

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ
ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ
ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ**

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF
COASTAL AQUIFERS WITH THE COUPLED USE OF FINITE ELEMENTS AND
GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS. A CASE STUDY FROM YERMASOGIA
AQUIFER IN CYPRUS**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΓΚΕΜΙΤΖΗ¹

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΟΛΙΚΑΣ²

Περίληψη

Ένα ημιτριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, που προσομοιώνει τη μόνιμη και μη μόνιμη ροή του γλυκού και του θαλασσινού νερού, τα οποία διαχωρίζονται από μια οξεία διεπιφάνεια, αναπτύχθηκε για τη μελέτη των παράκτιων υδροφορέων. Οι εξισώσεις ροής διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Galerkin των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο επαληθεύεται σε απλές περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχουν αναλυτικές λύσεις για μόνιμες και μη μόνιμες ροές, τόσο για ελεύθερο όσο και για υπό πίεση υδροφόρα. Όλα τα απαραίτητα στοιχεία εισάγονται και υφίστανται επεξεργασία μέσω των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Το πρόγραμμα προσομοίωσης αποτελεί ουσιαστικά ένα “εργαλείο” των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, με τη συνδυασμένη χρήση των οποίων δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων. Η εφαρμογή του μοντέλου στον υδροφόρα Γερμασόγειας Κύπρου, παρουσιάζει τις δυνατότητες που προσφέρει η χρήση του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε, σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών στην μελέτη των παράκτιων υδροφορέων

Abstract

A quasi three-dimensional finite element model that simulates both steady and transient freshwater and saltwater flow, separated by a sharp interface has been developed to study coastal aquifer systems. The governing equations are discretized by a Galerkin finite element discretization scheme. The model has been verified in simple cases where analytical solutions exist. All necessary data is introduced and managed through a GIS computer program. The simulation program is used as a tool of the GIS program, thus forming an integrated management tool in order to simulate and study saline intrusion in coastal aquifers. Application of the model to Yermasogia aquifer illustrates the coupled use of modeling and GIS techniques for the examination of regional coastal aquifer systems.

Λέξεις – κλειδιά: Παράκτιοι υδροφόροι, οξεία διεπιφάνεια, πεπερασμένα στοιχεία, μέθοδος Galerkin, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

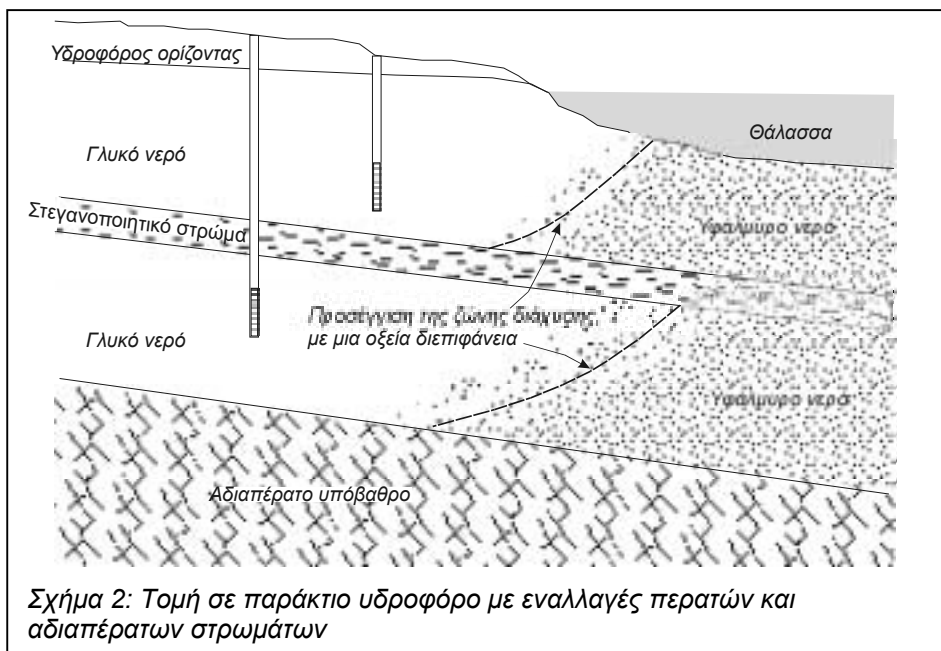
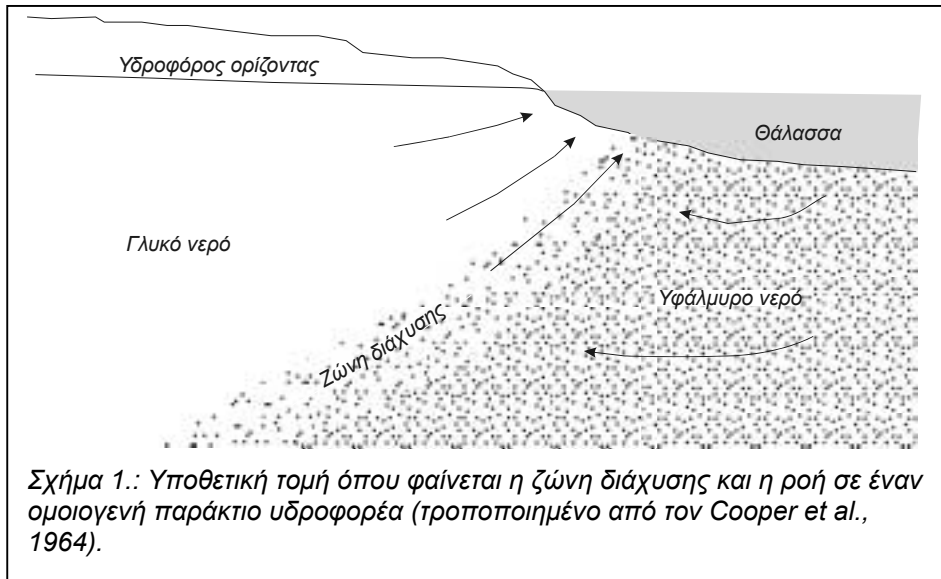
Keywords: Coastal aquifers, sharp interface, finite elements, Galerkin method, G.I.S.

