

## Διαχείριση Υπόγειων Υδάτων με Συνδυασμό Προσομοίωσης και Μεθόδων Βελτιστοποίησης

Γ. Καρατζάς<sup>1</sup>, Β. Αλεξοπούλου<sup>1</sup>, Ι. Νικολός<sup>2</sup>

1. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

2. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Πολυτεχνειούπολη, 73100 Χανιά, karatzas@mred.tuc.gr.

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται συνδυασμός μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, με σκοπό την ορθολογική διαχείριση ενός συστήματος υπογείων υδάτων με έντονο πρόβλημα υφαλμύρισης. Ο προσομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code), ενώ για τη βελτιστοποίηση εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι, η κλασική μέθοδος Simplex και ένας Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος. Η περιοχή μελέτης ήταν η ευρύτερη περιοχή της Βιομηχανικής Περιοχής Ηρακλείου (ΒΙ.ΠΕ), Κρήτης. Από τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων προέκυψε ότι οι λύσεις τους σχεδόν ταυτίζονται παρά το γεγονός ότι η φιλοσοφία τους και ο τρόπος αναζήτησης της βέλτιστης λύσης είναι τελείως διαφορετικά. Από την σύγκριση των δύο μεθόδων βελτιστοποίησης προκύπτει ότι η μέθοδος του Διαφορικού Εξελικτικού Αλγορίθμου είναι πιο αυτοματοποιημένη και μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε προβλήματα βελτιστοποίησης.

## Groundwater Management Using Combination of Numerical Simulation and Optimization Methods

G. Karatzas<sup>1</sup>, V. Aleksopoulou<sup>1</sup>, I. Nikolos<sup>2</sup>

1. Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Greece

2. Department of Production Engineering and Management

Technical University of Crete, 73100 Chania, Greece. karatzas@mred.tuc.gr.

### Abstract

In the present work a combination of a numerical simulator and two optimization methods is performed in order to determine the optimal management of a groundwater system with an intense saltwater intrusion problem. The numerical simulator Princeton Transport Code (PTC) was combined with two different optimization techniques: the classic Simplex Method and an Evolutionary Algorithm. The area of study was the region of the Industrial Zone of Heraklion, Crete. The obtained results of the two different optimization methods are very similar despite the fact that their philosophy and

their methodology are based on completely different approaches. From the comparison of the two methods it results that the Differential Evolution algorithm used in the present work is more automated and can provide reliable and qualitative results to optimization problems.

## 1. Εισαγωγή

Στη δεκαετία του 50 παρουσιάστηκαν αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης για μεγάλα προβλήματα αποθεμάτων πετρελαίου. Αυτή η προσπάθεια επεκτάθηκε αργότερα σε υπόγεια προβλήματα διαχείρισης, που σχετίζονται με την ποιότητα και την ποσότητα των υπογείων υδάτων. Στο παρελθόν, αρκετά αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής και μεταφοράς έχουν βασιστεί στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (SUTRA, Modflow and MD3d, PTC, FEMXATER, κ.λπ.).

Στη δεκαετία του 70 τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης συνδυάστηκαν με τεχνικές βελτιστοποίησης και έγιναν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων. Ο ρόλος της βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης λειτουργικής λύσης, για ένα συγκεκριμένο σκοπό, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς που υπάρχουν.

Ο συνδυασμός των τεχνικών της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης των υπογείων υδάτων μπορεί να θεωρηθεί ως οργανωμένη και μεθοδική μέθοδος trial-and-error. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις περισσότερες προσεγγίσεις trial-and-error, η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί και η αναζήτηση της λύσης καθορίζονται λεπτομερώς. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται μαθηματικά ως ένα πρόβλημα που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί μία αντικειμενική συνάρτηση σε ένα σύνολο περιορισμών που βασίζονται σε φυσικά, οικονομικά, τεχνικά ή κοινωνικά δεδομένα.

