα άλλων δραστηριοτήτων: χρήση λιπασμάτων και μυκητοκτόνων, απόβλητα από περιοχές εκτροφής ζώων, χρήση αλατιού για αποπαγοποίηση, διείσδυση από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές
- Φυσικές πηγές από αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων: φυσικές διαρροές αλληλοεπιδράσεις υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, εισροή θαλασσινού νερού σε υδροφορείς με γλυκό νερό [Καρατζάς, 2009]

Στο Σχήμα 1.1 που ακολουθεί συνοψίζονται τα κύρια προβλήματα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος που αντιμετωπίζει η Ελλάδα:



**Σχήμα 1.1. Προβλήματα ρύπανσης στην Ελλάδα [Περιφέρεια Κρήτης Διεύθυνση Υδάτων, 2009]**

Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε μονοπάτια με ανεξέλεγκτες συνέπειες αν δεν ληφθούν άμεσα και αποτελεσματικά μέτρα. Τα μέτρα αυτά θα επιβάλλουν καλύτερη διαχείριση με θεώρηση μεθόδων ελέγχου στην πηγή για τον περιορισμό του προβλήματος σε τοπικό επίπεδο, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση προκειμένου να εξοικονομηθεί νερό για άλλες χρήσεις, αποφυγή της ρύπανσης των αποδεκτών αλλά και την επιτακτική ανάγκη για διόρθωση των υφιστάμενων προβλημάτων. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων υδάτων και η οποία ορίζεται ως εξής:

- Διασφάλιση ενός ισορροπημένου υδάτινου ισοζυγίου λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες για νερό του οικοσυστήματος
- Διατήρηση υδάτινης κυκλοφορίας και χρόνου παραμονής κοντά στις φυσικές συνθήκες ούτως ώστε να διασφαλιστεί η φυσική ποιότητα και τα επίπεδα υπόγειων υδάτων

- Προσωρινά περιορισμένη ή καθόλου χρήση εξόρυξη μόνιμων υδατικών αποθεμάτων
- Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων δε μπορεί να υπερβαίνει τη φυσική δυνατότητα μείωσης του υδροφορέα
- Περιορισμός αρνητικών παρεμβολών μεταξύ γειτονικών γεωτρήσεων
- Ίση αξιολόγηση οικολογικών, οικονομικών και κοινωνικών απαιτήσεων [Modinger, Kobus, 2005]

## 1.2 Βασικές έννοιες υπόγειας υδρολογίας

Σε αυτή την παράγραφο ακολουθούν κάποιες βασικές έννοιες που αναφέρονται σε όλη την έκταση της εργασίας και είναι χαρακτηριστικές όταν μιλάμε για υπόγεια ροή.

Ο όρος **υπόγεια ύδατα** αναφέρεται στις υδάτινες ποσότητες που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανάμεσα στους πόρους καθώς και στα ρήγματα των γεωλογικών σχηματισμών. Έχουν μεγάλη οικολογική σημασία γιατί αποτελούν τρόπο τροφοδοσίας των ποταμών, των πηγών και άλλων υδάτινων σχηματισμών ενώ αποτελούν ένα είδος μακροχρόνιας δεξαμενής του φυσικού κύκλου του νερού. Συχνά καταναλώνονται για γεωργική, αστική και βιομηχανική χρήση με την κατασκευή και τη λειτουργία γεωτρήσεων. Τα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνουν την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη. Ακόρεστη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπεδάφους όπου οι πόροι του εδάφους καταλαμβάνονται από αέρα και νερό. Κορεσμένη είναι η ζώνη όπου όλοι οι πόροι του εδάφους είναι πλήρεις από νερό και υπό συνθήκες υδροστατικής πίεσης, ενώ η άνω επιφάνεια της είναι ο υδροφόρος ορίζοντας όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. [Καρατζάς, 2009]

**Υδροφορέας** είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία τροφοδοτούν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Παραδείγματα τέτοιων σχηματισμών αποτελούν η άμμος και οι χάλικες. Τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωλογία, τη δομή του υποστρώματος και την τοπογραφία. Ο ρόλος του ποικίλλει ανάλογα με την περίπτωση που εξυπηρετεί:

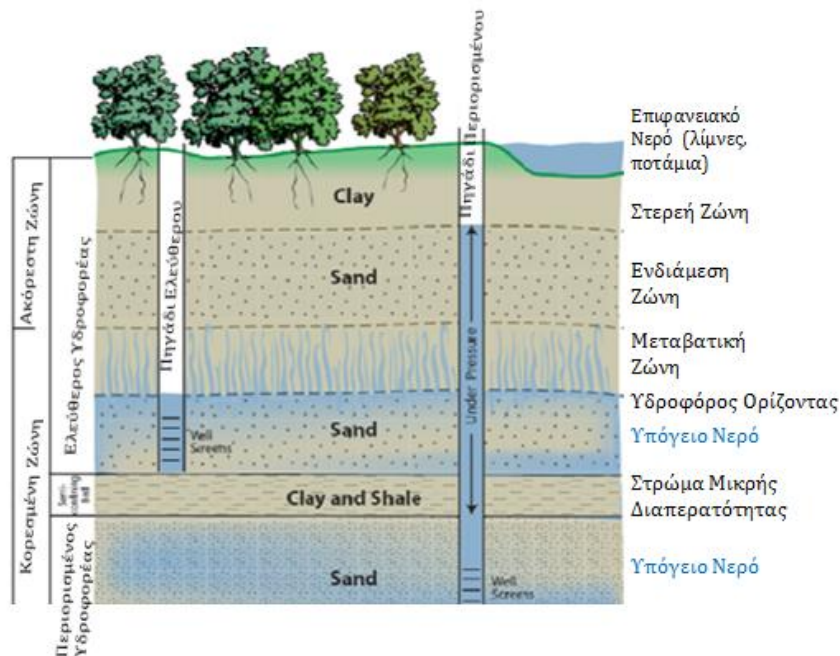
- Πηγή παροχής νερού
- Δεξαμενή αποθήκευσης
- Αγωγός μεταφοράς
- Φίλτρο καθαρισμού [Λατινόπουλος, 1998]

Οι υδροφορείς συμβάλλουν με πολλούς τρόπους στη συνολική ανάπτυξη των υδατικών πόρων μιας περιοχής, όπως είναι:

- Η λειτουργία τροφοδοσίας των έργων απόληψης (supply function)
- Η λειτουργία διοχέτευσης (piping function) νερού από μια περιοχή σε μια άλλη (Kazmann, 1956)
- Η λειτουργία εξόρυξης νερού (mining function) στην περίπτωση που η απόληψη ξεπερνά την αναπλήρωση, που οδηγεί όμως στην εξάντληση του υδροφόρου

- Η λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας (filter plant function) μεταχειρισμένων νερών (Hordon, 1977) στην ακόρεστη ζώνη
- Η λειτουργία παραγωγής ενέργειας (energy-source function) με την κατασκευή και εγκατάσταση των αντλιών θερμότητας που αξιοποιούν τη θερμική ενέργεια του υδροφόρου (Gass-Lehr, 1997, Andrews, 1978)
- Η λειτουργία αποθήκευσης νερού (storage function) με την υπόγεια αποθήκευση της περίσσειας νερού (χειμερινής, υγρών περιόδων, πλημμυρικών απορροών αλλά και επεξεργασμένων λυμάτων). [Καρτεράκης, 2005]

Οι κατηγορίες των υδροφορέων είναι δυο: οι ελεύθεροι και οι περιορισμένοι και ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 1.2). Ο ελεύθερος υδροφορέας έχει σαν ανώτερη επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ ο περιορισμένος περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα. [Καρατζάς, 2009]



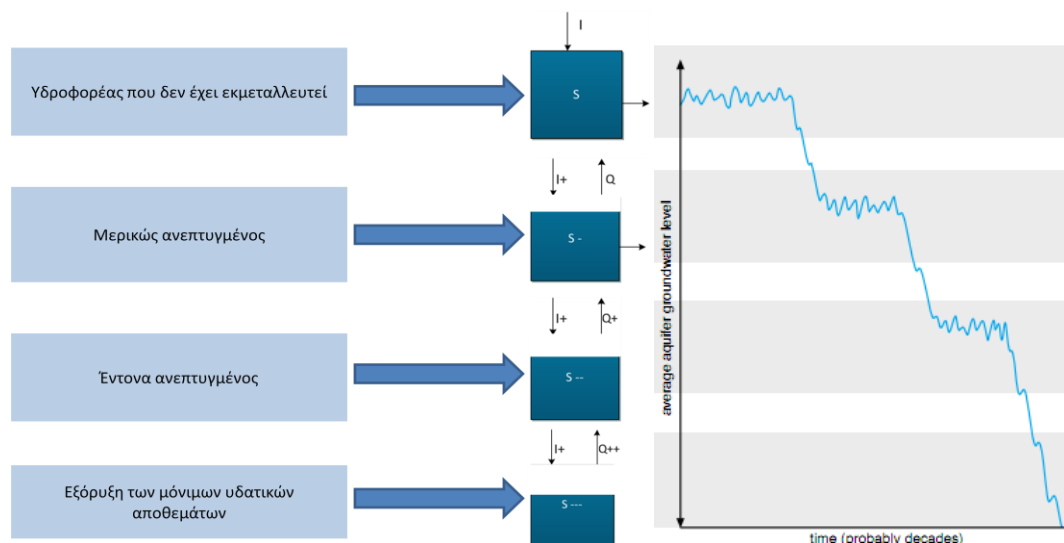
Σχήμα 1.2. Τα είδη του υδροφορέα

[[www.water.ca.gov/groundwater/groundwater\\_basics/hydrologic\\_cycle.cfm](http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm)]

Ανάλογα με την ποσότητα νερού και το βαθμό ανάπτυξης τους οι υδροφορείς χωρίζονται σε 4 κατηγορίες

- Υδροφορέας σε φυσικές συνθήκες. Αυτού του είδους οι υδροφορείς δεν έχουν εκμεταλλευτεί σχεδόν καθόλου. Έχουν υποστεί μικρές αντλήσεις και σε τοπικό μόνο επίπεδο. Όλη η εκφόρτιση γίνεται με φυσικό τρόπο.
- Μερικώς ανεπτυγμένος υδροφορέας. Γίνονται περιορισμένες αντλήσεις, αλλά η εκφόρτιση γίνεται κυρίως μέσω φυσικών διαδικασιών
- Έντονα ανεπτυγμένος υδροφορέας. Γίνονται εκτεταμένες αντλήσεις, μέσω των οποίων γίνεται όλη η εκφόρτιση του συστήματος.
- Υδροφορέας όπου γίνονται υπεραντλήσεις. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε άντληση των μόνιμων υδατικών αποθεμάτων [Foster et al., 2003a]

Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται τα παραπάνω στάδια αλλά και το ιστόγραμμα για το πώς ένας υδροφορέας μετατρέπεται από μη εκμεταλλευμένος σε υδροφορέα με υπεράντληση.



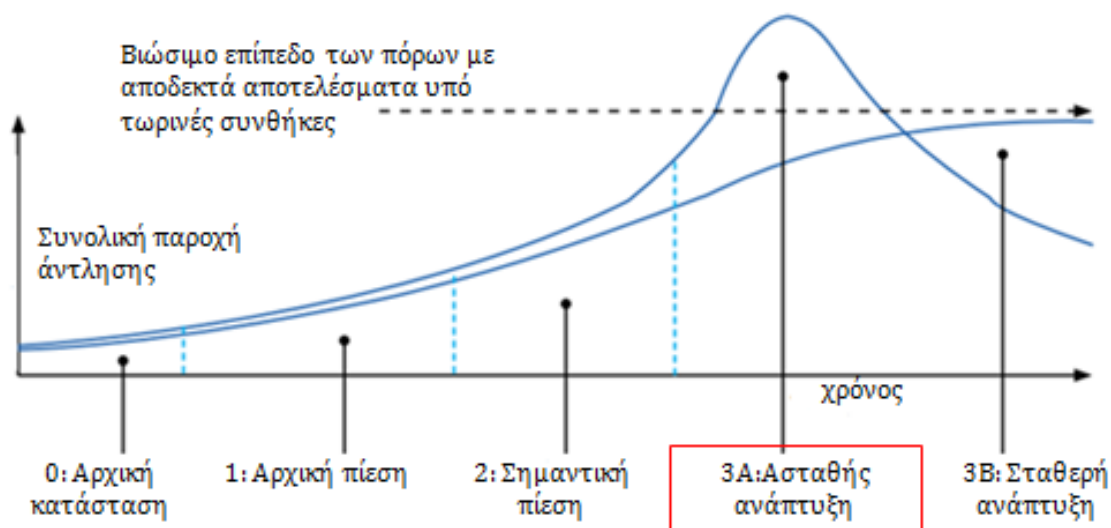
Σχήμα 1.3. Κατηγοριοποίηση υδροφορέων ανάλογα με το βαθμό εκμετάλλευσης [Foster et al., 2009]

Όπου  $I$ : η διήθηση

$Q$ : η παροχή άντλησης

$S$ : η αποθηκευτικότητα, δηλαδή ο όγκος νερού που απομακρύνεται από τον υδροφορέα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας και ανά μονάδα μείωσης του υδραυλικού ύψους

Ωστόσο ανάλογα με τη βιωσιμότητα του υδροφορέα, μπορούν να διαχωριστούν πέντε κατηγορίες, οι οποίες φαίνονται και στο Σχήμα 1.4, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζονται ο ρυθμός άντλησης και ο ρυθμός ανάκαμψης του υδροφορέα, ενώ στον οριζόντιο ο χρόνος.



Σχήμα 1.1. Κατηγοριοποίηση υδροφορέων ανάλογα με τη βιωσιμότητα [Taylor et al., 2010]

- 
- 0: Αρχική κατάσταση (baseline situation). Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει διαθεσιμότητα του νερού καθώς δεν χρησιμοποιούνται τα υπόγεια νερά, παρά μόνο για την κάλυψη μικρών διάσπαρτων αναγκών. Δεν απαιτούνται ιδιαίτερα διαχειριστικά μέτρα, παρά μόνο μια απλή καταγραφή των γεωτρήσεων και μια αρχική χαρτογράφηση της ύπαρξης νερού στην περιοχή.
  - 1: Αρχική πίεση (incipient stress). Παρατηρούνται μεγαλύτερες αντλήσεις, με λίγα τοπικά προβλήματα μείωσης της στάθμης σε γειτονικές γεωτρήσεις. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να λυθούν με απλά διαχειριστικά μέτρα, όπως η σωστή χωρική κατανομή των γεωτρήσεων.
  - 2: Σημαντική πίεση (significant stress). Στο στάδιο αυτό υπάρχει ταχεία και σημαντική αύξηση των αντλήσεων και αρχίζουν να παρατηρούνται οι πρώτες επιπτώσεις στο φυσικό σύστημα. Για την διατήρηση του υδατικού πόρου πρέπει να οριστεί ένα διαχειριστικό πλαίσιο βασισμένο στην αξιολόγηση της ποσότητας του διαθέσιμου ύδατος και με ιδιαίτερη προσοχή στη σύνδεση του συστήματος με γειτονικά, έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφθούν πιθανές απώλειες ή ποσότητες εμπλουτισμού.
  - 3Α: Ασταθής ανάπτυξη (unstable development). Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από υπερβολικές αντλήσεις με μη αναστρέψιμες επιπτώσεις, που προκαλούν ελλείψεις σε νερό. Αυτές οι ελλείψεις οδηγούν σε συγκρούσεις μεταξύ των χρηστών και των φορέων διαχείρισης. Για να ανατραπεί αυτή η κατάσταση πρέπει να υπάρχει ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, ενώ κρίνεται απαραίτητος και ο τεχνητός εμπλουτισμός.
  - 3Β: Σταθερή ανάπτυξη (stable highly developed). Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν υψηλές αντλήσεις, αλλά υπάρχει και μια ισορροπία μεταξύ της ζήτησης και των αναγκών του υδροφορέα και του οικοσυστήματος. Ως εκ τούτου πρέπει να υπάρχει ολοκληρωμένη διαχείριση με σύνολο κανονισμών, ενώ απαραίτητη είναι και η επιστημονική παρακολούθηση. [Taylor et al., 2010]

---

### 1.3 Διαχείριση υδάτων και αξιοποίηση

Η διαχείριση των υδάτων ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία η ποσότητα του φυσικού υπόγειου νερού που μπορεί να αντληθεί οικονομικά και νόμιμα σε αιεφόρο βάση από ένα υδροφορέα χωρίς να υποβαθμίζεται η φυσική ποιότητα του νερού ή να δημιουργούνται ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως η βλάβη στο περιβάλλον.

Η βέλτιστη ανάπτυξη των υπόγειων υδατικών πόρων έχει σαν βασική προϋπόθεση το σωστό σχεδιασμό, στο σύνολο της υδρογεωλογικής λεκάνης. Η σωστή διαχείριση πρέπει να βασίζεται σε επιλογή στόχων ώστε να αναπτυχθεί λειτουργικά ολόκληρη η λεκάνη. Αυτό όμως συνεπάγεται συλλογιστική όχι μόνο με γεωλογικές και υδρογεωλογικές θεωρήσεις, αλλά και νομικές, οικονομικές, πολιτικές και χρηματοδοτικές απόψεις [Καλλέργης, 2001].

Κατά τη διαδικασία της διαχείρισης ακολουθούνται κάποια βήματα, έτσι ώστε να ορισθεί η έννοια της ορθολογικής διαχείρισης στην συγκεκριμένη περιοχή. Πρώτα από όλα πρέπει να γίνει μια αρχική αξιολόγηση του υδροφορέα έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της διαχείρισης με την αρχική κατάσταση. Στη συνέχεια πρέπει να γίνει μια προγνωστική ανάλυση, στην οποία θα προβλέπεται η κατάσταση των υδάτων για κάποια σενάρια, και η ανάλυση των στόχων, όπου γνωστοποιείται η ανταπόκριση που θα πρέπει να έχει η διαχείριση και θέτονται στόχοι για κάθε σκοπό του διαχειριστικού σχεδίου. Με αυτό τον τρόπο συντάσσεται το κύριο μέρος των διαχειριστικών σχεδίων. Για να ελέγχεται η πρόοδος σε σχέση με τους στόχους πρέπει να οριστούν κάποιοι δείκτες, ενώ πρέπει να υπάρχει και ένα σύστημα παρακολούθησης.

Για κάθε σκοπό του προγράμματος διαχείρισης υπάρχει και ένας στόχος που ελέγχεται από κάποιους δείκτες και ένα πρωτόκολλο παρακολούθησης, που περιλαμβάνει την μέθοδο με την οποία γίνεται η παρακολούθηση, τις θέσεις δειγματοληψίας, τη συχνότητα της και άλλα χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα που προκύπτουν από την παρακολούθηση του υδροφορέα πρέπει να αξιολογηθούν και να εξεταστεί η επίδοση του, μέσα σε χρονικά περιθώρια μικρότερα από την περίοδο για την οποία θα ισχύει το συγκεκριμένο διαχειριστικό πλάνο. Προτείνεται το πλαίσιο διαχείρισης να διαρκεί τουλάχιστον το διπλάσιο χρόνο από την περίοδο σχεδιασμού και αρχικής παρακολούθησης. Αυτή η αξιολόγηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναθεώρηση της βιώσιμης ποσότητας νερού άντλησης.

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας είναι:

- Η διατήρηση της κατάστασης των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα
- Η διατήρηση της υδρολογικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων και του εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων
- Η διατήρηση της ποσότητας υπογείου νερού που σχετίζεται με την ζήτηση νερού άρδευσης
- Η συμβατότητα με την ευρύτερη διαχείριση του περιβάλλοντος και των πόρων που σχετίζονται με την ανάπτυξη (π.χ. αυξημένες ποσότητες άρδευσης) [Resource & Environmental Management Pty Ltd.,2004]

---

Η εκμετάλλευση των υδατικών πόρων στηρίζεται σε εις βάθος γνώση των ποιοτικών και ποσοτικών χωροχρονικών μεταβολών τους. Τέσσερις βασικοί παράγοντες επηρεάζουν τη διαμόρφωση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας νερού σε ένα υδραυλικό σύστημα.

1. Η μέση ετήσια επιφανειακή και υπόγεια απορροή, καθώς και η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού
2. Η τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησης του υπόγειου νερού
3. Η ποιότητα του νερού, υπόγειου ή επιφανειακού, στην υδρολογική λεκάνη και κοντά σε αυτήν
4. Η νομοθεσία για το νερό, υπόγειο ή επιφανειακό, μέσα και κοντά στην υδρολογική λεκάνη

Ωστόσο η διαχείριση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα το οποίο εστιάζεται στους παρακάτω παράγοντες:

- η έλλειψη συνδυασμένης ανάπτυξης και χρήσης τόσο των επιφανειακών όσον και υπόγειων νερών
- η αδυναμία αξιόπιστης ποσοτικοποίησης από πλευράς των υδρογεωλόγων της έννοιας της αειφόρου απόδοσης ενός υδροφόρου συστήματος
- η μη αποτελεσματική εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού αλλά και κυκλικής αποθήκευσης/χρήσης της περίσσειας (πλημμυρικών) απορροών
- ο μη συνδυασμός της χρήσης φυσικού νερού με αναγεννημένα ή αφαλατωμένα ή ακόμη και υφάλμυρα νερά.

Κλειδί για την αειφόρο ανάπτυξη του υδατικού τομέα αποτελεί η δημιουργία κατάλληλης υποδομής (Capacity Building) που περιλαμβάνει:

- τη δημιουργία κατάλληλου θεσμικού περιβάλλοντος
- την ανάπτυξη κατάλληλης εργαστηριακής υποδομής με εξασφάλιση της αποδοχής των κοινωνικών φορέων και τη συμμετοχή των εξειδικευμένων ακαδημαϊκών μονάδων
- την ανάπτυξη εξειδικευμένων ανθρώπινων πόρων και ενίσχυση των συστημάτων επιχειρησιακής διαχείρισης
- την όσο το δυνατόν ακριβέστερη γνώση των παραμέτρων που έχουν άμεση σχέση με τη χωροχρονική κατανομή της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων νερών μέσα από την συνεχή συλλογή δεδομένων (monitoring) [Καλλέργης, 2001]

## 1.4 Φορείς διαχείρισης

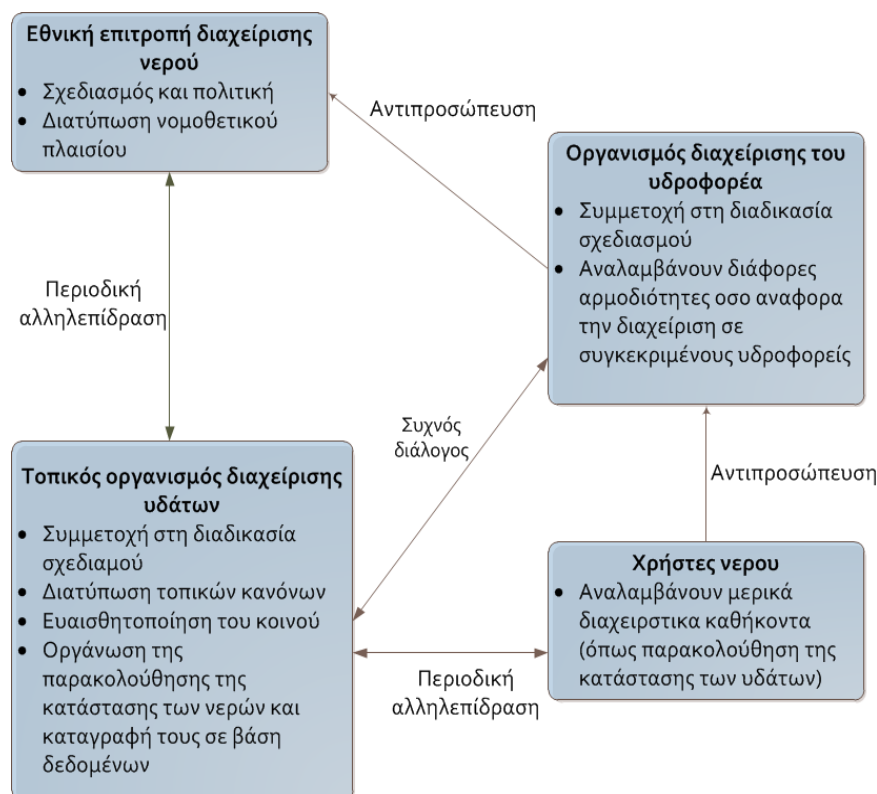
Η ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδάτων, που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι ενός έργου διαχείρισης. Ωστόσο σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση της ορθολογικής διαχείρισης, έχουν οι αντίστοιχοι φορείς. Στην προτεινόμενη δομή των φορέων διαχείρισης κύριο λόγο έχει η εθνική επιτροπή διαχείρισης νερού, η οποία σχεδιάζει την γενική πολιτική της διαχείρισης σε εθνικό επίπεδο και διατυπώνει το γενικό νομοθετικό πλαίσιο.

Ακολουθεί ο τοπικός – περιφερειακός οργανισμός διαχείρισης υδάτων, ο οποίος αλληλεπιδρά περιοδικά με την εθνική επιτροπή διαχείρισης υδάτων. Ο τοπικός οργανισμός διαχείρισης είναι υπεύθυνος για τη διατύπωση τοπικών κανόνων, για τον σχεδιασμό της πολιτικής σε τοπικό επίπεδο και για την οργάνωση της παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων και την σύνταξη βάσης δεδομένων. Μια άλλη βασική ευθύνη του τοπικού οργανισμού διαχείρισης είναι η ενημέρωση και η ευαισθητοποίηση του κοινού και των χρηστών, έτσι ώστε να είναι αποτελεσματική η διαχείριση.

Ο τοπικός οργανισμός διαχείρισης χωρίζεται σε πολλούς οργανισμούς διαχείρισης υδροφορέων, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για ένα υδροφορέα που ανήκει στη συγκεκριμένη περιφέρεια. Οι οργανισμοί αυτοί συμμετέχουν στη διαδικασία σχεδιασμού τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο και ανάλογα με την περίπτωση έχουν κύριες διαχειρίσιμες αρμοδιότητες.

Τέλος, φορέα διαχείρισης αποτελούν και οι ίδιοι οι χρήστες και ιδιοκτήτες γεωτρήσεων, καθώς μπορεί να αναλάβουν κάποια διαχειριστικά καθήκοντα όπως η παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων [Foster et al., 2003b]

Συνοπτικά οι φορείς διαχείρισης παρουσιάζονται στο σχήμα 1.5 που ακολουθεί:



Σχήμα 1.5. Φορείς διαχείρισης υπόγειων υδάτων [Foster et al., 2003b]

---

## 1.5 Νομοθεσία

Για την οργάνωση των φορέων διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που αναφέρθηκαν, η βάση αναφοράς είναι η λεκάνη απορροής ποταμού ή σύνολα περισσότερων ποταμών. Η διαχείριση γίνεται σε περιφερειακό επίπεδο, με βάση τις υδρολογικές λεκάνες και με συντονισμό σε εθνικό επίπεδο, υπακούοντας στη νομοθεσία που διέπει τον ορθολογικό τρόπο παρέμβασης. Συγκεκριμένα η Ελληνική νομοθεσία διέπει τη διαχείριση υδατικών πόρων με τις διατάξεις που ακολουθούν:

- Ν. 3199/03 (ΦΕΚ 280/9-12-2003), «Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000».
- αρ. 47630/16-11-2005 Κ.Υ.Α. των υπουργών Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Οικονομίας & Οικονομικών, Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων έργων (ΦΕΚ 1688/Β'/1-12-2005), «Διάρθρωση της Διεύθυνσης Υδάτων της Περιφέρειας».
- αρ. 49139 Κ.Υ.Α. του υπουργού Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και των υφυπουργών Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Οικονομίας & Οικονομικών (ΦΕΚ 1695/Β'/2-12-2005), «Οργάνωση της Κεντρικής Υπηρεσίας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων».
- αρ. 34685/6-12-2005 απόφαση του υπουργού Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΦΕΚ 1736/9-12-2005), «Συγκρότηση Εθνικού Συμβουλίου Υδάτων».
- αρ. 43504/5-12-2005 Κ.Υ.Α. των υπουργών Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Οικονομίας & Οικονομικών, Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων έργων, Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, Τουριστικής Ανάπτυξης (ΦΕΚ 1784/Β/20-12-2005 με ημερομηνία δημοσίευσης 10-01-2006) αφορά «Κατηγορίες αδειών χρήσης υδάτων και εκτέλεσης έργων αξιοποίησής τους, διαδικασία έκδοσης, περιεχόμενο και διάρκεια ισχύος αυτών».
- Π.Δ. αρ. 51/07 (ΦΕΚ 54/8-3-2007), «Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 200/60/ΕΚ “για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων” του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000».
- αρ. 39626/2208/Ε130 Κ.Υ.Α. των υπουργών Εσωτερικών, Οικονομίας & Οικονομικών, Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων έργων, Υγείας και Κοινωνικής Αλληλεγγύης, (ΦΕΚ 2075/Β'/25-09-2009), «Καθορισμός μέτρων για την προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση και την υποβάθμιση, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2006/118/ΕΚ “σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση”, του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 2006». [Περιφέρεια Κρήτης Διεύθυνση Υδάτων, 2009]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

### 2.1 Θεωρία υφαλμύρισης

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένες με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της υφαλμύρισης. Η υφαλμύριση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο το υφάλμυρο νερό διεισδύει σε παράκτιο υδροφόρο, δημιουργώντας προβλήματα στην ποιότητα του υπόγειου νερού που χρησιμοποιείται για κάθε είδους ανάγκη. Η διείσδυση αλμυρών υδάτων παρατηρείται σε πολλούς παράκτιους υδροφορείς, λόγω της συνεχούς επικοινωνίας με το θαλασσινό νερό και λόγω της διατάραξης της ισορροπίας του συστήματος γλυκού/αλμυρού νερού κάτω από συνθήκες άντλησης μεγάλων ποσοτήτων υπόγειου νερού για άρδευση. Πρακτικά λοιπόν, όταν το γλυκό νερό αποσύρεται με ταχύτερο ρυθμό από ό τι χρειάζεται για να ανανεωθεί, τότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνεται με αποτέλεσμα και τη μείωση της υδροστατικής πίεσης. Όταν αυτό συμβαίνει κοντά σε μια παράκτια περιοχή, το θαλασσινό νερό μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα προσπαθεί να πάρει τη θέση του φρέσκου-γλυκού νερού με αποτέλεσμα ο υδροφόρος ορίζοντας να ρυπανθεί με το αλμυρό νερό. Ανάλογα λοιπόν με τον υδροφόρο που έχουμε, ελεύθερο ή περιορισμένο, το φαινόμενο της υφαλμύρισης παίρνει και διαφορετική μορφή. [Bear, et al., 1999]

Η πρώτη προσπάθεια μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρισης έγινε από τον W. Badon-Ghyben (1888, 1889) και A. Herzberg (1901) και γι' αυτό και η σχέση που το περιγράφει ονομάζεται Ghyben-Herzberg:

$$h = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z = \frac{1000}{1024 - 1000} z \Rightarrow h \cong 40z$$

Το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας συμβολίζεται με  $h$ , και πάνω από την επιφάνεια της θάλασσα με  $z$ , ενώ γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή.

Ωστόσο, η αναγνώριση της υφαλμύρισης αν και δύσκολη μπορεί να γίνει με:

- το συντελεστή Revelle, όπου  $R = \frac{Cl}{(CO^3+HCO^3)} \frac{meq}{l}$
- τη χρήση σταθερών ισοτόπων υδρογόνου και οξυγόνου, τρίτιου και άνθρακα
- τις σχέσεις  $^{13}C/^{12}C$  και  $^{34}S/^{32}S$

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η μελέτη και μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρισης αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τρεις τρόποι προσέγγισης των προβλημάτων υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων:

- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp-Interface Conceptualization)
  - Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Two-fluid flow)
  - Θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας (Variable-Density Conceptualization)
- [Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πρώτη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας και η μελέτη του προβλήματος έγινε με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου MODFLOW.

Μια πιο λεπτομερή μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης και τριών θεωρήσεων παρουσιάζεται στην προπτυχιακή διατριβή μου με τίτλο 'ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ – FEFLOW [Δετοράκη, 2010].

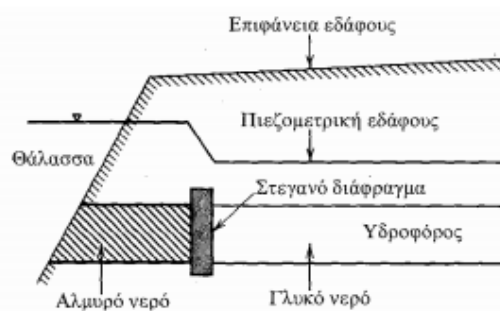
## 2.2 Τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρισης

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία, της οποίας η αναχαίτιση είναι μια αρκετά χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία. Οι τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρισης ποικίλλουν ανάλογα με την έκταση της μόλυνσης, τη γεωλογία της περιοχής, τη χρήση του νερού και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

**Τροποποίηση του γενικού σχεδίου άντλησης.** Μετακινώντας τις θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης που ήδη υπάρχουν σε μια επιβαρημένη περιοχή, απομακρύνοντας τες από την ακτή, αλλά και μειώνοντας την παροχή άντλησης αυτών.

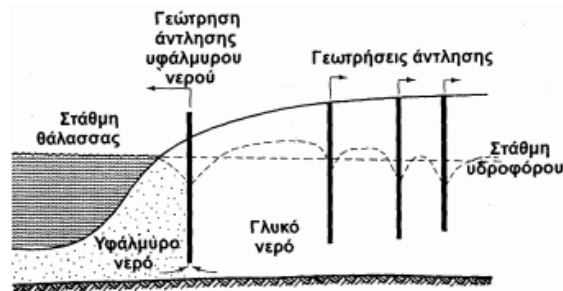
**Τεχνητός εμπλουτισμός.** Μπορεί να προκληθεί ανύψωση της στάθμης του νερού στις υφιστάμενες γεωτρήσεις και να διατηρηθεί έτσι, με την επιφανειακή κατάκλυση (τάφος εμπλουτισμού κατά μήκος της ακτής) ή λεκάνες εμπλουτισμού στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων, και τη χρήση υδρογεωτρήσεων εμπλουτισμού σε περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων. Θα πρέπει, πάντως, να εξευρεθεί συμπληρωματική πηγή νερού προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τον εμπλουτισμό.

**Δημιουργία υπόγειου φράγματος.** Η κατασκευή ενός στεγανού διαφράγματος, παράλληλα προς την ακτή και σε όλο το πάχος του υδροφορέα, εμποδίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Τα κύρια προβλήματα είναι το υψηλό κόστος της κατασκευής και η ευπάθεια του διαφράγματος στους σεισμούς και τη χημική διάβρωση. Ακολουθεί στο σχήμα 2.1 η κατασκευή του στεγανού υπόγειου φράγματος παράλληλα με την ακτή:



Σχήμα 2.1. Κατασκευή στεγανού υπόγειου φράγματος παράλληλα με την ακτή  
[Todd, 1980; Καλλέργης, 2001]

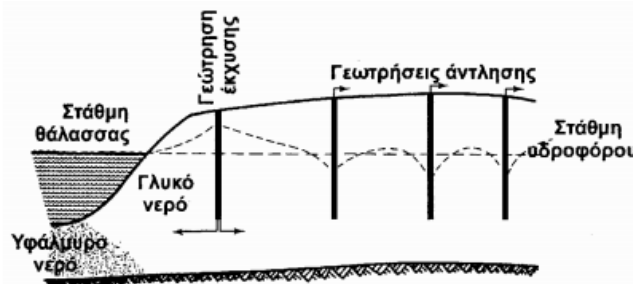
**Φράγμα από άντληση υφάλμυρου νερού κοντά στην ακτή.** Η συνεχής άντληση από μια σειρά γεωτρήσεων κοντά στη θάλασσα δημιουργεί ροή του θαλασσινού νερού προς τη συστοιχία των γεωτρήσεων ενώ το γλυκό νερό ρέει από το εσωτερικό της λεκάνης προς τη θάλασσα (προς τις αντλούμενες γεωτρήσεις). Το αντλούμενο νερό είναι υφάλμυρο και ρίχνεται στη θάλασσα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.2. Αντλησης υφάλμυρου νερού

[Todd, 1980; Καλλέργης, 2001]

**Φράγμα από τεχνητό εμπλουτισμό.** Η μέθοδος αυτή δημιουργεί ένα ύψωμα υψηλής πιεζομετρικής στάθμης, κατά μήκος μιας συστοιχίας γεωτρήσεων εμπλουτισμού, που βρίσκεται κοντά και παράλληλα στην ακτή. Το νερό που διαβιβάζεται στις γεωτρήσεις, ρέει προς τη θάλασσα και προς το εσωτερικό της λεκάνης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Το νερό του εμπλουτισμού πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας [Καλλέργης, 2001]



Σχήμα 2.3. Φραγμός μέσω τεχνητού εμπλουτισμού [Todd, 1980; Καλλέργης, 2001]

## 2.3 Εφαρμογές μοντέλων υφαλμύρισης στην Ελλάδα

Για τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης υπάρχουν τρεις θεωρήσεις για την προσέγγιση του προβλήματος, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις είναι η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας και της διαφοράς πυκνότητας. Η πρώτη και απλούστερη θεώρηση, βασίζεται στη σχέση (Ghyben – Herzgerg) και γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί στην Ελλάδα από πολλούς ερευνητές, όπως:

- Mantoglou et al. (2004) – Μια μέθοδος για την αξιολόγηση των βέλτιστων ποσοστών άντλησης των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων με βάση τη μη γραμμική βελτιστοποίηση και τους εξελικτικούς αλγόριθμους (EA) εφαρμόστηκε σε ένα πραγματικό ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα στο νησί της Καλύμνου. Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού άντλησης ενώ ταυτόχρονα η προστασία των παράκτιων πηγών από την υφαλμύριση. Η διατύπωση των περιορισμών βασίζεται στην αριθμητική προσομοίωση των εξισώσεων ροής του γλυκού νερού υπο σταθερές συνθήκες. Οι περιορισμοί είναι μη γραμμικοί ως προς τις μεταβλητές απόφαση που καταλήγουν σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

- Karterakis et al. (2007) – Σε αυτή τη μελέτη, το πρόβλημα της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων στον παράκτιο υδροφορέα της Χερσονήσου στην Κρήτη, μελετήθηκε με τη χρήση κλασικού γραμμικού προγραμματισμού. Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης του ελεύθερου παράκτιου υδροφορέα και στη συνέχεια, η κλασική γραμμική αλγόριθμος βελτιστοποίησης προγραμματισμού της μεθόδου Simplex χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, με κύριο στόχο τον έλεγχο των υδραυλικών υψών για την αποφυγή της διείσδυσης αλμυρού νερού. Η επίλυση του μη-γραμμικού προβλήματος διαχείρισης επιτυγχάνεται εναλλακτικά και με τη χρήση ενός διαφορικού εξελικτικού αλγόριθμου (Differential Evolution - DE). Μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης παρουσιάζεται. Τέλος, μια ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται για να εξετάσει την επίδραση των ενεργών πηγαδιών άντλησης στην εξέλιξη του μετώπου της υφαλμύρισης κατά μήκος της ακτογραμμής.
- Mantoglou and Papantoniou (2008) – Αναπτύχθηκε μια μέθοδος για τη βέλτιστη σχεδίαση δικτύων άντλησης σε παράκτιους υδροφορείς με βάση τους γενετικούς αλγορίθμους και την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη ροή του γλυκού νερού. Ο στόχος ήταν η βελτιστοποίηση των θέσεων των πηγαδιών υπό των περιορισμό για την προστασία του υδροφορέα από τη διείσδυση θαλασσινού νερού. Δύο μέθοδοι αναπτύχθηκαν. Η πρώτη βασίζεται στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των θέσεων των πηγαδιών και των ποσοστών άντλησης με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων (GA). Η δεύτερη μέθοδος αποτελείται από δύο στάδια, όπου το πρώτο στάδιο αφορά τη βελτιστοποίηση των θέσεων και το δεύτερο στάδιο αφορά τη βελτιστοποίηση των τιμών άντλησης. Η τελευταία μέθοδος χρησιμοποιεί τους γενετικούς αλγορίθμους για την αναζήτηση των θέσεων και σε κάθε παραγωγή του αλγορίθμου μια απλούστερη βελτιστοποίηση εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας μη γραμμικό προγραμματισμό. Οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης εφαρμόζονται αποτελεσματικά για τον καθορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού ενός δικτύου άντλησης και την εκτίμηση των τιμών άντλησης σε ένα παράκτιο υδροφορέα.
- Papadopoulou et al. (2010) – Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την προσέγγιση της πολύπλοκης συμπεριφοράς και αντίδρασης των φυσικών συστημάτων, επιτρέποντας σημαντική μείωση του χρόνου κατά τη διάρκεια του υπολογισμού βελτιστοποίησης. Σε αυτή τη μελέτη, ένα Νευρωνικό Δίκτυο Ακτινικής Βάσης Συνάρτησης (RBFN) συνδυάζεται με ένα διαφορικό εξελικτικό αλγόριθμο για να λύσει ένα πρόβλημα διαχείρισης υδάτινων πόρων, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Ο στόχος του προγράμματος είναι η βελτιστοποίηση έτσι ώστε να καλύψει την ημερήσια ζήτηση νερού στον παράκτιο υδροφορέα ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου, στην Κρήτη, χωρίς να μειωθεί η ποιότητα των υπόγειων υδάτων λόγω της υφαλμύρισης. Η RBFN χρησιμοποιείται ως ένα on-line υποκατάστατο μοντέλο για την προσέγγιση της συμπεριφοράς του υδροφορέα

αντικαθιστώντας κάποιες από τις δαπανηρές αξιολογήσεις ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης που λύνει τις διαφορικές εξισώσεις υπόγειας ροής. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη χρήση της μεθόδου Simplex και τη χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου χωρίς το υποκατάστατο μοντέλο. Αποδεικνύεται πως η χρήση του υποκατάστατου μοντέλου επιταχύνει τη σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης του εξελικτικού αλγορίθμου και παρέχει μια καλύτερη λύση για τον ίδιο ακριβή αριθμό αξιολογήσεων, σε σύγκριση με τον αρχικό εξελικτικό αλγόριθμο.

- Παππά (2010) - Στην εργασία αυτή γίνεται αρχικά η προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή της Χερσονήσου, στο Ηράκλειο Κρήτης και στη συνέχεια ακολουθεί η βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης. Γίνεται η χρήση του μοντέλου MODFLOW προκειμένου να εντοπιστεί η θέση του μετώπου της υφαλμύρισης, με τη βοήθεια της ισοϋψούς των 102.5m. Στη συνέχεια με τη χρήση του μοντέλου GWM, γίνεται η βελτιστοποίηση των αντλήσεων μέσω διαφόρων σεναρίων προκειμένου η υφαλμύριση να περιοριστεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν τόσο από το μοντέλο προσομοίωσης της ροής, όσο και από το μοντέλο βελτιστοποίησης, με παλαιότερες μελέτες που εξέτασαν το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην ίδια περιοχή.

Η δεύτερη προσέγγιση της θεώρησης διαφοράς πυκνότητας, θεωρεί ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υλικά, το νερό και ένα είδος ρυπαντή (αλάτι), που επηρεάζουν την πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού. Η εφαρμογή των μοντέλων που χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση (ειδικότερα των τρισδιάστατων) αυξήθηκε πρόσφατα. Αιτία αυτής της αύξησης είναι τα πλεονεκτήματα στην υπολογιστική ταχύτητα, επιτρέποντας τόσο τη χρήση λεπτομερέστερων δικτύων στον κάνναβο επίλυσης, όσο και επίλυση περιπλοκότερων γεωμετρικά μοντέλων. Τέτοιες εφαρμογές έχουν γίνει σε παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Στον ελληνικό χώρο έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές, όπως:

- Kopsiaftis et al. (2009) - Ένα αριθμητικό μοντέλο εφαρμόστηκε σε ένα ελεύθερο υδροφορέα που βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της νήσου Θήρας (Σαντορίνη). Δύο πιθανές περιπτώσεις αναπλήρωσης του υδροφορέα, με φυσικό και τεχνητό εμπλουτισμό προσομοιώνονται. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική εξάρτηση της υφαλμύρισης από τις αρχικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν κατά μήκος της ακτογραμμής. Η μεταβατική ζώνη παρουσιάζει σημαντικό πάχος, γεγονός που δείχνει την ανάγκη για μοντελοποίηση με τη χρήση προηγμένων τρισδιάστατων μοντέλων μεταβλητής πυκνότητας.