1. Εισαγωγή

Στη γενική του μορφή το σύστημα των παράκτιων υδροφορέων συνίσταται από ένα κορεσμένο πορώδες μέσο, το οποίο περιέχει αναμείξιμο υγρό μεταβλητής πυκνότητας και περιεκτικότητας σε άλατα. Σε σχετικά ομοιογενή πορώδη μέσα σε παράκτιες περιοχές, ο Cooper et al. (1964), βρήκε ότι το πυκνότερο θαλασσινό νερό τείνει να μένει διαχωρισμένο από το υπερκείμενο γλυκό νερό. Σε κάθε περίπτωση πάντως δημιουργείται μια ζώνη ανάμειξης, γνωστή και ως ζώνη διάχυσης ή διασποράς ανάμεσα στα δύο υγρά, όπως φαίνεται και στην τομή του σχήματος 1. Σε αυτή τη ζώνη ανάμειξης, μέρος του αλμυρού νερού

¹ Δρ. Γεωλόγος, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54006 Θεσσαλονίκη.

² Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54006 Θεσσαλονίκη.



αναμειγνύεται με το γλυκό νερό και κινείται προς τη θάλασσα προκαλώντας έτσι κίνηση του θαλασσινού νερού προς την περιοχή ανάμειξης. Έτσι δημιουργείται μια κυκλική ροή του θαλασσινού νερού. Αυτή η ζώνη ανάμειξης έχει βρεθεί ότι έχει ποικίλα πάχη. Σε παράκτιες περιοχές όπου το πορώδες μέσο είναι ανομοιογενές, μπορεί να παρατηρηθεί μια στρωμάτωση στη ζώνη ανάμειξης όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Η τριδιάστατη φύση του συστήματος ροής και η σταδιακή αύξηση στη συγκέντρωση αλάτων κατά μήκος της ζώνης ανάμειξης είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το φυσικό σύστημα.

2. Η ανάγκη ποσοτικοποίησης του συστήματος γλυκού – θαλασσινού νερού

Σε γενικές γραμμές η ποσοτικοποίηση έχει ως σκοπό την κατανόηση και την περιγραφή των σχέσεων μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού. Το φυσικό σύστημα που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι εξαιρετικά περίπλοκο και έτσι σε σπάνιες μόνο περιπτώσεις αντιμετωπίζεται η ροή στο πορώδες αυτό μέσο ως τριδιάστατη, με ανάμειξη εξαρτώμενη από την πυκνότητα. Συνήθως διάφορες απλοποιητικές παραδοχές γίνονται ώστε να επιτρέψουν μια καλή λύση που θα ποσοτικοποιήσει τη σχέση γλυκού και θαλασσινού νερού και θα βελτιώσει την κατανόηση του φαινομένου.