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο τον προσδιορισμό βέλτιστου σχεδιασμού για τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρισης σε περιοχές με έντονους ρυθμούς άντλησης υπογείων υδάτων. Η έρευνα εστιάζεται στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου, Κρήτης. Με χρήση του μοντέλου P.T.C. προσομοιώνεται η ροή των υπογείων υδάτων στην περιοχή για χρονικό διάστημα 2 ετών και προσδιορίζεται η θέση του μετώπου υφαλμύρισης με βάση τα υφιστάμενα δημοτικά πηγάδια και τους σημερινούς ρυθμούς άντλησης.

Αναζητούνται οι βέλτιστες παροχές άντλησης, για τις οποίες το μέτωπο της υφαλμύρισης θα αναχαιτισθεί ενώ ταυτόχρονα θα ικανοποιούνται οι αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με δύο μεθόδους: α) τη μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού Simplex και β) μία μέθοδο Εξελικτικών Αλγορίθμων, και συγκεκριμένα έναν Διαφορικό Εξελικτικό Αλγόριθμο.

Καθώς ο υπό μελέτη υδροφορέας είναι ελεύθερος, το υδραυλικό ύψος είναι πιθανόν να έχει μη γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με την παροχή άντλησης. Εάν ο υδροφορέας εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά απαιτείται η διαδοχική εφαρμογή της μεθόδου Simplex, ώστε να πραγματοποιηθεί σταδιακή γραμμικοποίηση. Δημιουργείται και εφαρμόζεται αλγόριθμος, από τη σύγκλιση του οποίου τελικά προκύπτει η βέλτιστη λύση.

Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος, που εφαρμόζεται στη συνέχεια, ανήκει σε μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζουν τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης και η οποία δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περίπλοκα μη γραμμικά προβλήματα.

Τελικά συγκρίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο μεθόδων μεταξύ τους ως προς την ακρίβεια, την απόδοση, την ταχύτητα και άλλες παραμέτρους (Αλεξοπούλου, 2005).

## 2. Ο μηχανισμός της υφαλμύρισης

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπογείων νερών παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε αυτούς, όπου το αλμυρό νερό αντικαθιστά ίσες ποσότητες γλυκού νερού με αποτέλεσμα την υφαλμύριση των υπογείων υδάτων. Στους παράκτιους υδροφορείς η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού καθορίζεται από τη διαφορά πυκνοτήτων μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού.

Μια ευρέως αποδεκτή και απλή θεωρία για την προσέγγιση της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση των Ghyben-Herzberg, η οποία προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού (Εικόνα 2.1):

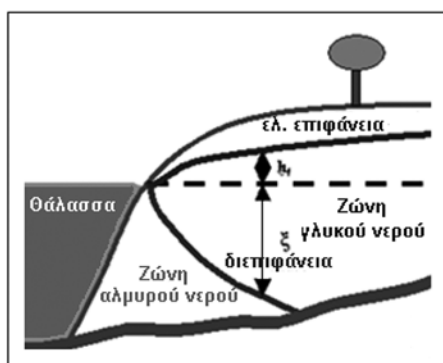
$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f$$

όπου:  $\xi$ : η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας,

$h_f$ : το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας,

$\rho_f$ : η πυκνότητα του γλυκού νερού ( $1\text{g/cm}^3$ ) και

$\rho_s$ : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ( $1,025\text{g/cm}^3$ ).



Εικόνα 2.1 Προσδιορισμός Υφαλμυρης Ζώνης

Γενικά το αλμυρό νερό είναι κατά 2,5% βαρύτερο του γλυκού, το οποίο σημαίνει ότι μια στήλη αλμυρού νερού 40 μέτρων απαιτεί για εξισορρόπηση 41 μέτρα γλυκού ύδατος.