- Kourakos and Mantoglou (2009) - Η μελέτη αυτή αναπτύσσει μια μέθοδο βελτιστοποίησης που βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και την εκπαίδευσή τους για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν την άντληση πηγαδιών. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το γεγονός ότι η κατανομή αλατότητας στον υδροφορέα, εξαρτάται περισσότερο από την άντληση ενός κοντινού πηγαδιού παρά ενός πιο απομακρυσμένου. Κάθε υποδίκτυο προβλέπει την αλατότητα σε ένα μόνο πηγάδι παρακολούθησης, και ελέγχεται από σχετικά λίγα φρεάτια άντλησης που εμπίπτουν σε ορισμένη απόσταση ελέγχου από το υπο παρακολούθησης πηγάδι. Τα τεχνητά νευρωνικά υποδίκτυα εκπαιδεύονται με μεγάλη προσαρμοστικότητα κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, και είναι δυνατόν να επανεκπαιδευτούν μόνο όσα πηγάδια δεν αποδίδουν καλά. Όσο εξελίσσεται η βελτιστοποίηση, τα υποδίκτυα προσαρμόζονται ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση κοντά στον πρόσφατο χώρο αναζήτησης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων σε συνδυασμό με ένα αποτελεσματικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης εφαρμόζονται σε ένα πραγματικό παράκτιο υδροφορέα στο ελληνικό νησί της Σαντορίνης. Η μέθοδος του SEAWAT επιλέχθηκε για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων της ροής και της εξίσωσης μεταφοράς. Οι μεταβλητές απόφασης αντιστοιχούν σε 34 πηγάδια άντλησης. Η επίλυση μέσω των νευρωνικών δικτύων οδήγησε σε σημαντική μείωση του χρόνου της CPU και προσδιόρισε μια ακόμα καλύτερη λύση από ότι το αρχικό αριθμητικό μοντέλο.
- Δεττοράκη (2010) – Στη μελέτη αυτή έγινε εφαρμογή του μοντέλου FEFLOW, σε ένα πραγματικό ελεύθερο υδροφορέα στην περιοχή της Χερσονήσου, στην Κρήτη. Για να μελετηθεί το μέγεθος, η έκταση και ο ρυθμός εξάπλωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης στην περιοχή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FEFLOW, το οποίο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας για την προσομοίωση της υπόγειας ροής με χρήσεις GIS. Έγινε παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης η οποία κρίνεται δυσμενής και είναι απαραίτητο να παρθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν 4 σενάρια: ο διπλασιασμός, υποδιπλασιασμός και μηδενισμός των παροχών στα πηγάδια άντλησης όλης της περιοχής που μελετήθηκε καθώς επίσης και η πρόβλεψη της κατάστασης σε 40 χρόνια με βάση τα δεδομένα άντλησης του παρόντος. Συμπερασματικά, από τη μελέτη των παραπάνω σεναρίων προκύπτει ότι η ανθρώπινη παρέμβαση στο φαινόμενο της υφαλμύρισης δεν είναι πολύ έντονη λόγω του γεγονότος ότι τα πηγάδια για τα οποία υπάρχουν δεδομένα άντλησης στην ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου απέχουν αρκετή απόσταση από την ακτογραμμή. Για το λόγο αυτό, το μέτωπο της υφαλμύρισης δεν παρουσιάζει τεράστια αλλαγή ανάλογα με

την εποχή, όπου το χειμώνα οι αντλήσεις των γεωτρήσεων σταματούν ενώ το καλοκαίρι είναι όλες ανοικτές.

- Dokou and Karatzas (2012) - Ένα τρισδιάστατο, εξαρτώμενο από την πυκνότητα μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπόγειων υδάτων αναπτύχθηκε, προκειμένου να προσδιοριστεί η έκταση της διείσδυσης του αλμυρού νερού σε ένα καρστικό παράκτιο υδροφορέα στην περιοχή της ΒΙ.ΠΕ Ηρακλείου Κρήτης. Έγινε σύγκριση της μεθόδου με την πιο απλοποιημένη προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας. Το καρστικό σύστημα μοντελοποιήθηκε με συνδυασμό των μεθόδου ισοδύναμου πορώδους (για τα ρήγματα μικρής τάξης) και διακριτών ρηγμάτων (για τα κυριότερα ρήγματα). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του καρστικού συστήματος, όπως το βάθος και τον προσανατολισμό του δικτύου ρηγμάτων, και τα φαινόμενα διάχυσης που σχετίζονται με τις μεταβλητές πυκνότητες του γλυκού και θαλασσινού νερού - παράμετροι που δημιουργούν ένα πολύπλοκο σύστημα, δημιουργώντας αβεβαιότητα στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν ότι η κατεύθυνση των ρηγμάτων, η αντλητική δραστηριότητα και η επίδραση της πυκνότητας, οδηγούν το μέτωπο της υφαλμύρισης ασυμμετρικά στην ενδοχώρα.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η εργασία αυτή έχει σαν αντικείμενο μελέτης την περιοχή του Τυμπακίου στο Ηράκλειο Κρήτης και το έντονο πρόβλημα της υφαλμύρισης που αντιμετωπίζει. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση του προβλήματος.

#### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής

Ο δήμος Τυμπακίου βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του νομού Ηρακλείου και έχει σαν έδρα του την ομώνυμη κωμόπολη Τυμπάκι. Πρόκειται για πεδινό και παραθαλάσσιο δήμο, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου βρίσκεται στον κάμπο της Μεσσαράς, ενώ βρέχεται από το Λιβυκό πέλαγος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001 ο δήμος είχε συνολικά 10.001 κατοίκους και έκταση 157.122 στρέμματα. Ο δήμος περιλαμβάνει 11 δημοτικά διαμερίσματα, ενώ με την εφαρμογή του προγράμματος Καλλικράτης εντάχθηκε στο νέο δήμο Φαιστού.

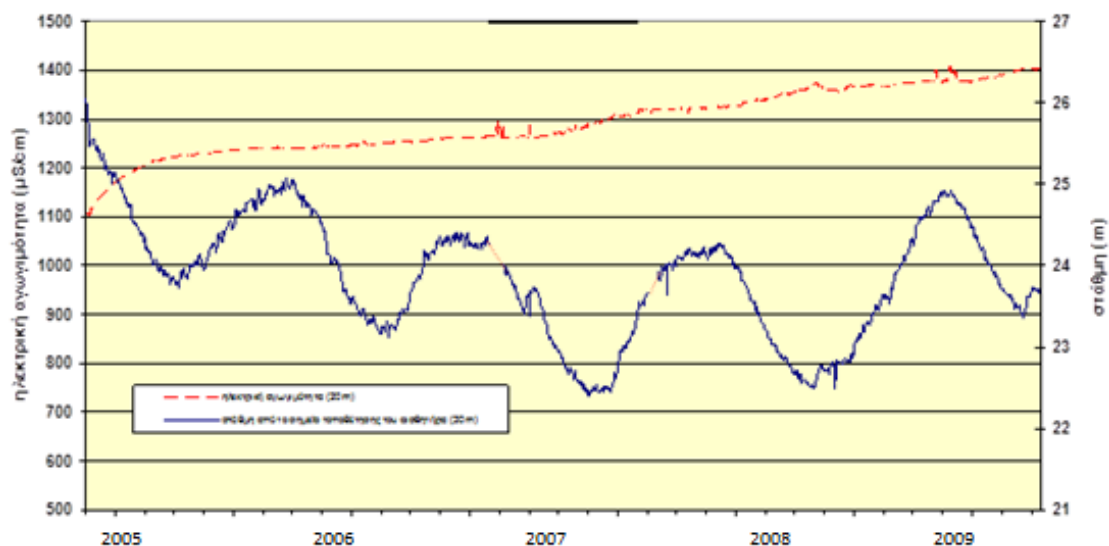
[<http://www.hellenica.de/DimosTympakiou.html>]



Σχήμα 3.1. Ο δήμος Τυμπακίου [<http://www.hellenica.de/DimosTympakiou.html>]

Η πεδιάδα του Τυμπακίου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης με την καλλιέργεια πρώιμων κηπευτικών σε θερμοκήπια καθώς και ελαιοδέντρων. Η αρδευόμενη έκταση είναι 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα προέρχεται από το υπόγειο δυναμικό. Ο αλουβιακός - πλειστοκαινικός υδροφορέας καταλαμβάνει το παράκτιο - κεντρικό τμήμα της λεκάνης, έχει έκταση περίπου 50 Km<sup>2</sup> και δέχεται μέσο ύψος βροχής 474 mm. Λόγω της γειτνιάσής του με τη θάλασσα ο υδροφορέας στο ΝΔ παράκτιο τμήμα του (περιοχή Κόκκινου Πύργου) έχει υποστεί υφαλμύριση. Λόγω της σπουδαιότητας του υδροφορέα έχουν εγκατασταθεί τρεις σταθμοί, δύο κοντά στην ακτή (Αεροδρόμιο και Κόκκινος Πύργος) και ένας στο κέντρο περίπου της λεκάνης (Γεώτρηση Α3).

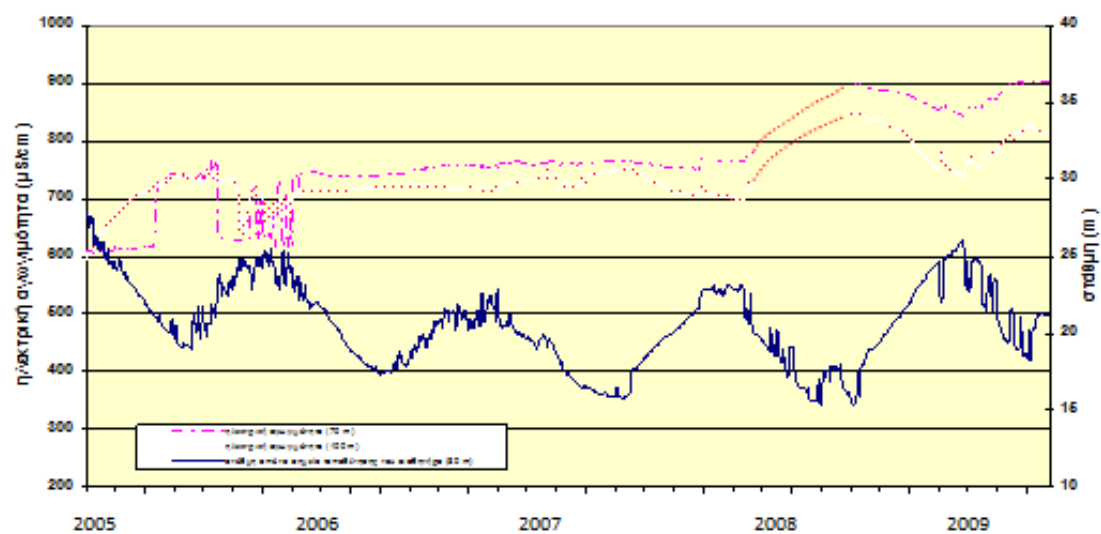
Ακολουθούν τα διαγράμματα διακύμανσης της στάθμης στο Σχήμα 3.2, 3.3 και 3.4, στα οποία φαίνεται η κατανάλωση νερού σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα για την παρουσία υφαλμύρισης. Τα υδρολογικά έτη που απεικονίζονται (2005-2009) ξεκινούν από τον Απρίλιο (τοπικό μέγιστο) και ολοκληρώνονται με τον Οκτώβριο (τοπικό ελάχιστο). [Περιφέρεια Κρήτης, 2009]



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου-αεροδρόμιο (Γεροπόταμος) [Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

Υπόμνημα:

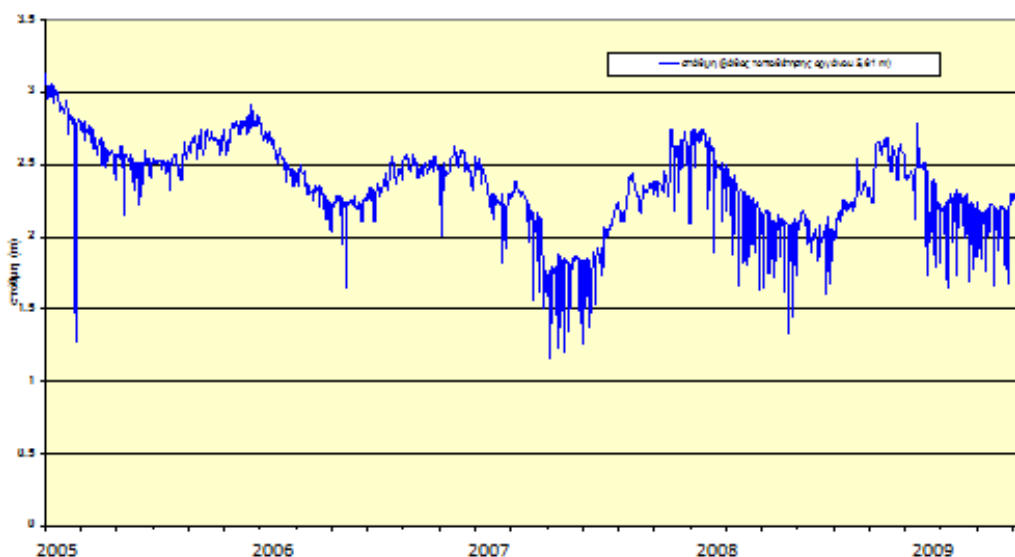
- ..... στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του οργάνου (30m)
- ..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (20m)
- ..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (100m)



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλ. αγωγιμότητας του σταθμού Α3-Τυμπακίου [Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

Υπόμνημα:

- ..... στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του οργάνου (80m)
- ..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (100m)
- ..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (70m)



Σχήμα 3.4.. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης του σταθμού Κόκκινος Πύργος (πηγάδι)  
[Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

Υπόμνημα:

..... στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του οργάνου (5.6m)

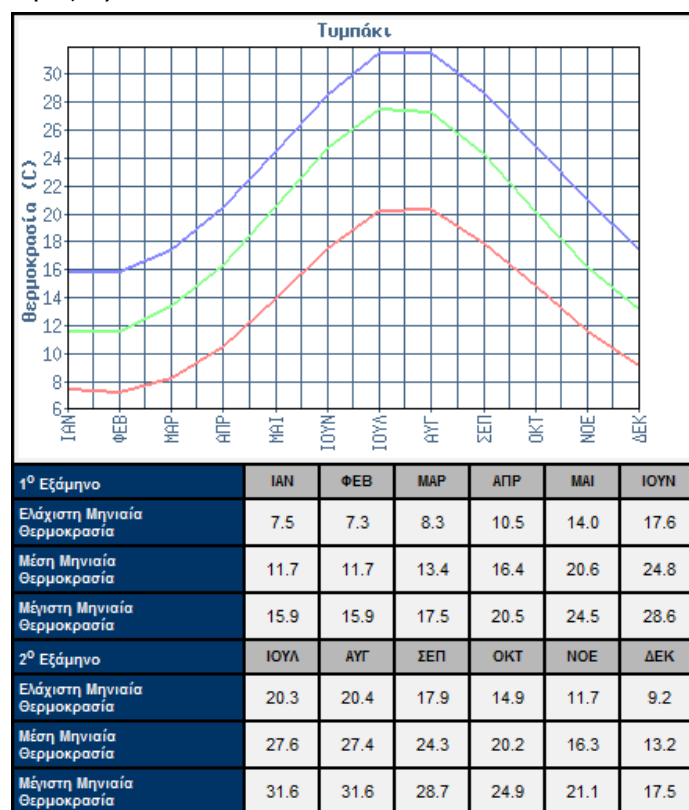
Η έντονη διακύμανση της στάθμης στο σταθμό του Κόκκινου Πύργου οφείλεται στις αντλήσεις του υφιστάμενου πηγαδιού που υπάρχει. [Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

### 3.2 Μετεωρολογικά στοιχεία

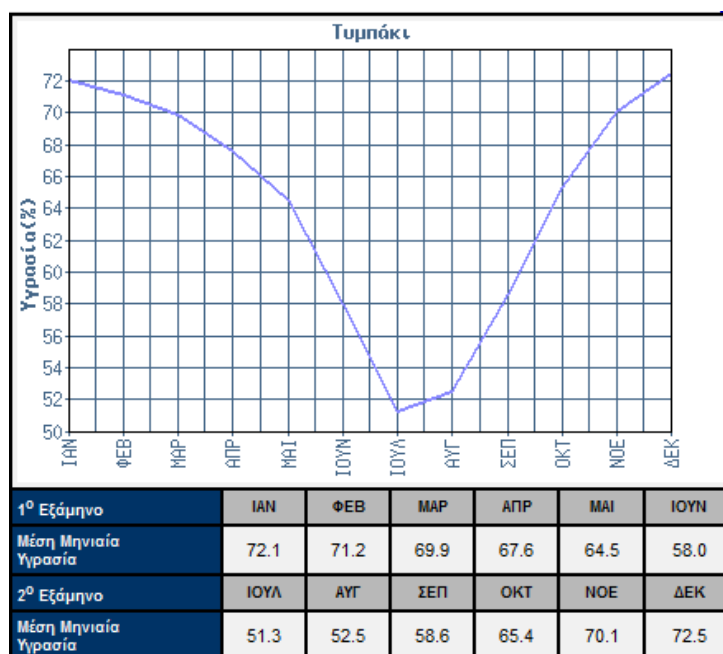
Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό, στους ορεινούς όγκους της όμως τείνει προς τον ηπειρωτικό τύπο με μέση ετήσια θερμοκρασία 14-15°C. Η πεδινή Κρήτη και ιδιαίτερα οι νοτιοανατολικές περιοχές είναι από τις θερμότερες της Ελλάδας. Ο χειμώνας είναι ήπιος με τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η ηλιοφάνεια διαρκεί όλους τους μήνες του έτους ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, αν και λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων το καλοκαίρι είναι σχετικά δροσερό. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ενώ οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από την παράκτια ζώνη στην ορεινή.

Το κλίμα της περιοχής του Τυμπακίου είναι τυπικά μεσογειακό με μέση ετήσια θερμοκρασία 18.5°C, η οποία όμως παρουσιάζει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή. Έτσι κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου σημειώνονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες, που φτάνουν τους -0,2°C, ενώ κατά τη διάρκεια του Ιουλίου έχουμε τις υψηλότερες τιμές που αγγίζουν τους 44°C. Οι βροχοπτώσεις μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους, με βροχερή περίοδο, την περίοδο Οκτωβρίου – Μαρτίου και με ετήσιο ύψος βροχής 474 mm.[www.emy.gr]

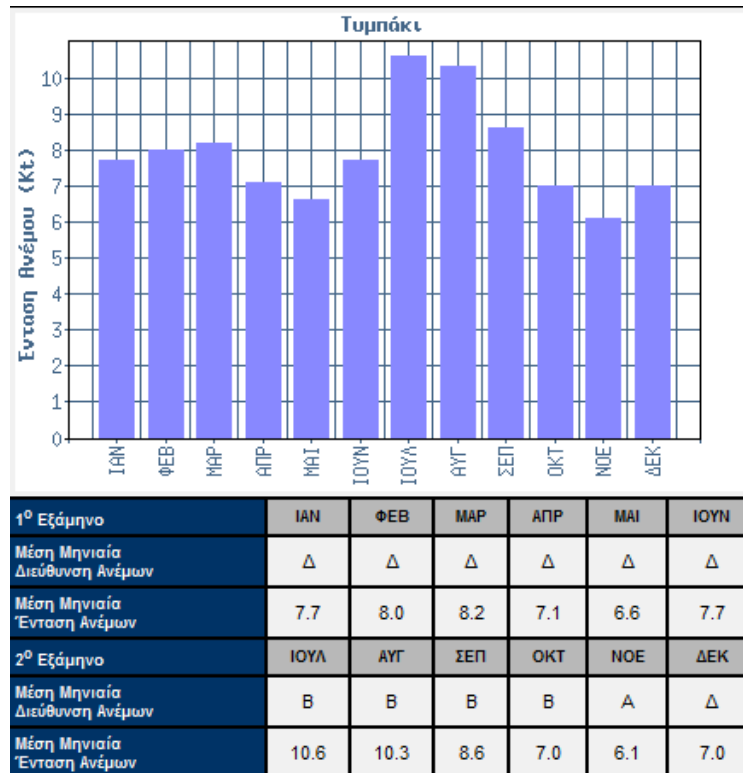
Στα σχήματα 3.5 και 3.6 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης κατά την περίοδο 1959-1997. Τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου είναι: Γ. Μήκος (Lon) 24°46'0" / Γ.Πλάτος (Lat) 35°4'0" / Ύψος 6μ.



Σχήμα 3.5.. Μηνιαία θερμοκρασία Δ. Τυμπακίου  
[Περιφέρεια Κρήτης, 2009]



Σχήμα 3.6. Μέση μηνιαία υγρασία Δ. Τυμπακίου  
[Περιφέρεια Κρήτης, 2009]



Σχήμα 3.7. Ανεμολογικά στοιχεία Δ. Τυμπακίου  
[Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

### 3.3 Γεωλογία της περιοχής

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από μια αλληλουχία φάσεων διαφορετικής ηλικίας και σχηματισμών που συμμετέχουν στη δομή της περιοχής αλλά και σε ολόκληρη τη γεωλογική δομή της νήσου της Κρήτης. Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελείται από ένα αυτόχθονο και ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων (σχηματισμοί του αλπικού υποβάθρου). Η στρωματογραφική στήλη ολοκληρώνεται με την παρουσία νεογενών, Πλειοπλειστοκαινικών και τεταρτογενών ιζημάτων [ΙΓΜΕ, 1987; Μουντράκης, 1985; Περλέρος, 2004].

Το αυτόχθονο σύστημα περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη σειρά πλακωδών ασβεστολίθων (Plattenkalk) της ενότητας Κρήτης - Μάνης ηλικίας Μέσου Ιουρασικού - Ηωκαίνου. Πρόκειται για ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους και μάρμαρα τεφρού χρώματος με ενστρώσεις πυριτολίθων που έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλής πίεσης - χαμηλής θερμοκρασίας. Πάνω στο αυτόχθονο υπέρκειται επωθημένο ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων που αποτελείται από αλληπαλά τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο :

- Τεκτονικό κάλυμμα φυλλιτών - χαλαζιτών. Αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, σερικιτικούς - μαρμαρυγιακούς - ανθρακικούς σχιστολίθους και χαλαζιακούς μεταψαμμίτες. Η σειρά είναι ηλικίας Περμίου - Ανωτέρου Τριαδικού και έχει υποστεί πολύ χαμηλού έως χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση σε συνθήκες υψηλής πίεσης - χαμηλής θερμοκρασίας.

• Ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως. Οι σχηματισμοί που περιλαμβάνει από τους υποκείμενους προς τους υπερκείμενους είναι οι εξής :

- Τεφρόμαυροι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι ημικρυσταλλικοί δολομίτες και μεσοστρωματώδεις τεφρόλευκοι έως τεφρόμαυροι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Ανωτέρου Ιουρασικού.

- Ασβεστόλιθοι μαύροι με ρουδιστές ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.

- Ασβεστόλιθοι τεφρόμαυροι με πλούσια νηριτική πανίδα Παλαιοκαινικής – ΜεσοΗωκαινικής ηλικίας.

- Φλύσχης ψαμμιτοπηλιτικός , ψαμμιτολυολιθικός, με εναλλαγές καστανών αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών ηλικίας Ανωτέρου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου.

• Ζώνη Πίνδου. Οι σχηματισμοί που περιλαμβάνει από τους υποκείμενους προς τους υπερκείμενους είναι οι εξής :

- Κλαστική σειρά με εναλλαγές μαργών – ψαμμιτών και ασβεστιτικές ενστρώσεις ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού.

- Ασβεστόλιθοι ροδόχροοι με ιάσπιδες, ραδιολαρίτες, ψαμμίτες και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι (πρώτος φλύσχης) ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Κατωτέρου Ιουρασικού.

- Πλακώδεις ασβεστόλιθοι λεπτοστρωματώδεις και λατυποπαγείς ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού – Κατωτέρου Ηωκαίνου.

- Φλύσχης ψαμμιτοπηλιτικός, ψαμμιτολυολιθικός, με ενστρώσεις ασβεστολιθικών τουρβιδιτών και ολισθόλιθους πάσης φύσεως Μεσο-ΑνωΗωκαινικής ηλικίας.

• Κάλυμμα Εσωτερικών Ελληνίδων. Αποτελεί ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με ποικιλία λιθολογικών φάσεων. Τα διάφορα καλύμματα τα οποία είναι επωθημένα το ένα επάνω στο άλλο από το υπερκείμενο προς το υποκείμενο είναι τα εξής :

- Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσες ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.

- Καλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοιτικούς γνευσίους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.

- Κάλυμμα Βάτου με εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και πάγκους από ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και ψαμμίτες ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού.

- Κάλυμμα Άρβης με βασάλτες σε «pillow λάβες» ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.

Όπως προαναφέρθηκε η στρωματογραφική σειρά ολοκληρώνεται με την παρουσία νεογενών, πλειοπλειστοκαινικών και τεταρτογενών ιζημάτων. Τα νεογενή και πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης (48%). Πρόκειται για σχηματισμούς διαφόρων φάσεων οι οποίοι είναι κατά σειρά από τον ανώτερο προς τον κατώτερο οι εξής :

- Ποτάμια και λιμναία ερυθρά κροκαλοπαγή, ερυθρές και κίτρινες άμμοι, ιλυόλιθοι και ερυθρές, κίτρινες και τεφρές άργιλοι και λιμναίοι μαργαϊκοί ασβεστολίθοι Πλειοπλειστοκαινικής ηλικίας (σχηματισμός Αγίας Γαλήνης).
  - Θαλάσσιες αποθέσεις κυρίως λευκών μαργών συχνά ψαμμιτικών, με μικρές εμφανίσεις καστανωπών φυλλωδών μαργών, λευκών μαργαϊκών ασβεστολίθων, καστανών άμμων, κροκαλοπαγών και κλαστικών ασβεστολίθων ηλικίας Κάτω Πλειοκαίνου (σχηματισμός Φοινικιάς).
  - Εναλλαγές ομογενών μαργών, φυλλωδών μαργών και υφαλογενών, κλαστικών, λατυποπαγών ασβεστολίθων στις οποίες παρεμβάλλονται στρώματα γύψου ηλικίας Μεσσηνίου (σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας).
  - Ανώμαλες και ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμους, ιλυολίθους, τεφροκύανες μάργες, ιλυώδεις άργιλους, λιγνίτες και λιμναίους κλαστικούς υφαλογενείς ασβεστολίθους ηλικίας Τορτονίου (σχηματισμός Αμπελούζου).
  - Λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή καλά συγκολλημένα που αποτελούνται από ασβεστολιθικές κροκάλες και λατύπες προνεογενούς προέλευσης ηλικίας Μέσου – Ανώτερου Μειοκαίνου (σχηματισμός Ηλία).
  - Καλά στρωμένες σκούρες τεφρές ή πρασινοκύανες θαλάσσιες άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι με παρεμβολές καστανών ψαμμιτών ηλικίας Ανώτερου Σερραβάλλιου (σχηματισμός Σχοινιά).
  - Καλά στρωμένες, ποταμολιμναίες σκούρες τεφρές ή πρασινωπές άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι με κατά θέσεις λιγνίτη ή και ενστρώσεις ασβεστολίθων και καλά διαβαθμισμένοι καστανοί ψαμμίτες ηλικίας Μέσου Μειοκαίνου (σχηματισμός Βιάννου).
- Τέλος, η στρωματογραφική σειρά ολοκληρώνεται με τα τεταρτογενή ιζήματα που είναι τοποθετημένα πάνω σε όλους τους σχηματισμούς τόσο του αλπικού υποβάθρου όσο και των νεογενών αποθέσεων και αποτελείται από ερυθρά κροκαλοπαγή, άμμους και άργιλους ποταμολιμναίας προέλευσης, αλλουβιακές ποτάμιες αποθέσεις ασύνδετων κροκαλοπαγών, χαλίκων και άμμων, θαλάσσιες και ποτάμιες αναβαθμίδες, λατυποπαγή κλιτύων, κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα. Τα τεταρτογενή ιζήματα καταλαμβάνουν κι αυτά σημαντική έκταση στην περιοχή μελέτης (19%) [Περλέρος, 2004].

### 3.4 Υδρολιθολογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομήθηκαν με βάση την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά και διαχωρίστηκαν στις εξής κατηγορίες.

#### Καρστικοί σχηματισμοί

- Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας

Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

- Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας

Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι Ιουρασικής – Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των καλυμμάτων των εσωτερικών ζωνών. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

- Μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας

Περιλαμβάνονται τα μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή όπως του σχηματισμού Ηλία. Παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες και φιλοξενούν σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

#### Κοκκώδεις σχηματισμοί

- Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας  
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες.

- Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικτής υδροπερατότητας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (συνήθως κλαστικοί και υφαλογενείς) των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς (εναλλαγές κυρίως μαργών, ιλυωδών αργίλων και ψαμμιτών). Τοπικά στο αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές

κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν έντονη υδροφορία εντόνως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειϊκών ιόντων.

### **Αδιαπέρατοι ρωγμώδεις σχηματισμοί**

- Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και τα ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα των διαφόρων ζωνών. Τέτοιοι σχηματισμοί είναι ο φλύσχος των ζωνών Πίνδου και Τρίπολης, το σύστημα φυλλιτών – χαλαζιτών, η Περμοτριάδικη κλαστική σειρά της ζώνης της Τρίπολης και οι εναλλαγές ιλυολίθων – ψαμμιτών του καλύμματος του Βάτου. Κατά θέσεις εντός των στρωμάτων του φλύσχη είτε στις επιφάνειες σχιστότητας είτε στις ενστρώσεις ή πάγκους ψαμμιτών αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού.

- Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας

Στην κατηγορία αυτή συμμετέχουν τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων (μαρμαρυγιακοί γνεύσιοι – σχιστόλιθοι και οφειόλιθοι). Κατά θέσεις στους σχηματισμούς αυτούς, τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της πετρολογικής σύνθεσής τους (π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών, μαρμάρων) αναπτύσσονται επιμέρους, τοπικού χαρακτήρα, υδροφορίες.

### **Γύψοι**

Στο σχηματισμό των γύψων αναπτύσσεται υψηλού δυναμικού υπόγεια υδροφορία εξαιτίας της διάλυσης τους (‘ψευδοκάρστ’) έντονα όμως υποβαθμισμένη λόγω της υψηλής περιεκτικότητας τους σε θειϊκά ιόντα. Στο σύνολο της περιοχής μελέτης οι καρστικοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 15% της συνολικής έκτασης της λεκάνης, οι κοκκώδεις υδροπερατοί σχηματισμοί το 66,6% και οι αδιαπέρατοι ρωγμώδεις σχηματισμοί το 17,8%. Μικρό τέλος ποσοστό καταλαμβάνουν οι γύψοι (0,6%) [Κρίνης, 2009].

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

### 4.1 Τα μοντέλα υπόγειου νερού

Τα μοντέλα υπόγειων υδάτων είναι μια απλοποιημένη μαθηματική έκφραση ενός υπόγειου υδροφορέα, συμπεριλαμβάνοντας τις διάφορες παραδοχές, υποθέσεις και περιορισμούς, για την επίτευξη των απαιτούμενων κάθε φορά στόχων.

Τα μοντέλα έχουν ως σκοπό τους την απεικόνιση των σχέσεων τόσο μεταξύ διάφορων παραγόντων του συστήματος αλλά και την αλληλεπίδραση του ίδιου του συστήματος με το περιβάλλον του. Έτσι, διευκολύνεται η εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος κάτω από διάφορες συνθήκες. Η επίλυση των εξισώσεων ενός μαθηματικού μοντέλου μπορεί να γίνει τόσο στο συνεχές όσο και στο διακριτό χώρο/χρόνο. Ανάλογα με την εφαρμογή στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τα μαθηματικά μοντέλα κατατάσσονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- Μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων
- Μοντέλα καθορισμού των παραμέτρων του προβλήματος
- Μοντέλα πρόβλεψης της λειτουργίας του συστήματος
- Μοντέλα διαχείρισης

#### Μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων

Κύριο μέλημα είναι η εύρεση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, γεγονός που εξαρτάται άμεσα από την εγκυρότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των διαδικασιών συλλογής δεδομένων, ο σχεδιασμός των δικτύων παρατήρησης και συλλογής δεδομένων, η αξιολόγηση των υπαρχόντων δεδομένων και η εκτίμηση των υπολοίπων τιμών που συμπληρώνουν το δίκτυο παρατήρησης.

[Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

#### Μοντέλα καθορισμού των παραμέτρων του προβλήματος

Σημαντικό ρόλο στην επίλυση των μοντέλων αποτελούν και οι υδρογεωολογικοί παράμετροι του υδροφορέα υπό μελέτη. Βασιζόμενοι σε παρατηρήσεις και μετρήσεις πεδίου, τα μοντέλα καθορισμού των παραμέτρων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αυτών, ακολουθώντας την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Γίνεται δηλαδή, ο υπολογισμός των φυσικών παραμέτρων του υδροφορέα γνωρίζοντας τη μεταβολή κάποιων υδραυλικών μεγεθών, π.χ. τη στάθμη του υδροφορέα, στο χρόνο). [Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

#### Μοντέλα πρόβλεψης της λειτουργίας του συστήματος

Το είδος του μοντέλου αυτού, χρησιμοποιεί το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των παραπάνω ειδών, και μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά του υδροφορέα στη μεταβολή κάποιων παραμέτρων του συστήματος. Μπορούν να διακριθούν δύο κατηγορίες :

- τα μοντέλα ροής, τα οποία εστιάζουν στην ποσοτική προσέγγιση για τη διαχείριση των υδροφορέων, το σχεδιασμό συστημάτων πηγαδιών, τη μελέτη της αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων νερών.

• τα μοντέλα μεταφοράς, τα οποία εστιάζουν στην ποιοτική προσέγγιση των υδροφορέων, εστιάζοντας στο θέμα της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Μερικά από τα ερωτήματα που απαντά είναι σχετικά την πορεία των ρύπων στους υδροφορείς, την πιθανότητα άφιξης των ρύπων σε περιοχές άντλησης υπόγειων νερών, τη διάρκεια των περιστατικών ρύπανσης πηγαδιών άντλησης, τη δυνατότητα εξυγίανσης των υδροφορέων με τεχνητές ή φυσικές διαδικασίες. [Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

#### Μοντέλα διαχείρισης

Τα μοντέλα διαχείρισης βοηθούν στην εκτίμηση της επίτευξης των στόχων ενός διαχειριστικού προβλήματος, όπως είναι η μεγιστοποίηση των οικονομικών εισόδων, η ελαχιστοποίηση του κόστους, η εξασφάλιση των απαιτούμενων ποσοτήτων νερού. Ωστόσο δεν πρέπει να παραβιάζεται κάποιος από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

Κατά τη διάρκεια επίλυσης των προβλημάτων διαχείρισης, κύριο μέλημα είναι η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Κατασταλτικός ωστόσο παράγοντας μπορεί να είναι τόσο η αβεβαιότητα όσο και ο απρόβλεπτος παράγοντας ακραίων συνθηκών. Η αβεβαιότητα μπορεί να προκύψει μέσω των εξισώσεων, των παραμέτρων αλλά και των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, ενώ ένας απρόβλεπτος παράγοντας μπορεί να είναι η ξηρασία ή η αλλαγή χρήσης νερού. Η κατανόηση της λειτουργίας, η γνώση των παραδοχών και του φάσματος ισχύος του μοντέλου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή περιγραφή ενός φυσικού φαινομένου, όπως είναι η λειτουργία ενός υπόγειου υδροφορέα. [Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

Η μαθηματική προσομοίωση είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για κάθε μελετητή, διευκολύνοντας την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων. Επίσης επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών για διάφορες υποθετικές καταστάσεις, όπως είναι τα σενάρια. Ωστόσο μια σειρά από προκλήσεις δημιουργούνται για τους μοντελιστές ή αναλυτές, όπως είναι:

- ο εντοπισμός δημιουργικών εναλλακτικών λύσεων για την επίλυση των προβλημάτων
- η αναγνώριση των συμφερόντων κάθε ομάδας προκειμένου να επιτευχθεί η κατανόηση των θεμάτων και η συναίνεση σχετικά με το τι πρέπει να γίνει
- η ανάπτυξη και χρήση μοντέλων, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται έτσι ώστε όλοι να μπορούν να καταλήξουν σε μια κοινή αντίληψη που να συνάδει και με τα ατομικά συμφέροντα
- τη λήψη αποφάσεων και την εφαρμογή τους, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές γνώμες, τις κοινωνικές αξίες και τους στόχους.

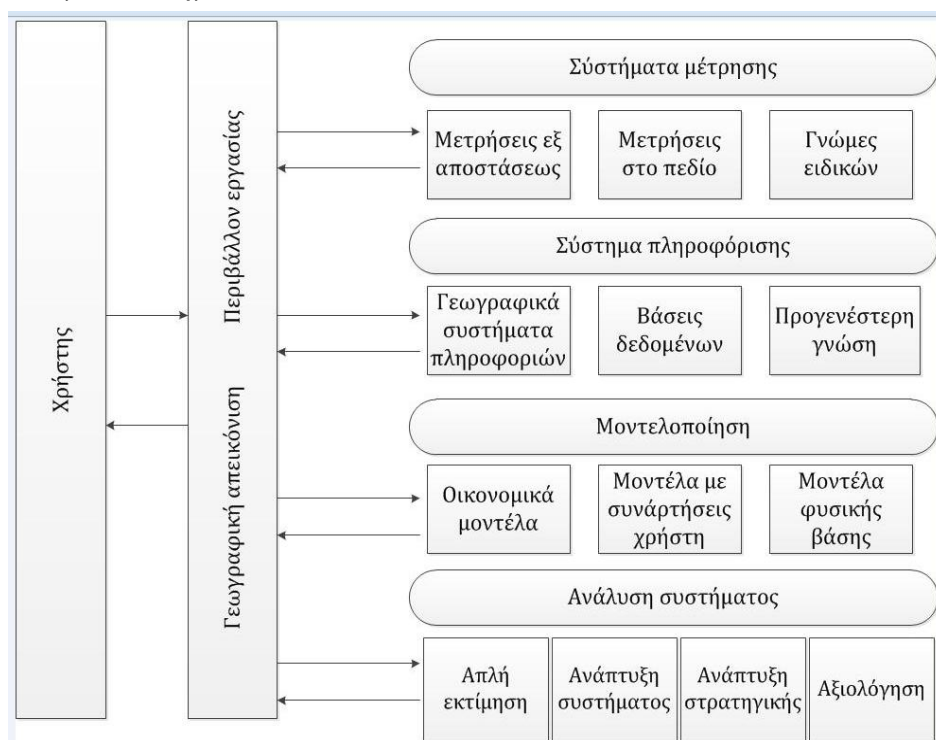
Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, πρέπει κάθε μελετητής να έχει υπόψη:

- νομικούς κανόνες και κανονισμούς
- προηγούμενες αποφάσεις
- πιθανές αντιδράσεις από όσους επηρεάζονται από τυχόν απόφαση
- τη σπουδαιότητα των διαφόρων θεμάτων που απασχολούν

- εφαρμόσιμες απόψεις για την επιστήμη, τη μηχανική και τη οικονομία –οι τεχνικές πτυχές της εργασίας τους.

Επίσης για την ενασχόληση ενός μελετητή σε ένα πρόβλημα διαχείρισης υδατικών πόρων, πρέπει να διαθέτει όχι μόνο τις απαιτούμενες μαθηματικές δεξιότητες και να γνωρίζει τη μεθοδολογία, αλλά πρέπει να κατανοεί την περιβαλλοντική μηχανική, τις οικονομικές, πολιτικές, πολιτιστικές και κοινωνικές πτυχές των υδατικών πόρων σε προβλήματα σχεδιασμού. [Loucks and van Bee, 2005]

Ακολουθούν οι βασικές συνιστώσες ενός συστήματος ανάλυσης αποφάσεων, σύμφωνα με το σχήμα 4.1:



**Σχήμα 4.1. Βασικά συστατικά συστήματος ανάλυσης αποφάσεων [Loucks and van Bee, 2005]**

Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα με τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα, σε συνδυασμό με πληροφορίες για την περιγραφή των υδραυλικών υψών ή των παροχών κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο, η γνώση της αρχικής κατάστασης για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι εξίσου απαραίτητη (αρχικές συνθήκες). Τα βασικά βήματα για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την υπόγεια ροή και την μεταφορά ρύπων είναι καταρχάς η ανάπτυξη του μοντέλου και στη συνέχεια ακολουθούν και άλλες διαδικασίες όπως η επιλογή του κώδικα του μοντέλου και η επαλήθευση του, ο σχεδιασμός του μοντέλου, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και η πρόβλεψη.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι η γεωμετρία των υδροφόρων στρωμάτων, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους (περατότητα, μεταβιβασιμότητα) και οι ζώνες τροφοδοσίας (υπόγειες πλευρικές εισροές, διηθήσεις, κατείσδυση,

---

επιστροφές αρδεύσεων) και εκφόρτισης. Στόχος του εννοιολογικού μοντέλου είναι η περιγραφή των βασικών μηχανισμών υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος και η τεκμηρίωση του τρόπου ή των τρόπων μαθηματικοποίησης των μηχανισμών αυτών στο μαθηματικό ομοίωμα. Κατά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητο να γίνονται κάποιες παραδοχές όσον αφορά στα γεωλογικά κυρίως χαρακτηριστικά του. Εύλογο είναι ότι η προσπάθεια μετασχηματισμού του φυσικού συστήματος στο μαθηματικό μοντέλο εμπεριέχει τη σαφή αναγνώριση και καταγραφή των παραδοχών που γίνονται και των περιορισμών στην ισχύ του μοντέλου που αυτές συνεπάγονται. [Γιαννέλη, 2009]

#### 4.2 Ταξινόμηση των μοντέλων

Μια πρώτη ταξινόμηση των μοντέλων προσομοίωσης μπορεί να γίνει με βάση το αντικείμενο της προσομοίωσης και την περιοχή της εφαρμογής. Σήμερα μπορεί κανείς να αποκτήσει, ή να αναπτύξει, προγράμματα λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη ένα μεγάλο αριθμό ανταγωνιστών των υδάτινων πόρων, όπως είναι:

- η ποσότητα και / ή η ποιότητα των ποταμών, εκβολών ή παράκτιων ζωνών
- η λειτουργία του ταμιευτήρα για την ποσότητα και / ή την ποιότητα
- η ποσότητα και/ή η ποιότητα της κορεσμένης και/ή η ακόρεστης ζώνης
- η απορροή κατακρήμνισης, συμπεριλαμβανομένης της διάβρωσης και των χημικών προϊόντων
- οι διαρροές επικίνδυνων υλικών
- οι μορφολογικές αλλαγές
- τα συστήματα συλλογής λυμάτων
- οι εγκαταστάσεις καθαρισμού λυμάτων
- οι εργασίες άρδευσης
- η υδροηλεκτρική παραγωγή
- τα οικονομικά οφέλη και το κόστος [Loucks and van Bee, 2005]

Στη συνέχεια, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των υπόγειων υδάτων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

Τα παραμετρικά, τα οποία είναι στατικά και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την παρούσα κατάσταση ενός συστήματος (Βουδούρης, 2004). Τα δυναμικά, τα οποία σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης στο μέλλον. Αποτελούνται από τα φυσικά, αναλογικά και μαθηματικά και ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ανάλογα με την μεθοδολογία δόμησής τους. Τα φυσικά μοντέλα προσομοιώνουν τη ροή άμεσα, σε αντίθεση με τα μαθηματικά, τα οποία χρησιμοποιούν βασικές εξισώσεις, αντιπροσωπευτικές των φυσικών διεργασιών σε ένα σύστημα και προσομοιώνουν τη ροή έμμεσα. [Anderson & Woessner, 1992]

---

**Φυσικά μοντέλα:** Τα φυσικά μοντέλα είναι αποτέλεσμα μελέτης σε εργαστηριακό περιβάλλον και αποτελούν πιστά αντίγραφα των φυσικών συστημάτων ροής κατασκευασμένα υπό κλίμακα. Έχουν τη δυνατότητα απευθείας προσομοίωσης της υπόγειας ροής, ενώ εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν εμφανίζουν δυσκολία στην πρακτική τους εφαρμογή.