Ίσως η πιο σημαντική προσέγγιση αφορά στην ικανότητα του γλυκού και του θαλασσινού νερού να αναμειγνύονται. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, αυτά τα δύο μειγνυόμενα υγρά θεωρούνται μη

μειγνυόμενα. Θεωρείται έτσι ότι διαχωρίζονται από ένα σαφές όριο ή μια διεπιφάνεια γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως “*sharp interface*” και που στη συγκεκριμένη εργασία θα αναφέρεται σαν οξεία διεπιφάνεια. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία και έδωσε μεγάλη ώθηση στις μαθηματικές εξελίξεις που περιγράφουν τη φυσική αυτή διεργασία (Reilly and Goodman, 1985).

Όταν το φυσικό σύστημα απλοποιείται ώστε να επιτευχθεί η ποσοτικοποίησή του, πρέπει να παρθούν κάποιες αποφάσεις σχετικά με τη φύση του προβλήματος. Έτσι πρέπει να εξεταστούν οι προσεγγίσεις σχετικά α) με τους κανόνες της διεργασίας ανάμειξης, β) με τα χαρακτηριστικά του συστήματος του υπό εξέταση υδροφορέα και γ) με την επιθυμητή κλίμακα και τη λεπτομέρεια της ανάλυσης που επιχειρείται (Reilly and Goodman, 1985). Όσον αφορά τη διεργασία ανάμειξης πρέπει να αποφασισθεί αν τα δύο υγρά θα θεωρηθούν μειγνυόμενα (ζώνη ανάμειξης) ή μη μειγνυόμενα (οξεία διεπιφάνεια), αν το πεδίο ροής θα θεωρηθεί διδιάστατο ή τριδιάστατο, αν η ροή είναι μόνιμη ή μη μόνιμη, αν το θαλασσινό νερό θα θεωρηθεί στατικό ή κινούμενο, αν η διαλυμένη ουσία είναι χημικώς, βιολογικώς και φυσικώς ενεργή και αν μπορεί να επηρεάσει τις φυσικές ιδιότητες του υδροφορέα. Σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση υδροφορέα πρέπει να αποφασισθεί αν θα θεωρηθεί ως προς την περατότητά του ομοιογενής και ισότροπος, ομοιογενής και ανισότροπος, ετερογενής και ισότροπος, ετερογενής και ανισότροπος. Τέλος η επιθυμητή λεπτομέρεια που απαιτείται, θα καθορίσει αν θα εξεταστεί με ιδιαίτερη ακρίβεια μια μικρή συγκεκριμένη περιοχή ή αν θα επιδιωχθεί μια λιγότερο ακριβής εξέταση μιας εκτεταμένης περιοχής.

Για παράδειγμα θα μπορούσε να αναφερθεί ο υδροφορέας του *σχήματος 2*. Αν επιδιώκεται μια εκτίμηση της θέσης του θαλασσινού νερού, θα ήταν κατάλληλο να επιλεγθεί η προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας. Όταν όμως επιδιώκεται η γνώση της συγκέντρωσης του χλωρίου στο αντλούμενο νερό μιας ρηχής γεώτρησης, τότε η πιο σωστή επιλογή θα ήταν αυτή της πιο περίπλοκης προσέγγισης που λαμβάνει υπόψη την ανάμειξη των δύο υγρών. Στο *σχήμα 2* γίνεται επίσης κατανοητός ο ρόλος της περατότητας. Αν επιδιώκεται η μελέτη μόνο του ανώτερου υδροφορέα τότε αυτός μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενής, αλλά αν είναι επιθυμητή η μελέτη του όλου συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη η ετερογένεια. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ο ρόλος της κλίμακας μελέτης. Το φυσικό σύστημα είναι συνεχές στο χώρο και στο χρόνο και περιλαμβάνει γεγονότα που συμβαίνουν σε όλες τις κλίμακες. Στην ανάλυση του προβλήματος το σύστημα υποχρεωτικά απλοποιείται και οι ιδιότητές του θεωρούνται σταθερές σε κάποιον όγκο (χώρο) ή σε κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτή η θεώρηση σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες απλοποιητικές προσεγγίσεις, επηρεάζουν την ακρίβεια της μαθηματικής περιγραφής του προβλήματος, θέτοντας έτσι σημαντικούς περιορισμούς σε ορισμένες περιπτώσεις.

3. Η προσέγγιση του φαινομένου της υπαλμύρωσης με την προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας.