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρισης με τον υπόγειο υδροφορέα ωθείται 40 μέτρα προς τα κάτω. Ωστόσο ο λόγος 40:1 δεν ισχύει σε παραθαλάσσιες περιοχές με αυξημένη άντληση γιατί τότε το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να εισχωρεί σε μεγάλο βάθος μέσα στον υδροφορέα (Freeze and Cherry, 1979).

### 3. Το μοντέλο προσομοίωσης Princeton Transport Code (PTC)

Το PTC (Princeton Transport Code) είναι ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει την ροή υπογείων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων. Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για την αναπαράσταση την ροής υπογείων υδάτων, όπως αυτή περιγράφεται από:

Τα υδραυλικά ύψη  $h$ ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (3.1)$$

Τις συνιστώσες της ταχύτητας των υπογείων υδάτων,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.2)$$

Τη μεταφορά ρύπου, η οποία περιγράφεται από τη συγκέντρωση  $c$ ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0$$

Όπου:  $h$  : το υδραυλικό ύψος [L],

$K_{xx}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα στη  $x$  οριζόντια διεύθυνση [ $LT^{-1}$ ],

- $K_{yy}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα στη y οριζόντια διεύθυνση [ $L T^{-1}$ ],  
 $K_{zz}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα στη z κατακόρυφη διεύθυνση [ $L T^{-1}$ ],  
 $S$  : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [ $L^{-1}$ ],  
 $Q_i$  : είναι ο όρος πηγής στη θέση  $i$  [ $L^3 T^{-1}$ ],  
 $C$  : η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας μέσα στο νερό, [ $M^3 T^{-1}$ ],  
 $D_{ij}$  : ο τανυστής του συντελεστή διασποράς, [ $L^2 T^{-1}$ ],  
 $V_i$  : η μέση ταχύτητα του ύδατος στις τρεις διαστάσεις, [ $L T^{-1}$ ] και  
 $t$  : ο χρόνος, [ $T$ ].

Η επίλυση των εξισώσεων αυτών ακολουθεί την εξής διαδικασία: αρχικά γίνεται επίλυση της εξίσωσης (3.1) ως προς το υδραυλικό ύψος  $h$ , έπειτα υπολογίζουμε τις ταχύτητες του Darcy από την εξίσωση (3.2) και τέλος επιλύουμε την εξίσωση (3.3) ως προς τη συγκέντρωση  $C$ . Το PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού, ο οποίος μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο. Ο αλγόριθμος αυτός περιλαμβάνει διαχωρισμό της περιοχής ελέγχου σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Μέσα σε καθένα από τα επίπεδα χρησιμοποιείται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, η οποία επιτρέπει ορθή απεικόνιση πεδίων ακανόνιστου σχήματος. Τα επίπεδα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών (Babu et al., 1997).

## 4. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης:

- 1) Η Μέθοδος Simplex και
- 2) Η Μέθοδος των Διαφορικών Εξελικτικών Αλγορίθμων.

### 4.1. Η μέθοδος Simplex

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως διαμορφώθηκε στην παρούσα μελέτη, έχει υποστεί ορισμένες τροποποιήσεις ως προς τον τρόπο έκφρασης της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου Simplex (Dantzig, 1963) στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Αρχικά το πρόβλημα πρέπει να μετατραπεί από πρόβλημα μεγιστοποίησης στο ισοδύναμο πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Η μέθοδος Simplex θα κλιθεί να ελαχιστοποιήσει την αρνητική συνολική παροχή και επομένως η αντικειμενική συνάρτηση θα πάρει τη μορφή:

$$f(x) = \max \sum_{i=1}^5 q_i \Rightarrow z = \min(-f(x))$$

Σύμφωνα με τον περιορισμό θα πρέπει το ελάχιστο επιτρεπτό υδραυλικό ύψος,  $H$ , σε κάθε κόμβο παρατήρησης να είναι μεγαλύτερο ή ίσον κάποιου υδραυλικού ύψους αναφοράς  $H_{ref}$ , έτσι ώστε να αναχαιτισθεί το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Εάν θεωρηθεί ως  $H_0$  το αρχικό υδραυλικό ύψος στον κόμβο παρατήρησης, τότε ο περιορισμός διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$H \geq H_{ref} \Rightarrow H_0 + \Delta H \geq H_{ref}$$

Το  $\Delta H$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του πίνακα απόκρισης  $A$  (response matrix) ως:  $\Delta H = A \cdot \Delta Q$ .