**Αναλογικά μοντέλα:** Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που δεν είναι εύκολη η αναλυτική επεξεργασία του φαινομένου και είναι φυσικά συστήματα που υπακούουν σε μερικές διαφορικές εξισώσεις με οριακές συνθήκες όμοιες με το πρωτότυπο. Πρόκειται στην ουσία για εργαστηριακές προσομοιώσεις των υδροφορέων με πιο γνωστά τα ηλεκτρικά ομοιώματα, τα ανάλογα άμμου, τη συσκευή Hele-Shaw, τα ανάλογα μεμβράνης, τα ομοιώματα Moire, τα θερμικά ομοιώματα, τα υβριδικά ομοιώματα, τα ηλεκτρικά ομοιώματα κ.λπ. Οι τεχνικές των μοντέλων αυτών δεν χρησιμοποιούνται τόσο πολύ πια, εξ αιτίας της ικανοποιητικής προσαρμοστικότητας, της μεγάλης διάθεσης και των πολύ μεγάλων δυνατοτήτων εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων. Παρουσιάζουν όμως ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα τελευταία, δεν απαιτούν διακριτικότητα στον χρόνο, που αποτελεί παράγοντα πιθανής δημιουργίας λαθών.

**Μαθηματικά μοντέλα:** Χρησιμοποιούνται ευρέως στην υδρογεωλογία και έχουν ως κύριο στόχο την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού χρησιμοποιώντας διαφορικές εξισώσεις. Με τα μαθηματικά μοντέλα γίνεται δυνατή η παρουσίαση μιας τεράστιας ποσότητας πληροφοριών με έναν εκπληκτικά απλό και συνεκτικό τρόπο. Διακρίνονται σε μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων, καθορισμού παραμέτρων, ροής και μεταφοράς και μοντέλα διαχείρισης. Βασίζονται κυρίως στην επίλυση βασικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού όπως είναι οι εξισώσεις του Darcy, Boussinesq, Laplace, Bernoulli, εξίσωση της συνέχειας, της ροής υπογείων υδάτων και θερμότητας. Τα μαθηματικά μοντέλα είναι κατάλληλα για προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, καθώς και χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, ρυθμό άντλησης και τροφοδοσίας. [Τάντος, 2006]

Η ανάγκη χρήσης αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων που έχουν σχέση με τη ρύπανση των υπόγειων νερών προέκυψε κυρίως από την αδυναμία των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα διάφορων εφαρμογών.

Όταν χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα ως εργαλεία επίλυσης προβλημάτων της υπόγειας ροής, γίνεται θεώρηση δυο βασικών διεργασιών: της ροής του υπόγειου νερού λόγω των υδραυλικών βαθμίδων και της αφαίρεσης (άντληση) ή προσθήκης νερού (εμπλουτισμός). Όταν χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς ρύπανσης είναι απαραίτητες οι διαδικασίες μεταφοράς με μοριακή διάχυση, μηχανική διασπορά και ρεύματα μεταφοράς, καθώς επίσης και οι διαδικασίες που ευθύνονται για την παραγωγή ή εξασθένιση του ρυπαντή όπως είναι οι χημικές, βιολογικές, ακόμα και πυρηνικές διαδικασίες (ρόφηση, ιοντοανταλλαγή, οξειδοαναγωγή, ραδιενεργός διάσπαση και βιοδιάσπαση). Για την ολοκληρωμένη μελέτη ενός υδροφόρου συστήματος απαραίτητες είναι και οι πληροφορίες για την περιοχή,

το σχήμα και τις συνθήκες κατά μήκος των συνόρων του υδροφορέα σε συνδυασμό με παραμέτρους προσομοίωσης. [U.S.N.R.C. 1990]

Ωστόσο τα μαθηματικά μοντέλα επιλύουν με αξιόπιστο τρόπο ένα μικρό ποσοστό προβλημάτων ροής ή μεταφοράς, μιας και περιγράφουν τη ροή του υπόγειου νερού ή τη μεταφορά ενός μοναδικού μη αντιδρώντα με το νερό ρυπαντή σε κορεσμένο πορώδες μέσο. Η αβεβαιότητα αυτή ως προς την αξιοπιστία με την οποία τα μαθηματικά μοντέλα αποδίδουν τις υδρογεωλογικές διαδικασίες, οδήγησε σε πειραματικές έρευνες μακράς διάρκειας ώστε να βελτιωθεί η κατανόηση των πιο πάνω διαδικασιών (U.S.N.R.C. 1990).

Η χρήση των μαθηματικών μοντέλων έχει κάποιες δυσκολίες, οι οποίες εντοπίζονται αρχικά στην ετερογένεια στην κλίμακα του πεδίου (μακροετερογένεια), αλλά και στην ύπαρξη διπλού πορώδους. Η ετερογένεια έχει σαν αποτέλεσμα τα στοιχεία εισόδου να προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα, ενώ η ροή μέσα σε διπλό πορώδες καθιστά δύσκολη έως αδύνατη την πρόγνωση για δοσμένη θέση, εκτός αν υπάρχει εκτεταμένη πληροφόρηση για το είδος και τη φύση του δικτύου ρωγμάτων (Καλλέργης, 2001). Έτσι τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν ως προς την **μεταβλητή κατάστασης (state variable)** σε τέσσερις τύπους :

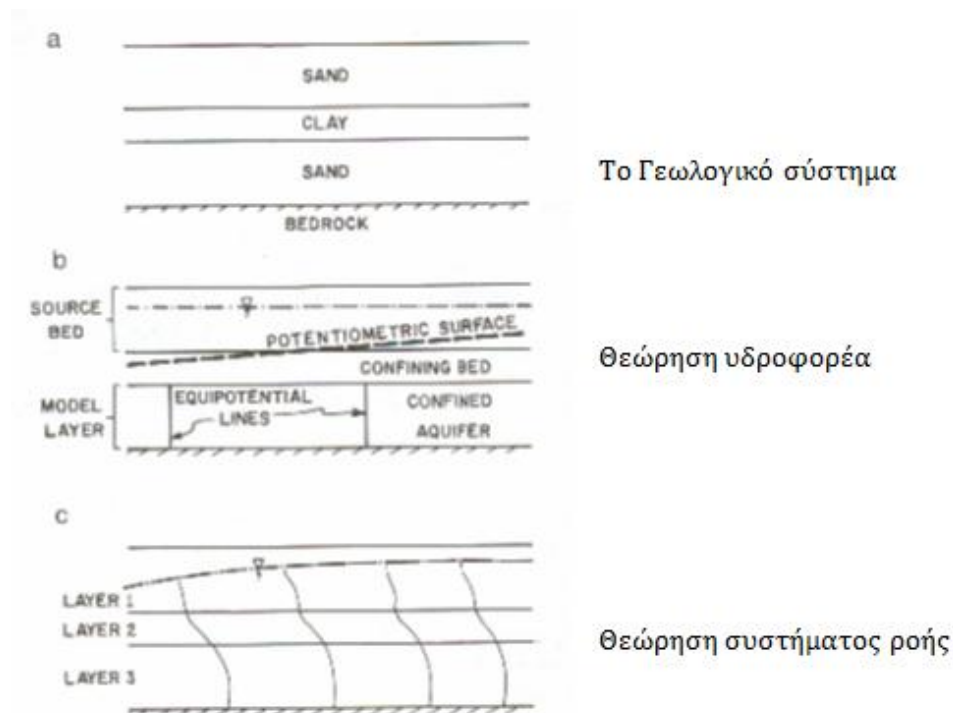
- Ροής υπόγειων νερών (Fluid flow models). Μια εξίσωση υπολογισμού του υδραυλικού φορτίου, της πίεσης ή του δυναμικού. Σε περίπτωση που υπάρχουν παραπάνω από μία φάσεις (πολυφασική ροή), υπάρχει και μία εξίσωση για καθεμία από τις φάσεις αυτές.
- Μεταφοράς διαλυτών ουσιών (Solute transport models). Μια εξίσωση υπολογισμού των συγκεντρώσεων των διαλυτών ουσιών στο σύστημα, υπάρχει επιπλέον για τις συνιστώσες ροής.
- Μεταφοράς θερμότητας (Heat transport models). Μια εξίσωση υπολογισμού των συγκεντρώσεων των διαλυτών ουσιών στο σύστημα σε μεταβλητή κατάσταση της θερμοκρασίας.
- Παραμορφώσεων - Καθιζήσεων (Deformation models). Ύπαρξη επιπλέον εξισώσεων για τον υπολογισμό των σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων σε ένα πορώδες μέσο.

### 4.3 Βασικές εξισώσεις

Μια ολοκληρωμένη περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις θεμελιώδεις εξισώσεις εάν το μοντέλο εξαρτάται από το χρόνο. Πριν όμως εξαχθούν οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την περιγραφή της υπόγειας ροής είναι απαραίτητο ένα θεμελιώδες μοντέλο του συστήματος (conceptual model). Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής, σύμφωνα και με το σχήμα 4.2:

1.Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)

2.Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint), [Diersch,1979]



Σχήμα 4.2. Οι δυο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής [Anderson and Woessner,1992]

### 1.Η θεώρηση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)

Με την προσέγγιση αυτή, μπορούμε να αναφερθούμε τόσο σε ελεύθερο (unconfined), όσο και σε περιορισμένο (confined) υδροφορέα. Στον περιορισμένο υδροφορέα το επάνω μέρος του καλύπτεται από ένα αδιαπέραστο στρώμα, το οποίο αποτελείται από πορώδες υλικό που επιβραδύνει την κίνηση του νερού, ενώ στον ελεύθερο υδροφορέα το ανώτερο στρώμα είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής στα πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις περιλαμβάνοντας και αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Επίσης η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα από τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας. Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή τη μεταβιβασιμότητα (transmissivity). Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενή και με σταθερό πάχος ενώ σε έναν ελεύθερο ποικίλει χωροταξικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού.

Η προσέγγιση υδροφορέα χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει διςδιάστατη ροή τόσο για περιορισμένο όσο και ελεύθερο υδροφορέα. Εάν έχουμε διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τριςδιάστατης ροής δια της οποίας η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από αυτόν. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέρατου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. [Diersch,1979]

### 2.Η θεώρηση συστήματος ροής (Flow system viewpoint)

Σ' αυτή τη προσέγγιση δεν μας απασχολεί το είδος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά η δημιουργία της τριςδιάστατης κατανομής

των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι τόσο για κάθετη όσο και για οριζόντια ροή σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι :

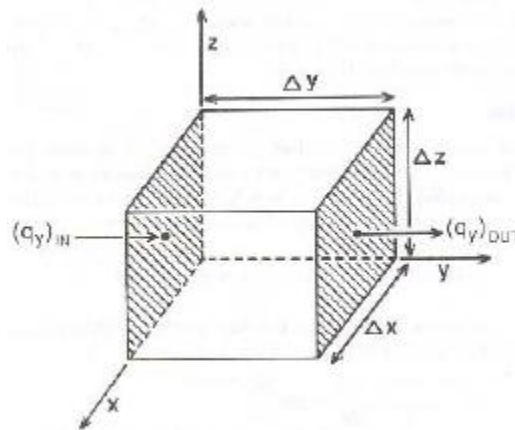
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

όπου  $K_x, K_y, K_z$  : οι συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα

$S_s$  : η ειδική αποθηκευτικότητα

$R^*$  : ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση είναι αποτέλεσμα της εξίσωσης της ισορροπίας του νερού και του νόμου του Darcy. Γίνεται δηλαδή θεώρηση ενός κύβου από πορώδες υλικό αρκετά μεγάλου έτσι ώστε να αντιπροσωπεύσει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρού έτσι ώστε να μην παρατηρούνται αλλαγές στα υδραυλικά ύψη.



Ο όγκος του κύβου ισούται με το γινόμενο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  και η ροή του νερού εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτωσης  $q$ : [Diersch, 1979]

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z$$

Το υδατικό ισοζύγιο (αρχή διατήρησης της μάζας) δηλώνει ότι:

$$\text{Έξοδος} - \text{Είσοδος} = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση}$$

Θεωρώντας τη ροή κατά μήκος του άξονα  $y$  του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια  $\Delta x \Delta z$  και ισούται με  $q_y^{IN}$  ενώ η εκροή με  $q_y^{OUT}$ . Ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$\frac{(q_y^{out} - q_y^{in}) \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα  $y$  είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $z$ . Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση}$$

για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι άντλησης) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ένας όρος  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$  ο οποίος θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή.

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση}$$

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι το  $\Delta V$  είναι θετικό όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό, ή αλλιώς ότι νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Με } S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

Άρα προκύπτει:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^*$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση αφού το  $q$  δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Όμως ο νόμος του Darcy δίνει μια σχέση μεταξύ των  $q$  και  $h$  και το υδραυλικό ύψος  $h$  είναι φυσικά άμεσα μετρήσιμο. Για τις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$\begin{aligned} q_x &= \left( -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ q_y &= \left( -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ q_z &= \left( -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Και προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

Με τα  $K_x$ ,  $K_y$  και  $K_z$  να είναι συγγραμμικά με τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ) που γράφεται ως εξής:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία του τανυστή μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του τανυστή που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. [Anderson and Woessner,1992]

### Αριθμητικές Μέθοδοι

Στις αριθμητικές μεθόδους απαιτείται μεγάλη προσοχή ώστε να αποφεύγεται το αριθμητικό σφάλμα και να προσεγγίζονται όσο το δυνατό οι πραγματικές τιμές. Αποτελούν χρήσιμο εργαλείο όταν η επίλυση των προβλημάτων γίνεται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι για την επίλυση των εξισώσεων που απαιτούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής χρησιμοποιούνται οι εξής:

- Πεπερασμένες διαφορές
- Πεπερασμένα στοιχεία
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Οριακή ολοκληρωτική μέθοδος
- Αναλυτικά στοιχεία

Με τις δυο πρώτες να είναι πιο εφαρμόσιμες, μετατρέποντας το μαθηματικό μοντέλο σε μια μορφή η οποία εύκολα μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση του υπολογιστή. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί ως ένας πίνακας αλγεβρικών εξισώσεων. Έτσι η διαδικασία της επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα:

1.την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μαθηματικό μοντέλο και

2. την επίλυση των αποτελεσμάτων με τον πίνακα των αλγεβρικών εξισώσεων

Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι πως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δημιουργεί το πλέγμα και υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο η οποία είναι η μέση τιμή σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο αυτόν. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζει ακριβώς την τιμή του υδραυλικού ύψους σε έναν κόμβο και προσδιορίζει την διακύμανση του ανάμεσα σε δύο κόμβους με διαφορετικές τιμές. Επίσης προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα σχήματα και όρια και προσομοιώνει τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης όπως και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του κινούμενου ύδατος πολύ καλύτερα. [Diersch,1979]

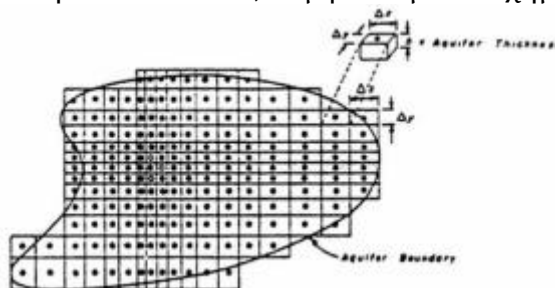
### Πλέγματα Πεπερασμένων Διαφορών

Ο βασικός στόχος των μεθόδων πεπερασμένων διαφορών είναι να προσεγγισθούν οι μερικές παράγωγοι στη διαφορική εξίσωση που επιλύεται από αντίστοιχους όρους διαφορών. Η εξίσωση διαφορών που προκύπτει με τον τρόπο αυτό γράφεται για έναν πεπερασμένο αριθμό χαρακτηριστικών σημείων του πεδίου καταλήγοντας έτσι σ' ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που είναι δυνατό να λυθούν πιο εύκολα απ' ότι η αρχική διαφορική εξίσωση. [Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

Στα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών,  $i$ ,  $j$  και  $k$ , οι οποίοι δείχνουν τη θέση τους σε μία γραμμή, στήλη και στρώμα του πλέγματος. Οι κόμβοι χωρίζονται έτσι ώστε τα διαστήματα  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$  να είναι σταθερά αλλά όχι και απαραίτητα ίσα. Τις περισσότερες φορές πλέγμα με μικρές αποστάσεις των κόμβων χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου συναντάται το κύριο πρόβλημα (π.χ. πηγάδια άντλησης) ή παρουσιάζονται άλλα σημαντικά υδρολογικά γνωρίσματα. Όταν στο εσωτερικό της περιοχής χρησιμοποιηθεί μικρό πλέγμα μπορεί να είναι απαραίτητο να αυξηθούν οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος και έτσι να διογκωθεί, και να βγει έξω από τα όρια. Γι' αυτό το λόγο ίσως χρειαστεί να αραιωθούν λίγο και ο κανόνας που χρησιμοποιείται στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών είναι ότι το διάστημα ενός κόμβου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κατά 1.5 φορές την απόσταση του προηγούμενου κόμβου.

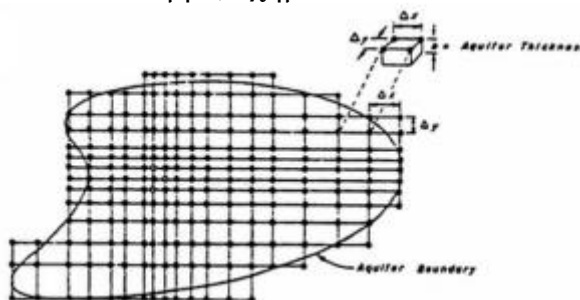
Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών είναι δύο [Γιαννέλη, 2009]:

- τα πλέγματα που έχουν στο κέντρο το κελί, με τις οριακές συνθήκες να λαμβάνονται στα άκρα των κελιών, σύμφωνα με το σχήμα 4.3:



Εικόνα 4.3. Πλέγματα πεπερασμένων διαφορών με κέντρο το κελί  
[American Society of Civil Engineers, 1996]

- τα πλέγματα που έχουν στο κέντρο το δίκτυο, με τις οριακές συνθήκες να λαμβάνονται πάνω στον κόμβο, σχήμα 4.4:



Εικόνα 4.4. Πλέγματα πεπερασμένων διαφορών με κέντρο το δίκτυο  
[American Society of Civil Engineers, 1996]

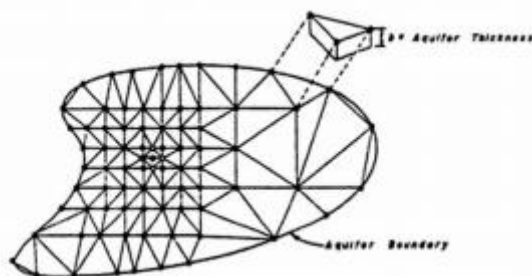
### Πλέγματα Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που την καθιστούν πολύ εύχρηστη και αποτελεσματική είναι:

- αναπαριστούνται με φυσικό τρόπο τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια των πεδίων και οι συνδυασμοί των οριακών συνθηκών
- η ετερογένεια και η ανισοτροπία του πεδίου προσομοιώνονται με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια

- ειδικές περιοχές του πεδίου, όπου αναμένονται έντονες μεταβολές του πιεζομετρικού φορτίου ή της συγκέντρωσης, προσομοιώνονται επίσης με ακρίβεια καθώς είναι πολύ εύκολη η τοπική πύκνωση των σημείων του κάρναβου. [Λατινόπουλος και Θεοδοσίου,2007]

Το βασικότερο μειονέκτημα στα πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των στοιχείων που απαιτούνται για την κατασκευή του πλέγματος είναι πολύ χρονοβόρα και δύσκολη. Κάθε κόμβος αλλά και στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και η συντεταγμένη θέση (x, y, z) κάθε κόμβου και ο αριθμός αυτού θα πρέπει να είναι στενά συνδεδεμένος με κάθε στοιχείο πριν αυτό εισαχθεί στο μοντέλο. Η αρίθμηση γίνεται από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά ανάλογα με το που είναι η μικρότερη διάσταση από το κύριο πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται ξεχωριστά κάθε στοιχείο και στη συνέχεια συναρμολογεί τις εξισώσεις κάθε στοιχείου σε έναν μαθηματικό πίνακα. Η αρίθμηση των κόμβων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, από τη μικρότερη διάσταση του πλέγματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος φάσματος των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο. Κατά το σχεδιασμό του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για ισοτροπικά υλικά θα πρέπει η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης να είναι κοντά στη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα σφάλματα και πετυχαίνεται καλύτερη μείωση με τη χρήση κανονικών τριγωνικών στοιχείων. Όταν χρησιμοποιούνται γραμμικά τριγωνικά στοιχεία, τότε μπορεί να είναι πιο εύκολο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες στους κόμβους λόγω του ότι θα υπάρχουν πάντα λιγότεροι κόμβοι απ' ό,τι στοιχεία σ' αυτό το είδος πλέγματος.



Εικόνα 4.5. Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων με τριγωνική μορφή

[American Society of Civil Engineers,1996]

Είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που θα εισαχθούν στο πλέγμα επειδή το μοντέλο απαιτεί δεδομένα για κάθε κόμβο, στοιχείο και κελί και γενικά τα στοιχεία του πεδίου είναι πενιχρά. Όταν δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για κάθε κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρεμβολή. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος γι' αυτό το σκοπό είναι η παρεμβολή 'kriging', σύμφωνα με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καλύτερη γραμμική απροκάλυπτη εκτίμηση. Η μεταβλητή προσδιορίζεται ως μία τυχαία συνάρτηση, της οποίας η χωρική συσχέτιση προκύπτει από αλλαγές της απόστασης. Η μέθοδος του 'kriging' διαφέρει από άλλες μεθόδους παρεμβολής διότι υπολογίζει τη χωρική δομή της μεταβλητής και προωθεί μία εκτίμηση του σφάλματος της παρεμβολής ως τυπική απόκλιση των τιμών. Η εκτίμηση του λάθους είναι απαραίτητη όταν οι τιμές των παραμέτρων χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.[Γιαννέλη,2009]

---

## Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος

Ο σκοπός της κατασκευής ενός θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του έτσι ώστε όλο το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Για την κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου είναι απαραίτητα τρία βήματα:

- Ο καθορισμός των υδρογραφικών μονάδων

Σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητη η χρήση γεωλογικών χαρτών, σε συνδυασμό με την υδρογεωλογία, για τον καθορισμό των υδρογραφικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.

- Ο καθορισμός του υδατικού ισοζυγίου

Εδώ καθορίζονται οι εισροές (βροχόπτωση, επιφανειακή ροή ή εναπόθεση από επιφανειακά νερά), οι εκροές (ανεξάντλητες πηγές, εναπόθεση σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση), οι πηγές και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής.

- Ο καθορισμός του συστήματος της ροής

Τα υδρογραφικά στοιχεία αποτελούν τη βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Οι υδρολογικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να θεμελιώσουν την κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος ενώ οι πληροφορίες για τη βροχόπτωση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή όπως επίσης και τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία χρησιμοποιούνται περισσότερο για την ανάλυση.

Η διάσταση των επιπέδων του νερού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής και ο συσχετισμός των υπόγειων υδροφορέων με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα αλλά είναι επιθυμητό να περιέχει και πληροφορίες από τη γεωχημεία, για να εδραιωθεί η κίνηση του, να εκτιμηθεί ο ρυθμός της υπόγειας ροής και να αναγνωριστούν οι πηγές όπως επίσης και το ποσό της ανταλλαγής.

Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει να γίνει κατάταξη του μοντέλου σε μια από τις κατηγορίες που ακολουθούν και αφορούν τη χωρική του διάταξη.

- Δισδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δισδιάστατες τομές (flow system viewpoint)
- Ήμι-τριδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τριδιάστατα (flow system viewpoint)

### Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα

Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να ανήκουν οι περιορισμένοι υδροφορείς, οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή, οι ελεύθεροι και οι μεικτοί.

#### Περιορισμένοι υδροφορείς

Χρειάζεται να καθοριστεί η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Η μεταβολή στην μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας μπορούν να εκτιμηθούν από τεστ άντλησης, εάν έχουν πραγματοποιηθεί, αλλιώς από τη βιβλιογραφία.

#### Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή, το αδιαπέρατο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί τον περιορισμένο υδροφορέα δεν απεικονίζεται σαφώς στο μοντέλο αλλά εκπροσωπείται από έναν όρο διαρροής (leakage) ο οποίος ισούται με το λόγο της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K_z$ ) του αδιαπέρατου στρώματος ως προς το πάχος ( $b$ ) αυτού.

$$leakage = \frac{K_z}{b}$$

Η πηγή του νερού σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας είτε ένας ελεύθερος ή ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο γενικά όποια κι αν είναι η πηγή του νερού υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος σε αυτή είναι σταθερό με το χρόνο. Επίσης υποθέτει ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση νερού εντός του αδιαπέραστου στρώματος. Η διαρροή του νερού από το αδιαπέραστο στρώμα πραγματοποιείται σε χρόνο  $t_s$  ο οποίος εξαρτάται από την ειδική αποθηκευτικότητα, την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος.

#### Ελεύθεροι υδροφορείς

Στους ελεύθερους υδροφορείς γίνονται πολλές παραδοχές, γνωστές ως οι παραδοχές του Dupuit, με τις οποίες εξασφαλίζουμε οριζόντια ροή και σταθερό υδραυλικό ύψος σε σχέση με το βάθος. Οι παραδοχές αυτές είναι:

1. Ο υδροφορέας είναι ομογενής και ισότροπος
2. Ο υδροφορέας όπως και το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστα
3. Η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ηρεμία (δεν υπάρχει ροή)
4. Ο υδροφορέας κατά το χρονικό διάστημα που αντλείται, δεν επανατροφοδοτείται είτε από άμεση κατείσδυση, είτε από υπερκείμενο ή υποκείμενο υδροφόρο στρώμα
5. Ισχύει ο νόμος του Darcy
6. Υπάρχει μόνιμη ροή του νερού με τα συνεπακόλουθα όπως σταθερή πιεζομετρική επιφάνεια, σταθερή ακτίνα επίδρασης, σταθερές ταχύτητες ροής
7. Υπάρχει συναρμογή της επιφάνειας πτώσης στάθμης με τις εκατέρωθεν επιφάνειες του υπόγειου νερού και ειδικά με την επιφάνεια του νερού μέσα στο πηγάδι
8. Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας ροής είναι μηδενική ή αμελητέα σε σχέση με την οριζόντια και σαν συνέπεια αυτού σε όλα τα σημεία της κατακόρυφου η ταχύτητα είναι η ίδια

Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραδοχές ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετατρέπεται σε δισδιάστατο ή ακόμη και σε μονοδιάστατο. Το μοντέλο υπολογίζει τη στάθμη του υπόγειου νερού για κάθε κόμβο. Η προσομοίωση απαιτεί πίνακες με τιμές από υδραυλική αγωγιμότητα, ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς. Τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και το ενεργό πορώδες υπολογίζονται από τεστ άντλησης. [Καλλέργης, 2001]

#### Μεικτοί υδροφορείς

Σε αυτά τα συστήματα υδροφορέα περιέχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που περιέχονται στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις.

---

### Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα

Ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην προσομοίωση υδροφορέων στους οποίους παρεμβάινουν αδιαπέρατα στρώματα. Τα αδιαπέρατα στρώματα δεν απεικονίζονται σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο ούτε και το υδραυλικό ύψος. Η επίδραση των αδιαπέραστων στρωμάτων προσομοιώνεται από έναν όρο διαρροής  $L$  ο οποίος παρουσιάζει την κάθετη ροή ανάμεσα σε δυο υδροφορείς και είναι συνάρτηση της διαρροής leakage και της διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του αδιαπέραστου στρώματος. Όταν υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερη από δυο ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέραστου στρώματος και του υδροφορέα τότε προτιμάται η χρήση του ημι-τρισδιάστατου μοντέλου.

### Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα

Οι δισδιάστατες τομές (profiles) και τα τρισδιάστατα μοντέλα έχουν τα ίδια δεδομένα με ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο με τη μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι πρέπει να είναι ξεχωριστοί για κάθε στρώμα του μοντέλου. Αυτή η κατηγορία των μοντέλων χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ελεύθερους υδροφορείς όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι αρκετά μεγάλη. Τόσο οι πεπερασμένες διαφορές όσο και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι αποτελεσματικά για να χρησιμοποιηθούν αλλά στην περίπτωση όπου έχουμε κίνηση της στάθμης του νερού τότε τα πεπερασμένα στοιχεία προτιμούνται. Επίσης τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού στα περιορισμένα στρώματα, στα οποία θεωρείται μια τιμή της ειδικής αποθηκευτικότητας.

Για την κατασκευή του πλέγματος το κυριότερο πρόβλημα έγκειται στη συχνότητα των κόμβων σε συνδυασμό με τις πεπερασμένες διαφορές ή τα πεπερασμένα στοιχεία. Το κομβικό πλέγμα θα διευθετήσει τη δομή του μοντέλου ενώ η επιλογή του κατάλληλου τύπου θα καθορίσει τις γενικές διαστάσεις του πλέγματος. Υπάρχουν δυο τύποι πλεγμάτων με πεπερασμένες διαφορές. Το block-centered πλέγμα, που χρησιμοποιείται και περισσότερο, και το mesh-centered. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο είναι στον τρόπο με τον οποίο οι οριακές διακυμάνσεις αντεπεξέρχονται. Η επιλογή του τύπου του μοντέλου θα καθορίσει τον αριθμό των στρωμάτων που απαιτούνται. Εάν μόνο ένα στρώμα χρειάζεται, αυτό θα αντιπροσωπεύει μία απλή υδρογραφική μονάδα. Η χρήση του θεμελιώδους μοντέλου επιτρέπει, τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν.

Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το μέγεθος της απόστασης των κόμβων στην οριζόντια κατεύθυνση που είναι συνάρτηση της αναμενόμενης καμπυλότητας του ύψους του νερού ή της ποτενσιομετρικής επιφάνειας. Οι αλλαγές του υδραυλικού ύψους στην κάθετη κατεύθυνση θα επιδράσουν στην επιλογή της κάθετης απόστασης των κόμβων. Ένας ακόμη παράγοντας είναι μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Τυπικά τα στρώματα των μοντέλων αντιστοιχούν σε μια υδρογραφική μονάδα, παρόλα αυτά όμως εάν υπάρχουν σημαντικές κάθετες κλίσεις στο υδραυλικό ύψος τότε δύο ή και περισσότερα στρώματα μπορούν να αναπαρασταθούν από μια απλή υδρογραφική μονάδα. Γενικά οι αλλαγές στην οριζόντια κατεύθυνση πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη απόσταση απ' ό,τι στην κάθετη απόσταση.

Τέλος ένας ακόμη παράγοντας που θα επηρεάσει στην επιλογή της απόστασης των κόμβων είναι και η έκταση της περιοχής. Ένα πλέγμα με μικρό αριθμό κόμβων είναι προτιμότερο, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των δεδομένων και των υπολογισμών για λόγους πρακτικότητας. Ακόμη είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός από κόμβους ούτως ώστε η αναπαράσταση του συστήματος να είναι ακριβής. [Καλλέργης 2001]

### Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες αποτελούν τη μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Για τη σωστή δόμηση ενός μοντέλου, που καλείται να προσομοιώσει ένα πραγματικό πρόβλημα, οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης, τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής.

Τα όρια μπορεί να οφείλονται στην πράξη σε διάφορες αιτίες. Ενδεικτικά, τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από τη φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος, ενώ διαφορετικού τύπου όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών, όπως η ύπαρξη υπόγειων χωρισμάτων και ποταμών.

Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet), για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό.
- Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής (Συνθήκες Neumann), για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου είναι σταθερή.
- Τύπος 3: Όρια εξαρτημένα από το υδραυλικό ύψος ροής (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου), για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μία τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή.

[Anderson and Woessner, 1992]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW

### 5.1 Εισαγωγή στο μοντέλο MODFLOW

Για την μελέτη του προβλήματος της υφαλμύρισης στην περιοχή του Τυμπακίου, θα χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό μοντελοποίησης το οποίο έχει την ικανότητα προσομοίωσης της ροής των υπόγειων υδάτων σε πορώδη κορεσμένα υλικά. Το MODFLOW (Modular three dimensional finite difference ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.) χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων. Μερικές από τις εφαρμογές που έχουν γίνει ακολουθούν:

- για τη μελέτη της συμπεριφοράς του υδροφορέα σε διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής (Scibek et al, 2007)
- για τη μελέτη των επιπτώσεων από την άντληση σε ένα δυναμικό σύστημα ποταμού – υδροφορέα (Zume και Tarhule, 2008)
- για την προσομοίωση ενός πολύπλοκου παράκτιου υδροφορέα και την επίδραση των ασυνεχειών του ανάγλυφου στην υπόγεια ροή (Παπαδοπούλου et al, 2009, 2010)
- για τη μελέτη και εκτίμηση πιθανών κλιματικών αλλαγών και αλλαγών στην αντλητική δραστηριότητα των υδατικών πόρων μιας λεκάνης στη Μεσόγειο (Γιαννόπουλος et al, 2012)
- για τη μοντελοποίηση δύο αλληλοβιακών υδροφορέων στη λεκάνη του Νέστου ποταμού (Βοσκίδης et al, 2012)

Το πρόγραμμα VISUAL MODFLOW χρησιμοποιεί την ανάλυση πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση της εξίσωσης της ροής των υπογείων υδάτων από την εξίσωση διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων του κάνναβου (block-centered) και η εφαρμογή του απαιτεί γνώσεις των υδραυλικών, υδρογεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. (Γιαννέλη, 2009)

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το MODFLOW, θεωρώντας ότι η πυκνότητα του υγρού παραμένει σταθερή, είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Delta V$$

Όπου

$Q_i$ : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα

$S_s$ : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού

$\Delta\Phi$ : η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα  $\Delta t$

$\Delta V$ : ο όγκος της κυψελίδας

Για την επίλυση, το πρόγραμμα MODFLOW χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο και έχει τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών μεθόδων:

- Ισχυρά πεπλεγμένη (S.I.P. 1)
- Σταδιακή υπερχαλάρωση των κόμβων (S.O.R.1)
- Υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (P.C.G.2)
- Μηχανή επίλυσης WHS

Η τρισδιάστατη κίνηση υπογείου ύδατος, υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου, περιγράφεται από τη μερική διαφορική εξίσωση [Anderson and Woessner, 1992]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

όπου:

$T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{zz}$ : οι τιμές της μεταβιβασιμότητας κατά τον x, y, z αντίστοιχα

h: το υδραυλικό φορτίο

W: παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού

Ss: ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου

t: ο χρόνος

Για την αξιοπιστία της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, άμεση συνάρτηση έχει η αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου (οι υδραυλικές και υδρολογικές παράμετροι, το υδραυλικό φορτίο, οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι παροχές αντλήσεων, οι πλευρικές εισροές, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά υδροφορέα, η βροχόπτωση), αλλά και η ομοιογένεια του υδροφόρου συστήματος που προσομοιώνεται. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η ετερογένεια και η ελλιπής πληροφόρηση σε όλα τα δεδομένα εισόδου, χρησιμοποιούνται τεχνικές που στηρίζονται στη γραμμική παρεμβολή. Η πιο δημοφιλής από τις τεχνικές αυτές είναι η τεχνική «kriging».

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα πραγματοποιείται μέσω των κυψελίδων (cells). Πρόκειται για τη μορφή ενός δικτύου - κανάβου από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια. Το πλήθος των κυψελίδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μιας περιοχής είναι απεριόριστο και ουσιαστικά περιορίζεται μόνο από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Το μέγεθος του μοντέλου προσδιορίζεται με τον αριθμό γραμμών, τον αριθμό στηλών και τον αριθμό στρωμάτων (NROW, NCOL, NLAY). Διακρίνονται οι παρακάτω τύποι:

- Σταθερού φορτίου (constant head). Με σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποδίδονται με τον κωδικό -1.
- Κυψελίδες Μηδενικής ροής (no flow boundary ή inactive). Καμία ροή νερού από και προς αυτές δεν λαμβάνει χώρα, με τις εισροές να είναι μηδενικές. Αποδίδονται με τον κωδικό 0.
- Κυψελίδες Μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell). Η στάθμη μεταβάλλεται με το χρόνο. Αποδίδονται με τον κωδικό 1.
- Κυψελίδες Σταθερής εισροής ή constant flux ή GHB (general head boundaries). Η εισροή παραμένει σταθερή και η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες.

---

## 5.2 Υπορουτίνες κώδικα MODFLOW

Η εισαγωγή δεδομένων και η επεξεργασία αυτών αποτελείται από πολλές επιμέρους διαδικασίες, υπορουτίνες. Τα πακέτα – ρουτίνες που συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των υπογείων ροών είναι:

- Βασικό πακέτο - Basic Package, BAS

Εισάγονται πληροφορίες για τον αριθμό των γραμμών και στηλών, τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων, τη χρονική περίοδο προσομοίωσης, το βήμα κάθε περιόδου, τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης και τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου. Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

- Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής - Block-Centered Flow Package, BCF

Εισάγονται πληροφορίες για τον τύπο του υδροφόρου, τις συνθήκες ροής, τις διαστάσεις των κυψελίδων του κανάβου, τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβασιμότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες, το συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες.

- Εμπλουτισμός - Recharge Package, RCH

Εισάγονται πληροφορίες για την κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό. Η εισαγωγή αυτή μπορεί να γίνει μόνο στο ανώτερο στρώμα.

- Γεωτρήσεις - Well Package

Εισάγονται πληροφορίες για τα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Ο εμπλουτισμός εισάγεται με θετικές τιμές της παροχής, ενώ οι αρνητικές άντληση. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος τόσο από την έκταση της κυψελίδας όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σ' αυτήν.

- Σταθερό φορτίο - Constant head

Εισάγονται πληροφορίες για τις τιμές φορτίων, οι οποίες ορίζονται στην αρχή της προσομοίωσης και παραμένουν αμετάβλητες.

- Υδρορεύματα - River, RIV

Εισάγονται πληροφορίες για τις εισροές στην περιοχή μελέτης από υδάτινους σχηματισμούς (ποτάμια, λίμνες), τα οποία μπορεί να τροφοδοτούν τον υδροφόρο ή να τροφοδοτούνται από αυτόν, ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφόρου.

- Όριο γενικού φορτίου - General Head Boundary, G.H.B.

Εισάγονται πληροφορίες για την πλευρική εισροή της περιοχής μελέτης από άλλους γειτονικούς υδροφορείς. Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κυψελίδα:

- Το γενικό φορτίο
- Την αγωγιμότητα

- Εξατμισοδιαπνοή – Evapotranspiration, ET

Εισάγονται πληροφορίες για την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους αλλά και από τη διαδικασία διαπνοής των φυτών.

- Output Control – Δεδομένα εξόδου

Εισάγονται δεδομένα για τον τρόπο εμφάνισης των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων.

[Visual MODFLOW, 2006]

### 5.3 Δυνατότητες –Τρόποι επίλυσης μοντέλου MODFLOW

Το μοντέλο προσομοίωσης MODFLOW έχει τη δυνατότητα να επιλύει το κάθε πρόβλημα με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τη μηχανή επίλυσης που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Οι τρόποι επίλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι παρακάτω:

- Πακέτο προαπαιτούμενης συζυγούς βαθμίδας - Preconditioned Conjugate Gradient package (PCG2). Γραμμικές και μη γραμμικές συνθήκες ροής μπορούν να προσομοιαστούν και περιλαμβάνονται δυο προαπαιτούμενες επιλογές:
  - Την τροποποιημένη μη ολοκληρωμένη προϋπόθεση Cholesky, η οποία είναι αποδοτική σε βαθμωτούς (scalar) υπολογιστές
  - Την πολωνυμική προϋπόθεση, η οποία απαιτεί από τον Η/Υ λιγότερη μνήμη και με συγκεκριμένες τροποποιήσεις είναι πιο αποδοτική στους ανυσματικούς (vector) υπολογιστές.

Η σύγκλιση της επίλυσης επιτυγχάνεται από τις μεταβολές των υδραυλικών φορτίων και τα κριτήρια υπολοίπου (residual criteria). Μη γραμμικά προβλήματα επιλύονται χρησιμοποιώντας τις επαναλήψεις Picard. Η μέθοδος PCG2 λειτουργεί προσεγγίζοντας την επίλυση σε δύο επίπεδα, σε ένα χρονικό βήμα, εσωτερικές και εξωτερικές επαναλήψεις. Οι εξωτερικές επαναλήψεις χρησιμοποιούνται για να διαφοροποιηθεί η μητρική προαπαιτούμενη παράμετρος, κατά την προσέγγιση της επίλυσης. Μία εξωτερική επανάληψη συμβαίνει όταν οι υδρογεωλογικές παράμετροι του συστήματος ροής (π.χ. μεταβιβασιμότητα, πάχος κορεσμένου υδροφορέα) ενημερώνονται στην προαπαιτούμενη ομάδα θεμελιωδών εξισώσεων. Οι εσωτερικές επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να συναντήσει το μέγιστο αριθμό αυτών που έχει ορίσει ο χρήστης ή να επιτευχθεί το κριτήριο σύγκλισης.