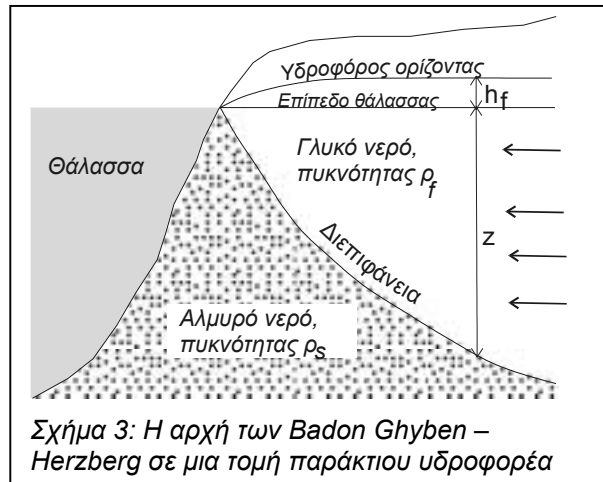
Μια από τις σημαντικότερες σχέσεις που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα για μια αρχική εκτίμηση της θέσης του θαλασσινού νερού σε κάποιον ελεύθερο υδροφορέα είναι αυτή των *Badon Ghyben (1889)* και *Herzberg (1901)*. Αυτή η σχέση συνδέει το ύψος της στάθμης του ύδατος σε κάποιον ελεύθερο υδροφορέα με το ύψος του ορίου ή της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού και αναπτύχθηκε από τους δύο παραπάνω Ευρωπαίους επιστήμονες. Η γνωστή λοιπόν ως σχέση *Ghyben- Herzberg* είναι η εξής:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (1)$$

όπου: ρ_f είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού, ρ_s είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, z είναι το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι το σημείο της διεπιφάνειας και h_f είναι το ύψος της ελεύθερης στάθμης του νερού στο συγκεκριμένο σημείο (*σχήμα 3*). Αυτή η σχέση ήταν η αρχή για την ποσοτική ανάλυση της θέσης της διεπιφάνειας, αν και όπως ορίστηκε αρχικά περιέχει μια σημαντική υπεραπλούστευση.

Η υπεραπλούστευση στην παραπάνω σχέση συνίσταται στο γεγονός ότι εμμέσως υπονοείται πως το υδραυλικό φορτίο στην επιφάνεια του υπογείου νερού θεωρείται ίσο με το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στη διεπιφάνεια, που συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει κάθετη συνιστώσα της υδραυλικής κλίσης (γνωστή και σαν προσέγγιση *Dupuit*). Το πιο προφανές λαθεμένο συμπέρασμα από αυτήν την προσέγγιση είναι το μηδενικό πάχος της ζώνης γλυκού νερού στην ακτή, όπου η στάθμη του γλυκού νερού είναι μηδέν. Το γεγονός όμως ότι γλυκό νερό εκρέει στη θάλασσα υποδεικνύει την ύπαρξη κάποιας ζώνης πεπερασμένου πάχους γλυκού νερού.

Κατά τη δεκαετία του 1930, η δυναμική της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού ήρθε στο φως από τις εργασίες των *Muskat (1937)* and *Hubbert (1940)*. Και οι δύο παραπάνω επιστήμονες έδειξαν ότι η συνέχεια της πίεσης στο πεδίο ροής πρέπει να διατηρηθεί κατά μήκος της διεπιφάνειας. Έτσι η διεπιφάνεια μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν μια οριακή επιφάνεια που συνδυάζει δύο διακριτά πεδία ροής.



Ο *Hubbert* (1940) έδειξε ότι αν καθοριστεί μια συνάρτηση για το υδραυλικό φορτίο για το κάθε υγρό, μπορεί να εξαχθεί η εξίσωση της διεπιφάνειας. Ορίζοντας το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού σαν h_f προκύπτει:

$$h_f = \frac{P}{\rho_f g} + Z \quad (2)$$

ενώ ορίζοντας το υδραυλικό φορτίο για το αλμυρό νερό σαν h_s , προκύπτει:

$$h_s = \frac{P}{\rho_s g} + Z \quad (3)$$

όπου: Z είναι η απόσταση από το επίπεδο αναφοράς μέχρι το σημείο στο οποίο γίνεται η μέτρηση του υδραυλικού φορτίου, P είναι η πίεση του υγρού στο σημείο μέτρησης και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Όμως η πίεση σε κάθε σημείο της διεπιφάνειας είναι ίση και για τα δύο υγρά. Έτσι γράφοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις ως προς την πίεση και εξισώνοντάς τις προκύπτει:

$$Z = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s} h_f - \frac{\rho_s}{\rho_f - \rho_s} h_s \quad (4)$$

Αν και η παραπάνω σχέση μοιάζει αρκετά απλή, ουσιαστικά αποτέλεσε μεγάλη πρόοδο σε σχέση με την αρχή που εξέφρασαν οι *Ghyben – Herzberg*. Η αρχή των *Ghyben – Herzberg* συνέδεε το υδραυλικό φορτίο στην ελεύθερη επιφάνεια με τη θέση της διεπιφάνειας, ενώ η σχέση του *Hubbert* συνδέει τα υδραυλικά φορτία του γλυκού και του θαλασσινού νερού στη διεπιφάνεια, με τη θέση της διεπιφάνειας αυτής.