Ο πίνακας απόκρισης  $A$  είναι στην ουσία οι αλλαγές που παρατηρούνται στα υδραυτικά ύψη του υπό μελέτη συστήματος για μοναδιαία αλλαγή  $\Delta Q$  της παροχής άντλησης  $Q_0$  και εκφράζεται μαθηματικά (για πέντε γεωτρήσεις άντλησης όπως στο παρόν πρόβλημα) ως:

$$A = \left[ \begin{array}{c} \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial Q} \right)_1 \quad \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial Q} \right)_2 \quad \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial Q} \right)_3 \quad \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial Q} \right)_4 \quad \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial Q} \right)_5 \end{array} \right] \Rightarrow$$

$$A = \left[ \begin{array}{ccccc} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_1} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_2} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_3} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_4} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_5} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_1} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_2} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_3} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_4} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_5} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_1} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_2} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_3} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_4} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_5} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_1} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_2} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_3} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_4} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_5} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_1} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_2} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_3} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_4} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_5} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_1} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_2} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_3} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_4} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_5} \end{array} \right]$$

Οπότε:

$$H_0 + A \cdot \Delta Q \geq H_{ref} \Rightarrow H_0 + A \cdot (Q - Q_0) \geq H_{ref} \Rightarrow H_0 + A \cdot Q - A \cdot Q_0 \geq H_{ref} \Rightarrow$$

$$A \cdot Q \geq H_{ref} + A \cdot Q_0 - H_0,$$

και τελικά :

$$-A \cdot Q \leq H_0 - H_{\text{ref}} - A \cdot Q_0$$

Εάν θέσουμε ως:  $b = H_0 - H_{\text{ref}} - A \cdot Q_0$

τότε λαμβάνουμε την τελική μορφή του προβλήματος στην γενική μορφή:

$$A \cdot Q \geq b$$

Όπου:  $Q_0$ : είναι το διάνυσμα των αρχικών τυχαίων τιμών παροχής

$H_0$ : το αντίστοιχο αρχικό διάνυσμα υδραυλικών υψών

$Q$ : είναι το εκάστοτε διαφοροποιημένο διάνυσμα των παροχών και

$H$ : τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν από το PTC βάση της παροχής  $Q$  (Karterakis et al., 2007).

## 4.2. Η μέθοδος των διαφορικών εξελικτικών αλγορίθμων

Σύμφωνα με το μηχανισμό εξέλιξης των οργανισμών, ο οποίος βασίζεται στον κανόνα της φυσικής επιλογής, οι οργανισμοί που δεν μπορούν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους πεθαίνουν, ενώ οι υπόλοιποι πολλαπλασιάζονται με αναπαραγωγή. Οι απόγονοι παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις από τους προγόνους τους, ενώ συνήθως υπερισχύουν αυτοί που συγκεντρώνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά. Η θεωρία αυτή της εξέλιξης (evolution) έχει χρησιμοποιηθεί σε μια κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων, που ονομάζονται Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms). Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι εμφανίζονται σε τρεις διαφορετικές μορφές, οι οποίες ακολουθούν διακριτή πορεία, αλλά με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους:

- τους **Γενετικούς Αλγόριθμους** (Genetic Algorithms – GA),
- τον **Εξελικτικό Προγραμματισμό** (Evolutionary Programming – EP)
- και τις **Εξελικτικές Στρατηγικές** (Evolutionary Strategies – ES).