- Πακέτο Ισχυρά πεπλεγμένης μεθόδου - Strongly Implicit Procedure Package (SIP). Χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλου συστήματος ταυτόσημων γραμμικών εξισώσεων με επανάληψη. Το πλεονέκτημα της είναι ότι είναι πολύ σταθερή και γενικά καταλήγει σε σύγκλιση, συχνά ωστόσο με πολύ αργό ρυθμό. Δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η μέθοδος PCG, αλλά απαιτεί λιγότερη μνήμη για να υπολογίσει την τελική επίλυση. Επειδή κάθε επίλυση περιλαμβάνει μέχρι επτά άγνωστες τιμές φορτίου και η ομάδα των άγνωστων τιμών αλλάζει από την μία εξίσωση στην επόμενη, διαμέσου του πλέγματος (grid), οι εξισώσεις για όλο το πλέγμα πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα, για κάθε χρονικό βήμα. Για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

- Πακέτο επιτυχούς εκτόνωσης - Slice-successive Over-Relaxation package (SOR). Χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων με τους μέσους όρους των επαναλήψεων. Κατά την εφαρμογή της, το πλέγμα διαιρείται σε κάθετες "φέτες", ομαδοποιώντας τις εξισώσεις των κόμβων σε διακριτές ομάδες, στις οποίες κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε μία "φέτα". Σε κάθε επανάληψη, αυτές οι ομάδες εξισώσεων λειτουργούν διαδοχικά, δίνοντας αποτελέσματα σε νέα ομάδα καθορισμένων τιμών φορτίων για κάθε "φέτα". Καθώς γίνεται η επεξεργασία των εξισώσεων για κάθε "φέτα", αυτές εκφράζονται πρώτα σε όρους της μεταβολής των υπολογιζόμενων φορτίων, μεταξύ των επιτυχημένων επαναλήψεων. Η ομάδα των εξισώσεων που αντιστοιχεί στην "φέτα" επιλύεται μέσω της Gaussian απαλοιφής, χρησιμοποιώντας τους όρους για μεταβαλλόμενες "φέτες" ως γνωστές ποσότητες. Στη συνέχεια, η κάθε μία από τις τιμές της μεταβολής του φορτίου που υπολογίζονται για τη "φέτα", πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή επιτάχυνσης,  $T$ , με τιμή γενικά μεταξύ 1 και 2. Τα αποτελέσματα θεωρούνται τελικές τιμές της μεταβολής του φορτίου στην επανάληψη για την "φέτα". Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι "φέτες" και προς τις τρεις διευθύνσεις, να επεξεργαστούν και να ολοκληρωθούν οι επαναλήψεις στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τελικά, η συνολική ακολουθία επαναλαμβάνεται μέχρι οι διαφορές μεταξύ των μεταβολών φορτίου, οι οποίες υπολογίστηκαν στις επιτυχείς επαναλήψεις, να είναι μικρότερες από το επιλεγμένο κριτήριο σε όλους του κόμβους του πλέγματος.
- Μηχανή επίλυσης WHS. Χρησιμοποιεί την ρουτίνα επιτάχυνσης της σταθερής συζυγούς βαθμίδας (Bi-Conjugate Gradient STABilized, Bi-CGSTAB), η οποία εφαρμόστηκε με την ατελή διάσπαση του Stone, για τις προαπαιτούμενες επιμέρους διαφορικές εξισώσεις της ροής του υπόγειου νερού. Αυτή η μηχανή επίλυσης, όπως και όλες όσες χρησιμοποιούν την μέθοδο των επαναλήψεων, προσεγγίζει την επίλυση μιας μεγάλης ομάδας μερικών διαφορικών εξισώσεων επαναληπτικά, μέσω μιας προσεγγιστικής επίλυσης. Επειδή η μητρική εξίσωση για τη ροή του υπόγειου νερού είναι αρχικά "ανεπαρκούς συνθήκης", είναι αναγκαία για αποτελεσματική επίλυση μια ενεργή προϋπόθεση για αυτές τις εξισώσεις. Στην μηχανή επίλυσης WHS είναι διαθέσιμα δύο "επίπεδα" παραγοντισμού. Ενώ η σύγκλιση της επίλυσης απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις με επίπεδο παραγοντισμού 1, η απαιτούμενη μνήμη για να "τρέχει" (run) η επίλυση αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού. Επίσης, η εργασία ανά επανάληψη αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού 1, τόσο ώστε ο συνολικός χρόνος επίλυσης να μην είναι λιγότερος από αυτόν που απαιτείται για το επίπεδο παραγοντισμού 0. [Visual MODFLOW, 2006 – Τσελέπη, 2009]
- Αλγεβρικές πολυδικτυακές μέθοδοι για συστήματα – Algebraic Multigrid Methods for Systems (SAMG). Το πακέτο αυτό είναι ένα ολοκληρωμένο πολυεπίπεδο εργαλείο, σχεδιασμένο να ξεπεράσει τις μεγάλες ανάγκες σε μνήμη που είχε το προηγούμενο πακέτο AMG, διατηρώντας ωστόσο την

---

επεκτασιμότητα και τους γρήγορους χρόνους εκτέλεσης του προηγούμενου προγράμματος. Το πακέτο SAMG έχει συγκριθεί με το πακέτο PCG2 και αποδείχτηκε πιο γρήγορο κατά 2.4 με 11.3 φορές και υπερσχύει όλων των πακέτων επίλυσης, όταν πρόκειται για προβλήματα με μεγάλο δίκτυο(πάνω από 40.000 κελιά). Γενικά τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων πακέτων είναι: η αποτελεσματικότητα του δεν εξαρτάται από την κατανομή των αρχικών συνθηκών και ο γραμμικός ρυθμός για την σύγκλιση των τιμών.

- Γεωμετρική πολυδικτυακή μηχανή επίλυσης – Geometric Multigrid Solver (GMG). Χρησιμοποιείται σε προβλήματα επίλυσης πεπερασμένων διαφορών και έχει στόχο να μειώσει το χρονικό βήμα επίλυσης σε σχέση με τα άλλα πακέτα επίλυσης

## 5.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι η μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη-head) ή την παράγωγο αυτής (ροή-flux) στα όρια της περιοχής του προβλήματος. Βασική προϋπόθεση για την ορθή κατασκευή του μοντέλου και την επίτευξη όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικής και αξιόπιστης προσομοίωσης της ροής, είναι η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης (steady-state), τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής και η επιλογή τους αποτελεί την πιθανότερη αιτία σφάλματος. Υπάρχουν τρεις τύποι οριακών συνθηκών:

### Συνθήκη 1<sup>ης</sup> τάξης (τύπος Dirichlet)

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος.

### Συνθήκη 2<sup>ης</sup> τάξης (τύπος Neumann)

Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$  η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές. Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου.

### Συνθήκη 3<sup>ης</sup> τάξης (τύπος Cauchy ή μικτού ορίου)

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. [Anderson and Woessner, 1992]

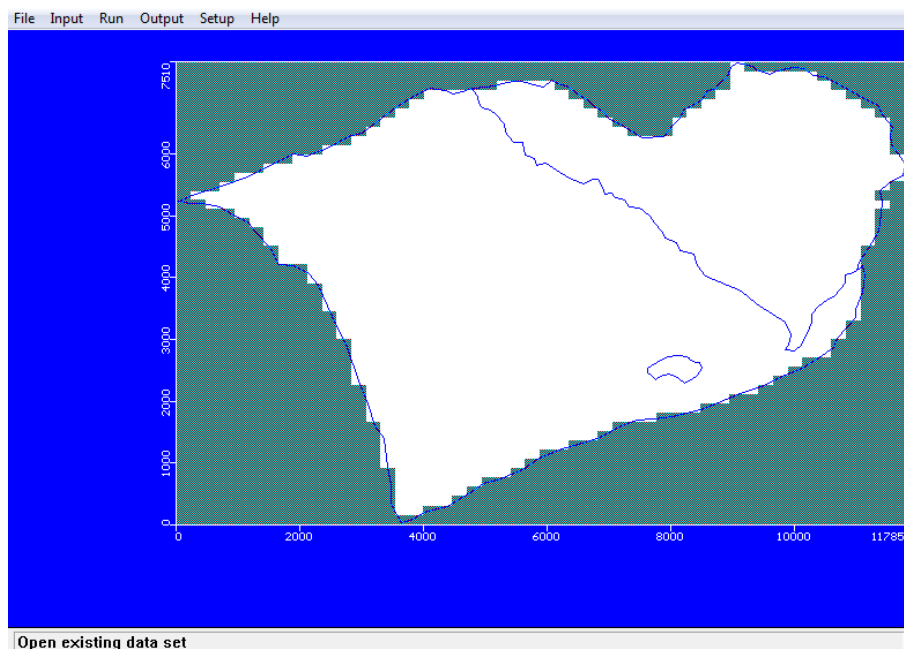
---

## 5.5 Προετοιμασία του μοντέλου

Για τη μελέτη της περιοχής και του μετώπου της υφαλμύρισης θα πρέπει να εισαχθούν τα δεδομένα στο μοντέλο και να αρχίσει η επεξεργασία αυτών. Για την επίλυση του υπάρχοντος προβλήματος, έγιναν δυο εφαρμογές του μοντέλου MODFLOW, μια για το χειμώνα και μια για το καλοκαίρι. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε να δούμε την έκταση του προβλήματος μέσα σε ένα υδρολογικό έτος και την εξάπλωση αυτού από την χειμερινή στην καλοκαιρινή περίοδο. Η χειμερινή περίοδος αναφέρεται από τον Οκτώβριο μέχρι και τον Απρίλιο, ενώ η καλοκαιρινή ξεκινά από τον Μάιο και ολοκληρώνεται στο Σεπτέμβριο. Τα δεδομένα που προέκυψαν από την χειμερινή εφαρμογή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου κατά την καλοκαιρινή περίοδο, η οποία ήταν και η περίοδος άμεσου ενδιαφέροντος. Η χρονική περίοδος εφαρμογής ήταν και για τις δυο περιπτώσεις οι 180 ημέρες και το υδρολογικό έτος που επιλέχθηκε ήταν το έτος 2000-2001, από το οποίο έχουμε και τα δεδομένα αναφοράς.

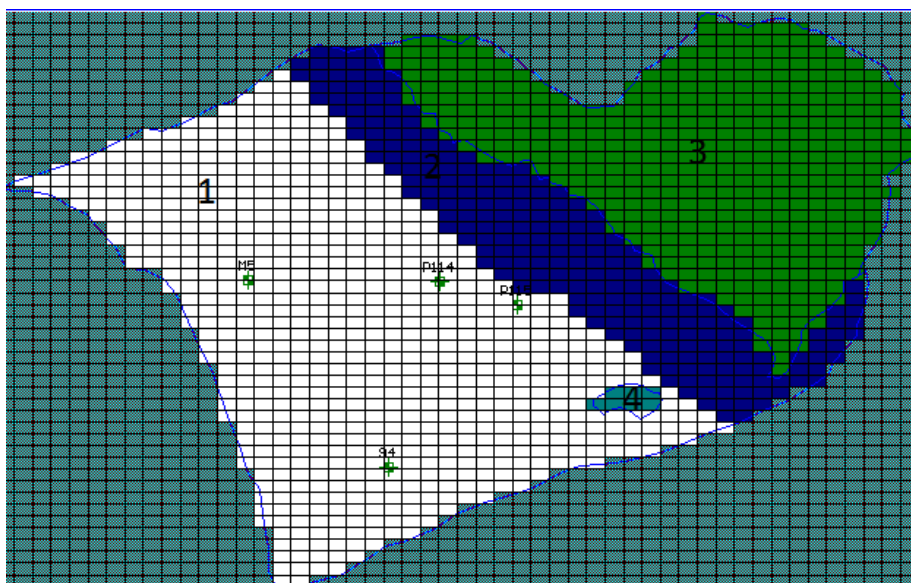
Πρωταρχικό ρόλο για τη σωστή και όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας λύση, είναι η δημιουργία σωστού κάρναβου. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένας κάρναβος διαστάσεων 50x50 με σκοπό τη μελέτη της περιοχής αλλά και τη διεξαγωγή κατάλληλων για επεξεργασία και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης των αντλήσεων θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής.

Στο φύλλο εργασίας, γίνεται εισαγωγή του χάρτη της περιοχής από το περιβάλλον του γρήγορου μενού πρόσβασης. Ο τοπογραφικός χάρτης απεικονίζει τα ακριβή όρια της περιοχής, τα οποία έχουν οριστεί από το περιβάλλον του GIS, έχοντας ορίσει ως σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων του το παγκόσμιο σύστημα. Τα κελιά εντός της περιοχής ενδιαφέροντος είναι ενεργά, ενώ έξω από την περιοχή τα ορίζουμε σαν ανενεργά και δεν δέχονται δεδομένα. Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρία στρώματα και η εισαγωγή του υψόμετρου έγινε μέσω δεδομένων του GIS. Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εισαγωγή του υψόμετρου όσο και για την εισαγωγή της αγωγιμότητας είναι αυτή της αντίστροφης απόστασης (inverse distance), ενώ η επίλυση του μοντέλου έγινε σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής (steady state flow). Προσδιορίστηκε ότι θα προσομοιωθεί ροή υπόγειου νερού σε κορεσμένο πορώδες μέσο στο οποίο η πυκνότητα του νερού θα παραμένει σταθερή και ότι η μεταφορά των ρύπων δεν συμπεριλαμβάνεται στα θέματα που θα εξεταστούν στην παρούσα προσομοίωση. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η περιοχή ενδιαφέροντος στο περιβάλλον εργασίας του μοντέλου MODFLOW.



Σχήμα 5.1. Φύλλο εργασίας MODFLOW

Ακολουθώντας τη γεωλογία της περιοχής, σύμφωνα με το σχήμα 5.2, έγινε η εισαγωγή δεδομένων για την υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών και για τις τρεις κατευθύνσεις x, y, z.



Σχήμα 5.2. Η απεικόνιση των γεωλογικών τμημάτων για την υδραυλική αγωγιμότητα

Τα δεδομένα για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 5.1. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής

| Γεωλογικοί<br>Σχηματισμοί | Υδραυλική<br>Αγωγιμότητα (m/d) |
|---------------------------|--------------------------------|
| Τμήμα 1                   | $5 \cdot 10^{-4}$              |
| Τμήμα 2                   | $8 \cdot 10^{-6}$              |
| Τμήμα 3                   | $5 \cdot 10^{-7}$              |
| Τμήμα 4                   | $10^{-5}$                      |

Ως αρχική κατανομή φορτίων, initial heads, ορίστηκε η τιμή των 4m μέσο υδραυλικό ύψος. Η τιμή αυτή προέκυψε σαν τη μέση τιμή ύψους στάθμης από τα πηγάδια παρατήρησης που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2:

**Πίνακας 5.2. Δεδομένα για τα πηγάδια παρατήρησης [Παρίτσης, 2005].**

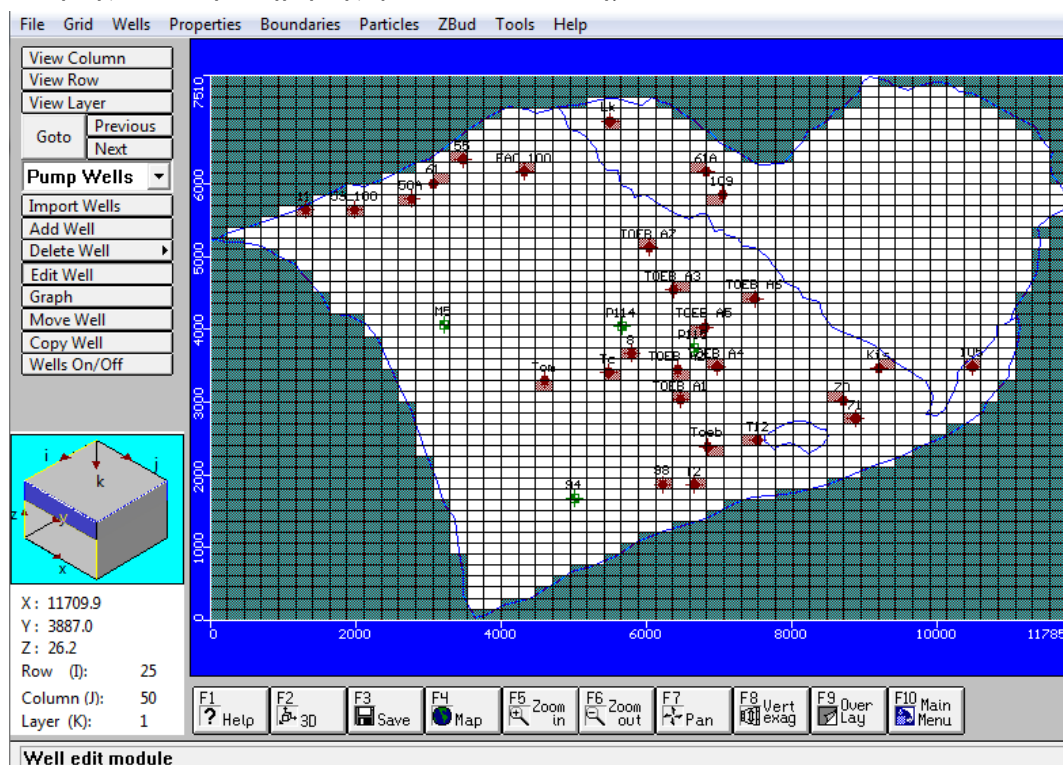
| Πηγάδι Παρατήρησης | Μέσο Ύψος Στάθμης (m) |
|--------------------|-----------------------|
| P115               | 5.62                  |
| M5                 | 0.07                  |
| P114               | 3.54                  |
| T12                | 8.22                  |
| 94                 | 2.51                  |

Στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή των δεδομένων για τα πηγάδια άντλησης. Τα πηγάδια άντλησης, pumping wells, ανάλογα με την αντλητική τους δυναμικότητα μεταβάλλουν τη στάθμη και τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα και για το λόγο αυτό επηρεάζουν τη θέση του μετώπου της υφαλμύρισης. Η λειτουργία τους κρίνεται απαραίτητη κατά την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι, για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών που προκύπτουν, κυρίως λόγω του περιορισμού των βροχοπτώσεων. Τα πηγάδια άντλησης για την περιοχή μελέτης στο σύνολο τους είναι 27 και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3:

**Πίνακας 5.1. Δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης [Παρίτσης, 2005].**

| Πηγάδι Άντλησης | Συντεταγμένες X | Συντεταγμένες Y | Χειμερινή Περίοδος m <sup>3</sup> /d | Καλοκαιρινή Περίοδος m <sup>3</sup> /d |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 11              | 566430          | 3883683         | 112                                  | 488                                    |
| 59_100          | 567110          | 3883683         | 520                                  | 2255                                   |
| 50A             | 567885          | 3883827         | 520                                  | 2255                                   |
| 61              | 568187          | 3884045         | 112                                  | 488                                    |
| 55              | 568601          | 3884369         | 112                                  | 488                                    |
| FAO 100         | 569447          | 3884201         | 112                                  | 400                                    |
| Lk              | 570609          | 3884905         | 112                                  | 300                                    |
| 61A             | 571938          | 3884201         | 180                                  | 430                                    |
| 109             | 572165          | 3883889         | 180                                  | 350                                    |
| TOEB A7         | 571153.3        | 3883154         | 180                                  | 160                                    |
| TOEB A3         | 571492.2        | 3882576         | 520                                  | 180                                    |
| TOEB A6         | 572606.9        | 3882458         | 112                                  | 320                                    |
| TOEB A5         | 571930.2        | 3882064         | 520                                  | 470                                    |
| TOEB A4         | 572096          | 3881516         | 520                                  | 600                                    |
| TOEB A2         | 571542          | 3881477         | 520                                  | 600                                    |
| TOEB A1         | 571595.7        | 3881069         | 520                                  | 500                                    |
| Tc              | 570594          | 3881442         | 180                                  | 2500                                   |
| 8               | 570921          | 3881697         | 180                                  | 3000                                   |
| Tom             | 569728          | 3881331         | 112                                  | 488                                    |
| 98              | 571342          | 3879902         | 281                                  | 2000                                   |
| T2              | 571783          | 3879891         | 180                                  | 780                                    |
| ToeB            | 571961          | 3880425         | 520                                  | 3000                                   |
| T12             | 572644          | 3880501         | 180                                  | 3000                                   |
| 70              | 573826          | 3881042         | 180                                  | 600                                    |
| 71              | 573990          | 3880800         | 180                                  | 780                                    |
| Kis             | 574323          | 3881496         | 180                                  | 700                                    |
| 105             | 575608          | 3881520         | 112                                  | 300                                    |

Και η απεικόνιση στο φύλλο εργασίας μετά την εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης και παρατήρησης φαίνεται στο σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3.Εισαγωγή δεδομένων για τα πηγάδια άντλησης και παρατήρησης

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των δεδομένων για την βροχόπτωση, γνωρίζοντας πως η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης είναι  $474 \frac{mm}{yr}$  [Ζαχαριουδάκης]. Για τη χειμερινή περίοδο θεωρήθηκε το 70% της συνολικής βροχόπτωσης (331.8mm), ενώ για τη θερινή το 30% (142.2mm) αντίστοιχα. Για την εισαγωγή αυτού του μεγέθους στο μοντέλο, έπρεπε να διαιρεθεί η ποσότητα αυτή με τον αριθμό των κελιών που περιλαμβάνονται στην περιοχή ενδιαφέροντος.

$$\text{Χειμερινή περίοδος: } \frac{\text{βροχόπτωση}}{\text{αριθμό κελιών}} = \frac{331.8mm}{5285000} = 0.00006278mm$$

$$\text{Θερινή περίοδος: } \frac{\text{βροχόπτωση}}{\text{αριθμό κελιών}} = \frac{142.2mm}{5285000} = 0.00002691mm$$

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε μεταβάλλοντας, τις πλευρικές εισροές (Συνθήκη 2<sup>ου</sup> είδους) στα σημεία των ορίων της περιοχής, και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με το χάρτη υδραυλικών υψών από προηγούμενη μελέτη για την συγκεκριμένη περιοχή [Παρίτσης, 2005].

Μετά από αρκετές δοκιμές τόσο για την χειμερινή όσο και για τη θερινή περίοδο προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Χειμερινή περίοδος: 5 - 50 - 100 - 140 - 160 - 230 - 160 - 150 - 50 - 30 - 20m/d

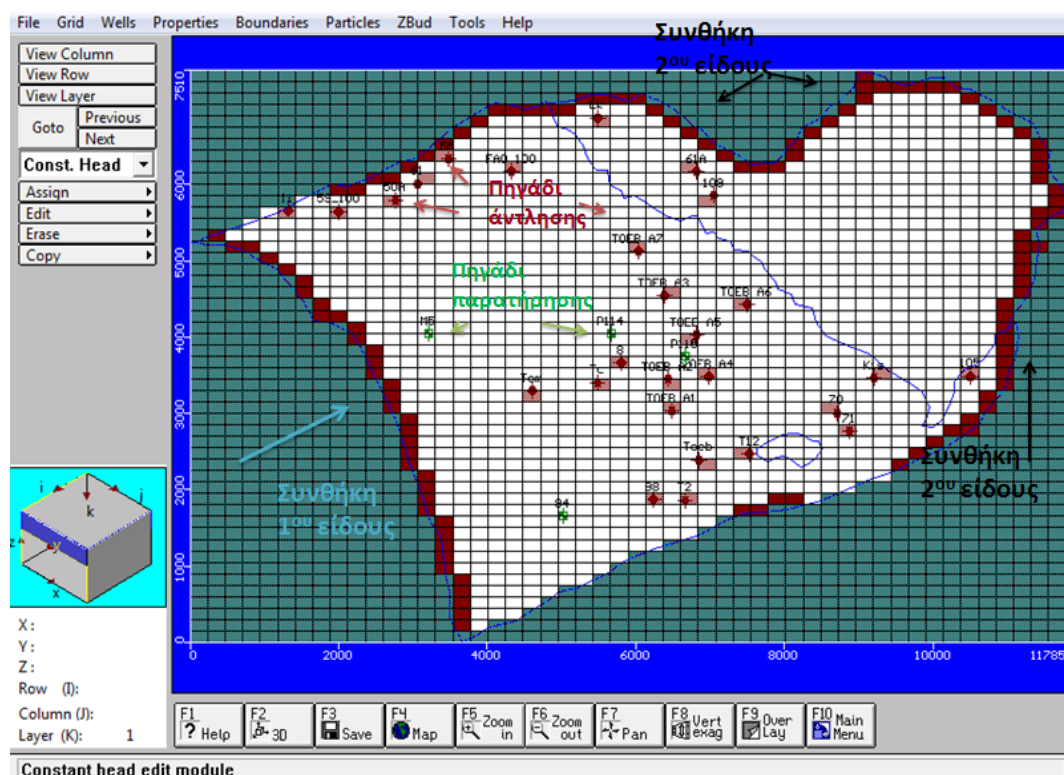
Θερινή περίοδος: 0.5 - 2 - 3.5 - 35 - 90 - 115 - 110 - 200 - 130 - 45 - 20 - 10 m/d

Οι παραπάνω τιμές πολλαπλασιάζονται αυτόματα από το μοντέλο με την επιφάνεια εισροής, ώστε να υπολογίζεται ο σταθερός όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου (σε m<sup>3</sup>/d) που εισέρχεται στους κόμβους, όπου εφαρμόζεται η οριακή αυτή συνθήκη.

Κατά μήκος της ακτογραμμής εισάγεται με την εντολή constant head το υδραυλικό ύψος (Συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους). Κατά τη διάρκεια δηλαδή αυτής της περιόδου στις συγκεκριμένες κυψελίδες, που βρίσκονται κατά μήκος του άνω ορίου της περιοχής, που είναι η θάλασσα, το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό και ίσο με μηδέν.

Τέλος κατά μήκος του ανατολικού τμήματος της περιοχής μελέτης εισάγεται με την εντολή constant head το υδραυλικό ύψος (Συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους). Εισάγεται η τιμή των 11m, σύμφωνα με προηγούμενη μελέτη που έγινε για την περιοχή. [Ζαχαριουδάκης]. Η τιμή αυτή επαληθεύτηκε από τη μέθοδο Dupuit, που εφαρμόστηκε για το συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής.

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής δεδομένων, εμφανίζεται στην οθόνη ό,τι έχει εισαχθεί και το αποτέλεσμα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4. Ολοκλήρωση εισαγωγής υδρολογικών στοιχείων

## 5.6 Αποτελέσματα

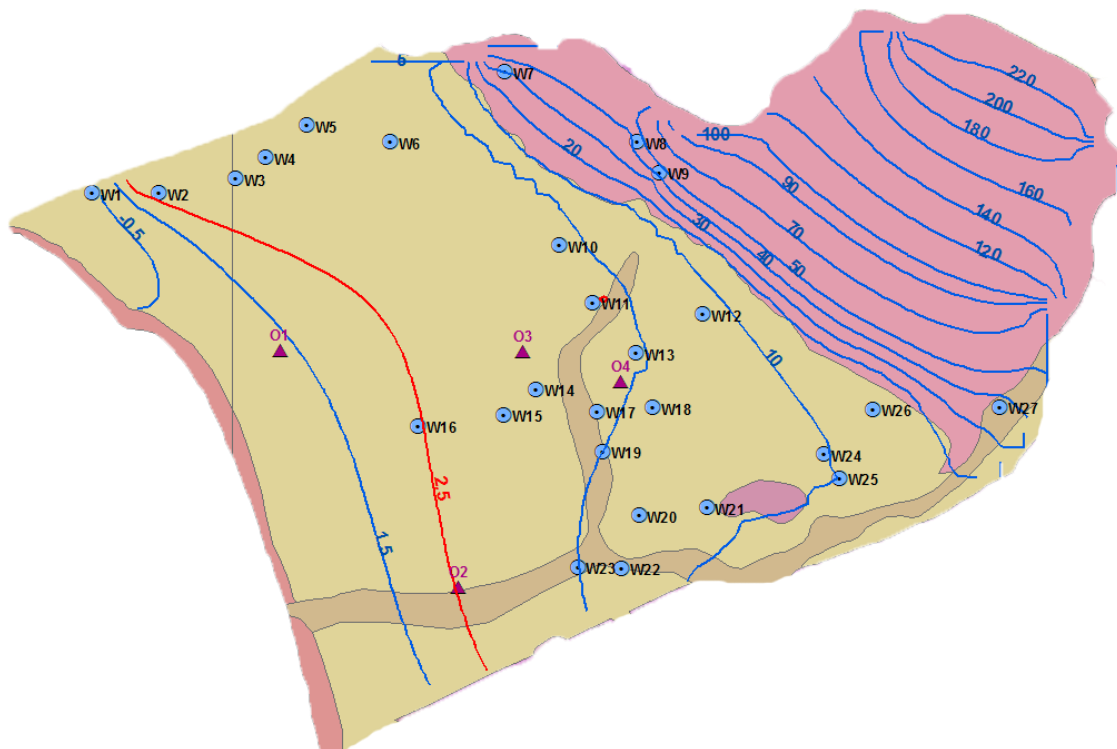
Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων και την επίλυση των εξισώσεων από το μοντέλο, γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Όλα τα αποτελέσματα μπορούν να εξεταστούν για κάθε επίπεδο ξεχωριστά και να εξακριβωθεί το βάθος του προβλήματος της υφαλμύρισης, ανά περίοδο (χειμερινή – θερινή) αλλά και να παρατηρηθούν ταυτόχρονα τα υδραυλικά ύψη που επικρατούν στην περιοχή.

Τα πρώτα αποτελέσματα αφορούν την τωρινή κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή του Τυμπακίου και παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5 και 5.6 Τα αποτελέσματα από τη χειμερινή προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της θερινής περιόδου. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε αυτό, ήταν μέσω της εντολής run→MODFLOW2000→Initial Heads→Previous MODFLOW

run. Έτσι συνδέθηκε η μια περίοδος με την άλλη και οι θερινές συνθήκες ακολούθησαν τις χειμερινές.

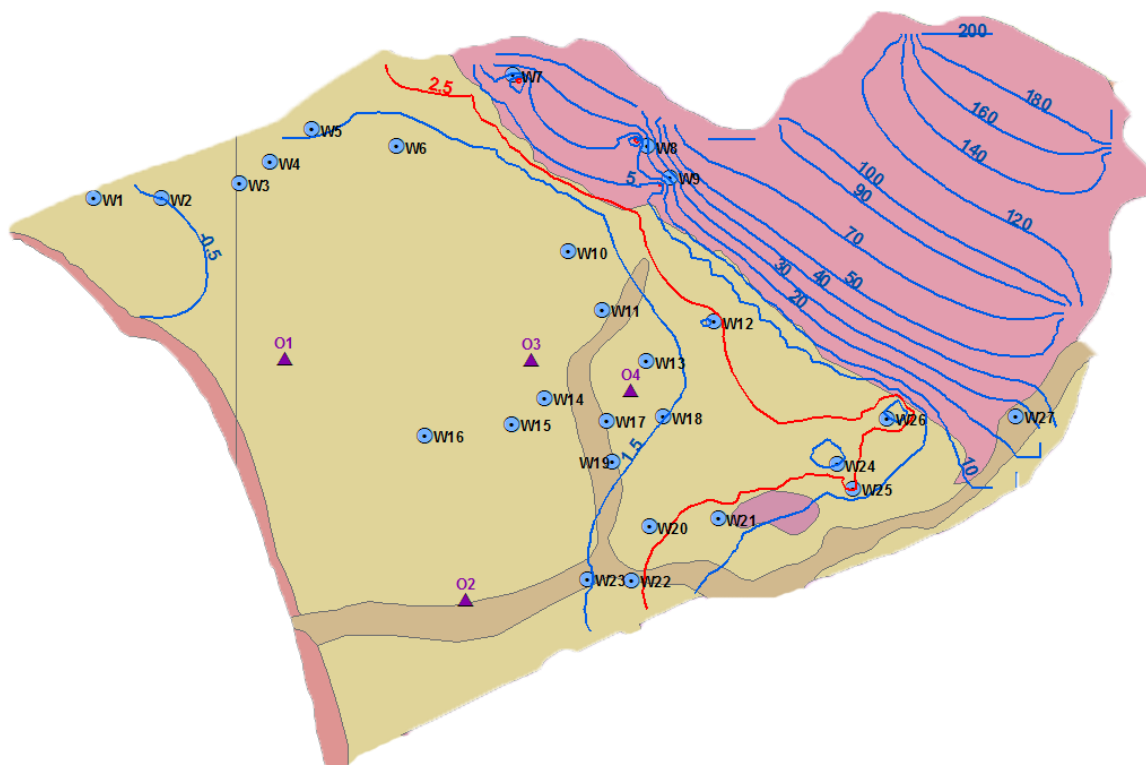
Τα αποτελέσματα αφορούν την υπόγεια ροή και τα υδραυλικά ύψη κατά

- Τη χειμερινή περίοδο



Σχήμα 5.5. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του χειμώνα

- Τη θερινή περίοδο



Σχήμα 5.6. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του καλοκαιριού

Σύμφωνα με την προσέγγιση Ghyben-Herzberg, υπολογίζεται η θέση της απότομης διεπιφάνειας μέσω της εξίσωσης:

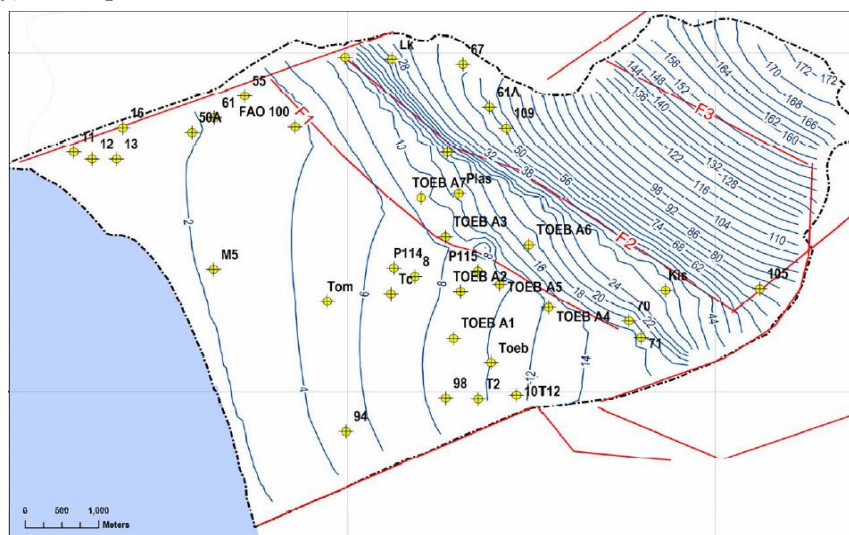
$$h \cong 40z$$

$$100m = 40z \Leftrightarrow z = 2.5m$$

Η ισοϋψής των 2.5 m αποτελεί το όριο εισχώρησης της υφαλμύρισης στη μελέτη αυτή.

Για την χειμερινή περίοδο, η υφαλμύριση εντοπίζεται 2.3 km από την ακτογραμμή με αποτέλεσμα να επηρεάζονται δύο πηγάδια άντλησης. Αντίστοιχα και για τη θερινή περίοδο, όπου το πρόβλημα γίνεται αισθητά εντονότερο, η υφαλμύριση εντοπίζεται 5.8 km από την ακτογραμμή και επηρεάζονται 22 πηγάδια άντλησης, από τα 27 συνολικά της περιοχής ενδιαφέροντος.

Τα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν είναι σύμφωνα με το χάρτη των υδραυλικών υψών, σχήμα 5.7, από προηγούμενη μελέτη για την συγκεκριμένη περιοχή [Παρίτσης, 2005].



Σχήμα 5.7. Αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης [Παρίτσης, 2005]

Οι τιμές που εμφανίζονται είναι από 0 έως 200 m και προσεγγίζουν αρκετά τις τιμές αναφοράς που είναι ήδη γνωστές. Τα αποτελέσματα από τα πηγάδια παρατήρησης που υπάρχουν, συμφωνούν με τις μετρήσεις που έχουν γίνει στο πεδίο για τα συγκεκριμένα πηγάδια. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 που ακολουθεί:

Πίνακας 5.4. Τιμές αναφοράς για τα πηγάδια της περιοχής

| Ονομασία Πηγαδιού | Χειμερινή Περίοδος (m) | Καλοκαιρινή Περίοδος (m) |
|-------------------|------------------------|--------------------------|
| P114              | 3.29                   | -0.31                    |
| 94                | 2.66                   | 0.51                     |
| M5                | 1.17                   | 0.1                      |
| T12               | 6.96                   | 1.56                     |
| 59/100            | 2.72                   | -2.58                    |
| P115              | 6.34                   | 1.29                     |
| 105               | 35.5                   | 25.07                    |
| A1                | 9.3                    | 5.7                      |
| A6                | 7.45                   | 1.45                     |

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Η ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η απόκτηση αξιόπιστων εκτιμήσεων για το κατά πόσο τα υπόγεια ύδατα είναι διαθέσιμα μέσα σε μια περιοχή είναι θεμελιώδους σημασίας για την ορθή διαχείρισή τους. Για το λόγο αυτό η βελτιστοποίηση αποτελεί σημαντικό κομμάτι ενός διαχειριστικού προγράμματος.

Η διαθεσιμότητα των υπόγειων υδάτων είναι μια συνάρτηση του υδροφόρου ορίζοντα και των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του καθώς και των παραγόντων κινδύνου των εμπλεκόμενων φορέων λήψης αποφάσεων. Μια γενική αρχή που πρέπει να τηρείται για την βέλτιστη δυνατή χρήση των υπόγειων υδάτων είναι ότι ο συνολικός όγκος απομάκρυνσης – άντλησης του υπόγειου νερού σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο δεν πρέπει να υπερβαίνει την επαναφόρτιση κατά την ίδια χρονική περίοδο. Ενώ η προσέγγιση αυτή είναι θεωρητικά ελκυστική, θεωρείται όλο και περισσότερο ανεπαρκής, καθώς δεν καλύπτει τις οικολογικές απαιτήσεις για τα υπόγεια ύδατα. Σε ορισμένους άλλους τομείς, οι απαιτήσεις για την ικανοποίηση των αναγκών των κατοίκων σε νερό είναι πολύ μεγαλύτερες και υπερβαίνουν το ρυθμό επαναφόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η εξάντληση των υπόγειων υδάτων είναι δεδομένη.

Η βελτιστοποίηση για την διαχείριση των υδάτων αποτελείται από 3 τμήματα :

- Τους στόχους που θέλουμε να πετύχουμε με την διαχείριση
- Τους περιορισμούς
- Τις μεταβλητές ελέγχου (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση για την τήρηση των περιορισμών)

Σε ένα τέτοιου είδους μοντέλο τα κριτήρια μπορεί να είναι είτε να μεγιστοποιήσουμε μια μεταβλητή ή και να την ελαχιστοποιήσουμε. Ακόμα υπάρχει και η δυνατότητα να γίνουν και τα δύο και τότε έχουμε να κάνουμε με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Ένα παράδειγμα είναι η μεγιστοποίηση της άντλησης για οικονομικούς λόγους και η ελαχιστοποίηση της για την εξασφάλιση της διατήρησης των υπόγειων υδάτων σε επιθυμητά επίπεδα ή ακόμα και για την αποφυγή καθιζήσεων.

Υπάρχουν ωστόσο και κάποιες πιέσεις που καλύπτουν ένα φάσμα θεμάτων:

- Η διασφάλιση ότι δεν προκαλείται διείσδυση αλμυρού νερού κατά μήκος της ακτής
- Η πρόληψη καθιζήσεων
- Η προστασία των ρηχών πηγαδιών από το να στερέψουν
- Η διασφάλιση για τη διατήρηση ρεμάτων και ρυάκια, κυρίως λόγω οικολογικής σημασίας
- Η ισότιμη κατανομή του νερού για χρήση εντός της περιοχής ενδιαφέροντος [Uddameri et al.]

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις με τις οποίες γίνεται η προσομοίωση στα μοντέλα βελτιστοποίησης: της ενσωματωμένης προσέγγισης (embedded approach) και της προσέγγισης μέσω της συνάρτησης απόκρισης (response function approach). Στην πρώτη περίπτωση, ολόκληρο το μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνεται στο πλαίσιο βελτιστοποίησης, ενώ στη δεύτερη η σχέση μεταξύ αυτού που προσομοιώνεται (η άντληση στα πηγάδια) και της αντίδρασης που έχει σε ένα πηγάδι που παρακολουθείται εκφράζεται από μια αλγεβρική σχέση. Η μέθοδος ενσωματωμένης προσέγγισης προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά την αλλαγή στην άντληση και τις θέσεις παρακολούθησης των πηγαδιών. Ωστόσο, η ανάπτυξη των εν λόγω μοντέλων απαιτεί σημαντικές προσπάθειες προγραμματισμού και η ερμηνεία αυτών απαιτεί μεγάλη εμπειρία και γνώση. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση συνάρτησης απόκρισης είναι καταλληλότερη για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας των υπόγειων υδάτων και συχνά χρησιμοποιείται σε μελέτες βελτιστοποίησης των υπόγειων υδάτων. Η αλγεβρική εξίσωση που συνδέει την άντληση των υπογείων υδάτων με την πτώση στάθμης του υδροφορέα είναι γραμμική για περιορισμένους υδροφορείς. Η εξίσωση αυτή περιγράφει την αντίδραση του υδροφορέα που δέχεται πιέσεις από πολλές αντλήσεις και σε διαφορετικά σημεία και ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αυτών αντλήσεων. Επομένως, εάν ο συνολικός αριθμός των νέων πηγαδιών είναι  $N$ , τουλάχιστον  $N + 1$  φορές θα πρέπει να τρέξει το μοντέλο για μια δεδομένη χρονική στιγμή-βήμα. Σε περιπτώσεις όπου η άντληση δεν είναι υπερβολική, η γραμμικότητα της εξίσωσης μπορεί να επεκταθεί και σε υδροφορείς που είναι ελεύθεροι. [Wang and Zheng, 1998; Uddameri et al.]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω η βελτιστοποίηση αποτελεί σημαντικό κομμάτι ενός διαχειριστικού προγράμματος. Ανάλογα, ωστόσο, με τις εξισώσεις που μπορεί να επιλύει και τις περιπτώσεις που μπορεί να συναντά, υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες προγραμματισμού κάθε φορά.

#### Γραμμικός προγραμματισμός

Γραμμικός προγραμματισμός (LP) χρησιμοποιείται για την επίλυση ποσοτικών και ποιοτικών προβλημάτων στα υπόγεια ύδατα με την αντικειμενική συνάρτηση να είναι γραμμική. Η ικανότητα των LP τεχνικών για την επίλυση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων και την διασφάλιση της βέλτιστης συνολικής λύσης έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στον τομέα της διαχείρισης των υπογείων υδάτων.

#### Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός

Ο μεικτός-ακέραιος προγραμματισμός (MIP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και γραμμικούς περιορισμούς, μερικοί από τους οποίους δέχονται μόνο ακέραιες τιμές. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι απαντήσεις του τύπου ναι ή όχι, ή ακόμα και μεταβλητές απόφασης για τον αριθμό των εγκαταστάσεων, κλπ.

#### Μη γραμμικός προγραμματισμός

Σε πολλές περιπτώσεις μοντελοποίησης των υπόγειων υδάτων, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται καθώς επίσης και οι περιορισμοί μπορεί να είναι μη γραμμικοί. Μερικά παραδείγματα αποτελούν: (i) συναρτήσεις κόστους, (ii) μη γραμμικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή ιδιαίτερα για ελεύθερους υδροφορείς, (iii) μη γραμμικές εξισώσεις για τη διαλυμένη ουσία και την μεταφορά στα

υπόγεια ύδατα. Αυτά τα προβλήματα διαχείρισης μη γραμμικών εξισώσεων μπορούν να επιλυθούν με τη βοήθεια μη γραμμικών αλγορίθμων (NLP).

#### Διαφορικός δυναμικός προγραμματισμός

Ο διαφορικός δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων πολυσταδιακής απόφασης. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, η διαδικασία που ακολουθείται είναι να διασπαστεί σε επιμέρους απλά προβλήματα με οποιοδήποτε είδος βελτιστοποίησης. Το πλεονέκτημα της χρήσης του διαφορικού δυναμικού προγραμματισμού είναι ότι μπορεί να ασχοληθεί με διακριτές μεταβλητές, μη κυρτές, μη συνεχής και μη διαφορικές εξισώσεις. [Das and Datta, 2001]

#### Συνδυαστικοί αλγόριθμοι

Στην κατηγορία των συνδυαστικών αλγορίθμων, δύο αλγόριθμοι με ευρεία εφαρμογή στα υπόγεια ύδατα, ο γενετικός αλγόριθμος (GA) και ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (SA). Ο γενετικός αλγόριθμος μιμείται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της φυσικής επιλογής και της φυσική γενετική προκειμένου να βρει βέλτιστες λύσεις σε ένα χώρο αναζήτησης. Ο γενετικός αλγόριθμος λειτουργεί σε ένα πληθυσμό από σύνολα μεταβλητών απόφασης. Τρεις γενετικές δραστηριότητες, της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, εφαρμόζονται για να επιτύχει μια βέλτιστη λύση. Σε αυτού του είδους τη βελτιστοποίηση, τα σωματίδια ψάχνουν στο χώρο που ορίζεται από το πρόβλημα για την καλύτερη λύση, ακολουθώντας το μέχρι εκείνη τη στιγμή καλύτερο σωματίδιο. Κάθε σωματίδιο απομνημονεύει την καλύτερη του θέση και την αντίστοιχη καλύτερη λύση που έχει επιτύχει, ενώ σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου η ταχύτητα και η θέση των σωματιδίων μεταβάλλονται ανάλογα με την καλύτερη θέση του καλύτερου σωματιδίου, την καλύτερη θέση του εαυτού τους και την τρέχουσα ταχύτητα ή θέση τους. Ο δεύτερος αλγόριθμος αποτελείται από πέντε κύρια βήματα: : (1) εκπροσώπηση του πιθανού συστήματος διαμόρφωσης σε συνοπτική μορφή, (2) συγκεκριμενοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, (3) αναδιάταξη του συστήματος, (4) παράμετροι ελέγχου και χρονοδιάγραμμα ανόπτησης και (5) τα κριτήρια για τον τερματισμό του αλγορίθμου. [Das and Datta, 2001]

#### Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν ένα μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης, ενώ σχεδιάστηκαν για να μιμούνται τη διαδικασία μάθησης του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ένα τυπικό δίκτυο αποτελείται από μια σειρά κόμβων που συνδέονται μεταξύ τους με τα αντίστοιχα συναπτικά βάρη. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η εξαγωγή μιας σχέσης μεταξύ των τιμών εισόδου και εξόδου. Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης τα βάρη του δικτύου προσαρμόζονται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό σφάλμα. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου γίνεται με τροφοδότηση στο δίκτυο ζευγών τιμών εισόδου και των αντίστοιχων τιμών εξόδου. Στη συνέχεια το εκπαιδευμένο δίκτυο δοκιμάζεται για την επαλήθευση της απόδοσης του.