4. Το μαθηματικό μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στηρίχθηκε στις εξής υποθέσεις:

- Το γλυκό και το θαλασινό νερό δεν αναμειγνύονται και θεωρείται ότι διαχωρίζονται από μια σαφή διεπιφάνεια (προσέγγιση οξείας διεπιφάνειας).
- Η ροή έχει κυρίως οριζόντια συνιστώσα (προσέγγιση Dupuit) και έτσι καθίσταται δυνατή η ολοκλήρωση των εξισώσεων ροής ως προς την κάθετο.
- Ισχύει ο νόμος Darcy.
- Οι ιδιότητες του υδροφορέα και του υγρού παραμένουν αμετάβλητες στο χρόνο.
- Οι τιμές της ειδικής αποθηκευτικότητας και της υδραυλικής αγωγιμότητας έχουν σταθερές τιμές ως προς την κάθετη διεύθυνση.
- Οι τιμές της ειδικής αποθηκευτικότητας και της υδραυλικής αγωγιμότητας θεωρούνται ίδιες τόσο για το γλυκό όσο και για το θαλασινό νερό.

Σε κάθε παράκτιο υδροφορέα οι περιοχές του γλυκού και του θαλασσινού νερού, σύμφωνα με την προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας, συνενώνονται μέσω της εξίσωσης κοινού ορίου στη διεπιφάνεια. Για κάθε περιοχή ροής η εξίσωση συνέχειας είναι δυνατόν να ολοκληρωθεί ως προς την κάθετη διεύθυνση, καθιστώντας έτσι το πρόβλημα καθορισμού της θέσης της διεπιφάνειας ένα διδιάστατο πρόβλημα (x και y

διεύθυνση). Οι κάθετα ολοκληρωμένες εξισώσεις ροής του γλυκού και του θαλασσινού νερού, είναι αντίστοιχα (Bear, 1979, Essaid, 1990):

$$S_f B_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + na \frac{\partial h_f}{\partial t} + \left(n\delta \frac{\partial h_f}{\partial t} - n(1+\delta) \frac{\partial h_s}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B_f K_{fx} \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(B_f K_{fy} \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + Q_f \quad (5)$$

(1) (2) (3) (4) (4) (5)

$$S_s B_s \frac{\partial h_s}{\partial t} + \left(n(1+\delta) \frac{\partial h_s}{\partial t} - n\delta \frac{\partial h_f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B_s K_{sx} \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(B_s K_{sy} \frac{\partial h_s}{\partial y} \right) + Q_s \quad (6)$$

(1) (3) (4) (4) (5)

$$\delta = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s} \quad (7)$$

όπου K_{fx} , K_{fy} και K_{sx} , K_{sy} είναι οι μέσοι όροι ως προς την κάθετη διεύθυνση των τανυστών των υδραυλικών αγωγιμοτήτων γλυκού και θαλασσινού νερού αντίστοιχα κατά τη διεύθυνση x και y (LT^{-1}), η παράμετρος a είναι ίση με 1 για κάποιον ελεύθερο υδροφορέα, ενώ είναι ίση με 0 για κάποιον υδροφορέα υπό πίεση, S_f και S_s είναι οι τιμές ειδικής αποθηκευτικότητας (specific storage) του γλυκού και θαλασσινού νερού (L^{-1}), n είναι το ενεργό πορώδες (αδιάστατο μέγεθος), h_f και h_s είναι οι μέσοι όροι ως προς την κάθετη διεύθυνση των υδραυλικών φορτίων του γλυκού και του θαλασσινού νερού (L), B_f είναι το πάχος της ζώνης γλυκού νερού (L), B_s είναι το πάχος της ζώνης του θαλασσινού νερού (L), Q_f και Q_s οι εισροές και εκροές από το σύστημα για το γλυκό και το αλμυρό νερό (LT^{-1}).