Ο Διαφορικός Εξελικτικός (Δ.Ε.) Αλγόριθμος, είδος Εξελικτικών Στρατηγικών, προτάθηκε από τους Storn και Price (1995). Ο Δ.Ε. Αλγόριθμος είναι ένας εξαιρετικά απλός στην εφαρμογή και πολλά υποσχόμενος Εξελικτικός Αλγόριθμος, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την ευρωστία. Ο συγκεκριμένος Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος, που χρησιμοποιείται στο παρόν πρόβλημα, στηρίχθηκε στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από τον Νίκολος (2004). Η γενική μορφή του Δ.Ε. αλγόριθμου περιγράφεται παρακάτω.

Θεωρούμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπωμένο ως εξής:

$$\min_x = f(X)$$

Όπου  $X$ : είναι ένα διάνυσμα  $n \times 1$  παραμέτρων, το οποίο αναπαριστά ένα χρωμόσωμα και

$f$ : είναι η αντικειμενική συνάρτηση που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί.

Σε κάθε γενιά  $G$ , ένας πληθυσμός από  $N_p$  υποψήφιας λύσεις υποβάλλονται σε ειδικές διεργασίες, ενώ μια υποψήφια λύση διατυπώνεται ως εξής:

$$X_{i,G}, i = 1, \dots, N_p, G = 1, \dots, msgens \quad (4.2.1)$$

όπου:  $msgens$  είναι ο μέγιστος αριθμός γενιών και ο πληθυσμός  $N_p$  παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Το διάνυσμα  $X$  των παραμέτρων αναπαριστά τις μεταβλητές πραγματικών αριθμών. Ωστόσο ο Δ.Ε. αλγόριθμος μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να χειρίζεται και διακριτές ή ακέραιες μεταβλητές.

Ο Δ.Ε. αλγόριθμος ξεκινά παράγοντας τυχαία, με ομοιόμορφη πιθανότητα, τον αρχικό πληθυσμό χρωμοσωμάτων, με τα γονίδια του (μεταβλητές σχεδίασης) να παίρνουν τιμές εντός της επιθυμητής εφικτής περιοχής. Ως κανόνα θεωρούμε ομοιόμορφη κατανομή πιθανοτήτων για όλες τις τυχαίες αποφάσεις. Οι χαμηλότεροι και υψηλότεροι περιορισμοί για κάθε μεταβλητή σχεδίασης επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται συγκεκριμένες ανεπιθύμητες λύσεις. Η κύρια ιδέα πίσω από τον Δ.Ε. αλγόριθμο είναι ένα νέο σχήμα μετάλλαξης, σύμφωνα με το οποίο γεννιούνται δοκιμαστικά διανύσματα μεταβλητών σχεδίασης, από την πρόσθεση του διανύσματος σταθμισμένων διαφορών δύο μελών του πληθυσμού σε ένα τρίτο μέλος, που ονομάζεται δότης (donor). Η διαδικασία της μετάλλαξης εφαρμόζεται σε όλα τα μέλη του πληθυσμού. Για κάθε άτομο η διαδικασία της μετάλλαξης ξεκινά με τυχαία επιλογή τριών ατόμων μέσα από τον πληθυσμό, τα οποία συντάσσουν μια τριάδα (triplet). Στην τριάδα αυτή το ένα μέλος επιλέγεται τυχαία να είναι ο δότης, ενώ τα άλλα δύο μέλη χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μιας διαταραχής στον δότη.