Η βελτιστοποίηση με χρήση σμήνους σημείων είναι ένας σχετικά νέος εξελικτικός αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιείται για να βρεθούν βέλτιστες λύσεις σε αριθμητικά και ποσοτικά προβλήματα.

### Ενσωμάτωση των αβεβαιοτήτων στη διαχείριση υπόγειων υδάτων

Τα αίτια της αβεβαιότητας όσον αφορά τη διαχείριση των υπογείων υδάτων είναι (i) η έλλειψη τέλει γνώσης σχετικά με το σύστημα του υδροφορέα, (ii) η ίδια η μεταβλητότητα των παραμέτρων του συστήματος, της ροής και μεταφοράς χαρακτηριστικών, και (iii) άλλοι παράγοντες όπως το κόστος. Πολλοί ερευνητές μελέτησαν την επίδραση της αβεβαιότητας στη διαχείριση των υπογείων υδάτων. Μία παραδοσιακή προσέγγιση για την ανάλυση της αβεβαιότητας στα μοντέλα βελτιστοποίησης είναι η ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό της επίδρασης μικρών αλλαγών στα δεδομένα του μοντέλου. [Das and Datta, 2001]

Ωστόσο τα προβλήματα βελτιστοποίησης χαρακτηρίζονται συνήθως ως μη γραμμικά ή σχεδόν μη γραμμικά. Στην πλειοψηφία των προβλημάτων η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ή/και οι συναρτήσεις των περιορισμών (constraints) έχουν μη γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τις μεταβλητές απόφασης (decision variables). Τις περισσότερες φορές, κυρίως σε ελεύθερους υδροφορείς, αυτό συμβαίνει λόγω της μη γραμμικής μεταβολής του υδραυλικού ύψους συναρτήσει της παροχής άντλησης. Μια φυσική ερμηνεία αυτής της μη γραμμικότητας μπορεί να επιτευχθεί θεωρώντας ότι η επίλυση του προβλήματος απαιτεί την αλληλεπίδραση του υδραυλικού ύψους και των ορίων του όγκου ελέγχου. Σε προβλήματα τριών διαστάσεων επιτυγχάνεται με τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας, ενώ σε προβλήματα δυο διαστάσεων, με το πάχος του υδροφορέα. Ακόμα και αν τα ύψη εμφανίζονται σε γραμμικές εξισώσεις, η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί που εμπεριέχουν τα ύψη αυτά μεταβάλλονται μη γραμμικά συναρτήσει της παροχής άντλησης. Η μαθηματική σχέση που συνδέει το υδραυλικό ύψος  $h$  σε ένα σημείο με την παροχή άντλησης  $Q$ , την απόσταση του πηγαδιού από το σημείο αυτό  $r$ , το μέγιστο υδραυλικό ύψος  $H$  και την αντίστοιχη απόσταση από το πηγάδι  $R$  είναι η εξής :

$$h^2 = H^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi K} Q$$

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται Dupuit – Forchheimer και αναφέρεται σε ακτινική ροή του ύδατος σε ένα πηγάδι μεγάλου βάθους διείσδυσης σε ομογενή ελεύθερο υδροφορέα. Ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει και η δεύτερη παράγωγος

$$\frac{\partial^2 h}{\partial Q^2} = -\frac{1}{4} \left( \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi K} \right)^2 \left[ H^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi K} Q \right]^{-\frac{3}{2}}$$

Η δεύτερη παράγωγος είναι αρνητική, που σημαίνει ότι το υδραυλικό ύψος είναι κοίλη συνάρτηση της παροχής άντλησης. Μια φυσική ερμηνεία του παραπάνω μπορεί να δοθεί δεδομένου ότι η αύξηση στους ρυθμούς άντλησης προκαλεί αύξηση στην κλίση της καμπύλης της πτώσης στάθμης και ταυτόχρονα μείωση στη διατομή της κορεσμένης επιφάνειας μέσα από την οποία πραγματοποιείται η ροή.

Η έννοια της κυρτότητας επηρεάζει άμεσα και τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η κυρτότητα της συνάρτησης αποτελεί ένδειξη της πιθανότητας τοπικών ελαχίστων, δεδομένου ότι για μια κυρτή συνάρτηση με ένα ελάχιστο, αυτό θα είναι ταυτόχρονα και τοπικό και ολικό (χωρίς όμως να ισχύει και το

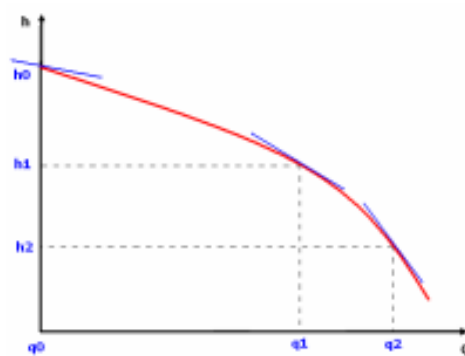
αντίστροφο). Οι αλγόριθμοι που επιλύουν μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης βασίζονται στην αναζήτηση ελαχίστων για τα οποία όμως δεν μπορούν με σαφήνεια να αποφανθούν αν είναι τοπικά ή ολικά. [Ahlfeld και Mulligan, 2000]

### 6.1 Προσέγγιση μη γραμμικών προβλημάτων

Η πολυπλοκότητα των μη γραμμικών προβλημάτων, εμποδίζει την ανάπτυξη μιας διαδεδομένης μεθόδου επίλυσης. Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου πρέπει να γίνεται αφού μελετηθεί σε βάθος η λύση του εκάστοτε προβλήματος. Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση προβλημάτων μη γραμμικής φύσεως είναι οι παρακάτω:

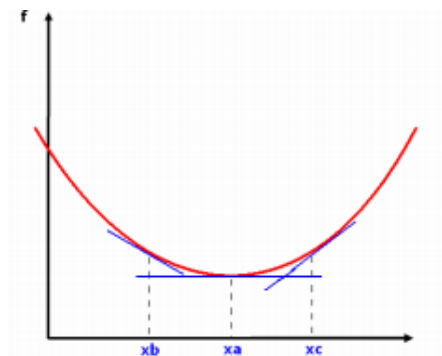
- Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης
- Μέθοδοι που χρησιμοποιούν την κλίση της συνάρτησης
- Μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν την κλίση της συνάρτησης

Η πρώτη τεχνική – μέθοδος είναι η μέθοδος της διαδοχικής γραμμικοποίησης. Εφαρμόζεται όταν το πρόβλημα είναι μη γραμμικό λόγω του υδραυλικού ύψους σε ελεύθερο υδροφορέα, αλλά όλες οι άλλες παράμετροι του προβλήματος είναι γραμμικές. Υπό αυτές τις συνθήκες ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τη μικρή μη γραμμικότητα του υδραυλικού ύψους συναρτήσει της παροχής άντλησης και λύνει το πρόβλημα εφαρμόζοντας διαδοχικά γραμμικές μεθόδους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1. Σε κάθε γραμμικό βήμα, δημιουργείται ένας πίνακας απόκρισης (response matrix) με το πάχος του υδροφορέα και τα όρια του όγκου ελέγχου. Ο υδροφορέας αντιμετωπίζεται σαν περιορισμένος και με δεδομένες τις παροχές άντλησης και λαμβάνοντας υπ' όψη τους περιορισμούς, προκύπτουν τα υδραυλικά ύψη. Στη συνέχεια τα νέα υδραυλικά ύψη εισάγονται στο πρόβλημα για να προκύψουν τα νέα όρια του όγκου ελέγχου και να κατασκευαστεί ο νέος πίνακας απόκρισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές που υπολογίζονται. [Ahlfeld και Mulligan, 2000]



Σχήμα 6.1. Η προσέγγιση της καμπύλης υδραυλικού ύψους – παροχής άντλησης από τον αλγόριθμο της διαδοχικής γραμμικοποίησης [Ahlfeld και Mulligan, 2000]

Στη συνέχεια ακολουθούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν την κλίση. Για την κατανόηση αυτών των μεθόδων είναι απαραίτητη η απεικόνιση της συνάρτησης της παραγώγου, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.2. Η γνώση της παραγώγου της συνάρτησης σε διάφορα σημεία μπορεί να καθοδηγήσει την έρευνα για την εύρεση του ακροτάτου [Ahlfeld και Mulligan, 2000]

Από το σχήμα 6.2, παρατηρείται ότι η παραπάνω συνάρτηση παρουσιάζει ελάχιστο στο σημείο  $x_a$ , όπου και η παράγωγος είναι μηδέν. Στο σημείο  $x_b$  η παράγωγος είναι διάφορη του μηδενός, με αρνητικό πρόσημο της κλίσης οπότε και το ελάχιστο θα βρίσκεται κάπου προς τα δεξιά του σημείου  $x_b$  (δηλαδή προς την κατεύθυνση που η συνάρτηση μειώνεται). Ομοίως η μη μηδενική, θετική τιμή της κλίσης στο σημείο  $x_c$  δείχνει αφενός ότι το σημείο δεν είναι το ελάχιστο και αφετέρου ότι το ελάχιστο θα πρέπει να αναζητηθεί στην περιοχή αριστερά του  $x_c$ . Η παράγωγος μιας συνάρτησης μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη θέση του ελαχίστου. Ακολουθούν οι τρεις βασικές κατηγορίες της μεθόδου:

- Προβλήματα χωρίς περιορισμούς, όπου η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται χωρίς περιορισμούς.
- Μη γραμμικά προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς, όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη γραμμική αλλά οι περιορισμοί γραμμικοί.
- Προβλήματα με μη γραμμικούς περιορισμούς, όπου η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη και οι περιορισμοί μη γραμμικοί.

Ακολουθούν οι μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν την κλίση. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται έχουν τη δυνατότητα να αποφεύγουν αποτελεσματικά τα τοπικά ακρότατα, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν απόλυτες αποδείξεις ότι τελικά εντοπίζουν τα ολικά ακρότατα. Απαιτούν αρκετά υψηλή υπολογιστική ισχύ και εφαρμόζονται καλύτερα σε προβλήματα μικρής έκτασης. Στόχος της μεθόδου ολικής βελτιστοποίησης είναι ο συνδυασμός τεχνικών αναζήτησης ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος και ταυτόχρονα να γίνει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τους. Βρίσκουν συνήθως εφαρμογή σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης όπου οι κλασικές μέθοδοι αποτυγχάνουν. [Ahlfeld και Mulligan, 2000]

## 6.2 Προσέγγιση γραμμικών προβλημάτων

Σε ένα μονοκριτήριο γραμμικό πρόβλημα επιλύεται η γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και ζητείται να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών ( $x_1, x_2, \dots, x_l$ ) που τη βελτιστοποιούν, στο πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης:

$$g(x) = z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_lx_l$$

s. t.

$$a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \dots + a_{1l}x_{1l} \leq b_1$$

$$a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \dots + a_{2l}x_{2l} \leq b_2$$

$$a_{m1}x_{m1} + a_{m2}x_{m2} + \dots + a_{ml}x_{ml} \leq b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_l \geq 0$$

όπου  $i = 1, 2, \dots, m$  και  $j = 1, 2, \dots, l$

Στο παραπάνω πρόβλημα η ανισότητες μπορούν να είναι ισότητες ή και ανισότητες αντίθετης φοράς.

Οι προϋποθέσεις ωστόσο, για τις οποίες ένα κλασικό μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να επιλύσει ένα αντίστοιχο γραμμικό πρόβλημα είναι:

- Γραμμικότητα: κάθε μέρος του προβλήματος, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω να είναι γραμμικό (αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί) συνάρτηση του αιτίου  $x_j$  που το προκαλεί.
- Διαιρετότητα: οι μεταβλητές απόφασης  $x_j$  μπορούν να διαιρεθούν άπειρα (π.χ. εκφράζονται σε μονάδες μήκους, βάρους κ.λπ.).
- Βεβαιότητα: τα δεδομένα του προβλήματος, τα αριθμητικά στοιχεία δηλαδή των μητρών  $a, b, c$ , είναι γνωστά με απόλυτη βεβαιότητα. Διαφορετικά πρόκειται για στοχαστικό προγραμματισμό.
- Μονοδιάσταση: η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να είναι μια και μοναδική (μονοδιάστατος ή μονοκριτηριακός γραμμικός προγραμματισμός). Σε αντίθετη περίπτωση, πρόκειται για πολυκριτηριακό γραμμικό προγραμματισμό.

## 6.3 Η χρήση της μεθόδου Simplex

Εάν το πρόβλημα της διαχείρισης του υπόγειου νερού είναι γραμμικό, τότε υπάρχει μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επίλυσης, η μέθοδος simplex. Πρόκειται για μια ταχεία και αποτελεσματική μέθοδο προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης ενός γραμμικού προβλήματος. Ο τρόπος επίλυσης της στηρίζεται στις κορυφές ενός υπερπολυέδρου  $A$ , όπου περιλαμβάνονται οι λύσεις του γραμμικού προβλήματος, βελτιώνοντας ωστόσο σε κάθε βήμα (από κορυφή σε κορυφή) την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $z$ . Επειδή το υπερπολύεδρο  $A$  είναι ένα κυρτό σύνολο, αυτή η περιήγηση θα σταματήσει όταν βρεθεί μια βέλτιστη λύση, η οποία αντιπροσωπεύεται από μια κορυφή πέραν της οποίας δεν υπάρχει άλλη βελτίωση. Κάθε κορυφή καθώς και αλλαγή κορυφής του υπερπολυέδρου  $A$  υπολογίζεται αλγεβρικά. Κάθε αλλαγή κορυφής καθοδηγείται από δυο κριτήρια: τη βελτίωση της τιμής της  $z$  και την επιβεβαίωση της κατάληξης σε νέα κορυφή. Είναι όμως δυνατό, ο αλγόριθμος αυτός να μην οδηγήσει σε βέλτιστη λύση αλλά σε μια ειδική περίπτωση. Κάτι τέτοιο όμως προσδιορίζεται πάλι με αλγεβρικό

τύπο. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Simplex, πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c^t x \\ \text{υ. π. } & Ax = b, \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

Για το σκοπό αυτό εισάγεται για κάθε ανισοεξίσωση, που μπορεί να υπάρχει μια θετική μεταβλητή απόκλισης (slack variable), προστιθέμενη όταν ο περιορισμός είναι του τύπου  $\leq$  ή αφαιρούμενη όταν ο περιορισμός είναι του τύπου  $\geq$ . Οι νέες αυτές μεταβλητές έχουν μηδενικό συντελεστή στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι μεταβλητές απόκλισης των περιορισμών  $1, 2, \dots, m$  συμβολίζονται αντίστοιχα με  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$  όπου υπάρχουν.

Το νέο γραμμικό πρόβλημα είναι ισοδύναμο με το αρχικό, από την άποψη ότι υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των λύσεων των δύο επιμέρους γραμμικών προβλημάτων.

Ακολουθούν οι κανόνες τις μεθόδου Simplex

- Κριτήριο εισόδου στη βάση: Επιλέγεται η μη-βασική μεταβλητή που θα αυξήσει περισσότερο την αντικειμενική συνάρτηση. Είναι αυτή που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή (ή μικρότερο αρνητικό στον πίνακα).
- Κριτήριο εξόδου από τη βάση: Επιλέγεται η βασική μεταβλητή που περιορίζει περισσότερο τη μη-βασική μεταβλητή που επιλέχθηκε. Η εξερχόμενη μεταβλητή είναι αυτή που έχει τον μικρότερο θετικό όρο.
- Κριτήριο Τερματισμού διαδικασίας: Όλα τα στοιχεία της γραμμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι θετικά ή μηδέν.

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποιοι γενικοί ορισμοί και το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου Simplex.

**Λύση**  $x \in \mathbb{R}$  ονομάζεται κάθε διάνυσμα που επαληθεύει τη σχέση του γραμμικού προγραμματισμού.

**Δυνατή λύση** λέγεται κάθε λύση που ικανοποιεί τις σχέσεις του γραμμικού προγραμματισμού.

**Βάση** λέγεται μια τετραγωνική μήτρα  $B$ , που προκύπτει από τη μήτρα  $A$ , και αποτελείται από γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα της  $A$ . Οι μεταβλητές που στοιχειοθετούν τη βάση λέγονται βασικές μεταβλητές, ενώ οι υπόλοιπες μη βασικές.

**Βασική δυνατή λύση** ενός συστήματος γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων ως προς μια βάση  $B$ , λέγεται μια δυνατή λύση η οποία έχει το πολύ όλες τις βασικές μεταβλητές (ως προς  $B$ ) θετικές και όλες ανεξάρτητα τις μη βασικές μηδέν. Εάν έχει και ορισμένες από τις βασικές μεταβλητές μηδέν, η λύση λέγεται εκφυλισμένη βασική δυνατή λύση.

Το σύνολο των επόμενων ιδιοτήτων των λύσεων επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση των κορυφών του υπερπολυέδρου των δυνατών λύσεων ενός γραμμικού προβλήματος με αλγεβρικό τρόπο και την κατεύθυνση προς τη βέλτιστη λύση.

1. Ο αριθμός των βασικών δυνατών λύσεων ενός γραμμικού προβλήματος που ικανοποιεί τις προαναφερόμενες προϋποθέσεις, είναι πεπερασμένος.
2. Το σύνολο των δυνατών λύσεων είναι κυρτό (υπερπολύεδρο).

- 
3. Κάθε βασική δυνατή λύση του γραμμικού προβλήματος είναι ένα ακραίο σημείο του κυρτού συνόλου (κορυφή του πολυγώνου) των εφικτών λύσεων, και κάθε ακραίο σημείο του κυρτού συνόλου είναι μια βασική δυνατή λύση του συστήματος των περιορισμών.
  4. Εάν υπάρχει μια δυνατή λύση τότε υπάρχει και μια βασική δυνατή λύση.
  5. Εάν υπάρχει μια βέλτιστη δυνατή λύση, τότε η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη βέλτιστη τιμή της σε ένα τουλάχιστον ακραίο σημείο του κυρτού συνόλου των δυνατών λύσεων (κορυφή ή ακμή ή πλευρά του υπερπολυέδρου), δηλαδή σε μια βασική δυνατή λύση.
  6. Εάν υπάρχει τουλάχιστον μια βέλτιστη εφικτή λύση, που δεν είναι βασική, τότε υπάρχουν άπειρες βέλτιστες δυνατές λύσεις.
- [Ahlfeld και Mulligan, 2000]

#### 6.4 Το μοντέλο GWM (Ground - Water Management)

Ένα από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων, είναι το μοντέλο GWM (Ground Water Management). Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το μοντέλο MODFLOW και επιλύει προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων με τη μέθοδο του πίνακα απόκρισης (response matrix). Τα προβλήματα αυτά μπορεί να είναι γραμμικά, μη γραμμικά ή ακόμα και μικτά δυαδικά. Ο πίνακας απόκρισης χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό ενός προβλήματος διαχείρισης της υπόγειας ροής σε μορφή κατάλληλη για τη βελτιστοποίηση, έτσι ώστε να μπορεί να επιλυθεί από το GWM. Κάθε διατύπωση προβλήματος αποτελείται από ένα σύνολο από μεταβλητές απόφασης, μια αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο από περιορισμούς. Ξεκινώντας από το σύνολο των μεταβλητών απόφασης, εντοπίζονται τα παρακάτω τρία είδη:

- Μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής (flow-rate decision variables)

Αντιπροσωπεύουν την άντληση ή τον εμπλουτισμό στα πηγάδια που βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης και βρίσκονται στα κελιά του κάναβου βάσει του οποίου προσομοιώθηκε η περιοχή. Όλες οι τιμές των παροχών ( $Q_{wn}$ ) παραμένουν σταθερές για κάθε χρονική περίοδο που εξετάζεται, ενώ το πρόσημο τους είναι μόνο θετικό. Για το διαχωρισμό της περίπτωσης άντλησης ή εμπλουτισμού, το μοντέλο αποδίδει με εσωτερική διαδικασία το ανάλογο πρόσημο κατά περίπτωση. Για κάθε μια περίπτωση, άντλησης ή εμπλουτισμού, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια μεταβλητή απόφασης ρυθμού ροής. Ωστόσο σε ένα πηγάδι μπορούν να οριστούν πάνω από μια τέτοιες μεταβλητές για τις διάφορες περιόδους.

- Εξωτερικές μεταβλητές απόφασης (external decision variables)

Αντιπροσωπεύουν πηγές ή δεξαμενές νερού που βρίσκονται εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης που προσομοιώνεται. Για το λόγο αυτό, δεν έχουν άμεση επίδραση στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος ροής του υπόγειου ύδατος. Το πρόσημο τους είναι μόνο θετικό, τόσο για τιμές της πηγής όσο και για της δεξαμενής νερού.

- Δυναδικές παράμετροι (binary variables)

Μια ή περισσότερες εξωτερικές μεταβλητές απόφασης ή ρυθμού ροής, ή και συνδυασμός αυτών, μπορούν να συσχετισθούν με μια μόνο δυαδική παράμετρο. Οι δυαδικές παράμετροι συμβολίζονται με  $I_l$  και δέχονται την τιμή 0 ή 1. Για τιμές  $I_l = 0$  τουλάχιστον μια από τις μεταβλητές απόφασης είναι ανενεργή, ενώ για τιμές  $I_l = 1$ , οι μεταβλητές θεωρούνται ενεργές. Οι δυαδικές παράμετροι μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική επιβάρυνση κατά τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος με το μοντέλο GWM και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή όταν υπάρχουν μη γραμμικά στοιχεία στο πρόβλημα.

#### 6.4.1. Η Αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί

Κάθε διατύπωση του προβλήματος αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση. Το πρόβλημα μπορεί να είναι μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης και μια τυπική μορφή της συνάρτησης ακολουθεί:

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Q_{W_n} T_{Q_{W_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m E x_m T_{E x_m} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l$$

Όπου,

$Q_{W_n}$  = οι τιμές των παροχών

$E x_m$  = οι εξωτερικές μεταβλητές

$I_l$  = οι δυαδικές παράμετροι  $\beta_n$  = το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που αντλείται ή εμπλουτίζεται σε ένα πηγάδι n

$\gamma_m$  = το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται στο σύστημα από εξωτερική πηγή m

$\kappa_l$  = το κόστος ή το όφελος που σχετίζεται με τις δυαδικές μεταβλητές

$T_{Q_{W_n}}$  = Η συνολική διάρκεια άντλησης σε ένα πηγάδι n

$T_{E x_m}$  = Η συνολική διάρκεια ροής από μια εξωτερική πηγή m

$N, M, L$  = Ο συνολικός αριθμός εξωτερικών μεταβλητών απόφασης, μεταβλητών ρυθμού άντλησης και δυαδικών μεταβλητών

Τα  $T_{Q_{W_n}}$  και  $T_{E x_m}$  υπολογίζονται από το GWM, αθροίζοντας τη διάρκεια όλων των περιόδων κατά τη διάρκεια της οποίας η n-οστή ή m-οστή μεταβλητή απόφασης είναι ενεργή. Η εξίσωση αποτελείται από το σταθμισμένο άθροισμα των τριών τύπων των μεταβλητών απόφασης. Ο πρώτος όρος στην εξίσωση είναι το κόστος (ή όφελος) από την άντληση ή τον εμπλουτισμό νερού στις μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής, ο δεύτερος όρος είναι το κόστος (ή όφελος) από την εισαγωγή ή εξαγωγή του νερού στις εξωτερικές μεταβλητές, και ο τρίτος όρος είναι το κόστος (ή όφελος) καθιστώντας τις μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής ή τις εξωτερικές μεταβλητές ικανές να συνδέονται με κάθε δυαδική παράμετρο που είναι ενεργή. Οι συντελεστές  $\beta_n$  και  $\gamma_m$  στους δύο πρώτους όρους της εξίσωσης υποδηλώνουν ότι το κόστος ή το όφελος του νερού είναι γραμμικά ανάλογο του όγκου του νερού που αντλείται, εμπλουτίζεται, εισέρχεται ή εξέρχεται. Μπορούν να θεωρηθούν ως σχετικά κόστη και οφέλη μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών ρυθμών άντλησης και εξωτερικών μεταβλητών.

Στην περίπτωση μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, μέσω των  $n$  πηγαδιών άντλησης, οι συντελεστές  $\beta_n$  είναι αδιάστατοι και παίρνουν την τιμή 1. Έτσι η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\text{maximize} \sum_{n=1}^N Qw_n T_{Qw_n}$$

Και η αντικειμενική τιμή που προκύπτει είναι σε όρους όγκου νερού που συνολικά αντλείται.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα είδη του συνόλου των περιορισμών:

1. Περιορισμοί μεταβλητών απόφασης - Decision-Variable Constraints
2. Τα γραμμικά αθροίσματα των τριών ειδών των μεταβλητών απόφασης - Linear-Summation Constraints
3. Περιορισμοί για το υδραυλικό ύψος - Hydraulic-Head Constraints
4. Περιορισμοί για τα υδατορεύματα

1. Οι περιορισμοί μεταβλητών απόφασης περιλαμβάνουν τα ανώτερα και κατώτερα όρια για τις μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής ή τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν το ρυθμό άντλησης ή εμπλουτισμού ενός πηγαδιού καθώς και τη χωρητικότητα μιας εξωτερικής πηγής ή δεξαμενής νερού. Η μαθηματική έκφραση των ανώτερων και κατώτερων ορίων είναι:

$$\begin{aligned} Qw_n^l &\leq Qw_n \leq Qw_n^u \\ Ex_m^l &\leq Ex_m \leq Ex_m^u \end{aligned}$$

όπου  $Qw_n^l$ : το κατώτερο όριο της μεταβλητής απόφασης ρυθμού άντλησης  $n$

$Qw_n^u$ : το ανώτερο όριο της μεταβλητής απόφασης ρυθμού άντλησης  $n$

$Ex_m^l$ : το κατώτερο όριο της εξωτερικής μεταβλητής απόφασης  $m$

$Ex_m^u$ : το ανώτερο όριο της εξωτερικής μεταβλητής απόφασης  $m$

Το μοντέλο GWM προϋποθέτει τα  $Qw_n^l$ ,  $Qw_n^u$  και τα  $Ex_m^l$ ,  $Ex_m^u$  να είναι μεγαλύτερα ή ίσα του μηδέν, αλλά και να ισχύει ότι  $Qw_n^l \leq Qw_n^u$  και  $Ex_m^l \leq Ex_m^u$ . Εάν μια μεταβλητή απόφασης ρυθμού άντλησης ή μια εξωτερική μεταβλητή δεν έχει συσχετισθεί με μια δυαδική μεταβλητή στο GWM, το κατώτερο όριο για κάθε μια μεταβλητή  $Qw_n^l$  και  $Ex_m^l$  πρέπει να οριστεί το μηδέν. Έτσι προκύπτει:

$$\begin{aligned} 0 &\leq Qw_n \leq Qw_n^u \\ 0 &\leq Ex_m \leq Ex_m^u \end{aligned}$$

Ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να καθορίσει μη μηδενικά κατώτερα όρια για τις μεταβλητές απόφασης που δεν σχετίζονται με δυαδικές μεταβλητές, χρησιμοποιώντας γραμμικά αθροίσματα περιορισμών.

Εάν μια μεταβλητή απόφασης ρυθμού άντλησης ή μια εξωτερική μεταβλητή έχει συσχετισθεί με μια δυαδική μεταβλητή στο GWM, τότε προκύπτει:

$$\begin{aligned} Qw_n &\geq Qw_n^l I_l \\ Ex_m &\geq Ex_m^l I_l \end{aligned}$$

όπου  $I_l$  είναι η δυαδική μεταβλητή που σχετίζεται με μεταβλητές απόφασης  $Qw_n$  και, ή  $Ex_m$ .

2. Τα γραμμικά αθροίσματα των τριών ειδών των μεταβλητών απόφασης, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο GWM ακολουθούν:

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p \leq b_p$$

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p \geq b_p$$

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p = b_p$$

Όπου  $a_p$  και  $b_p$  είναι καθορισμένοι συντελεστές,  $GV_p$  είναι μια από τις τρεις μεταβλητές απόφασης ( $Qw_n, Ex_m, I_l$ ) και  $P$  είναι ο συνολικός αριθμός των όρων του αθροίσματος. Επειδή όλες οι μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής και οι εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, θεωρούνται στο GWM θετικές τιμές ανεξάρτητα από το αν είναι άντληση, εμπλουτισμός, είσοδος ή έξοδος, ο χρήστης πρέπει να είναι προσεκτικός με το πρόσημο καθενός από τους παραπάνω περιορισμούς, αλλά και με τις μονάδες των μεταβλητών.

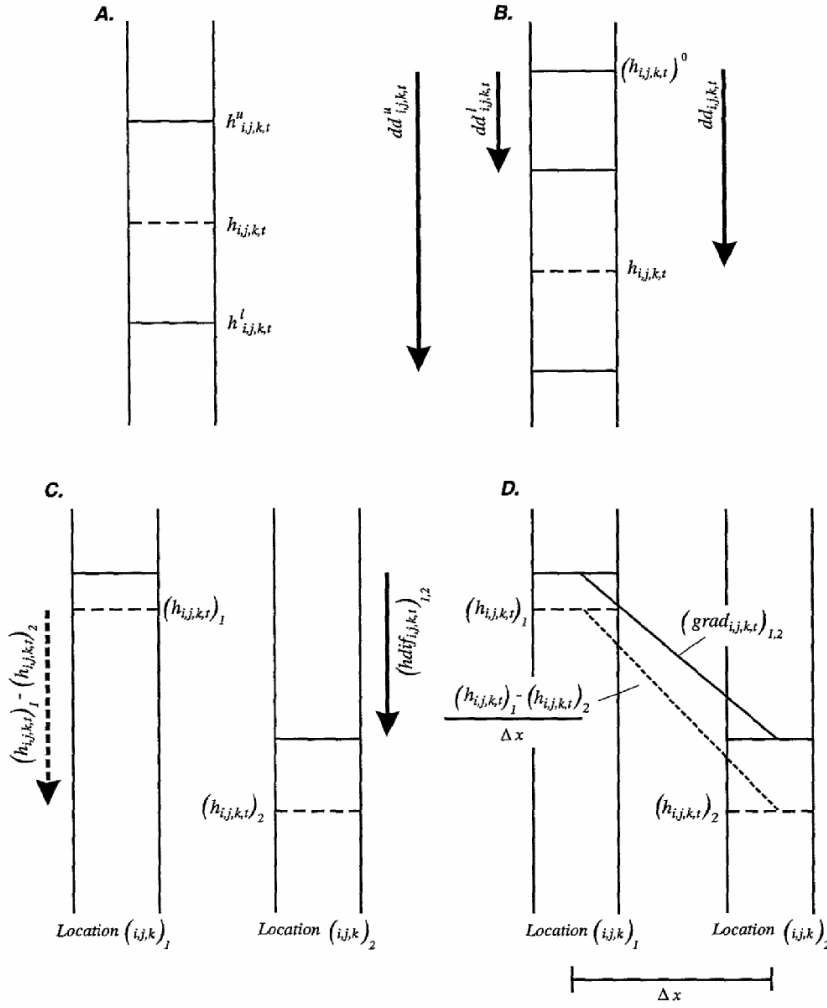
Δεν είναι απαραίτητο, ωστόσο να προσδιορίζεται σε ποιες χρονικές περιόδους είναι ενεργοί οι περιορισμοί, επειδή εμπεριέχεται ήδη στις μεταβλητές που έχουν οριστεί. Η γενικευμένη φύση αυτών των περιορισμών προϋποθέτει ο χρήστης να διασφαλίζει το φυσικό τους νόημα. Μερικά παραδείγματα, όπου χρησιμοποιούνται αυτού του είδους οι περιορισμοί είναι:

- Ανάγκες ύδρευσης\άρδευσης, Water-supply demands
- Περιορισμοί για το συνολικό ρυθμό άντλησης (παροχή), Net stress constraints
- Περιορισμοί για συγκεκριμένο αριθμό αντλήσεων, Stress ratio constraints
- Περιορισμοί για το συνολικό αριθμό των ενεργών πηγαδιών, Constraints on the total number of active well sites

3. Οι περιορισμοί που συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο GWM για το υδραυλικό ύψος, χωρίζονται σε τέσσερις τύπους:

- Ο πρώτος τύπος αυτού του περιορισμού είναι ένα απόλυτο κατώτερο ( $h_{i,j,k,t}^l$ ) ή ανώτερο ( $h_{i,j,k,t}^u$ ) όριο ενός υδραυλικού φορτίου ( $h_{i,k,t}$ ) σε μια συγκεκριμένη θέση και για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Χρησιμοποιείται για ελέγξουν την υπερβολική μείωση ή ανύψωση της ποτενσιομετρικής επιφάνειας.
- Ο δεύτερος τύπος του περιορισμού του υδραυλικού ύψους είναι η πτώση στάθμης ( $dd_{i,j,k,t}$ ) σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο.
- Ο τρίτος τύπος του περιορισμού του υδραυλικού ύψους είναι το κατώτερο όριο ( $hdif_{i,j,k,t}$ ) στη διαφορά του υδραυλικού ύψους μεταξύ δύο θέσεων του μοντέλου στο τέλος μιας χρονικής περιόδου  $t$ .
- Ο τέταρτος τύπος περιορισμού του υδραυλικού ύψους είναι το κατώτερο όριο ( $grad_{i,j,k}$ ) για την κλίση του υδραυλικού ύψους μεταξύ δύο θέσεων του μοντέλου στο τέλος μιας χρονικής περιόδου  $t$ . [GWM, 2006]

Συνοπτικά και τέσσερις τύποι, απεικονίζονται στο σχήμα 6.3 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.3 Οι τέσσερις τύποι περιορισμών του υδραυλικού ύψους

#### 6.4.2. Οι συντελεστές απόκρισης

Οι μερικές παράγωγοι που καθορίζουν τους συντελεστές απόκρισης δεν υπολογίζονται απευθείας, αλλά προσεγγίζονται από μία πρώτου βαθμού, πεπερασμένης διαφοράς μέθοδο διαταραχής. Η παράγωγος του ύψους σε σχέση με κάθε μεταβλητή απόφασης ρυθμού άντλησης, προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial h_{i,k,t}}{\partial Qw_n} = \frac{\Delta h_{i,k,t}}{\Delta Qw_n} = \frac{h_{i,k,t}(Qw_{\Delta n}) - h_{i,j,k,t}^0(Qw^0)}{Qw_{\Delta n}}$$

όπου  $Qw_{\Delta n}$  είναι η τιμή της διαταραχής για τη ν-ιστή μεταβλητή απόφασης ρυθμού άντλησης και  $h_{i,k,t}(Qw_{\Delta n})$  είναι το υδραυλικό ύψος στη θέση περιορισμού  $i,j,k$  και για χρονική περίοδο  $t$  υπολογισμένο με τη χρήση ενός διανύσματος παροχής ( $Qw_{\Delta n}$ ) το οποίο διαφέρει από το αρχικό διάνυσμα ( $Qw^0$ ) μόνο στο ν-οστό στοιχείο, το οποίο είναι αλλαγμένο κατά ( $Qw_{\Delta n}$ ).

Για να υπολογιστεί κάθε συντελεστής απόκρισης σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, το GWF του MODFLOW τρέχει για  $N+1$  φορές. Στο πρώτο τρέξιμο, το οποίο ονομάζεται τρέξιμο συνθήκης-βάσης (base-condition run), το ύψος υπολογίζεται για κάθε θέση περιορισμού και χρονική περίοδο για κάθε

$h_{i,j,k,t}^0(Qw^0)$ . Για κάθε ένα από τα υπολειπόμενα  $N$  τρεξίματα, το υδραυλικό ύψος σε κάθε θέση περιορισμού υπολογίζεται με βάση τη διαταραχή (perturbation) του ρυθμού άντλησης ή εμπλουτισμού της  $n$ -οστής μεταβλητής απόφασης ρυθμού άντλησης. Για καθένα από αυτά τα τρεξίματα, ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού από τα υπολειπόμενα  $N-1$  πηγάδια, παραμένει στην τιμή της συνθήκης – βάσης. Τα  $N$  τρεξίματα και οι συνακόλουθοι υπολογισμοί των συντελεστών απόκρισης καταλήγουν σε έναν πίνακα από συντελεστές απόκρισης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης.

Οι τιμές της διαταραχής, τα  $(Qw_{\Delta n})$ , υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση

$$Qw_{\Delta n} = \delta^0 Qw_n^u$$

Όπου  $\delta^0$  είναι μια μεταβλητή διαταραχής (perturbation variable) που ορίζεται από το χρήστη και  $Qw_n^u$  είναι το ανώτερο όριο του ρυθμού άντλησης ή εμπλουτισμού του πηγადιού  $n$ . Η μεταβλητή διαταραχής μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Η θετική τιμή της  $\delta^0$  συνεπάγεται την αύξηση του ρυθμού άντλησης, ενώ η αρνητική τιμή συνεπάγεται την μείωση του ρυθμού κατά  $(Qw_{\Delta n})$ .

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης απαιτεί τη διεξαγωγή ενός τρεξίματος, για να ληφθούν τιμές βάσης των μεταβλητών κατάστασης και έναν πρόσθετο τρέξιμο για κάθε διαταραγμένη μεταβλητή απόφασης ρυθμού ροής. Επειδή αυτά τα τρεξίματα γίνονται αυτόματα από το GWM, είναι σημαντικό ότι τα αρχεία εισόδου GWF δημιουργούν τρεξίματα που είναι σταθερά για μια σειρά των μεταβλητών απόφασης ρυθμού ροής.

Οι συντελεστές απόκρισης είναι μια κρίσιμη σχέση μεταξύ της φυσικής του συστήματος ροής του υπόγειου νερού και των αποτελεσμάτων του προγράμματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων, όπως είναι το GWM. Αποτέλεσμα αυτού, η ορθότητα και η ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης να παίζουν σημαντικό ρόλο στην επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης. Η ακρίβειά αυτών εξαρτάται από δύο κυρίως παράγοντες.

Πρώτον, η ακρίβεια των υδραυλικών υψών που υπολογίζεται με το MODFLOW για ένα συγκεκριμένο σύστημα ροής υπόγειων υδάτων, είναι μια αντανάκλαση της ακρίβειας με την οποία το γεωλογικό πλαίσιο, οι υδραυλικές ιδιότητες, οι οριακές συνθήκες και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συστήματος ροής είναι γνωστά και παρουσιάζονται στο μοντέλο. Σαφώς η ακρίβειά των συντελεστών απόκρισης αυξάνεται όσο καλύτερη γίνεται η κατανόηση του συστήματος ροής και η αναπαράστασή τους με το μαθηματικό μοντέλο.

Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης είναι η προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης της ροής του υπόγειου νερού από ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Η λύση των εξισώσεων των πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιούνται από το MODFLOW για να περιγράψουν το υδραυλικό ύψος σε κάθε κελί του κάρναβου προσομοίωσης της περιοχής, δίνει μόνο προσεγγιστικές τιμές για τη κατανομή των πραγματικών τιμών του υδραυλικού ύψους. Το λάθος που δημιουργείται από αυτή την προσέγγιση είναι ανάλογο του μεγέθους των κελιών που αποτελούν τον κάρναβο και του μεγέθους του χρονικού βήματος. Γενικά το προσεγγιστικό σφάλμα γίνεται μεγαλύτερο καθώς ο κάρναβος γίνεται πιο αραιός και/ή όταν το χρονικό βήμα μεγαλώνει. Αντίστοιχα, το σφάλμα μειώνεται, μειώνοντας το μέγεθος των κελιών της περιοχής καθώς και τα χρονικά βήματα,

αν και αυτές οι ενέργειες επιδρούν αυξάνουν το χρόνο επίλυσης του προβλήματος από τον υπολογιστή.

Η ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης είναι μια ένδειξη της ικανότητάς τους να αντικατοπτρίζουν την πραγματική απόκριση της υπολογιζόμενης κατάστασης του συστήματος σε αλλαγές. Ένα μέτρο της ακρίβειας των συντελεστών απόκρισης είναι ο αριθμός των σημαντικών ψηφίων των τιμών τους. Η διατήρηση επαρκούς ακρίβειας στους υπολογισμένους συντελεστές απόκρισης είναι απαραίτητη για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης από το πακέτο επίλυσης RMS. Ακόμη και αν το τρέξιμο δεν είναι ιδιαίτερα ακριβές, είναι σημαντικό η ακρίβεια του κάθε συντελεστή απόκρισης να διατηρηθεί. Η ακρίβειά τους επηρεάζεται εν μέρει από το μέγεθος των τιμών των διαταραχών (perturbation), όπως για παράδειγμα η τιμή του μεγέθους ( $Q_{W_{\Delta n}}$ ). Αν και οι συντελεστές απόκρισης για τα γραμμικά συστήματα θεωρούνται σταθεροί και οι τιμές τους ανεξάρτητες από το μέγεθος των τιμών των διαταραχών, η ακρίβειά τους και επομένως η ακρίβεια της επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης, εξαρτάται από τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που φέρει κάθε πραγματικό νούμερο κατά τον υπολογισμό του κάθε συντελεστή απόκρισης.

Οι περισσότερες από τις διαθέσιμες μεθόδους για την επίλυση προσομοίωσης από ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών είναι επαναληπτική. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους επαναλαμβάνονται μέχρι το ανώτατο όριο που υπολογίζεται στην αλλαγή του σε κάθε κελί να είναι μικρότερο από ένα καθορισμένο κριτήριο σύγκλισης μεταξύ των επαναλήψεων.

#### 6.4.3. Γενική μορφή προβλήματος διαχείρισης

Συνδυάζοντας όλες τις αντικειμενικές και περιοριστικές συναρτήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, η πλήρης μορφή του προβλήματος της διαχείρισης των υπογείων υδάτων με χρήση του μοντέλου GWM είναι η ακόλουθη:

Maximize or minimize

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=1}^N \beta_n Q_{W_n} T_{Q_{W_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m E x_m T_{E x_m} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l \\
 & 0 \leq Q_{W_n} \leq Q_{W_n}^u \\
 & 0 \leq E x_m \leq E x_m^u \\
 & \sum_{p=1}^P a_p G V_p \leq b_p \\
 & \sum_{p=1}^P a_p G V_p \geq b_p \\
 & \sum_{p=1}^P a_p G V_p = b_p \\
 & (h_{i,j,k,t}^l) \leq (h_{i,j,k,t}) \leq (h_{i,j,k,t}^u) \\
 & (dd_{i,j,k,t}^l) \leq (dd_{i,j,k,t}) \leq (dd_{i,j,k,t}^u) \\
 & (h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2 \geq h d i f_{i,j,k,t} \\
 & \frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x} \geq g r a d_{i,j,k}
 \end{aligned}$$

Μια πλήρης μαθηματική έκφραση του προβλήματος διαχείρισης των υπογείων υδάτων όπως ορίζεται από τις παραπάνω εξισώσεις περιλαμβάνει πτυχές γραμμικού, μη γραμμικού και δυαδικού προγραμματισμού. Ένα γραμμικό πρόγραμμα είναι μια σύνθεση βελτιστοποίησης στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Στην περίπτωση μη γραμμικού προβλήματος, η αντικειμενική συνάρτηση και/ή ένας ή περισσότεροι περιορισμοί είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Σε ένα δυαδικό πρόβλημα περιέχονται δυαδικές μεταβλητές απόφασης (1). Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που συνδυάζει στοιχεία γραμμικού προγραμματισμού και δυαδικές μεταβλητές καλείται πρόβλημα μικτού δυαδικού προγραμματισμού. Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα διαχείρισης όμως περιλαμβάνει στοιχεία από έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω τύπους προγραμματισμού, οι οποίοι μπορούν να επιλυθούν από το μοντέλο GWM. Το πακέτο επίλυσης με βάση τον πίνακα απόκρισης (RMS-Response Matrix Solution) του GWM χρησιμοποιεί το MODFLOW προκειμένου να υπολογίσει τη διαφορά της στάθμης σε κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε περιορισμό και προκύπτει από τη διαταραχή μίας παροχής άντλησης.