Στις εξισώσεις (5) και (6) οι όροι (1) περιγράφουν την αλλαγή στην ελαστική εναποθήκευση (*elastic storage*) σε κάθε μια από τις περιοχές ροής. Ο όρος (2) περιγράφει τη μεταβολή στην εναποθήκευση του γλυκού νερού λόγω του εμπλουτισμού του υδροφορέα μέσω της ελεύθερης επιφάνειας, οι όροι (3) περιγράφουν τη μεταβολή στην εναποθήκευση σε κάθε πεδίο ροής λόγω της κίνησης της διεπιφάνειας. Οι παράγωγοι των ροών κατά τη x και την y διεύθυνση δίνονται από τους όρους (4) των παραπάνω εξισώσεων. Οι εισροές και εκροές στο σύστημα (αντλήσεις, εμπλουτισμοί) δίνονται μέσω των όρων (5). Γενικά η μεταβολή στην εναποθήκευση λόγω της μετατόπισης του υγρού στην ελεύθερη επιφάνεια και τη διεπιφάνεια (όροι 2 και 3) είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη μεταβολή που οφείλεται στην ελαστική εναποθήκευση (όροι 1) (Essaid, 1990).

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις αποτελούν δύο μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις παραβολικού τύπου που πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα για το γλυκό και το θαλασσινό υδραυλικό φορτίο (h_f και h_s). Μόλις οι τιμές των δύο παραπάνω ποσοτήτων γίνουν γνωστές είναι δυνατός ο υπολογισμός της θέσης της διεπιφάνειας (Z) από τη σχέση (4).

Φυσικά, όπως είναι εύκολα κατανοητό, αναλυτικές λύσεις για τις παραπάνω σχέσεις είναι δυνατό να υπάρχουν μόνο για πολύ απλές περιπτώσεις υδροφορέων. Για να υπολογιστεί η λύση των εξισώσεων αυτών σε πραγματικά πεδία ροής είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας προσεγγιστικής μεθόδου, που στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε να είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

5. Το αριθμητικό μοντέλο

Η ιδέα των στοιχείων (στοιχειώδεις υποπεριοχές που ορίζονται από γραμμές που ενώνουν κομβικά σημεία) είναι θεμελιακή στην ανάπτυξη των εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συγκεκριμένη εργασία τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιούνται, αν και τετραγωνικά ή και άλλου σχήματος στοιχεία είναι δυνατό να συνυπάρχουν. Οι γεωμετρικές και υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα σε κάθε στοιχείο, λαμβάνονται ως ο μέσος όρος των τριών κομβικών τιμών (Γκεμιτζή, 2002). Δύο εξισώσεις γράφονται για κάθε κομβικό σημείο (μια για το γλυκό και μια για το θαλασσινό νερό), ενώ σκοπός είναι ο καθορισμός των άγνωστων κομβικών τιμών των φορτίων του γλυκού $h_L^f(t)$ και θαλασσινού νερού $h_L^s(t)$ που στην περίπτωση όμως των μη μόνιμων ροών αποτελούν συναρτήσεις του χρόνου.

Η μέθοδος *Galerkin* των πεπερασμένων στοιχείων όταν εφαρμοστεί στις εξισώσεις ροής οδηγεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής που δίνεται στη σχέση (8), το οποίο επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Seidel, ενώ η μη γραμμικότητα αντιμετωπίζεται λαμβάνοντας τους μη γραμμικούς όρους από το προηγούμενο υπολογιστικό βήμα (επαναλήψεις Picard).

$$[G]\{h\} + [P]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} = \{f\} + \{B\} \quad (8)$$

Στη σχέση (8), ο πίνακας [G] είναι ένα τετραγωνικός, συμμετρικός πίνακας με τις τιμές των γεωμετρικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα (*conductance matrix*). Ο πίνακας {h} είναι ένας πίνακας-στήλη με τις τιμές του υδραυλικού φορτίου γλυκού και θαλασσινού νερού σε κάθε κόμβο $h_{fl}(t)$ και $h_{sl}(t)$ και για τον χρόνο t. Ο πίνακας [P] είναι ένας τετραγωνικός πίνακας ο οποίος περιέχει τους όρους με τους συντελεστές εναποθήκευσης των εξισώσεων που εκφράζουν το μη μόνιμο φαινόμενο. Ο πίνακας $\{\partial h/\partial t\}$ είναι ένας πίνακας-στήλη που περιέχει τις χρονικές παραγώγους $\partial h_{fl}/\partial t$ και $\partial h_{sl}/\partial t$. Οι πίνακες {f} και {B} είναι και αυτοί πίνακες-στήλες και αντιπροσωπεύουν τις οριακές συνθήκες καθώς και τις αντλήσεις και τους εμπλουτισμούς (φυσικούς και τεχνητούς) αντίστοιχα.