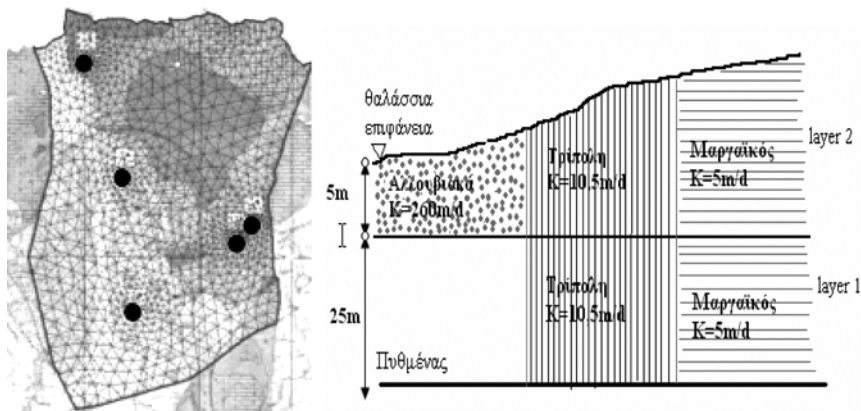
Ο Δ.Ε. αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι προγραμματισμένος σε γλώσσα Visual Basic, διαθέτει γραφικό περιβάλλον και έχει τη δυνατότητα να καλεί εξωτερικά προγράμματα για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε υποψήφιας λύσης. (Nikolos, 2004).

## 5. Περιοχή μελέτης και βέλτιστος σχεδιασμός αντλήσεων

Η περιοχή μελέτης είναι η ευρύτερη περιοχή στα ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου. Περιλαμβάνει την ΒΙ.ΠΕ. και τις ανατολικές συνοικίες της πόλης ενώ εκτείνεται στα νότια μέχρι τις συνοικίες Άνω Φορτέτσα - Νέα Αλάτσατα - Καλλιθέα - Πρασάς.

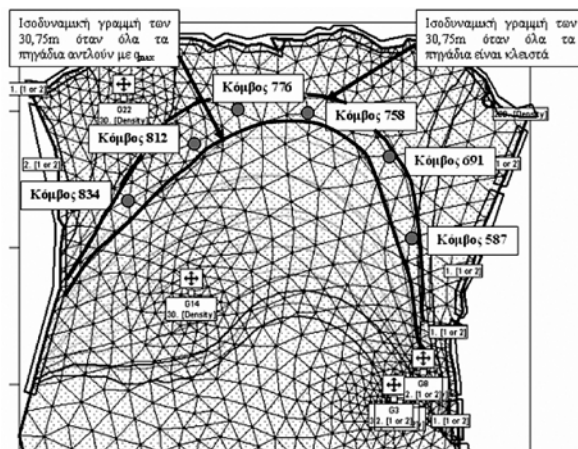
Η περιοχή μελέτης, ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων, οι θέσεις των γεωτρήσεων και η γεωλογία της περιοχής παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1. Σημείο αναφοράς του υδροφορέα ορίσθηκε τα 30 m υπό την επιφάνεια της θάλασσας.





Εικόνα 5.1 Η περιοχή μελέτης, κλίμακα, θέσεις γεωτρήσεων και γεωλογία της περιοχής (γεωλογική τομή)

Με βάση την εξίσωση Ghyben-Herzberg, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2, για βάθος αλμυρού νερού 30 m απαιτείται στήλη «γλυκού» νερού 30.75 m. Επομένως, για υδραυλικά ύψη μικρότερα ή ίσα του 30.75 m υπάρχει πρόβλημα υφαλμύρινσης. Για τον προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρινσης έγιναν δύο προσομοιώσεις α) με όλες τις γεωτρήσεις να αντλούν με τις υπάρχουσες συνθήκες άντλησης και β) με όλες τις γεωτρήσεις να έχουν μηδενική άντληση. Για κάθε σενάριο ο χρόνος προσομοίωσης ήταν τα δύο χρόνια με δύο περιόδους διαχείρισης ανά έτος (χειμώνα και καλοκαίρι), όπου σε κάθε περίοδο έχουμε διαφορετικές οριακές συνθήκες, συνθήκες άντλησης (εντονότερες το καλοκαίρι) και βροχόπτωση (μόνο την χειμερινή περίοδο). Τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC για τα δύο αυτά σενάρια παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 Ζώνης Υφαλμύρινσης και βέλτιστος σχεδιασμός

Σκοπός της βελτιστοποίησης ήταν η σταδιακή μείωση της ζώνης υφαλμύρινσης με έλεγχο της αντλούμενης ποσότητας νερού. Για τον λόγο αυτό οι περιορισμοί (5 κόμβοι παρατήρησης) τέθηκαν στην περιοχή που ορίζεται από το σενάριο της μηδενικής άντλησης των πέντε υπαρχόντων γεωτρήσεων και της άντλησης με τις σημερινές συνθήκες (Εικόνα 5.2).