Για την επίλυση των γραμμικών προβλημάτων, τα οποία μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο Simplex, η διαδικασία είναι πιο απλή. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος του υπόγειου νερού να ανταποκρίνονται γραμμικά στις αλλαγές που επιβάλλονται στις μεταβλητές απόφασης του ρυθμού άντλησης, δηλαδή σε κάθε  $Qw_n$ . Επιπλέον δεν θα πρέπει να υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές, στο πρόβλημα. Για την ικανοποίηση της πρώτης προϋπόθεσης, θα πρέπει στο σύστημα άντλησης της υπόγειας ροής να προσομοιωθεί με σταθερή διαπερατότητα σε κάθε επίπεδο, όλες οι πλευρικές συνθήκες να είναι γραμμικές. Ως εκ τούτου, μπορεί να υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες τα ποσοστά διαρροής μεταξύ ενός συστήματος υπογείων υδάτων και των παρακείμενων υδατορεμάτων, να είναι γραμμικές συναρτήσεις του υδραυλικού ύψους και των επιβαλλόμενων ρυθμών άντλησης, ωστόσο οι περιορισμοί σχετικά με τα υδατορέματα να συγκαταλέγονται στο μη γραμμικό προγραμματισμό. Η εξάλειψη των δυαδικών μεταβλητών από τους περιορισμούς, μετατρέπει την αντικειμενική συνάρτηση στην μορφή

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Qw_n T_{Qw_n} + \sum_{m=1}^M \gamma_m Ex_m T_{Ex_m}$$

Το τελευταίο βήμα για τη μετατροπή του προβλήματος διαχείρισης των υπόγειων υδάτων σε μια μορφή που μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση της μεθόδου simplex, είναι η δημιουργία συναρτησιακών σχέσεων μεταξύ των αντλήσεων σε ένα πηγάδι και των επακόλουθων αλλαγών στο υδραυλικό ύψος στις θέσεις περιορισμού. Οι συναρτησιακές αυτές σχέσεις είναι απαραίτητες για την επαναδιατύπωση των περιορισμών υδραυλικού ύψους με όρους μεταβλητών απόφασης ρυθμού ροής. Περιγράφονται από τη σχέση  $h_{i,j,k,t} = h_{i,j,k,t}(Qw)$ , όπου  $(Qw)$  είναι ένα διάνυσμα με τα στοιχεία του ρυθμού άντλησης ή εμπλουτισμού σε όλες τις θέσεις των πηγαδιών. Αυτή η μετατροπή απαιτεί τη χρήση μιας πρώτης σειράς Taylor για να καθορίσει το υδραυλικό ύψος σε κάθε θέση περιορισμού (constraint location) και χρονική περίοδο σαν συνάρτηση νέων πιέσεων άντλησης ή εμπλουτισμού:

$$h_{i,j,k,t}(Qw) = h_{i,k,t}^0(Qw^0) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Qw_n}(Qw^0)(Qw_n - Qw_n^0)$$

Όπου

$h_{i,j,k,t}(Qw)$  είναι το υδραυλικό ύψος στη θέση περιορισμού  $i,j,k$  και για χρονική περίοδο  $t$  για ένα νέο διάνυσμα ρυθμών  $Qw$  άντλησης και εμπλουτισμού

$h_{i,k,t}^0(Qw^0)$  είναι το υδραυλικό ύψος στη θέση περιορισμού  $i,j,k$  και για χρονική περίοδο  $t$  για ένα αρχικό διάνυσμα ρυθμών  $Qw$  άντλησης και εμπλουτισμού

$\sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Qw_n}(Qw^0)$  είναι η μεταβολή του υδραυλικού ύψους στη θέση  $i,j,k$  και για χρονική περίοδο  $t$  λόγω αλλαγής στον ρυθμό της άντλησης ή του εμπλουτισμού, υπολογισμένη στο αρχικό διάνυσμα των ρυθμών άντλησης  $Qw^0$

$N$  είναι ο συνολικός αριθμός μεταβλητών απόφασης ρυθμού άντλησης. Η παραπάνω εξίσωση εξηγεί ότι τι υδραυλικό ύψος σε κάθε θέση περιορισμού ισούται με το υδραυλικό ύψος στη θέση περιορισμού για μια αρχική κατάσταση άντλησης ή εμπλουτισμού.

Αντίθετα στην περίπτωση ενός μη γραμμικού προβλήματος, η διαδικασία επίλυσης είναι πιο περίπλοκη. Οι μη γραμμικότητες σε ένα πρόβλημα διαχείρισης μπορούν να προκύψουν έμμεσα ως αποτέλεσμα δυο κοινών χαρακτηριστικών των μοντέλων ροής των υπογείων υδάτων. Η πρώτη είναι η παρουσία στρωμάτων στα οποία η μεταβιβασιμότητα είναι συνάρτηση του υδραυλικού ύψους (μη γραμμική σχέση). Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η παρουσία οριακών συνθηκών που εξαρτώνται από το υδραυλικό ύψος όπως τα υδατορεύματα, η ξηρασία, η εξατμισοδιαπνοή κ.α. Αυτές οι οριακές συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των υδραυλικών υψών και του ρυθμού ροής που προσομοιώνουν.

Η προσέγγιση για την επίλυση των μη γραμμικών προβλημάτων βασίζεται στον αλγόριθμο της διαδοχικής γραμμικοποίησης, γνωστό ως SLP (sequential linear program). Βασίζεται σε επαναλαμβανόμενες γραμμικοποιήσεις μη γραμμικών χαρακτηριστικών του προβλήματος και υλοποιείται με τον επανυπολογισμό του πίνακα απόκρισης για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόβλημα. Η πρώτης τάξης σειρά Taylor για το υδραυλικό ύψος, που παρουσιάστηκε παραπάνω, θεωρείται ακριβής για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόβλημα, αλλά σε αντίθεση με τη γραμμική περίπτωση, το διάνυσμα των αντλήσεων αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Το υδραυλικό ύψος σε κάθε θέση εκτιμάται από:

$$h_{i,j,k,t}(Qw) = h_{i,k,t}^v(Qw^v) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Qw_n^v}(Qw^v)(Qw_n - Qw_n^v)$$

όπου ο εκθέτης  $v$  αντιπροσωπεύει ένα επαναληπτικό στάδιο, έτσι ώστε  $h_{i,k,t}^v(Qw^v)$  να είναι το ύψος που θα προκύψει όταν εφαρμοστεί ρυθμός άντλησης  $Qw^v$ . Για τιμές  $Qw$  κοντά στο  $Qw^v$ , τότε το σφάλμα σε αυτήν την προσέγγιση είναι μικρό και οι τιμές του υδραυλικού ύψους  $h_{i,j,k,t}$  που προβλέπονται από αυτήν την εξίσωση είναι αρκετά ακριβείς.

Η πρώτης τάξης σειρά Taylor χρησιμοποιείται και για τον καθορισμό συναρτησιακών σχέσεων μεταξύ της ροής των υδατορευμάτων και των τιμών παροχής άντλησης ή εμπλουτισμού.

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου SLP, ένα γραμμικό πρόγραμμα κατασκευάζεται σύμφωνα με την προσέγγιση πρώτης τάξης σειράς Taylor και λύνεται με τη μέθοδο simplex. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να

πληρούνται δύο κριτήρια σύγκλισης. Το πρώτο κριτήριο προϋποθέτει ότι η αλλαγή της τιμής της μεταβλητής του ρυθμού άντλησης από την προηγούμενη επανάληψη στην τρέχουσα, να είναι μικρότερη από ένα κλάσμα του μεγέθους των μεταβλητών άντλησης:

$$\|Qw^{v+1} - Qw^v\| \leq \varepsilon_1(1 + \|Qw^{v+1}\|)$$

Η άπειρη νόρμα (infinity norm) χρησιμοποιείται σε αυτήν την έκφραση και το  $\varepsilon_1$  προσδιορίζεται από το χρήστη ως μεταβλητή εισόδου (SLPVCRIT). Σημειώνεται ότι το 1 προστίθεται στη νόρμα στο δεξί άκρο της εξίσωσης. Είναι πιθανόν στις περισσότερες περιπτώσεις, η νόρμα των μεταβλητών απόφασης να παίρνει τιμές πολύ μεγαλύτερες από τη μονάδα, ίσες με το μηδέν ή κοντά στο μηδέν. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η προσθήκη 1 διασφαλίζει ότι ένα λογικό κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιείται.

Το δεύτερο κριτήριο απαιτεί ότι η αλλαγή της τιμής  $Z$  της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι μικρότερη από ένα καθορισμένο κλάσμα του μεγέθους της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

$$\|Z^{v+1} - Z^v\| \leq \varepsilon_2(1 + \|Z^{v+1}\|)$$

Το κλάσμα  $\varepsilon_2$  εισάγεται από το χρήστη ως μεταβλητή εισόδου (SLPZCRIT.)

Το πρόβλημα, λοιπόν επιλύεται με τον αλγόριθμο SLP σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Ορισμός των  $v = 0$  και  $Qw^0$

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης από το διάνυσμα των ρυθμών  $Qw^v$

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Λύση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, με τη δημιουργία του διανύσματος  $Qw^{v+1}$

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Αν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης η διαδικασία σταματά, διαφορετικά,

Βήμα 5<sup>ο</sup>: Ορίζεται  $v = v + 1$  και γίνεται επιστροφή στο δεύτερο βήμα

Οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται για κάθε επανάληψη  $v$ , χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\frac{\partial h_{i,k,t}}{\partial Qw_n} = \frac{\Delta h_{i,k,t}}{\Delta Qw_n} = \frac{h_{i,k,t}(Qw_{\Delta n}) - h_{i,k,t}(Qw^0)}{Qw_{\Delta n}}$$

Τα υδραυλικά ύψη δίνονται από την εξίσωση

$$\frac{\Delta h_{i,k,t}^v}{\Delta Qw_n^v} = \frac{h_{i,k,t}^v(Qw_{\Delta n}^v) - h_{i,k,t}^v(Qw^v)}{Qw_{\Delta n}^v}$$

όπου  $Qw_{\Delta n}^v$  είναι μια διαταραχή για την  $n$ -οστή μεταβλητή απόφασης ρυθμού ροής στην επανάληψη  $v$

$(h_{i,k,t}^v Qw_{\Delta n}^v)$  είναι το υδραυλικό ύψος στη θέση  $i, j, k$  και στη χρονική περίοδο  $t$  υπολογισμένη από το διάνυσμα των ρυθμών άντλησης  $Qw_{\Delta n}^v$  που διαφέρει από το προηγούμενο  $Qw^v$  μόνο στο  $n$ -οστό στοιχείο, το οποίο έχει μεταβληθεί κατά  $Qw_{\Delta n}^v$ .

Επειδή η τιμή της διαταραχής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία του αλγόριθμου SLP, σε κάθε επανάληψη οι τιμές της διαταραχής υπολογίζονται από την εξίσωση

$$Qw_{\Delta n}^v = \delta^v Qw_n^u$$

όπου  $\delta^v$  είναι η τιμή της διαταραχής στην επανάληψη  $v$ , και  $Qw_n^u$  είναι το καθορισμένο άνω όριο του ρυθμού άντλησης ή εμπλουτισμού του πηγαδιού  $n$ .

Η αρχική τιμή της διαταραχής είναι  $\delta^0$ , ενώ η τιμή της για κάθε επανάληψη δίνεται γενικά από τη σχέση

$$\delta^v = \frac{\delta_{initial} - \delta_{minimum}}{(\delta_{scale})^v} + \delta_{minimum}$$

όπου  $v$  είναι το επίπεδο επανάληψης

$\delta_{initial}$  είναι η αρχική διαταραχή για το  $n$ -οστό πηγάδι

$\delta_{minimum}$  είναι η ελάχιστη τιμή της διαταραχής για το συγκεκριμένο πηγάδι και

$\delta_{scale}$  είναι ένας παράγοντας που ορίζει το βαθμό μείωσης της τιμής της διαταραχής

Να σημειωθεί ότι το  $\delta_{scale}$  εκφράζεται εκθετικά, έτσι όταν λάβει τιμές μεγαλύτερες τις μονάδας η μεταβλητή διαταραχής μειώνεται καθώς η διαδοχική διεργασία προχωρά και προσεγγίζει τη ελάχιστη τιμή.

Αν κάποιο τρέξιμο, χρησιμοποιώντας το ρυθμό διαταραχής αποτύχει, τότε η αξία διαταραχής αλλάζει αυτόματα κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης SLP. Αυτό δεν έχει καμία επίδραση επί της τιμής διαταραχής κατά την επόμενη επανάληψη SLP. Εάν η πρώτη εκτέλεση ήταν επιτυχής, ενώ η επόμενη δεν ήταν, τότε είναι δυνατή η προσαρμογή του διανύσματος βάσης, παρά να τερματιστεί ο αλγόριθμος. Αυτό γίνεται με τη χρήση μιας παραμέτρου χαλάρωσης  $\alpha$ , η οποία μετατοπίζει την επίλυση βάσης πιο κοντά στην προηγούμενη, την επιτυχή. Για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης ρυθμού ροής, η προσωρινή τιμή βάσης υπολογίζεται σύμφωνα με:

$$\hat{Q}w_n^v = (1 - \alpha)\hat{Q}w_n^v + \alpha\hat{Q}w_n^{v-1}$$

Όπου  $\hat{Q}w_n$  είναι η προσωρινή τιμή της μεταβλητής απόφασης ρυθμού ροής [GWM, 2005]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GWM ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η προσέγγιση του προβλήματος της υφαλμύρισης στην περιοχή του Τυμπακίου ξεκίνησε με την προσομοίωση της υπόγειας ροής μέσω του μοντέλου MODFLOW και σε αυτό το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και τη χρήση του μοντέλου GWM. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για τον εντοπισμό των βέλτιστων δυνατών αντλήσεων, με σκοπό τόσο την ικανοποίηση των αναγκών των κατοίκων σε ύδρευση και σε άρδευση, όσο και την αναχαίτιση του προβλήματος της υφαλμύρισης. Σκοπός της διαδικασίας είναι η αιεφόρος διαχείριση του υδροφορέα, χωρίς όμως τη λήψη ακραίων μέτρων. Αρχικά γίνεται προσπάθεια για την αποφυγή επιδείνωσης του φαινομένου, ενώ στη συνέχεια γίνεται προσέγγιση και για την υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης. Εξετάζονται οι συνδυασμοί των μέγιστων τιμών άντλησης που μπορούν να επιτευχθούν προκειμένου το μέτωπο της υφαλμύρισης να υποχωρήσει σε συγκεκριμένες θέσεις, προς την ακτογραμμή.

### 7.1 Βελτιστοποίηση της υφιστάμενης κατάστασης

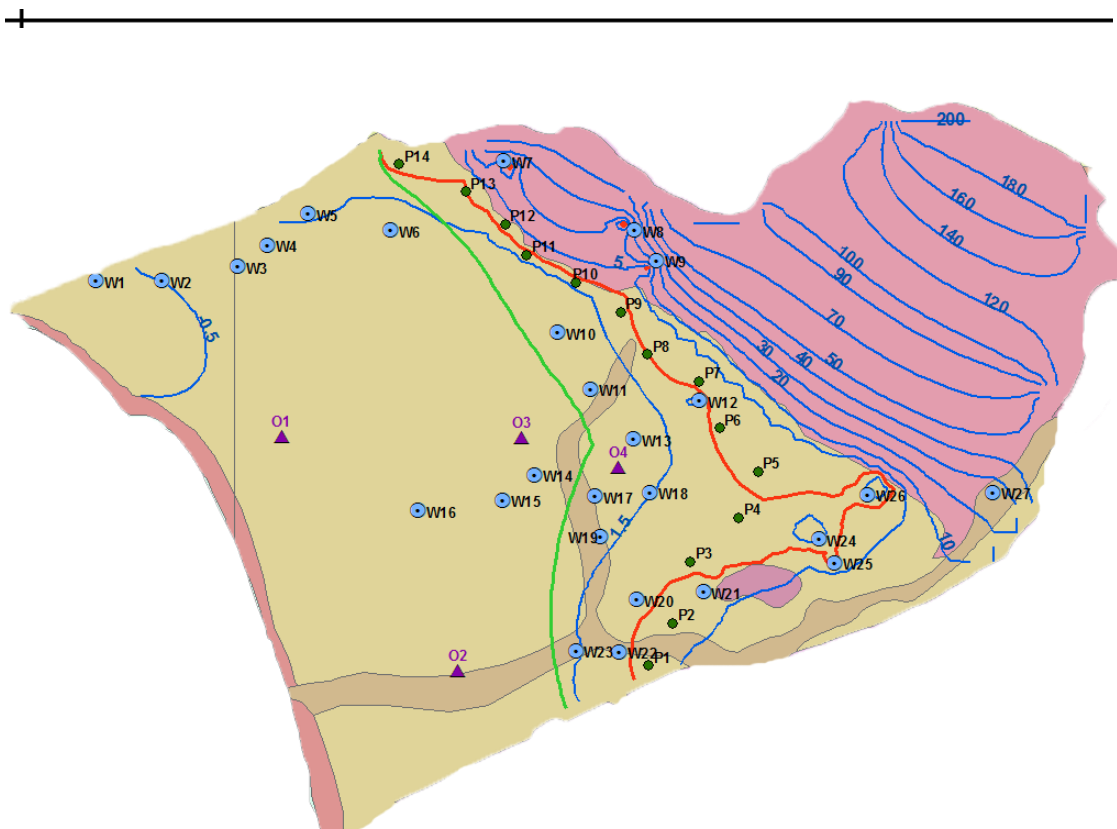
Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των αντλήσεων είναι ελαφρώς μη γραμμικό, λόγω της μη γραμμικής μεταβολής του υδραυλικού ύψους συναρτήσει της παροχής άντλησης. Για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε η διαδικασία της διαδοχικής γραμμικοποίησης (SLP), η οποία βασίζεται σε επαναλαμβανόμενες γραμμικοποιήσεις των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του προβλήματος και υλοποιείται με τον επανυπολογισμό του πίνακα απόκρισης για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόβλημα. Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος που επιλύεται έχει την παρακάτω μορφή:

$$\max \sum_{i=1}^{27} Q_i \quad \text{όπου } i = 1, \dots, 27 = \text{o αριθμός των αντλήσεων}$$

$$\text{s.t.} \\ 0 \leq Q_i \leq Q_{\max} \\ h_j \geq 2.5 \quad \text{όπου } j = 1, \dots, 14 = \text{o αριθμός των σημείων παρατήρησης}$$

Οι επιτρεπόμενες τιμές των αντλήσεων στα πηγάδια άντλησης είναι μη αρνητικές και δεν πρέπει να ξεπερνούν τις αρχικές τιμές ( $Q_{\max}$ ), δηλαδή τις τιμές που υπάρχουν στην υφιστάμενη κατάσταση.

Η παραπάνω τιμή των 2.5m, επιλέχθηκε με βάση τη θέση του μετώπου της υφαλμύρισης, σύμφωνα με την εξίσωση Ghyben-Herzberg. Από το περιβάλλον του μοντέλου MODFLOW, σημειώνονται τα σημεία παρατήρησης για το μέτωπο της υφαλμύρισης, με την ακριβή σειρά και στήλη του σημείου. Τα δεκατέσσερα αυτά σημεία επιλέγονται για την βελτιστοποίηση του προβλήματος στην υφιστάμενη κατάσταση, και διαδοχικά με την εφαρμογή των σεναρίων και την μετατόπιση των σημείων προς την ακτογραμμή, γίνεται προσπάθεια για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την επαναφορά του συστήματος στη βέλτιστη δυνατή κατάσταση. Τα σημεία παρατήρησης παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 7.1. Η θέση των σημείων παρατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης

#### Υπόμνημα

- ◆ Σημεία\_Παρατήρησης
- ▲ Πηγάδια\_Παρατήρησης
- Πηγάδια\_Άντλησης
- Βέλτιστο\_Σενάριο
- Χειρότερο\_Σενάριο
- Ισοδυναμικές\_Γραμμές Υδραυλικού Ύψους

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον του μοντέλου MODFLOW. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνονται σε αρχεία που προέκυψαν από την προσομοίωση της περιοχής μελέτης και περιέχουν πληροφορίες για τα υδρολογικά στοιχεία, τη χρονική και χωρική διακριτοποίηση της περιοχής καθώς και τις τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους του κάνναβου όταν τα πηγάδια άντλησης είναι εκτός λειτουργίας.

Τα αρχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα αρχεία:

- BAS – ενεργά, μη ενεργά κελιά
- BCF – υδραυλική αγωγιμότητα
- DIS - στάθμες
- PCG – αλγόριθμος επίλυσης

+

---

Το μοντέλο, ωστόσο χρειάζεται και άλλες πληροφορίες για τη σωστή βελτιστοποίηση του προβλήματος, πληροφορίες που εισάγονται από τον χρήστη στα παρακάτω αρχεία:

- **DECVAR** – Εισάγονται δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης και αφορούν: το χαρακτηρισμό του πηγαδιού ως άντλησης ή εμπλουτισμού, το συνολικό αριθμό πηγαδιών που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης, την ονομασία του κάθε πηγαδιού αλλά και την ακριβή τοποθεσία του με τον αριθμό της γραμμής και της στήλης στον κάρναβο του MODFLOW.
- **GWM** - Εισάγονται οι ονομασίες των αρχείων από τα οποία θα λαμβάνει το μοντέλο τις απαραίτητες πληροφορίες, με το χαρακτηριστικό τους μονοπάτι (path). Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν πληροφορίες που έχει ορίσει ο χρήστης του μοντέλου (αρχεία DECVAR, OBJFNC, VARCON, HEDCON, SOLN)
- **HEDCON** – Εισάγονται δεδομένα για τα σημεία παρατήρησης που έχουν οριστεί σαν περιορισμοί του υδραυλικού ύψους (με την χαρακτηριστική τιμή των 2.5m, για την υφαλμύριση στη συγκεκριμένη διατρίβή) και αφορούν: το συνολικό αριθμό των σημείων που έχουν οριστεί, την ονομασία του κάθε σημείου αλλά και την ακριβή τοποθεσία του με τον αριθμό της γραμμής και της στήλης στον κάρναβο του MODFLOW.
- **NAM** – Εισάγονται οι ονομασίες των αρχείων από τα οποία θα λαμβάνει το μοντέλο τις απαραίτητες πληροφορίες, με το χαρακτηριστικό μονοπάτι, path. Τα αρχεία αυτά δεν έχουν εισαχθεί στο παραπάνω αρχείο GWM, και αποτελούνται από τα GLOBAL, LIST, DIS, BAS, BCF, PCG και GWM
- **OBJFNC** – Εισάγονται πληροφορίες για τα πηγάδια άντλησης και τον συντελεστή βαρύτητας – συνεισφοράς αυτών στην επίλυση του προβλήματος
- **SOLN** – Εισάγονται πληροφορίες για τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος, και προσδιορίζεται ο τύπος γραμμικότητας αυτού (slp: διαδοχική γραμμικοποίηση). Η εύρεση των κατάλληλων μεταβλητών, που εμπεριέχονται στο συγκεκριμένο αρχείο, είναι το κλειδί στην επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Η ανάλυση των μεταβλητών αυτών ακολουθεί:  
*SPLITMAX*→ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων  
*SLPVCRIT*→ το κριτήριο σύγκλισης  
*DINIT*→ η αρχική τιμή διαταραχής των αντλήσεων στην πρώτη επανάληψη  
*DMIN*→ η ελάχιστη τιμή διαταραχής των αντλήσεων  
*DSC*→ παράμετρος που ελέγχει το ρυθμό αλλαγής των διαταραχών  
*NSIGDIG*→ κατώτερο όριο αριθμού σημαντικών ψηφίων των τιμών του πίνακα απόκρισης  
*AFACT*→ ελέγχει τη σύγκλιση της προσωρινής λύσης με την πιο πρόσφατη σωστή λύση, λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1  
*NINFMX*→ ο μέγιστος αριθμός μη-εφικτών επαναλήψεων πριν τερματιστεί η διαδικασία

- VARCON – Εισάγονται δεδομένα για τα όρια των τιμών της αντλητικής δυναμικότητας των πηγαδιών, σύμφωνα με την εξίσωση

$$0 \leq Q_i \leq Q_{max}$$

Το μοντέλο GWM, περιλαμβάνει και το αρχείο με την ονομασία GLO, το οποίο δίνει πληροφορίες για τη σωστή ανάγνωση των υπόλοιπων αρχείων από το μοντέλο κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και περιέχει και τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος. Είναι ένα αρχείο που βοηθά τον χρήστη να μπορεί να διορθώσει λάθη και γενικότερα να παρακολουθεί τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να προκύψει η σωστή λύση του προβλήματος.

Όλα τα αρχεία και οι αριθμοί που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο παρουσιάζονται στο παράρτημα αυτής της εργασίας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης της υφιστάμενης κατάστασης στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1:

**Πίνακας 7.1.Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των παροχών της υφιστάμενης κατάστασης**

| Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>W1</b>      | 488                                     | 488                                 | <b>W15</b>     | 2500                                    | 2500                                |
| <b>W2</b>      | 2255                                    | 2255                                | <b>W16</b>     | 488                                     | 488                                 |
| <b>W3</b>      | 2255                                    | 2255                                | <b>W17</b>     | 600                                     | 600                                 |
| <b>W4</b>      | 488                                     | 488                                 | <b>W18</b>     | <b>600</b>                              | <b>19.5</b>                         |
| <b>W5</b>      | 488                                     | 488                                 | <b>W19</b>     | 500                                     | 500                                 |
| <b>W6</b>      | 400                                     | 400                                 | <b>W20</b>     | 3000                                    | 3000                                |
| <b>W7</b>      | <b>300</b>                              | <b>167</b>                          | <b>W21</b>     | 3000                                    | 3000                                |
| <b>W8</b>      | 430                                     | 430                                 | <b>W22</b>     | 780                                     | 780                                 |
| <b>W9</b>      | 350                                     | 350                                 | <b>W23</b>     | 2000                                    | 2000                                |
| <b>W10</b>     | 160                                     | 452                                 | <b>W24</b>     | <b>600</b>                              | <b>0</b>                            |
| <b>W11</b>     | 180                                     | 180                                 | <b>W25</b>     | 780                                     | 780                                 |
| <b>W12</b>     | <b>320</b>                              | <b>0</b>                            | <b>W26</b>     | 700                                     | 700                                 |
| <b>W13</b>     | 470                                     | 470                                 | <b>W27</b>     | 300                                     | 300                                 |
| <b>W14</b>     | 3000                                    | 3000                                | <b>Total</b>   | <b>27432</b>                            | <b>25684</b>                        |

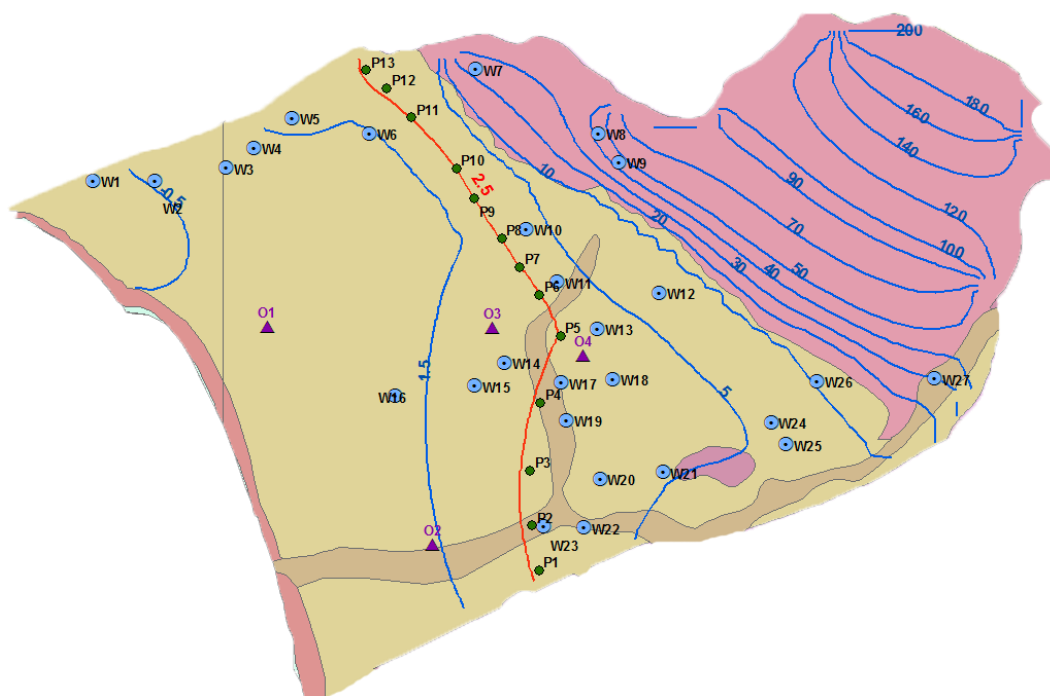
Από την πρώτη προσομοίωση της περιοχής παρατηρείται μια μείωση της συνολικής αντλητικής δραστηριότητας, κατά 6.5%. Η μικρή αυτή μείωση ήταν αναμενόμενη, επειδή τα σημεία παρατήρησης (P3 – P6) ορίστηκαν πιο κοντά στην ακτογραμμή και δεν ακολουθούν την ισοϋψή των 2.5m. Η θέση των σημείων αυτών, σύμφωνα με το σχήμα 7.1 από την προσομοίωση της περιοχής μελέτης, μετατοπίστηκε ελάχιστα για την καλύτερη προσέγγιση της βελτιστοποίησης.

Από τον πίνακα 7.1, παρατηρείται μηδενική παροχή άντλησης στα πηγάδια 24 και 12. Το πηγάδι 12 βρίσκεται πολύ κοντά στην ισοϋψή των 2.5m, και για το λόγο αυτό την επηρεάζει κατά τη βελτιστοποίηση. Το πηγάδι 24, μαζί με τα πηγάδια 25 και 26, ανήκουν στο συνδυασμό άντλήσεων στην περιοχή όπου έγινε η μικρή μετατόπιση των σημείων παρατήρησης, που αναφέρθηκε παραπάνω. Με τον μηδενισμό της παροχής άντλησης στο πηγάδι 24 και τη

μείωση της παροχής άντλησης στο πηγάδι 18, επιτεύχθηκε ο στόχος της βελτιστοποίησης.

## 7.2. Βελτιστοποίηση του προβλήματος με τη βοήθεια σεναρίων αναχαίτισης

Από την βελτιστοποίηση του προβλήματος για την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης, δημιουργήθηκε η ανάγκη για προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της υφαλμύρισης και επαναφοράς του συστήματος στη βέλτιστη δυνατή κατάσταση. Τα σενάρια που επιλέχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι τέσσερα και προέκυψαν από την σταδιακή μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρισης προς την ακτογραμμή. Οι θέσεις των σημείων παρατήρησης ξεκινούν από την χειρότερη περίπτωση, την υφιστάμενη δηλαδή κατάσταση, και μετατοπίζονται μέχρι και τη βέλτιστη δυνατή. Η βέλτιστη δυνατή κατάσταση, είναι η κατάσταση που προκύπτει από την εφαρμογή μηδενικής άντλησης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της περιοχής με μηδενικές αντλήσεις, ακολουθούν στο σχήμα 7.2:



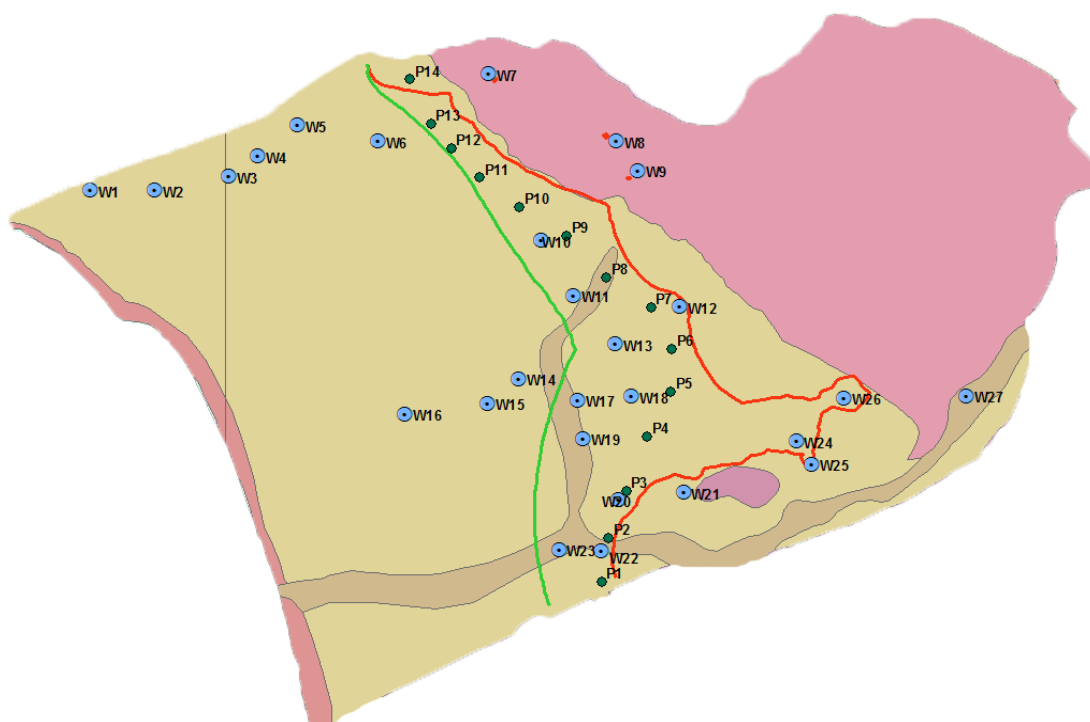
Σχήμα 7.2. Αποτέλεσμα της βέλτιστης δυνατής κατάστασης (best case scenario)

Λόγω της υπεράντλησης που παρουσιάζει η περιοχή μελέτης, η απόσταση των θέσεων παρατήρησης μεταξύ της χειρότερης – υφιστάμενης κατάστασης και της βέλτιστης δυνατής δεν είναι πολύ μεγάλη. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η το φαινόμενο της υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων είναι μια αργή διαδικασία η οποία δεν είναι πλήρως αναστρέψιμη, τουλάχιστον όχι μέσα σε μικρή χρονική περίοδο. Γι αυτό το λόγο είναι προτιμότερο οι προσπάθειες να επικεντρώνονται σε μέτρα πρόληψης του φαινομένου (στα πλαίσια του εφικτού), παρά σε μέτρα αντιμετώπισης.

Με βάση τα παραπάνω, τα σενάρια που μελετήθηκαν είναι τέσσερα και παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν.

### 7.2.1 Σενάριο 1<sup>ο</sup>

Με την πρώτη μετατόπιση των θέσεων παρατήρησης για την αναχαίτιση της υφαλμύρισης, προκύπτει το πρώτο σενάριο. Οι ακριβείς θέσεις των σημείων παρατήρησης (P1-P14) παρουσιάζονται στο σχήμα 7.3:



Σχήμα 7.3. Η θέση των σημείων παρατήρησης του πρώτου σεναρίου

Σύμφωνα με τις θέσεις των σημείων παρατήρησης που ορίστηκαν για το μέτωπο της υφαλμύρισης, το μοντέλο GWM έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις παροχές άντλησης των πηγαδιών, σύμφωνα με τον πίνακα 7.2:

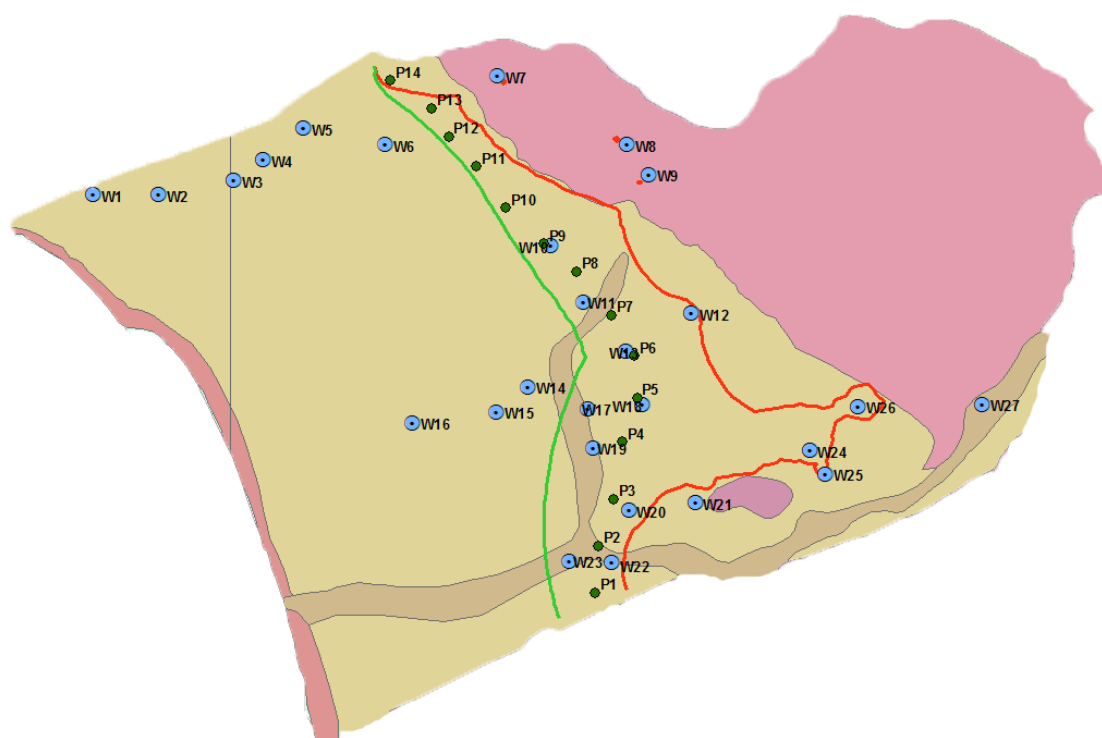
Πίνακας 7.2. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των παροχών του πρώτου σεναρίου

| Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| W1             | 488                                     | 488                                 | W15            | 2500                                    | 0                                   |
| W2             | 2255                                    | 2255                                | W16            | 488                                     | 0                                   |
| W3             | 2255                                    | 2255                                | W17            | 600                                     | 0                                   |
| W4             | 488                                     | 488                                 | W18            | 600                                     | 0                                   |
| W5             | 488                                     | 488                                 | W19            | 500                                     | 0                                   |
| W6             | 400                                     | 0                                   | W20            | 3000                                    | 0                                   |
| W7             | 300                                     | 0                                   | W21            | 3000                                    | 3000                                |
| W8             | 430                                     | 0                                   | W22            | 780                                     | 0                                   |
| W9             | 350                                     | 0                                   | W23            | 2000                                    | 0                                   |
| W10            | 160                                     | 0                                   | W24            | 600                                     | 181                                 |
| W11            | 180                                     | 0                                   | W25            | 780                                     | 780                                 |
| W12            | 320                                     | 0                                   | W26            | 700                                     | 700                                 |
| W13            | 470                                     | 0                                   | W27            | 300                                     | 300                                 |
| W14            | 3000                                    | 0                                   | <b>Total</b>   | <b>27432</b>                            | <b>10935</b>                        |

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου με την αρχική κατάσταση, παρατηρείται μια μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 60%. Ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση φτάνει τα δεκαεπτά, ενώ παρατηρείται και μια αισθητή μείωση στο πηγάδι 24, που φτάνει το 70%. Τα περισσότερα από τα πηγάδια αυτά βρίσκονται αρκετά κοντά στην ισοϋψή των 2.5m, οπότε την επηρεάζουν άμεσα. Βρίσκονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης, με μέση τιμή παροχής τα 450 m<sup>3</sup>/d. Παρόλο που οι νέες θέσεις των σημείων παρατήρησης δεν απέχουν μεγάλη απόσταση από την αρχική κατάσταση, οι αλλαγές στην αντλητική δραστηριότητα είναι αισθητές. Το γεγονός αυτό αποτελεί απόδειξη του έντονου προβλήματος που παρουσιάζει η περιοχή μελέτης και της υπεράντλησης που γίνεται για την ικανοποίηση των αναγκών σε ύδρευση και κυρίως άρδευση.

### 7.2.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup>

Στο δεύτερο σενάριο που εξετάζεται, οι θέσεις των σημείων παρατήρησης μετατοπίζονται λίγο περισσότερο. Οι ακριβείς θέσεις των σημείων παρατήρησης παρουσιάζονται στο σχήμα 7.4:



Σχήμα 7.4. Η θέση των σημείων παρατήρησης του δεύτερου σεναρίου

Σύμφωνα με τις θέσεις των σημείων παρατήρησης που ορίστηκαν για το μέτωπο της υφαλμύρισης, το μοντέλο GWM έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις βέλτιστες παροχές άντλησης των πηγαδιών, σύμφωνα με τον πίνακα 7.3:

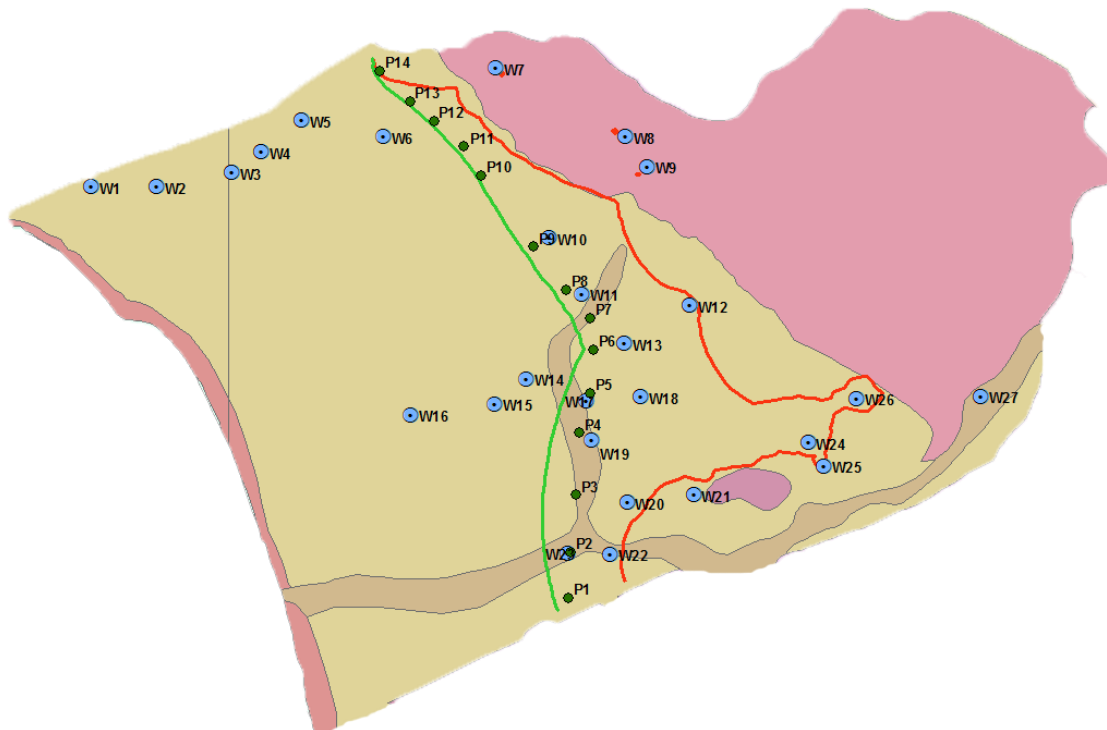
Πίνακας 7.3. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των παροχών του δεύτερου σεναρίου

| Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| W1             | 488                                     | 488                                 | W15            | 2500                                    | 0                                   |
| W2             | 2255                                    | 2255                                | W16            | 488                                     | 0                                   |
| W3             | 2255                                    | 2255                                | W17            | 600                                     | 0                                   |
| W4             | 488                                     | 488                                 | W18            | 600                                     | 0                                   |
| W5             | 488                                     | 488                                 | W19            | 500                                     | 0                                   |
| W6             | 400                                     | 400                                 | W20            | 3000                                    | 0                                   |
| W7             | 300                                     | 0                                   | W21            | 3000                                    | 2820                                |
| W8             | 430                                     | 0                                   | W22            | 780                                     | 0                                   |
| W9             | 350                                     | 0                                   | W23            | 2000                                    | 0                                   |
| W10            | 160                                     | 0                                   | W24            | 600                                     | 0                                   |
| W11            | 180                                     | 0                                   | W25            | 780                                     | 780                                 |
| W12            | 320                                     | 0                                   | W26            | 700                                     | 0                                   |
| W13            | 470                                     | 0                                   | W27            | 300                                     | 300                                 |
| W14            | 3000                                    | 0                                   | <b>Total</b>   | <b>27432</b>                            | <b>9874</b>                         |

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου, παρατηρείται μια μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 64%. Ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση φτάνει τα 19, ενώ παρατηρείται και μια μείωση στο πηγάδι 21, της τάξεως του 6%. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με το προηγούμενο σενάριο παρατηρούμε ότι όσο μετατοπίζεται το μέτωπο της υφαλμύρισης προς την ακτογραμμή, η συνολική παροχή άντλησης μειώνεται ενώ ταυτόχρονα ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση αυξάνεται. Η διασπορά των πηγαδιών που επηρεάζονται είναι παρόμοια με το πρώτο σενάριο και εστιάζει στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Ωστόσο παρατηρείται και μια αισθητή μείωση των πηγαδιών με μεγάλη αντλητική δραστηριότητα (μέση τιμή παροχής τα 3000 m<sup>3</sup>/d).