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώθηκε ως εξής:

$$\text{Αντικειμενική Συνάρτηση: } f = \max \sum_{i=1}^5 q_i = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5$$

$$\begin{aligned} \text{Περιορισμοί: } H_{834}, H_{812}, H_{776}, H_{758}, H_{691}, H_{587} &\geq 30,75 \text{ m} \\ 0 \leq q_1 \leq 1920, \quad 0 \leq q_2 \leq 1920, \quad 0 \leq q_3 \leq 1920, \\ 0 \leq q_4 \leq 587, \quad 0 \leq q_5 \leq 480 \end{aligned}$$

Όπου  $H_j$  το υδραυλικό ύψος στο κόμβο παρατήρησης  $j$  και  $q_i$  ο ρυθμός άντλησης στη γεώτρηση  $i$ .

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε με χρήση των δύο διαφορετικών μεθόδων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί:

**Πίνακας 5.1.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων του βέλτιστου σχεδιασμού.

Γεώτρηση άντλησης	Βέλτιστη τιμή παροχής $q(\text{m}^3/\text{d})$	
	Μέθοδος Simlex	Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος
Γ8	1920	1907,6
Γ4	535	313
Γ3	0	112
Γ22	576	574
Γ14	0	66,6
Άθροισμα ΣQ	3031	2973,2

Η μόνη εμφανής διαφορά των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι ότι η μέθοδος Simplex θέτει τις γεωτρήσεις Γ3 και Γ14 μη ενεργές (μηδενική παροχή), ενώ ο Δ.Ε. αλγόριθμος τις θέτει ενεργές, αλλά να αντλούν με μικρές τιμές παροχής. Οι βέλτιστες τιμές της συνολικής παροχής άντλησης που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους διαφέρουν κατά  $57,8 \text{ m}^3/\text{d}$ , αλλά η διαφορά αυτή είναι στην ουσία αμελητέα, αφού δεν επιφέρει καμία αλλαγή όσον αφορά τη διαχείριση του υδατικού πόρου, και τη μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρινσης. Συγκρίνοντας τον χρόνο προσομοίωσης

των δύο μεθόδων στο παρόν πρόβλημα η μέθοδος Simplex χρειάστηκε περίπου 3- 4 ώρες και με συνεχή επέμβαση του χρήστη σε κάθε βήμα, ενώ ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος απαιτήσε 18 συνεχόμενες ώρες για να επιλύσει το πρόβλημα, χωρίς όμως να απαιτεί την παραμικρή παρέμβαση του χρήστη (Αλεξοπούλου, 2005).

## Βιβλιογραφία

1. Αλεξοπούλου, Β., 2005. «*Διαχείριση των Υπογείων Υδάτων με συνδυασμό προσομοίωσης και Γενετικών Αλγορίθμων*». Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 114pp.
2. Babu, D.K., Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld, D.P. and Stothoff, S.A., 1997. Chemical transport by three-dimensional groundwater flows, Princeton University, 84-WR-3.
3. Dantzig, G., 1963. *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 627pp.
4. Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
5. Karterakis S.M, Karatzas, G.P., Nikolos, I.K. and Papadopoulou, M.P., 2007. *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, 342(3-4): 270-282.
6. Nikolos, I.K., 2004. *Inverse Design of Aerodynamic Shapes using Differential Evolution coupled with Artificial Neural Network*. Proc. ERCOFTAC Conference, Design Optimization: Methods and Applications, Athens.
7. Storn, R. and Price, K., 1995. *DE - a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Space*. Technical Report TR-95-012, ICSI.