### 7.2.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup>

Στο τρίτο σενάριο που εξετάζεται, οι θέσεις των σημείων παρατήρησης μετατοπίζονται για μια ακόμα φορά προς την ακτογραμμή, χωρίς να ξεπερνούν τα όρια της βέλτιστης δυνατής κατάστασης. Οι ακριβείς θέσεις των σημείων παρατήρησης παρουσιάζονται στο σχήμα 7.5:



Σχήμα 7.5. Η θέση των σημείων παρατήρησης του τρίτου σεναρίου

Σύμφωνα με τις θέσεις των σημείων παρατήρησης που ορίστηκαν για το μέτωπο της υφαλμύρισης, το μοντέλο GWM έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις παροχές άντλησης των πηγαδιών, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4:

Πίνακας 7.4. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των παροχών του τρίτου σεναρίου

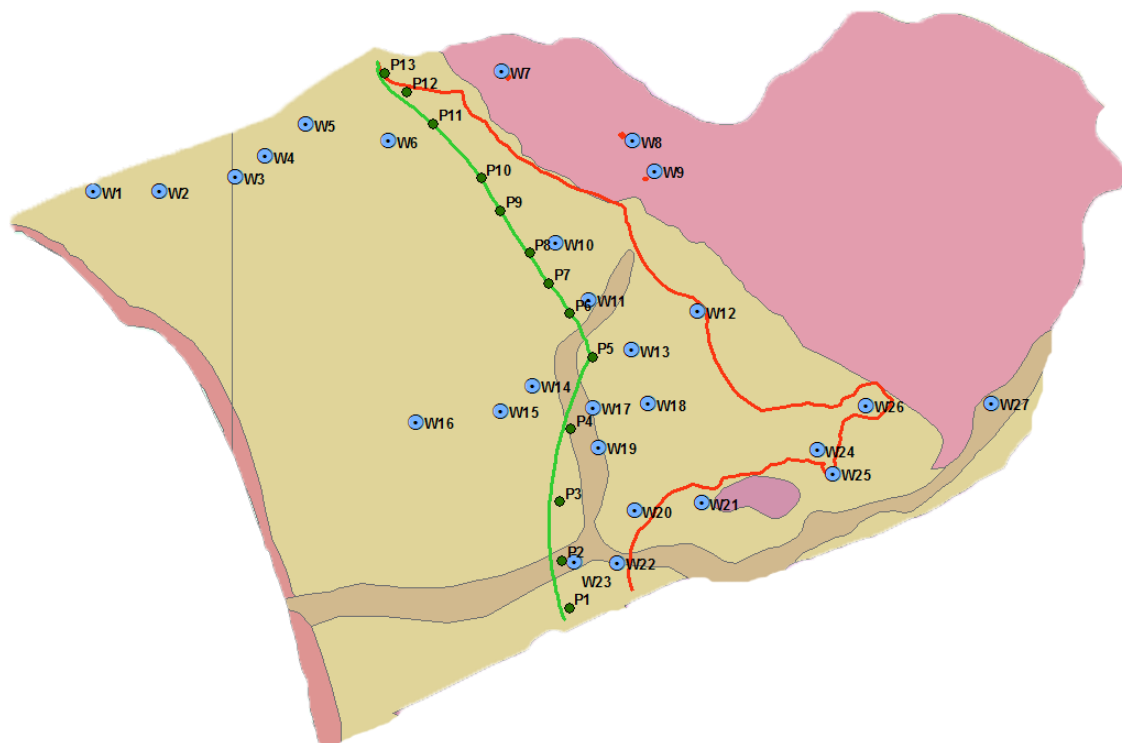
| Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| W1             | 488                                     | 488                                 | W15            | 2500                                    | 0                                   |
| W2             | 2255                                    | 2255                                | W16            | 488                                     | 436                                 |
| W3             | 2255                                    | 2255                                | W17            | 600                                     | 0                                   |
| W4             | 488                                     | 488                                 | W18            | 600                                     | 0                                   |
| W5             | 488                                     | 488                                 | W19            | 500                                     | 0                                   |
| W6             | 400                                     | 74.3                                | W20            | 3000                                    | 0                                   |
| W7             | 300                                     | 0                                   | W21            | 3000                                    | 0                                   |
| W8             | 430                                     | 23                                  | W22            | 780                                     | 0                                   |
| W9             | 350                                     | 0                                   | W23            | 2000                                    | 0                                   |
| W10            | 160                                     | 0                                   | W24            | 600                                     | 0                                   |
| W11            | 180                                     | 0                                   | W25            | 780                                     | 780                                 |
| W12            | 320                                     | 0                                   | W26            | 700                                     | 700                                 |
| W13            | 470                                     | 0                                   | W27            | 300                                     | 300                                 |
| W14            | 3000                                    | 0                                   | <b>Total</b>   | <b>27432</b>                            | <b>8288</b>                         |

Στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου, τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε σχέση με τα προηγούμενα δυο σενάρια. Παρατηρείται μια μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 68%, ενώ ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση είναι δεκαέξι. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα προηγούμενα σενάρια παρατηρούμε ότι όπως και προηγουμένως όσο μετατοπίζεται το μέτωπο της υφαλμύρισης προς την ακτογραμμή, η συνολική παροχή άντλησης μειώνεται. Στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου όμως δεν συμβαίνει ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των πηγαδιών με μηδενική άντληση, αλλά ακριβώς το αντίθετο.

Αναλυτικότερα, τα πηγάδια έξι και οκτώ παρουσιάζουν αντλητική δραστηριότητα, η οποία ωστόσο είναι μόλις 74.3 και 23 m<sup>3</sup>/d αντίστοιχα, σε σχέση με τα δυο πρώτα σενάρια όπου και είχαν μηδενική παροχή άντλησης. Το πηγάδι δεκαέξι εμφανίζει παροχή άντλησης παρόμοια με την αρχική του τιμή (436 m<sup>3</sup>/d έναντι 488 m<sup>3</sup>/d), ενώ το πηγάδι 26 ξανανοίγει αντλώντας 700 m<sup>3</sup>/d, τιμή ίση με την αρχική του. Ωστόσο το πηγάδι 21, το οποίο είναι ένα πηγάδι με μεγάλη αντλητική δραστηριότητα (αρχική τιμή ίση με 3000 m<sup>3</sup>/d), αποκτά μηδενική παροχή άντλησης και παύει να είναι ενεργό. Για το λόγο αυτό, αν και αυξάνεται ο αριθμός των ενεργών πηγαδιών, μειώνεται το άθροισμα των παροχών άντλησης για την περιοχή μελέτης.

#### 7.2.4 Σενάριο 4<sup>ο</sup>

Στο τέταρτο σενάριο που εξετάζεται, οι θέσεις των σημείων παρατήρησης μετατοπίζονται λίγο περισσότερο. Οι ακριβείς θέσεις των σημείων παρατήρησης παρουσιάζονται στο σχήμα 7.6:



Σχήμα 7.6. Η θέση των σημείων παρατήρησης του τέταρτου σεναρίου

Σύμφωνα με τις θέσεις των σημείων παρατήρησης που ορίστηκαν για το μέτωπο της υφαλμύρισης, το μοντέλο GWM έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις παροχές άντλησης των πηγαδιών, σύμφωνα με τον πίνακα 7.5:

Πίνακας 7.5. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των παροχών του τέταρτου σεναρίου

| Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Όνομα Πηγαδιού | Αρχική Τιμή Παροχής (m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστη Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| W1             | 488                                     | 488                                 | W15            | 2500                                    | 0                                   |
| W2             | 2255                                    | 2255                                | W16            | 488                                     | 0                                   |
| W3             | 2255                                    | 2255                                | W17            | 600                                     | 0                                   |
| W4             | 488                                     | 488                                 | W18            | 600                                     | 0                                   |
| W5             | 488                                     | 488                                 | W19            | 500                                     | 0                                   |
| W6             | 400                                     | 240                                 | W20            | 3000                                    | 0                                   |
| W7             | 300                                     | 0                                   | W21            | 3000                                    | 0                                   |
| W8             | 430                                     | 0                                   | W22            | 780                                     | 0                                   |
| W9             | 350                                     | 0                                   | W23            | 2000                                    | 0                                   |
| W10            | 160                                     | 0                                   | W24            | 600                                     | 6.1                                 |
| W11            | 180                                     | 0                                   | W25            | 780                                     | 780                                 |
| W12            | 320                                     | 0                                   | W26            | 700                                     | 700                                 |
| W13            | 470                                     | 0                                   | W27            | 300                                     | 300                                 |
| W14            | 3000                                    | 0                                   | Total          | 27432                                   | 8055                                |

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του τέταρτου και τελευταίου σεναρίου με την αρχική κατάσταση, παρατηρείται μια μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 71%. Ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση φτάνει τα δεκαεπτά, ενώ παρατηρείται και μια αισθητή αλλαγή της αντλητικής δραστηριότητας σε δύο πηγάδια άντλησης. Το πηγάδι έξι αντλεί με παροχή 240m<sup>3</sup>/d, τιμή μικρότερη της αρχικής του κατά 40%, ενώ το πηγάδι 24 υπολειτουργεί με μία μικρή παροχή άντλησης, μόλις 6.1 m<sup>3</sup>/d.

Παρατηρώντας την κατανομή των πηγαδιών στην περιοχή ενδιαφέροντος, γίνεται αντιληπτό ότι όλα τα πηγάδια που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα έχουν μηδενική παροχή άντλησης. Αντίθετα τα πηγάδια που δεν παρουσίασαν καμία αλλαγή βρίσκονται μακριά από την ενδοχώρα, με τα έξι από αυτά να είναι στο δυτικό τμήμα και κοντά στην ακτογραμμή και τα υπόλοιπα τέσσερα να βρίσκονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

### 7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Επαλήθευση μεθόδου

Στις προηγούμενες ενότητες έγινε σύγκριση του κάθε σεναρίου με την αρχική – υφιστάμενη κατάσταση. Σε αυτή την ενότητα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα και από τα τέσσερα σενάρια και θα προταθεί ένα σενάριο σαν την πιο εφικτή λύση στο έντονο πρόβλημα της υφαλμύρισης που αντιμετωπίζει η περιοχή του Τυμπακίου. Για το λόγο αυτό ακολουθεί ο πίνακας 7.6, ο οποίος περιλαμβάνει τα αποτελέσματα κάθε βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής.

Πίνακας 7.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την σύγκριση των σεναρίων

| Κατάσταση Υδροφορέα | Συνολική παροχή άντλησης (m <sup>3</sup> /d) | Μείωση άντλησης (%) | Αριθμός πηγαδιών με μηδενική άντληση |
|---------------------|----------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Αρχική              | 27432                                        | -                   | 0                                    |
| Υφιστάμενη          | 25684                                        | 6.5                 | 2                                    |
| Σενάριο 1           | 13935                                        | 50                  | 17                                   |
| Σενάριο 2           | 12874                                        | 53                  | 19                                   |
| Σενάριο 3           | 11288                                        | 59                  | 16                                   |
| Σενάριο 4           | 8055                                         | 70                  | 17                                   |

Το σενάριο που βρίσκεται πιο κοντά στη βέλτιστη κατάσταση είναι το τέταρτο σενάριο, το οποίο όμως έχει και τη μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές των παροχών άντλησης. Με μείωση 71% των αρχικών τιμών, το τελευταίο σενάριο δεν θεωρείται μια ρεαλιστική – εφαρμόσιμη λύση.

Το πρώτο σενάριο είναι και η πρώτη προσέγγιση που έγινε για την αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρισης. Παρόλο που οι νέες θέσεις των σημείων παρατήρησης δεν απέχουν μεγάλη απόσταση από την αρχική κατάσταση, οι αλλαγές στην αντλητική δραστηριότητα είναι αισθητές, μειώνοντας τις αρχικές τιμές κατά 60%.

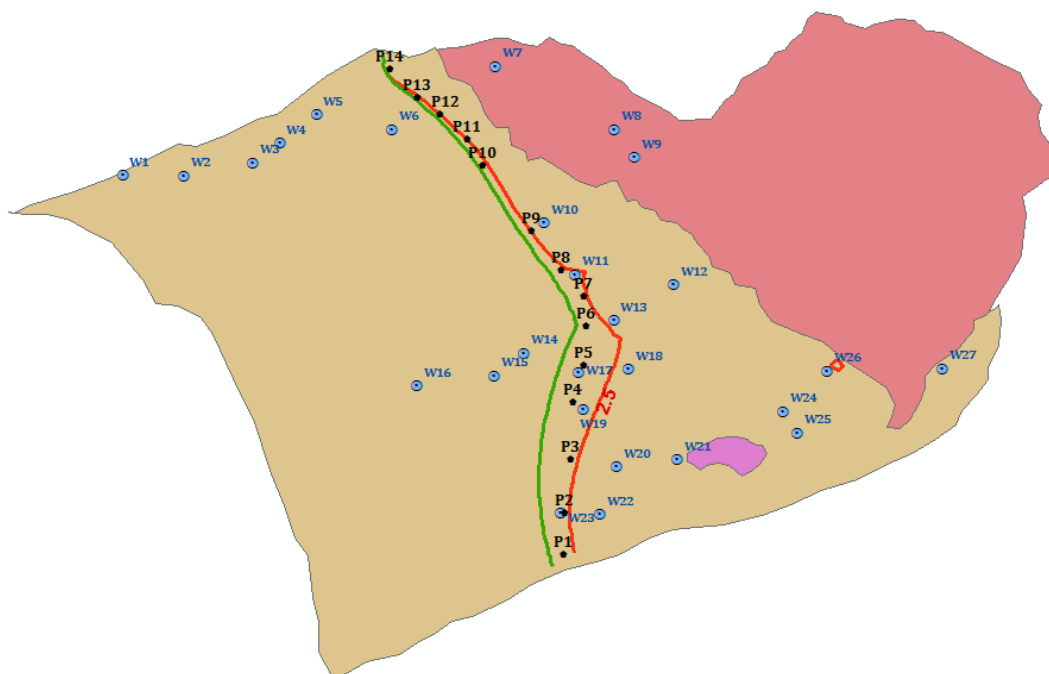
Το δεύτερο σενάριο επιδρά πιο δραστικά στις τιμές των παροχών άντλησης των πηγαδιών, καθιστώντας 19 πηγάδια ανενεργά και μειώνοντας τις παροχές άντλησης κατά 64%. Η διαφορά στη συνολική παροχή άντλησης για την περιοχή του Τυμπακίου δεν διαφέρει πολύ από αυτή του πρώτου σεναρίου (διαφορά μόλις 4%), άλλα στο δεύτερο σενάριο ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση φτάνει τα 19. Από τα 27 πηγάδια που υπάρχουν στην περιοχή, δεν είναι εφικτό να μείνουν μόνο εννέα πηγάδια ενεργά, πέντε πηγάδια στο δυτικό τμήμα και τέσσερα στο ανατολικό.

Στο τρίτο σενάριο, το μέτωπό της υφαλμύρισης, που έχει οριστεί από τα σημεία παρατήρησης, βρίσκεται κοντά στη βέλτιστη δυνατή λύση. Παρατηρείται μια μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 68%, ενώ η διαφορά του από το πρώτο σενάριο (το σενάριο με τη μικρότερη μείωση στη συνολική παροχή άντλησης) είναι μόλις 8%. Τα ενεργά πηγάδια στο σύνολο τους είναι δώδεκα, παρουσιάζοντας την παρακάτω κατανομή:

- Έξι πηγάδια (W1 – W6) στο δυτικό τμήμα της περιοχής, με μέγιστη παροχή 2255 m<sup>3</sup>/d και ελάχιστη 74.3 m<sup>3</sup>/d
- Δύο πηγάδια (W8, W16) στην ενδοχώρα, με μέγιστη παροχή 436 m<sup>3</sup>/d και ελάχιστη 23 m<sup>3</sup>/d
- Τρία πηγάδια (W25 - W27) στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, με μέγιστη παροχή 780 m<sup>3</sup>/d και ελάχιστη 300 m<sup>3</sup>/d

Για τους παραπάνω λόγους, το τρίτο σενάριο κρίνεται πιο εφικτό και προτείνεται σαν μια πιθανή λύση.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων του τρίτου σεναρίου που προτείνεται. Τα αποτελέσματα για τις παροχές άντλησης που προέκυψαν από το μοντέλο GWM και τη βελτιστοποίηση της περιοχής μελέτης, εισάγονται σα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο προσομοίωσης MODFLOW. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι ο εντοπισμός του μετώπου της υφαλμύρισης και τις ισοϋψούς των 2.5 m, στη θέση που έχει οριστεί από τα σημεία παρατήρησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο σχήμα 7.7 που ακολουθεί. Στο σχήμα 7.7 εμφανίζεται με **κόκκινο** χρώμα η ισοϋψής των 2.5 m που προέκυψε από το μοντέλο MODFLOW. Με **πράσινο** χρώμα απεικονίζεται η βέλτιστη δυνατή λύση, όπου οι παροχές άντλησης είναι μηδενικές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τέλος με **μαύρο** χρώμα εμφανίζονται οι θέσεις των σημείων παρατήρησης (P1 – P14), οι οποίες ορίστηκαν κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης του τρίτου σεναρίου.



**Σχήμα 7.7. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης στο μοντέλο MODFLOW**

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου MODFLOW και εφαρμόζοντας τις βέλτιστες αντλήσεις που υπολογίστηκαν, επιβεβαιώνεται ότι η θέση του μετώπου της υφαλμύρισης εντοπίζεται αρκετά κοντά στα σημεία παρατήρησης λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της ισοϋψούς των 2.5 m. Η ισοϋψής των 2.5m σχεδόν ταυτίζεται στο δυτικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής, ενώ στο κεντρικό τμήμα υπάρχει μια μικρή απόκλιση στα σημεία P4 – P6. Η ορθότητα του αποτελέσματος ολοκληρώνεται από το γεγονός ότι η ισοϋψής δεν ξεπερνά κανένα από τα σημεία παρατήρησης. Η μικρή απόκλιση μεταξύ της ισοϋψούς και των πηγαδιών παρατήρησης οφείλεται στο γεγονός ότι τα πηγάδια αντιστοιχήθηκαν σε κελιά του μοντέλου MODFLOW συγκεκριμένης έκτασης (στα οποία εφαρμόστηκε ο περιορισμός του υδραυλικού ύψους) εφόσον δεν υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν σημειακά στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 7.7. Ως εκ τούτου ο περιορισμός των 2.5 m ορίζεται στην ουσία σε μια ζώνη μικρού πάχους και όχι σε μια γραμμή.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής του Τυμπακίου με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης MODFLOW, το οποίο χρησιμοποιεί την ανάλυση πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση της εξίσωσης της υπόγειας ροής. Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο της υφαλμύρισης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου σε συνδυασμό με τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, που βασίζεται στην εξίσωση Ghyben – Herzberg.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή που αφορούν τόσο τα αποτελέσματά του προγράμματος MODFLOW, όσο και τα τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης των αντλήσεων που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου GWM, συνοψίζονται στις προτάσεις που ακολουθούν:

- Από τα αποτελέσματα του μοντέλου MODFLOW προκύπτει ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης στον υπόγειο υδροφορέα του Τυμπακίου έχει προχωρήσει αρκετά, με το μέτωπο της υφαλμύρισης να φτάνει στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Αιτία του έντονου αυτού προβλήματος αποτελεί η υπεράντληση του υδροφορέα για την ικανοποίηση των αναγκών σε άρδευση, αφού η ευρύτερη περιοχή του Τυμπακίου χαρακτηρίζεται ως αγροτική.
- Από την προσομοίωση του μοντέλου, παρατηρείται μια έντονη διαφοροποίηση του προβλήματος κατά τη διάρκεια του ενός υδρολογικού έτους που εξετάστηκε. Τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από αυτά του χειμώνα, με το πρόβλημα να εμφανίζεται εντονότερο κατά τη θερινή περίοδο. Για την χειμερινή περίοδο, η υφαλμύριση εντοπίζεται 2.3 km από την ακτογραμμή με αποτέλεσμα να επηρεάζονται δύο πηγάδια άντλησης. Αντίστοιχα και για τη θερινή περίοδο, όπου το πρόβλημα γίνεται αισθητά εντονότερο, η υφαλμύριση εντοπίζεται 5.8 km από την ακτογραμμή και επηρεάζονται 22 πηγάδια άντλησης, από τα 27 συνολικά της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Από την πρώτη προσομοίωση της περιοχής μελέτης για την υφιστάμενη κατάσταση, παρατηρείται μια μείωση της συνολικής αντλητικής δραστηριότητας, κατά 6.5%. Η μικρή αυτή μείωση ήταν αναμενόμενη, επειδή τα σημεία παρατήρησης (P3 – P6) ορίστηκαν πιο κοντά στην ακτογραμμή και δεν ακολουθούν την ισοϋψή των 2.5m. Η θέση των σημείων αυτών μετατοπίστηκε ελάχιστα για την καλύτερη προσέγγιση της βελτιστοποίησης. Συνολικά τα πηγάδια που επηρεάζονται είναι τέσσερα, από τα οποία τα δύο μηδενίζονται. Τα συγκεκριμένα πηγάδια βρίσκονται αρκετά κοντά στην ισοϋψή των 2.5m, οπότε την επηρεάζουν άμεσα.

- Τα σενάρια που επιλέχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας προέκυψαν από την σταδιακή μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρισης προς την ακτογραμμή. Οι θέσεις των σημείων παρατήρησης ξεκινούν από την χειρότερη περίπτωση, την υφιστάμενη δηλαδή κατάσταση, και μετατοπίζονται μέχρι και τη βέλτιστη δυνατή. Η βέλτιστη δυνατή κατάσταση, είναι η κατάσταση που προκύπτει από την εφαρμογή μηδενικής άντλησης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Για την περίπτωση της βέλτιστης δυνατής κατάστασης, παρατηρείται ότι ο υδροφορέας λόγω της υπερεκμετάλλευσης των τελευταίων ετών έχει επιβαρυνθεί σημαντικά. Ακόμα και με το μηδενισμό όλων των αντλήσεων, το μέτωπο της υφαλμύρισης εντοπίζεται σε μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή. Για το λόγο αυτό, η απόσταση των θέσεων παρατήρησης μεταξύ της χειρότερης – τωρινής κατάστασης και της βέλτιστης δυνατής δεν είναι πολύ μεγάλη.

- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου, όπου οι νέες θέσεις των σημείων παρατήρησης δεν απέχουν μεγάλη απόσταση από την αρχική κατάσταση, οι αλλαγές στην αντλητική δραστηριότητα είναι αισθητές. Οι τιμές των παροχών άντλησης μειώνονται κατά το ήμισυ και επηρεάζεται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων. Παρατηρείται μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 60%, ενώ ο αριθμός των πηγαδιών με μηδενική άντληση είναι δεκαεπτά. Το γεγονός αυτό αποτελεί απόδειξη του έντονου προβλήματος που παρουσιάζει η περιοχή μελέτης και της υπεράντλησης που γίνεται για την ικανοποίηση των αναγκών σε ύδρευση και κυρίως άρδευση.
- Το δεύτερο σενάριο επιδρά πιο δραστικά στις τιμές των παροχών άντλησης των πηγαδιών, καθιστώντας περισσότερα πηγάδια ανενεργά και μειώνοντας κι άλλο τις παροχές άντλησης. Παρατηρείται μείωση των παροχών άντλησης της τάξεως του 64%, με τον αριθμό των πηγαδιών με μηδενική άντληση να φτάνει τα 19. Ωστόσο η διασπορά των πηγαδιών που επηρεάζονται είναι παρόμοια με το πρώτο σενάριο και εστιάζει στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου και όλα τα πηγάδια άντλησης είναι ανενεργά.
- Από τα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου, το μέτωπό της υφαλμύρισης που έχει οριστεί από τα σημεία παρατήρησης, βρίσκεται κοντά στη βέλτιστη δυνατή λύση. Η μείωση των παροχών άντλησης είναι 68%, ενώ μειώνεται και ο αριθμός των ανενεργών πηγαδιών. Στο σενάριο αυτό τα ενεργά πηγάδια (11 πηγάδια) είναι περισσότερα από κάθε άλλο σενάριο που εξετάστηκε και η διασπορά τους είναι καλύτερη, επιτρέποντας την άντλησης από το δυτικό, ανατολικό αλλά και το κεντρικό κομμάτι της περιοχής. Τέλος το τρίτο σενάριο είναι το σενάριο που προτείνεται ως μια εφικτή λύση για την υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης και την αναχαίτιση του φαινομένου.

- Τέλος το σενάριο που βρίσκεται πιο κοντά στη βέλτιστη κατάσταση είναι το τέταρτο σενάριο, το οποίο όμως έχει και τη μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές των παροχών άντλησης. Παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση των τιμών των παροχών άντλησης (71%), καθιστώντας σχεδόν καθολική μηδενική αντλητική δραστηριότητα. Για το λόγο αυτό, το τελευταίο σενάριο δεν θεωρείται μια ρεαλιστική και εφαρμόσιμη λύση.

Συμπερασματικά, από τη μελέτη τόσο της υφιστάμενης κατάστασης, όσο και των παραπάνω σεναρίων, προκύπτει ότι η ανθρώπινη παρέμβαση στο φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι πολύ έντονη λόγω του γεγονότος ότι τα πηγάδια χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες άρδευσης της αγροτικής περιοχής του Τυμπακίου. Παρατηρείται υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα, αναγκάζοντας τον να υποχωρεί και με τον τρόπο αυτό να εντείνεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Για το λόγο αυτό, το μέτωπο της υφαλμύρισης παρουσιάζει τεράστια αλλαγή ανάλογα με την εποχή, όπου το χειμώνα οι αντλήσεις είναι λιγότερες λόγω της βροχόπτωσης, ενώ το καλοκαίρι είναι όλες ανοικτές με μεγάλες τιμές παροχής άντλησης. Ακόμα και στην περίπτωση, όπου όλα τα πηγάδια άντλησης είναι κλειστά (βέλτιστη κατάσταση), το μέτωπο της υφαλμύρισης υποχωρεί χωρίς όμως να φτάνει αρκετά κοντά στην ακτογραμμή. Ωστόσο η υπεράντληση των γεωτρήσεων δεν βοηθά στην υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης.

## 8.2 Προτάσεις

- Το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η περιοχή. Η αναχαίτιση, ωστόσο του φαινομένου αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία, και πολλές φορές το επιθυμητό αποτέλεσμα δεν είναι εφικτό όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην διατριβή αυτή. Για το λόγο αυτό, είναι προτιμότερη η πρόβλεψη του φαινομένου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισροή της θάλασσας στην ενδοχώρα με μια σωστή υδρολογική μελέτη για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων, παρά η αντιμετώπιση του φαινομένου.
- Η ανεξέλεγκτη εμφάνιση παράνομων «ιδιωτικών» γεωτρήσεων για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα άντλησης ίσως αποτελεί την αιτία του υπάρχοντος προβλήματος και της επιδείνωσης της παρούσας κατάστασης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παρουσία γεωτρήσεων σε μεγάλες γεωργικές μονάδες – θερμοκήπια, για την ικανοποίηση των αναγκών σε άρδευση, οι οποίες δεν ελέγχονται από τη ΔΕΥΑΧ.
- Νέα υδροληπτικά έργα όπως τα φράγματα και ο εμπλουτισμός των υδροφορέων θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια λύση. Στην περιοχή μελέτης, κάνουν την εμφάνιση τους τέσσερις ποταμοί, από τους οποίους ο ποταμός Κουτσουλίδης καλύπτει τη μεγαλύτερη επιφάνεια (105Km<sup>2</sup>).

Ωστόσο στην περίπτωση των φραγμάτων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο παράγοντας αντισεισμικότητα. Έτσι για την περιοχή του Τυμπακίου, ή ακόμα ευρύτερα της Κρήτης, όπου έχουν κάνει την εμφάνιση τους ισχυροί σεισμοί, θα πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Σε περίπτωση αστοχίας της αντοχής ενός φράγματος, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι καταστροφικά, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στην περιοχή και κυρίως στον ανθρώπινο παράγοντα.

Ο εμπλουτισμός των υδροφορέων μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση, από αυτή των φραγμάτων. Η επαναχρησιμοποίηση των υδάτων από τις εκροές του βιολογικού καθαρισμού, μπορούν να συμβάλλουν στον εμπλουτισμό των υδροφορέων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατάλληλη επεξεργασία των υδάτων από τις εκροές για τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι το κόστος αυτής της επιλογής είναι σχετικά υψηλό.

- Σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό το πρόβλημα έχει δημιουργηθεί από την προσπάθεια των ανθρώπων να καλύψουν τις καθημερινές ανάγκες σε άρδευση. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλες ποσότητες νερού κατασπαταλώνται μέσω της γεωργίας στην περιοχή. Αν λοιπόν, επιβαλλόταν η άρδευση να γίνεται κατά τις νυκτερινές ώρες ή νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα για την αποφυγή μεγάλης εξάτμισης καθώς και όταν η ένταση του ανέμου δεν είναι μεγάλη, τότε το πρόβλημα θα μπορούσε να περιοριστεί.
- Επίσης ένα μέρος του προβλήματος που μπορεί να μετριάσει τη σπατάλη του νερού, μειώνοντας έτσι άσκοπα τα αποθέματα του, είναι οι απώλειες μέσω του δικτύου. Ο έλεγχος και η συντήρηση τόσο των δικτύων μεταφοράς, όσο και των δικτύων διανομής, πρέπει να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την αποφυγή διαρροών που οδηγούν σε άσκοπη κατανάλωση νερού.
- Βελτιώνοντας ωστόσο τη διαχείριση της ποσότητας των υπόγειων υδάτων, θα πρέπει κύριο μέλημα να είναι η εύρεση μιας βέλτιστης δυνατής λύσης. Ωστόσο προτείνεται και μια ακολουθία ενεργειών που μπορούν να γίνουν:
  - Συνεργατικές πρωτοβουλίες στον τομέα της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων
  - Επανεξέταση της προσέγγισης για τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων
  - Βασική έρευνα
  - Παρακολούθηση και συλλογή στοιχείων
  - Η διάδοση στοιχείων και την πρόσβαση σε αυτά
  - Ολοκληρωμένη διαχείριση σε στρατηγικές τοποθεσίες, θέτοντας τα θεμέλια για τη διαχείριση σε πολύπλοκες θέσεις
  - Υποστήριξη ενός προγράμματος Εθνικής ή ακόμα και Παγκόσμιας Αξιολόγησης των νερών

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Χ. Γιαννέλη, Υδρολογική έρευνα λεκανών του ελληνικού χώρου: παράδειγμα από τη λεκάνη Αγίων Αναργύρων (Καστοριά), Θεσσαλονίκη, 2009
2. Γ. Καλλέργης, Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία , Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2001
3. Γ. Καρατζάς, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2009
4. Σ. Καρτεράκης, Διαχείριση των υπόγειων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, 2005
5. Κατάσταση υπόγειων υδροφορέων Κρήτης, Περιφέρεια Κρήτης Διεύθυνση Υδάτων, 2009
6. Π. Κρίνης, Εφαρμογή μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής σε λεκάνες του ελληνικού χώρου. (Λεκάνη Μεσσαράς του νομού Ηρακλείου, νότια Κρήτη), 2009
7. Π. Λατινόπουλος, Υδραυλική των υπογείων υδάτων, Α.Π.Θ., 1998
8. Π. Λατινόπουλος και Ν. Θεοδοσίου, Εκμετάλλευση και προστασία των υπόγειων υδατικών πόρων, 2007
9. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
10. Β. Τάντος , Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου – Κορίνθου. Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, Πάτρα, 2006
11. Μ. Τσαλέπη, Προσομοίωση της λειτουργίας υδροφορέα υπό συνθήκες κλιματικών αλλαγών, Θεσσαλονίκη, 2009

---

## Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. D. Ahlfeld, A. Mulligan, Optimal Management of Flow Groundwater Systems, Academic Press, 2000
2. D. Ahlfeld, A. Mulligan, P. Barlow, GWM – A Ground-Water Management Process for the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model (MODFLOW – 2000), U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Virginia, 2005
3. M. Anderson, W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
4. P. Barlow, Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast, 2003
5. J. Bear, A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publishers, 1999
6. I. Boskidis, V. Pisinaras, C. Petalas, V. Tsihritzis, Monitoring and modeling of two alluvial aquifers in lower Nestos river basin, Northern Greece, Journal of Environmental Science and Health, Part A (2012) 47, 1849–1868, 2012
7. A. Das, B. Datta, Application of optimisation techniques in groundwater quantity and quality management, Sadhana, Vol. 26, Part 4, 293–316, 2001
8. Z. Dokou, G. Karatzas, Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modelling and comparison with the sharp-interface Approach, Hydrological Sciences Journal, 57:5, 985–999, 2012
9. S. Foster, A. Tuinhof, K. Kemper, H. Garduño, M. Nanni, Groundwater Management Strategies - facets of the integrated approach, World Bank - Global water partnership associate program, 2003a
10. S. Foster, A. Tuinhof, K. Kemper, H. Garduño, M. Nanni, Characterization of Groundwater Systems - key concepts and frequent misconceptions, World bank - Global water partnership associate program, 2003b
11. S. Foster, C. Perry, R. Hirata, H. Garduño, Groundwater Resource Accounting - critical for effective management in a changing world, 2009

- 
12. G. Giannopoulos, E. Varouchakis, G. Karatzas, Assessment of potential climatic and pumping changes on the groundwater resources of a Mediterranean basin, *Protection* 2012: 271-278, 2012
  13. G. Zacharioudakis, Conceptual Model and Model idealisation report of Tibaki basin in South Crete, Scientific report
  14. S. Karterakis, G. Karatzas, I. Nikolos, M. Papadopoulou, Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria, *Journal of hydrology*, vol. 342, 270-282, 2007
  15. G. Kopsiaftis, A. Mantoglou, P. Giannouloupoulos, Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island, *Desalination*, vol. 237, 65-80, 2009
  16. G. Kourakos, A. Mantoglou, Pumping optimization of coastal aquifers based on evolutionary algorithms and surrogate modular neural network models, *Advances in Water Resources*, vol.32, 507-521, 2009
  17. D. Loucks και E. van Bee, *Water Resources Systems Planning and Management, An Introduction to Methods, Models and Applications*, 2005
  18. A. Mantoglou, M. Papantoniou, P. Giannouloupoulos, Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms, *Journal of Hydrology*, vol. 297, 209-228, 2004
  19. A. Mantoglou, M. Papantoniou, Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models, *Journal of Hydrology*, vol. 361, 52-63, 2008
  20. J. Modinger, H. Kobus, Approach and Methods for the Assessment of Sustainable Groundwater Management in the Rhine-Neckar region, Germany, *International Journal of Water Resources Development*, 2005
  21. M. Papadopoulou, I. Nikolos, G. Karatzas, Computational benefits using artificial intelligent methodologies for the solution of an environmental design problem: saltwater intrusion, 2010
  22. M. Papadopoulou, E. Varouchakis, G. Karatzas, Simulation of complex aquifer behavior using numerical and geostatistical methodologies, *Desalination*, 2009

23. M. Papadopoulou, E. Varouchakis, G. Karatzas, Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer, Environmental Modeling and Assessment, 2010
24. S. Paritsis, Simulation of Seawater Intrusion into the Tymbaki aquifer, South Central Crete, Greece, Scientific report, 2005
25. Resource & Environmental Management Pty Ltd., Guiding Principles for Sustainable Groundwater Management, Sustainable Groundwater Use Project commissioned by the Murray Darling Basin Commission, 2004
26. J. Scibek, D. Allen, A. Cannon, P. Whitfield, Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model, Journal of hydrology, 2007
27. V. Uddameri, M. Kuchanur, N. Baliya, Optimization-Based Approaches for Groundwater Management, n.d
28. P. Taylor, R. Owen, A. Tuinhof, Groundwater Management in IWRM – Training Manual. Ground Water Management Advisory Team, 2010
29. D. Todd, Groundwater Hydrology, second edition, Wiley, New York, 1980
30. Visual Modflow v.4.2 User's Manual, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, 2006
31. M. Wang, C. Zheng, Ground Water Management Optimization using Genetic Algorithms and Simulated Annealing: Formulation and Comparison, Journal of the American Water Resources Association, vol 34, 1998
32. J. Zume, A. Tarhule, Simulating the impacts of groundwater pumping on stream aquifer dynamics in semiarid northwestern Oklahoma, USA, Hydrogeology Journal, 2008

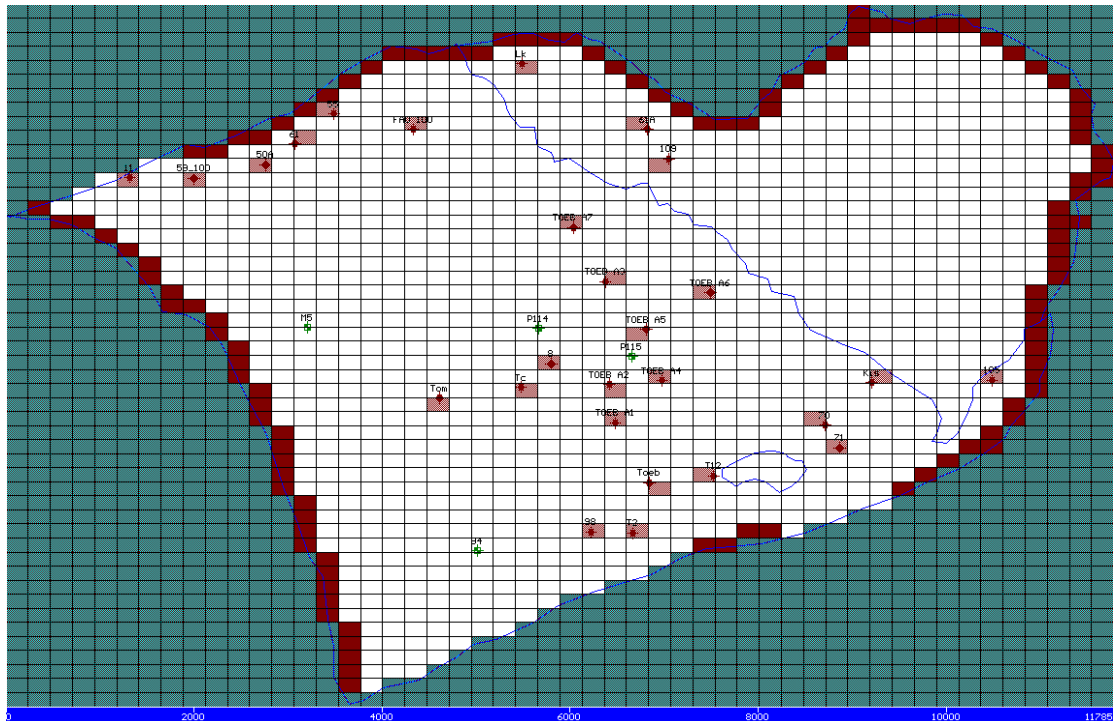
#### Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

1. <http://www.hellenica.de/DimosTympakiou.html>
2. [www.emy.gr](http://www.emy.gr)
3. [http://emeric.ims.forth.gr/crinno\\_meteo\\_search\\_gr.php](http://emeric.ims.forth.gr/crinno_meteo_search_gr.php)
4. [www.igme.gr](http://www.igme.gr)
5. [www.waterinfo.gr](http://www.waterinfo.gr)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Αρχεία MODFLOW

- Γενική μορφή αρχείου



- Εισαγωγή πηγαδιών άντλησης

Well Name: 59.100 X=1993.748 (m) Y=5650.674 (m)

Model coordinates World coordinates

Screened Intervals

| Screen Bottom (m) | Screen Top (m) |
|-------------------|----------------|
| -100              | -5             |

Pumping Schedule

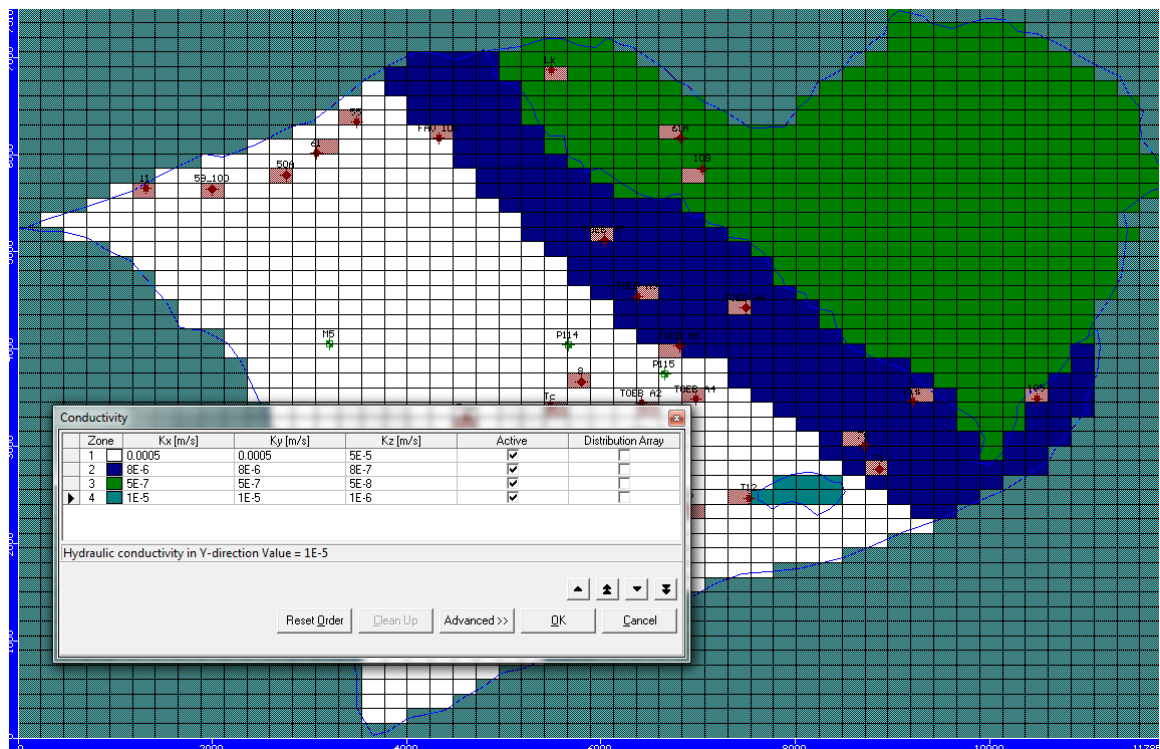
| Start (day) | End (day) | Rate (m <sup>3</sup> /d) |
|-------------|-----------|--------------------------|
| 0           | 180       | -2255                    |

Display as: ☒ Elevation ☐ Depth To

☒ Active

OK Cancel

- Εισαγωγή υδραυλικής αγωγιμότητας



- Εισαγωγή πλευρικών εισροών

The figure shows a dialog box titled "File Help" with a "Description:" field containing "Constant-Head(193)". Below this is a checkbox labeled "Assign to appropriate layer" which is unchecked. The main part of the dialog box is a table for defining lateral inflows. The table has the following structure:

| Edit selected row(s) or column: \$SHEAD \$EHEAD |                  |                 |                     |                    |                                     |
|-------------------------------------------------|------------------|-----------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------|
|                                                 | Start Time [day] | Stop Time [day] | Start Time Head [m] | Stop Time Head [m] | Active                              |
| ▶                                               | 0                | 180             | 3.5                 | 3.5                | <input checked="" type="checkbox"/> |

At the bottom of the dialog box are buttons: "OK" and "Cancel".

- Εισαγωγή βροχόπτωσης

File Help

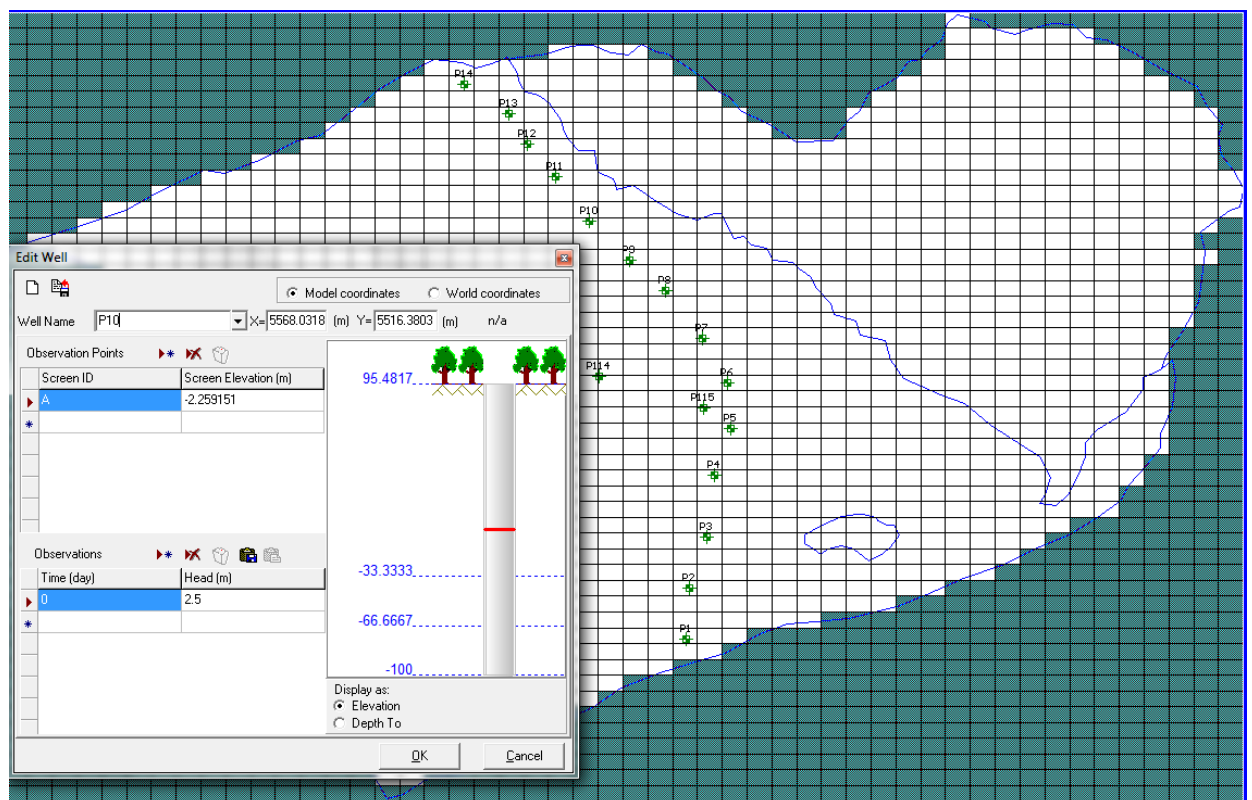
Zone #: 1 Zone Name: Recharge zone (1) Layer #: 1

Edit selected row(s) or column: \$RECHARGE

| Start Time [day] | Stop Time [day] | Recharge [mm/yr] | Active                              |
|------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| 0                | 180             | 2.6906E-5        | <input checked="" type="checkbox"/> |

OK Cancel

- Εισαγωγή πηγαδιών - σημείων παρατήρησης για την βελτιστοποίηση του προβλήματος



## Αρχεία GWM

- DECVAR

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, DECVAR file
#August 14, 2006
1 0
27 0 0 #1-IPRN GWMWFILE
Q11 1 1 13 6 W Y 1 #2-NFVAR NEVAR NBVAR
Q50A 1 1 12 12 W Y 1 #3a-FVNAME NC LAY ROW COL FTYPE FSTAT WSP
Q61 1 1 10 14 W Y 1
Q55 1 1 8 15 W Y 1
QFA0100 1 1 9 19 W Y 1
Q61A 1 1 9 29 W Y 1
Q109 1 1 12 30 W Y 1
QA7 1 1 16 26 W Y 1
QA3 1 1 20 28 W Y 1
QA6 1 1 21 32 W Y 1
QA5 1 1 24 29 W Y 1
Q8 1 1 26 25 W Y 1
QTC 1 1 28 24 W Y 1
QTom 1 1 29 20 W Y 1
QA2 1 1 28 28 W Y 1
QA4 1 1 27 30 W Y 1
QA1 1 1 30 28 W Y 1
QToeb 1 1 35 30 W Y 1
QT2 1 1 38 29 W Y 1
Q98 1 1 38 27 W Y 1
Q70 1 1 30 37 W Y 1
Q71 1 1 32 38 W Y 1
QK1s 1 1 27 40 W Y 1
Q105 1 1 27 45 W Y 1
QT12 1 1 34 32 W Y 1
QLk 1 1 5 24 W Y 1
Q59 1 1 13 9 W Y 1
```

- GWM

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, GWM file
#February 20, 2005
DECVAR C:\dewater\dewater.decvr
OBJFNC C:\dewater\dewater.objfnc
VARCON C:\dewater\dewater.varcon
HEDCON C:\dewater\dewater.hedcon
SOLN C:\dewater\dewater.soln
```

- HEDCON

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, HEDCON file
#February 20, 2005
1 #1-IPRN
14 0 0 0 #2-NHB NDD NDF NGD
P-1 1 39 30 ge 2.5 1 #3-HBNAME LAYH ROWH COLH TYPH BND NSP
P-2 1 36 31 ge 2.5 1
P-3 1 32 32 ge 2.5 1
P-4 1 29 34 ge 2.5 1
P-5 1 26 35 ge 2.5 1
P-6 1 23 33 ge 2.5 1
P-7 1 20 32 ge 2.5 1
P-8 1 18 30 ge 2.5 1
P-9 1 15 29 ge 2.5 1
P-10 1 13 27 ge 2.5 1
P-11 1 11 25 ge 2.5 1
P-12 1 9 24 ge 2.5 1
P-13 1 7 22 ge 2.5 1
P-14 1 5 19 ge 2.5 1
```

- NAM

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
GLOBAL 7 C:\dewater\dewater.glo
LIST 8 C:\dewater\dewater.lst
DIS 9 C:\dewater\dewater.dis
BAS6 10 C:\dewater\dewater.bas
BCF6 11 C:\dewater\dewater.bcf
PCG 12 C:\dewater\dewater.pcg
GWM 13 C:\dewater\dewater.gwm
```

- OBJFNC

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, OBJFNC file
#February 20, 2005
1 #1-IPRN
MAX WSDV #2-OBJTYP FNTYP
27 0 0 #3-NFVOBJ NEVOBJ NBVOBJ
Q11 1.0 #4-FVNAME FVOBJC
Q50A 1.0
Q61 1.0
Q55 1.0
QFA0100 1.0
Q61A 1.0
Q109 1.0
QA7 1.0
QA3 1.0
QA6 1.0
QA5 1.0
Q8 1.0
QTC 1.0
QTom 1.0
QA2 1.0
QA4 1.0
QA1 1.0
QToeb 1.0
QT2 1.0
Q98 1.0
Q70 1.0
Q71 1.0
QKis 1.0
Q105 1.0
QT12 1.0
QLk 1.0
Q59 1.0
```

- SOLN

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, SOLN file
#February 20, 2005
SLP #1-SOLNTYP
100 1000 0 #5a-SLPITMAX LPITMAX BBITMAX
1 100 0.1 0.05 1 #5b-SLPVCRIT SLPZCRIT DINIT DMIN DSC
1 100 0.5 0.3 3 #5c-NSIGDIG NPGNMX PGFACT AFACT NINFMX
1 0 1 #5d-SLPITPRT BBITPRT RANGE
0 #6a-IBASE
```

- VARCON

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
#DEWATER Sample Problem, VARCON file
#February 20, 2005
1 #1-IPRN
Q11 0.0d2 4.88d2 0.0d2 #2-FVNAME FVMIN FVMAX FVREF
Q50A 0.0d2 22.55d2 0.0d2
Q61 0.0d2 4.88d2 0.0d2
Q55 0.0d2 4.88d2 0.0d2
QFA0100 0.0d2 4.00d2 0.0d2
Q61A 0.0d2 4.30d2 0.0d2
Q109 0.0d2 3.50d2 0.0d2
QA7 0.0d2 1.60d2 0.0d2
QA3 0.0d2 1.80d2 0.0d2
QA6 0.0d2 3.20d2 0.0d2
QA5 0.0d2 4.70d2 0.0d2
Q8 0.0d2 30.0d2 0.0d2
QTC 0.0d2 25.0d2 0.0d2
QTom 0.0d2 4.88d2 0.0d2
QA2 0.0d2 6.00d2 0.0d2
QA4 0.0d2 6.00d2 0.0d2
QA1 0.0d2 5.00d2 0.0d2
QToeb 0.0d2 30.0d2 0.0d2
QT2 0.0d2 7.80d2 0.0d2
Q98 0.0d2 20.0d2 0.0d2
Q70 0.0d2 6.00d2 0.0d2
Q71 0.0d2 7.80d2 0.0d2
QKis 0.0d2 7.00d2 0.0d2
Q105 0.0d2 3.00d2 0.0d2
QT12 0.0d2 30.0d2 0.0d2
QLk 0.0d2 3.00d2 0.0d2
Q59 0.0d2 22.55d2 0.0d2
```

- GLO

```
dewater - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια

MODFLOW-2000
U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL
VERSION GWM-2000 1.1.3 120709, FROM MF2K V1.17.02

This model run produced both GLOBAL and LIST files.  This is the GLOBAL file.
GLOBAL LISTING FILE: C:\dewater\dewater.glo
UNIT 7

OPENING C:\dewater\dewater.lst
FILE TYPE:LIST UNIT 8 STATUS:REPLACE
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

OPENING C:\dewater\dewater.dis
FILE TYPE:DIS UNIT 9 STATUS:OLD
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

OPENING C:\dewater\dewater.bas
FILE TYPE:BAS6 UNIT 10 STATUS:OLD
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

OPENING C:\dewater\dewater.bcf
FILE TYPE:BCF6 UNIT 11 STATUS:OLD
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

OPENING C:\dewater\dewater.pcg
FILE TYPE:PCG UNIT 12 STATUS:OLD
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

OPENING C:\dewater\dewater.gwm
FILE TYPE:GWM UNIT 13 STATUS:OLD
FORMAT:FORMATTED ACCESS:SEQUENTIAL

DISCRETIZATION INPUT DATA READ FROM UNIT 9
#Discretization Package translator - (C) 2001 Waterloo Hydrogeologic Software
#ARXIKO.DIS Sat Dec 10 19:57:16 2011
3 LAYERS 50 ROWS 50 COLUMNS
1 STRESS PERIOD(S) IN SIMULATION
MODEL TIME UNIT IS DAYS
MODEL LENGTH UNIT IS METERS
THE GROUND-WATER TRANSPORT PROCESS IS INACTIVE

THE OBSERVATION PROCESS IS INACTIVE
THE SENSITIVITY PROCESS IS INACTIVE
THE PARAMETER-ESTIMATION PROCESS IS INACTIVE

MODE: FORWARD

Confining bed flag for each layer:
0 0 0

67600 ELEMENTS OF GX ARRAY USED OUT OF 67600
7500 ELEMENTS OF GZ ARRAY USED OUT OF 7500
7500 ELEMENTS OF IG ARRAY USED OUT OF 7500

DELR
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E16.9)
```

DEL R  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E16.9)

DEL C  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E16.9)

TOP ELEVATION OF LAYER 1  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E14.7)

MODEL LAYER BOTTOM EL. FOR LAYER 1  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E14.7)

MODEL LAYER BOTTOM EL. FOR LAYER 2  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E14.7)

MODEL LAYER BOTTOM EL. FOR LAYER 3  
READING ON UNIT 9 WITH FORMAT: (10E14.7)

| STRESS PERIOD | LENGTH   | TIME STEPS | MULTIPLIER FOR DELT | SS FLAG |
|---------------|----------|------------|---------------------|---------|
| 1             | 180.0000 | 1          | 1.000               | SS      |

STEADY-STATE SIMULATION

PCG2 -- CONJUGATE GRADIENT SOLUTION PACKAGE, VERSION 2.4, 12/29/98  
MAXIMUM OF 25 CALLS OF SOLUTION ROUTINE  
MAXIMUM OF 10 INTERNAL ITERATIONS PER CALL TO SOLUTION ROUTINE  
MATRIX PRECONDITIONING TYPE : 0  
15500 ELEMENTS IN X ARRAY ARE USED BY PCG  
1750 ELEMENTS IN IX ARRAY ARE USED BY PCG  
30000 ELEMENTS IN Z ARRAY ARE USED BY PCG  
  
15500 ELEMENTS OF X ARRAY USED OUT OF 15500  
30000 ELEMENTS OF Z ARRAY USED OUT OF 30000  
1750 ELEMENTS OF IX ARRAY USED OUT OF 1750

SOLUTION BY THE CONJUGATE-GRADIENT METHOD

MAXIMUM NUMBER OF CALLS TO PCG ROUTINE = 25  
MAXIMUM ITERATIONS PER CALL TO PCG = 10  
MATRIX PRECONDITIONING TYPE = 0  
RELAXATION FACTOR (ONLY USED WITH PRECOND. TYPE 1) = 0.10000E+01  
PARAMETER OF POLYNOMIAL PRECOND. = 2 (2) OR IS CALCULATED : 0  
HEAD CHANGE CRITERION FOR CLOSURE = 0.10000E-01  
RESIDUAL CHANGE CRITERION FOR CLOSURE = 0.10000E-01  
PCG HEAD AND RESIDUAL CHANGE PRINTOUT INTERVAL = 10  
PRINTING FROM SOLVER IS LIMITED(1) OR SUPPRESSED (>1) = 1  
DAMPING PARAMETER = 0.10000E+01

GWM1 -- GROUND-WATER MANAGEMENT PROCESS, VERSION 1.1.2 061609  
INPUT READ FROM UNIT 13

-----  
Reading GwM Input  
-----

#DEWATER Sample Problem, GwM file  
#February 20, 2005

OPENING DECISION-VARIABLE FILE ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.decvvar  
#DEWATER Sample Problem, DECVAR file  
#August 14, 2006

NO. OF FLOW-RATE DECISION VARIABLES (NFVAR) 27  
NO. OF EXTERNAL DECISION VARIABLES (NEVAR): 0  
BINARY VARIABLES ARE NOT ACTIVE.

| FLOW-RATE VARIABLES:           |         |            |     |     |     |                     |
|--------------------------------|---------|------------|-----|-----|-----|---------------------|
| NUMBER                         | NAME    | TYPE       | LAY | ROW | COL | FRACTION<br>OF FLOW |
| 1                              | Q11     | WITHDRAWAL | 1   | 13  | 6   | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 2                              | Q50A    | WITHDRAWAL | 1   | 12  | 12  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 3                              | Q61     | WITHDRAWAL | 1   | 10  | 14  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 4                              | Q55     | WITHDRAWAL | 1   | 8   | 15  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 5                              | QFA0100 | WITHDRAWAL | 1   | 9   | 19  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 6                              | Q61A    | WITHDRAWAL | 1   | 9   | 29  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 7                              | Q109    | WITHDRAWAL | 1   | 12  | 30  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 8                              | QA7     | WITHDRAWAL | 1   | 16  | 26  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 9                              | QA3     | WITHDRAWAL | 1   | 20  | 28  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 10                             | QA6     | WITHDRAWAL | 1   | 21  | 32  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 11                             | QA5     | WITHDRAWAL | 1   | 24  | 29  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 12                             | Q8      | WITHDRAWAL | 1   | 26  | 25  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 13                             | QTC     | WITHDRAWAL | 1   | 28  | 24  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 14                             | QToM    | WITHDRAWAL | 1   | 29  | 20  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 15                             | QA2     | WITHDRAWAL | 1   | 28  | 28  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 16                             | QA4     | WITHDRAWAL | 1   | 27  | 30  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 17                             | QA1     | WITHDRAWAL | 1   | 30  | 28  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 18                             | QToeb   | WITHDRAWAL | 1   | 35  | 30  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |
| 19                             | QT2     | WITHDRAWAL | 1   | 38  | 29  | 1.0000              |
| AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1 |         |            |     |     |     |                     |

```

20      Q98      WITHDRAWAL      1  38  27  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

21      Q70      WITHDRAWAL      1  30  37  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

22      Q71      WITHDRAWAL      1  32  38  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

23      QKis     WITHDRAWAL      1  27  40  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

24      Q105     WITHDRAWAL      1  27  45  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

25      QT12     WITHDRAWAL      1  34  32  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

26      QLK      WITHDRAWAL      1   5  24  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

27      Q59      WITHDRAWAL      1  13   9  1.0000
AVAILABLE IN STRESS PERIODS: 1

```

1893 BYTES OF MEMORY ALLOCATED TO STORE DATA FOR DECISION VARIABLES

CLOSING DECISION-VARIABLE FILE

OPENING OBJECTIVE-FUNCTION FILE ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.objfnc  
#DEWATER Sample Problem, OBJFNC file  
#February 20, 2005

OBJECTIVE TYPE: MAX FUNCTION TYPE: WSDV

NO. OF FLOW-RATE DECISION VARIABLES IN OBJECTIVE FUNCTION (NFV0BJ): 27  
NO. OF EXTERNAL DECISION VARIABLES IN OBJECTIVE FUNCTION (NEV0BJ): 0  
NO. OF BINARY DECISION VARIABLES IN OBJECTIVE FUNCTION (NBV0BJ): 0

OBJECTIVE FUNCTION: (excluding flow duration terms)

```

MAX      + 1.00E+00 Q11      + 1.00E+00 Q50A      + 1.00E+00 Q61
          + 1.00E+00 Q55      + 1.00E+00 QFA0100    + 1.00E+00 Q61A
          + 1.00E+00 Q109     + 1.00E+00 QA7       + 1.00E+00 QA3
          + 1.00E+00 QA6      + 1.00E+00 QA5       + 1.00E+00 Q8
          + 1.00E+00 QTC      + 1.00E+00 QT0m      + 1.00E+00 QA2
          + 1.00E+00 QA4      + 1.00E+00 QA1       + 1.00E+00 QToeb
          + 1.00E+00 QT2      + 1.00E+00 Q98       + 1.00E+00 Q70
          + 1.00E+00 Q71      + 1.00E+00 QKis      + 1.00E+00 Q105
          + 1.00E+00 QT12     + 1.00E+00 QLK      + 1.00E+00 Q59

```

108 BYTES OF MEMORY ALLOCATED TO STORE DATA FOR OBJECTIVE-FUNCTION

CLOSING OBJECTIVE-FUNCTION FILE

OPENING DECISION-VARIABLE CONSTRAINTS FILE  
ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.varcon  
#DEWATER Sample Problem, VARCON file  
#February 20, 2005

FLOW RATE VARIABLES:

| NUMBER | NAME    | MINIMUM<br>FLOW RATE | MAXIMUM<br>FLOW RATE | REFERENCE<br>FLOW RATE |
|--------|---------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 1      | Q11     | 0.000E+00            | 4.880E+02            | 0.000E+00              |
| 2      | Q50A    | 0.000E+00            | 2.255E+03            | 0.000E+00              |
| 3      | Q61     | 0.000E+00            | 4.880E+02            | 0.000E+00              |
| 4      | Q55     | 0.000E+00            | 4.880E+02            | 0.000E+00              |
| 5      | QFA0100 | 0.000E+00            | 4.000E+02            | 0.000E+00              |
| 6      | Q61A    | 0.000E+00            | 4.300E+02            | 0.000E+00              |
| 7      | Q109    | 0.000E+00            | 3.500E+02            | 0.000E+00              |
| 8      | QA7     | 0.000E+00            | 1.600E+02            | 0.000E+00              |
| 9      | QA3     | 0.000E+00            | 1.800E+02            | 0.000E+00              |
| 10     | QA6     | 0.000E+00            | 3.200E+02            | 0.000E+00              |
| 11     | QA5     | 0.000E+00            | 4.700E+02            | 0.000E+00              |
| 12     | Q8      | 0.000E+00            | 3.000E+03            | 0.000E+00              |
| 13     | QTC     | 0.000E+00            | 2.500E+03            | 0.000E+00              |
| 14     | QT0m    | 0.000E+00            | 4.880E+02            | 0.000E+00              |
| 15     | QA2     | 0.000E+00            | 6.000E+02            | 0.000E+00              |
| 16     | QA4     | 0.000E+00            | 6.000E+02            | 0.000E+00              |
| 17     | QA1     | 0.000E+00            | 5.000E+02            | 0.000E+00              |
| 18     | QToeb   | 0.000E+00            | 3.000E+03            | 0.000E+00              |
| 19     | QT2     | 0.000E+00            | 7.800E+02            | 0.000E+00              |
| 20     | Q98     | 0.000E+00            | 2.000E+03            | 0.000E+00              |
| 21     | Q70     | 0.000E+00            | 6.000E+02            | 0.000E+00              |
| 22     | Q71     | 0.000E+00            | 7.800E+02            | 0.000E+00              |
| 23     | QKis    | 0.000E+00            | 7.000E+02            | 0.000E+00              |
| 24     | Q105    | 0.000E+00            | 3.000E+02            | 0.000E+00              |
| 25     | QT12    | 0.000E+00            | 3.000E+03            | 0.000E+00              |
| 26     | QLK     | 0.000E+00            | 3.000E+02            | 0.000E+00              |
| 27     | Q59     | 0.000E+00            | 2.255E+03            | 0.000E+00              |

CLOSING DECISION-VARIABLE CONSTRAINTS FILE

OPENING HEAD CONSTRAINTS FILE  
ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.hedcon  
#DEWATER Sample Problem, HEDCON file  
#February 20, 2005

HEAD CONSTRAINTS:

| NUMBER | NAME | LAY | ROW | COL | TYPE | RIGHT-HAND<br>SIDE | STRESS<br>PERIOD |
|--------|------|-----|-----|-----|------|--------------------|------------------|
| 1      | P-1  | 1   | 39  | 30  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 2      | P-2  | 1   | 36  | 31  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 3      | P-3  | 1   | 32  | 32  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 4      | P-4  | 1   | 29  | 34  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 5      | P-5  | 1   | 26  | 35  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 6      | P-6  | 1   | 23  | 33  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 7      | P-7  | 1   | 20  | 32  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 8      | P-8  | 1   | 18  | 30  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 9      | P-9  | 1   | 15  | 29  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 10     | P-10 | 1   | 13  | 27  | >    | 2.5000E+00         | 1                |

OPENING HEAD CONSTRAINTS FILE  
ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.hedcon  
#DEWATER Sample Problem, HEDCON file  
#February 20, 2005

#### HEAD CONSTRAINTS:

| NUMBER | NAME | LAY | ROW | COL | TYPE | RIGHT-HAND<br>SIDE | STRESS<br>PERIOD |
|--------|------|-----|-----|-----|------|--------------------|------------------|
| 1      | P-1  | 1   | 39  | 30  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 2      | P-2  | 1   | 36  | 31  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 3      | P-3  | 1   | 32  | 32  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 4      | P-4  | 1   | 29  | 34  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 5      | P-5  | 1   | 26  | 35  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 6      | P-6  | 1   | 23  | 33  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 7      | P-7  | 1   | 20  | 32  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 8      | P-8  | 1   | 18  | 30  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 9      | P-9  | 1   | 15  | 29  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 10     | P-10 | 1   | 13  | 27  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 11     | P-11 | 1   | 11  | 25  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 12     | P-12 | 1   | 9   | 24  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 13     | P-13 | 1   | 7   | 22  | >    | 2.5000E+00         | 1                |
| 14     | P-14 | 1   | 5   | 19  | >    | 2.5000E+00         | 1                |

924 BYTES OF MEMORY ALLOCATED TO STORE DATA FOR HEAD CONSTRAINTS

#### CLOSING HEAD CONSTRAINTS FILE

OPENING SOLUTION FILE ON UNIT 99:  
C:\dewater\dewater.soln  
#DEWATER Sample Problem, SOLN file  
#February 20, 2005

SOLNTYP IS SLP: GMM WILL USE SEQUENTIAL ITERATION OF THE  
NONLINEAR PROBLEM UNTIL A SOLUTION IS FOUND OR THE PROBLEM  
DOES NOT CONVERGE.

MAXIMUM NUMBER OF LP ITERATIONS: 1000  
MAXIMUM NUMBER OF BRANCH AND BOUND ITER: 0

MAXIMUM NUMBER OF SLP ITERATIONS: 100

SLP VARIABLE CONVERGENCE CRITERION (SLPVCRT): 1.00000E+00  
SLP OBJECTIVE CONVERGENCE CRITERION (SLPZCRT): 1.00000E+02

PERTURBATION VALUES (DINIT, DMIN, AND DSC): 0.10D+00 0.50D-01 0.10D+01

MAXIMUM NUMBER OF PERTURBATION ATTEMPTS: 100  
BASE FLOW RATE RELAXATION PARAMETER (AFAC): 0.30000  
PERTURBATION ADJUSTMENT FACTOR (PGFACT): 0.50000

SLPITPRT>=1: PRINT SLP ITERATIONS.

OUTPUT FROM BRANCH-AND-BOUND ALGORITHM WILL NOT BE PRINTED.

BASE PUMPING RATES TAKEN FROM FVREF SPECIFIED IN VARCON INPUT FILE

#### PROBLEM SIZE

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| NUMBER OF VARIABLES (INCLUDING SLACKS) | 41 |
| NUMBER OF CONSTRAINT EQUATIONS         | 14 |

15932 BYTES OF MEMORY ALLOCATED FOR RESPONSE MATRIX ALGORITHM

#### CLOSING SOLUTION AND OUTPUT FILE

#### ----- Solution Algorithm

```

Begin Solution Algorithm
Running Base Flow Process Simulation
Status of Simulation-Based Constraints
Constraint Type      Name      Status      Distance To RHS
-----
Head Bound          P-1      Satisfied    1.5562E+00
Head Bound          P-2      Satisfied    1.9343E+00
Head Bound          P-3      Satisfied    1.4177E+00
Head Bound          P-4      Satisfied    1.4226E+00
Head Bound          P-5      Satisfied    3.8605E+00
Head Bound          P-6      Satisfied    3.8997E+00
Head Bound          P-7      Satisfied    5.1000E+00
Head Bound          P-8      Satisfied    4.6023E+00
Head Bound          P-9      Satisfied    5.3237E+00
Head Bound          P-10     Satisfied    5.1872E+00
Head Bound          P-11     Satisfied    3.5071E+00
Head Bound          P-12     Satisfied    5.2283E+00
Head Bound          P-13     Satisfied    9.6938E-01
Head Bound          P-14     Satisfied    4.2051E-01

```

Distance to RHS is the absolute value of the difference between the  
the right hand side of the constraint and the left side of the  
constraint evaluated using the current set of decision variable values.

#### Calculating Response Matrix

```

Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -1.952000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -3.904000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -7.808000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation Value: -1.561600E+03

```



```
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -1.952000E+02
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -1.952000E+02
Perturb Flow Variable 5
By Perturbation value: -4.000000E+01
Perturb Flow Variable 6
By Perturbation value: -4.300000E+01
Perturb Flow Variable 7
By Perturbation value: -3.500000E+01
Perturb Flow Variable 8
By Perturbation value: -1.600000E+01
Perturb Flow Variable 9
By Perturbation value: -1.800000E+01
Perturb Flow Variable 10
By Perturbation value: -3.200000E+01
Perturb Flow Variable 11
By Perturbation value: -4.700000E+01
Perturb Flow Variable 12
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 13
By Perturbation value: -2.500000E+02
Perturb Flow Variable 14
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturb Flow Variable 15
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 16
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 17
By Perturbation value: -5.000000E+01
Perturb Flow Variable 18
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 19
By Perturbation value: -7.800000E+01
Perturb Flow Variable 20
By Perturbation value: -2.000000E+02
Perturb Flow Variable 21
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 22
By Perturbation value: -7.800000E+01
Perturb Flow Variable 23
By Perturbation value: -7.000000E+01
Perturb Flow Variable 24
By Perturbation value: -3.000000E+01
Perturb Flow Variable 25
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 26
By Perturbation value: -3.000000E+01
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -2.255000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -4.510000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -9.020000E+02

Average Number of Significant Digits in Matrix 7.142857E-01

Solving Linear Program
Feasible Solution Found
Optimal Solution Found
Objective Value -4.631629E+06
Maximum Relative Change in Flow Variable 9.996668E-01
SLP Algorithm: End Iteration 1
```

```
SLP Algorithm: Begin Iteration 2
Running Base Flow Process Simulation
Flow Process Failed: Reset Base
Flow Process Failed: Reset Base
Status of Simulation-Based Constraints
Constraint Type Name Status Distance To RHS
-----
Head Bound P-1 Satisfied 1.0814E+00
Head Bound P-2 Satisfied 1.4322E+00
Head Bound P-3 Satisfied 7.2579E-01
Head Bound P-4 Satisfied 7.2451E-01
Head Bound P-5 Satisfied 2.6728E+00
Head Bound P-6 Satisfied 2.7912E+00
Head Bound P-7 Satisfied 3.7631E+00
Head Bound P-8 Satisfied 2.9155E+00
Head Bound P-9 Satisfied 3.0288E+00
Head Bound P-10 Satisfied 2.6045E+00
Head Bound P-11 Satisfied 1.9689E+00
Head Bound P-12 Satisfied 3.6600E+00
Head Bound P-13 Satisfied 4.9265E-01
Head Bound P-14 Satisfied 3.3658E-01
```

Distance to RHS is the absolute value of the difference between the  
the right hand side of the constraint and the left side of the  
constraint evaluated using the current set of decision variable values.

```
Calculating Response Matrix
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -1.952000E+02
```

```
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -1.952000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -3.904000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -7.808000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 1
By Perturbation value: -1.561600E+03
Perturb Flow Variable 2
By Perturbation value: -2.255000E+02
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 3
By Perturbation value: -1.952000E+02
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -9.760000E+01
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 4
By Perturbation value: -1.952000E+02
Perturb Flow Variable 5
By Perturbation value: -4.000000E+01
Perturb Flow Variable 6
By Perturbation value: -4.300000E+01
Perturb Flow Variable 7
By Perturbation value: -3.500000E+01
Perturb Flow Variable 8
By Perturbation value: -1.600000E+01
Perturb Flow Variable 9
By Perturbation value: -1.800000E+01
Perturb Flow Variable 10
By Perturbation value: -3.200000E+01
Perturb Flow Variable 11
By Perturbation value: -4.700000E+01
Perturb Flow Variable 12
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 13
By Perturbation value: -2.500000E+02
Perturb Flow Variable 14
By Perturbation value: -4.880000E+01
Perturb Flow Variable 15
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 16
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 17
By Perturbation value: -5.000000E+01
Perturb Flow Variable 18
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 19
By Perturbation value: -7.800000E+01
Perturb Flow Variable 20
By Perturbation value: -2.000000E+02
Perturb Flow Variable 21
By Perturbation value: -6.000000E+01
Perturb Flow Variable 22
By Perturbation value: -7.800000E+01
Perturb Flow Variable 23
By Perturbation value: -7.000000E+01
Perturb Flow Variable 24
By Perturbation value: -3.000000E+01
Perturb Flow Variable 25
By Perturbation value: -3.000000E+02
Perturb Flow Variable 26
By Perturbation value: -3.000000E+01
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -2.255000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -4.510000E+02
Perturbation Failed:
Response Precision Inadequate
Perturb Flow Variable 27
By Perturbation value: -9.020000E+02

Average Number of Significant Digits in Matrix 7.222222E-01

Solving Linear Program
Feasible Solution Found
Optimal Solution Found
Objective value -4.623132E+06
Maximum Relative Change in Flow variable 5.098301E-01
SLP Algorithm: End Iteration 2
Iterations have converged
```

| Ground-water Management Solution                                                                                                                        |                 |                |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| OPTIMAL SOLUTION FOUND                                                                                                                                  |                 |                |                           |
| OPTIMAL RATES FOR EACH FLOW VARIABLE                                                                                                                    |                 |                |                           |
| Variable Name                                                                                                                                           | Withdrawal Rate | Injection Rate | Contribution To Objective |
| Q11                                                                                                                                                     | 4.880000E+02    |                | 8.784000E+04              |
| Q50A                                                                                                                                                    | 2.255000E+03    |                | 4.059000E+05              |
| Q61                                                                                                                                                     | 4.880000E+02    |                | 8.784000E+04              |
| Q55                                                                                                                                                     | 4.880000E+02    |                | 8.784000E+04              |
| QFA0100                                                                                                                                                 | 4.000000E+02    |                | 7.200000E+04              |
| Q61A                                                                                                                                                    | 4.300000E+02    |                | 7.740000E+04              |
| Q109                                                                                                                                                    | 3.500000E+02    |                | 6.300000E+04              |
| QA7                                                                                                                                                     | 4.525037E+01    |                | 8.145067E+03              |
| QA3                                                                                                                                                     | 1.800000E+02    |                | 3.240000E+04              |
| QA6                                                                                                                                                     | 0.000000E+00    |                | 0.000000E+00              |
| QA5                                                                                                                                                     | 4.700000E+02    |                | 8.460000E+04              |
| Q8                                                                                                                                                      | 3.000000E+03    |                | 5.400000E+05              |
| QTC                                                                                                                                                     | 2.500000E+03    |                | 4.500000E+05              |
| QTom                                                                                                                                                    | 4.880000E+02    |                | 8.784000E+04              |
| QA2                                                                                                                                                     | 6.000000E+02    |                | 1.080000E+05              |
| QA4                                                                                                                                                     | 1.948880E+01    |                | 3.507985E+03              |
| QA1                                                                                                                                                     | 5.000000E+02    |                | 9.000000E+04              |
| QToeb                                                                                                                                                   | 3.000000E+03    |                | 5.400000E+05              |
| QT2                                                                                                                                                     | 7.800000E+02    |                | 1.404000E+05              |
| Q98                                                                                                                                                     | 2.000000E+03    |                | 3.600000E+05              |
| Q70                                                                                                                                                     | 0.000000E+00    |                | 0.000000E+00              |
| Q71                                                                                                                                                     | 7.800000E+02    |                | 1.404000E+05              |
| QKis                                                                                                                                                    | 7.000000E+02    |                | 1.260000E+05              |
| Q105                                                                                                                                                    | 3.000000E+02    |                | 5.400000E+04              |
| QT12                                                                                                                                                    | 3.000000E+03    |                | 5.400000E+05              |
| QLk                                                                                                                                                     | 1.673289E+02    |                | 3.011920E+04              |
| Q59                                                                                                                                                     | 2.255000E+03    |                | 4.059000E+05              |
| TOTALS                                                                                                                                                  | 2.568407E+04    | 0.000000E+00   | 4.623132E+06              |
| OBJECTIVE FUNCTION VALUE                                                                                                                                |                 |                | 4.623132E+06              |
| BINDING CONSTRAINTS                                                                                                                                     |                 |                |                           |
| Constraint Type                                                                                                                                         | Name            | Status         | Shadow Price              |
| Head Bound                                                                                                                                              | P-4             | Binding        | -1.3553E+06               |
| Head Bound                                                                                                                                              | P-10            | Binding        | -2.1925E+04               |
| Head Bound                                                                                                                                              | P-13            | Binding        | -6.7626E+04               |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q11             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q50A            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q61             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q55             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QFA0100         | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q61A            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q109            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QA3             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QA5             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q8              | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QTC             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QTom            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QA2             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QA1             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QToeb           | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QT2             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q98             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q71             | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QKis            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q105            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | QT12            | Binding        | Not Available             |
| Maximum Flow Rate                                                                                                                                       | Q59             | Binding        | Not Available             |
| Binding constraint and range analysis values are determined from the linear program and based on the response matrix approximation of the flow-process. |                 |                |                           |
| RANGE ANALYSIS                                                                                                                                          |                 |                |                           |

### Constraint Ranges

Lower/Upper Bound are the values of the RHS beyond which basis will change.  
 Leaving is the variable which will leave the basis.  
 Entering is the variable which will enter the basis.  
 If the entering or leaving variable is a constraint name,  
 then the constraint slack variable is active

| Constraint Name | Slack      | Original RHS | Lower/Upper Bound        | Entering             | Leaving    |
|-----------------|------------|--------------|--------------------------|----------------------|------------|
| P-1             | 5.9015E-01 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>3.0902E+00  | QT2<br>No Change     | P-1        |
| P-2             | 9.1179E-01 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>3.4118E+00  | QT12<br>No Change    | P-2        |
| P-3             | 7.8768E-03 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>2.5079E+00  | QT12<br>No Change    | P-3        |
| P-4             | 0.0000E+00 | 2.5000E+00   | 2.4909E+00<br>2.5025E+00 | QT12<br>QK15         | P-3<br>QA4 |
| P-5             | 1.4235E+00 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>3.9235E+00  | Q109<br>No Change    | P-5        |
| P-6             | 1.6406E+00 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>4.1406E+00  | Q109<br>No Change    | P-6        |
| P-7             | 2.3854E+00 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>4.8854E+00  | Q109<br>No Change    | P-7        |
| P-8             | 1.1962E+00 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>3.6962E+00  | Q109<br>No Change    | P-8        |
| P-9             | 6.6299E-01 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>3.1630E+00  | Q109<br>No Change    | P-9        |
| P-10            | 0.0000E+00 | 2.5000E+00   | 2.3550E+00<br>2.6597E+00 | QK15<br>Q109         | QA4<br>QA7 |
| P-11            | 4.3325E-01 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>2.9333E+00  | P-10<br>No Change    | P-11       |
| P-12            | 1.9878E+00 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>4.4878E+00  | Q109<br>No Change    | P-12       |
| P-13            | 0.0000E+00 | 2.5000E+00   | 2.1994E+00<br>2.8791E+00 | Q109<br>P-10         | QLK<br>QLK |
| P-14            | 2.4984E-01 | 2.5000E+00   | -Infinity<br>2.7498E+00  | QFA0100<br>No Change | P-14       |

### Objective-Function Coefficient Ranges

Lower/Upper Bound are the values of the coefficients beyond which basis will change.  
 Leaving is the variable which will leave the basis.

| Variable Name | Reduced Cost | Original Coefficient | Lower/Upper Bound        | Entering             | Leaving    |
|---------------|--------------|----------------------|--------------------------|----------------------|------------|
| Q11           | 1.7963E+02   | 1.8000E+02           | 3.6630E-01<br>Infinity   | Q11<br>No Change     | Q11        |
| Q50A          | 1.7697E+02   | 1.8000E+02           | 3.0310E+00<br>Infinity   | Q50A<br>No Change    | Q50A       |
| Q61           | 1.7624E+02   | 1.8000E+02           | 3.7574E+00<br>Infinity   | Q61<br>No Change     | Q61        |
| Q55           | 1.7780E+02   | 1.8000E+02           | 2.2023E+00<br>Infinity   | Q55<br>No Change     | Q55        |
| QFA0100       | 1.3973E+02   | 1.8000E+02           | 4.0266E+01<br>Infinity   | QFA0100<br>No Change | QFA0100    |
| Q61A          | 2.2677E+01   | 1.8000E+02           | 1.5732E+02<br>Infinity   | Q61A<br>No Change    | QA4        |
| Q109          | 1.6288E+00   | 1.8000E+02           | 1.7837E+02<br>Infinity   | Q109<br>No Change    | QA4        |
| QA7           | 0.0000E+00   | 1.8000E+02           | 1.0262E+02<br>1.8121E+02 | P-10<br>Q109         | QA7<br>QA4 |
| QA3           | 4.0132E+01   | 1.8000E+02           | 1.3987E+02<br>Infinity   | QA3<br>No Change     | QA3        |
| QA6           | -2.4969E+01  | 1.8000E+02           | Infinity<br>2.0497E+02   | QA6<br>No Change     | QA4        |
| QA5           | 3.1636E+01   | 1.8000E+02           | 1.4836E+02<br>Infinity   | QA5<br>No Change     | QA5        |
| Q8            | 9.1075E+01   | 1.8000E+02           | 8.8925E+01<br>Infinity   | Q8<br>No Change      | QA4        |
| QTC           | 1.0060E+02   | 1.8000E+02           | 7.9403E+01<br>Infinity   | QTC<br>No Change     | QA4        |
| QTom          | 1.3443E+02   | 1.8000E+02           | 4.5568E+01<br>Infinity   | QTom<br>No Change    | QTom       |
| QA2           | 4.5203E+01   | 1.8000E+02           | 1.3480E+02<br>Infinity   | QA2<br>No Change     | QA2        |
| QA4           | 0.0000E+00   | 1.8000E+02           | 1.7438E+02<br>2.1393E+02 | Q109<br>QK15         | QA4<br>P-3 |
| QA1           | 4.8824E+01   | 1.8000E+02           | 1.3118E+02<br>Infinity   | QA1<br>No Change     | QA1        |
| QToeb         | 6.8838E+01   | 1.8000E+02           | 1.1116E+02<br>Infinity   | QToeb<br>No Change   | QA4        |
| QT2           | 9.8511E+01   | 1.8000E+02           | 8.1489E+01<br>Infinity   | QT2<br>No Change     | QT2        |
| O98           | 1.0111E+02   | 1.8000E+02           | 7.8886E+01               | O98                  | QA4        |

|                                                                                                               |             |            |                          |              |            |       |           |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|--------------------------|--------------|------------|-------|-----------|-------|
| QA5                                                                                                           | 3.1636E+01  | 1.8000E+02 | 1.4836E+02<br>Infinity   | QA5          | QA5        | ----- | No Change | ----- |
| Q8                                                                                                            | 9.1075E+01  | 1.8000E+02 | 8.8925E+01<br>Infinity   | Q8           | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| QTC                                                                                                           | 1.0060E+02  | 1.8000E+02 | 7.9403E+01<br>Infinity   | QTC          | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| QTom                                                                                                          | 1.3443E+02  | 1.8000E+02 | 4.5568E+01<br>Infinity   | QTom         | QTom       | ----- | No Change | ----- |
| QA2                                                                                                           | 4.5203E+01  | 1.8000E+02 | 1.3480E+02<br>Infinity   | QA2          | QA2        | ----- | No Change | ----- |
| QA4                                                                                                           | 0.0000E+00  | 1.8000E+02 | 1.7438E+02<br>2.1393E+02 | Q109<br>QKis | QA4<br>P-3 | ----- |           |       |
| QA1                                                                                                           | 4.8824E+01  | 1.8000E+02 | 1.3118E+02<br>Infinity   | QA1          | QA1        | ----- | No Change | ----- |
| QToeb                                                                                                         | 6.8838E+01  | 1.8000E+02 | 1.1116E+02<br>Infinity   | QToeb        | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| QT2                                                                                                           | 9.8511E+01  | 1.8000E+02 | 8.1489E+01<br>Infinity   | QT2          | QT2        | ----- | No Change | ----- |
| Q98                                                                                                           | 1.0111E+02  | 1.8000E+02 | 7.8886E+01<br>Infinity   | Q98          | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| Q70                                                                                                           | -5.3976E+01 | 1.8000E+02 | Infinity<br>2.3398E+02   | Q70          | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| Q71                                                                                                           | 7.9379E+01  | 1.8000E+02 | 1.0062E+02<br>Infinity   | Q71          | P-3        | ----- | No Change | ----- |
| QKis                                                                                                          | 2.8489E+01  | 1.8000E+02 | 1.5151E+02<br>Infinity   | QKis         | P-3        | ----- | No Change | ----- |
| Q105                                                                                                          | 1.7128E+02  | 1.8000E+02 | 8.7233E+00<br>Infinity   | Q105         | Q105       | ----- | No Change | ----- |
| QT12                                                                                                          | 3.3314E+01  | 1.8000E+02 | 1.4669E+02<br>Infinity   | QT12         | QA4        | ----- | No Change | ----- |
| QLk                                                                                                           | 0.0000E+00  | 1.8000E+02 | 1.5460E+02<br>9.8795E+02 | Q109<br>P-10 | QA4<br>QA7 | ----- |           |       |
| Q59                                                                                                           | 1.7895E+02  | 1.8000E+02 | 1.0466E+00<br>Infinity   | Q59          | Q59        | ----- | No Change | ----- |
| ----- Final Flow Process Simulation -----                                                                     |             |            |                          |              |            |       |           |       |
| Running Final Flow Process Simulation<br>using Optimal Flow variable Rates                                    |             |            |                          |              |            |       |           |       |
| WARNING: Final flow process simulation failed to converge<br>when using the optimal rates for flow variables. |             |            |                          |              |            |       |           |       |