Οι οριακές συνθήκες που συνδέονται με τις εξισώσεις διαφασικής ροής που περιγράφουν το πρόβλημα της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς σύμφωνα με την προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας μπορεί να είναι είτε γνωστού (προκαθορισμένου) υδραυλικού φορτίου h_f και h_s (*fixed head boundary condition*) ή γνωστής παροχής (εισορής, εκροής) (*fixed flux boundary condition*). Σαν υποπερίπτωση του ορίου γνωστής παροχής, λαμβάνεται το αδιαπέρατο όριο (no flow boundary), κάθετα στο οποίο η ροή είναι μηδενική.

Για τον εντοπισμό των σημείων τομής της διεπιφάνειας με την οροφή και τη βάση του υδροφορέα ακολουθήθηκε η τεχνική που προτείνεται από τους *Huyakorn et al, 1996*, και σύμφωνα με την οποία τα αποτελέσματα είτε της προσομοίωσης των μόνιμων ροών, είτε αυτά που προκύπτουν για κάθε χρονικό βήμα κατά την προσομοίωση του μη μόνιμου φαινομένου εισάγονται σε ρουτίνα παρεμβολής σημείων (*interpolation*). Για πρακτικούς λόγους είναι αρκετό να τοποθετηθεί το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τη βάση (*toe*) και την οροφή (*tip*) του υδροφορέα στα σημεία που αντιστοιχούν με πάχος ζώνης αλμυρού νερού ίσου με το 5% και 95% αντίστοιχα, του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα

6. Επαλήθευση του μοντέλου

Όπως ειπώθηκε και προηγούμενα, αναλυτικές λύσεις για τις εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο των υπογειών ροών στους παράκτιους υδροφορείς, υπάρχουν μόνο για απλές περιπτώσεις υδροφορέων. Έτσι για την επαλήθευση του αριθμητικού σχήματος που εκτέθηκε παραπάνω κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή του σε έναν ιδεατό υδροφορέα, τετραγωνικού σχήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν αυτή της μόνιμης και μη μόνιμης ροής για ελεύθερο και υπό πίεση υδροφορέα.

Για την περίπτωση των μόνιμων ροών σε παράκτιο υδροφορέα υπό πίεση οι αναλυτικές λύσεις έχουν ως εξής (*Verruijt, 1968; Vappicha and Nagaraja, 1975*):

$$h^f = z^t + \frac{a_s}{a_f} (h_0^s - z^t) + \left(\frac{2}{Ka_f} q_0 x + \left(\beta \frac{q_0}{K} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$z = z^t - \left(\frac{2a_f}{K} q_0 x + \left(\beta \frac{a_f}{K} q_0 \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

όπου: z είναι η θέση της διεπιφάνειας ως προς το επίπεδο αναφοράς, z^t είναι η θέση της οροφής του υπό πίεση υδροφορέα, q_0 είναι η παροχή του γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους υδροφορέα, K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω λαμβάνεται ίση τόσο για το γλυκό όσο και για το θαλασσινό νερό, $a_f = \rho_f/(\rho_s - \rho_f)$ και $a_s = \rho_s/(\rho_s - \rho_f)$ όπου ρ_f και ρ_s είναι οι πυκνότητες του γλυκού και θαλασσινού νερού αντίστοιχα, h_f είναι το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού, ενώ h_0^s είναι το υδραυλικό φορτίο του θαλασσινού νερού στην ακτή. Η παράμετρος β εξαρτάται από την κλίση του εδάφους κάτω από τη θάλασσα. Η τιμή της παραμέτρου αυτής υπολογίστηκε τόσο με αναλυτικές όσο και με πειραματικές μεθόδους για τις δύο ακραίες περιπτώσεις: του κάθετου και του οριζόντιου εδάφους. Η τιμή είναι ίδια τόσο για ελεύθερο όσο και για υπό πίεση υδροφορέα και ισούται με $\beta=1$ για μικρές κλίσεις (*Verruijt, 1968; Glover, 1959*) ενώ $\beta = 0.741$ για την περίπτωση του κάθετου εδάφους (*Vappicha and Nagaraja, 1975; Rummer and Harleman, 1962*). Για κάθε περίπτωση μεταξύ της οριζόντιας και της κάθετης είναι αποδεκτή η γραμμική παρεμβολή, ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης και των τιμών της παραμέτρου β (*Polo and Ramis, 1983*).

Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στην ακτογραμμή, δηλαδή των οριακών τιμών των h^f και z στην ακτή, δεχόμαστε ότι το υδραυλικό φορτίο του θαλασσινού νερού στην ακτογραμμή ισούται με το μέσο

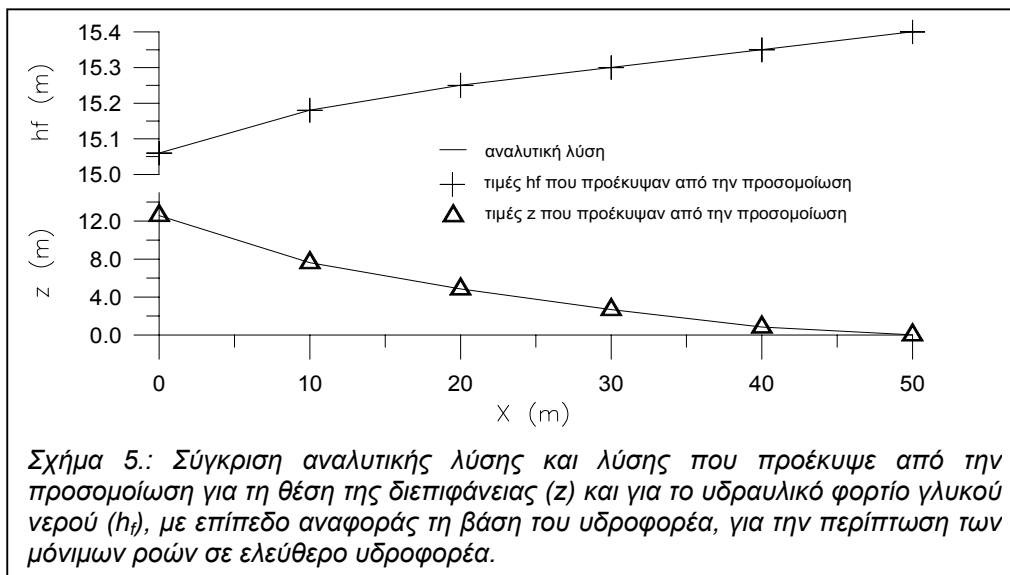
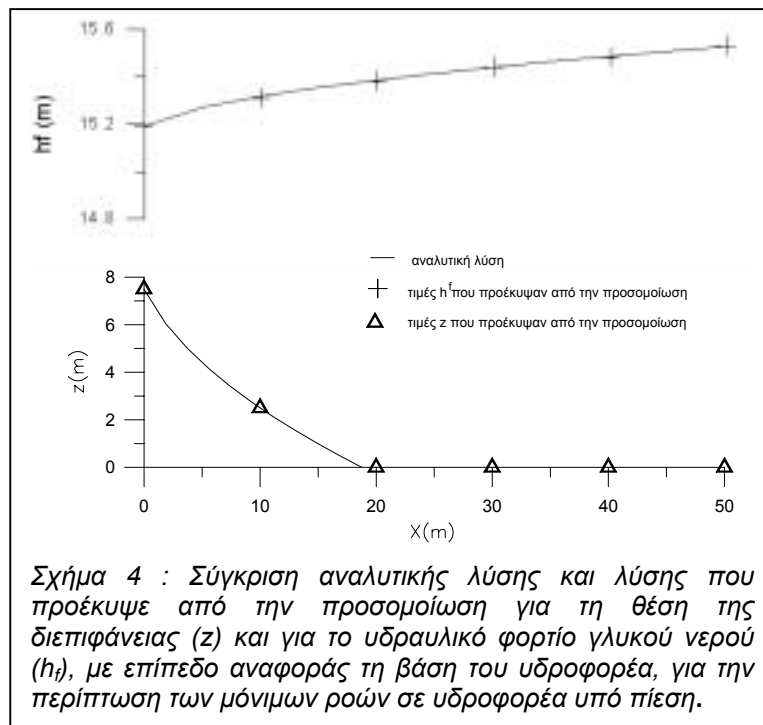
επίπεδο της θάλασσας. Έτσι από τις σχέσεις (9) και (10) υπολογίζονται οι τιμές των h^f και z στην ακτή. Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός των οριακών αυτών τιμών για την περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων (Polo and Ramis, 1983).

Για την περίπτωση της μόνιμης ροής σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρα οι αναλυτικές λύσεις έχουν ως εξής (Verruijt, 1968; Vappicha and Nagaraja, 1975):

$$z = h_0^s - \left(\frac{2a_f^2}{Ka_s} q_0 x + \frac{a_f - 1}{a_s} \left(\beta \frac{a_f}{K} q_0 \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$h^f = h_0^s + \left(\frac{2}{Ka_f} q_0 x \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

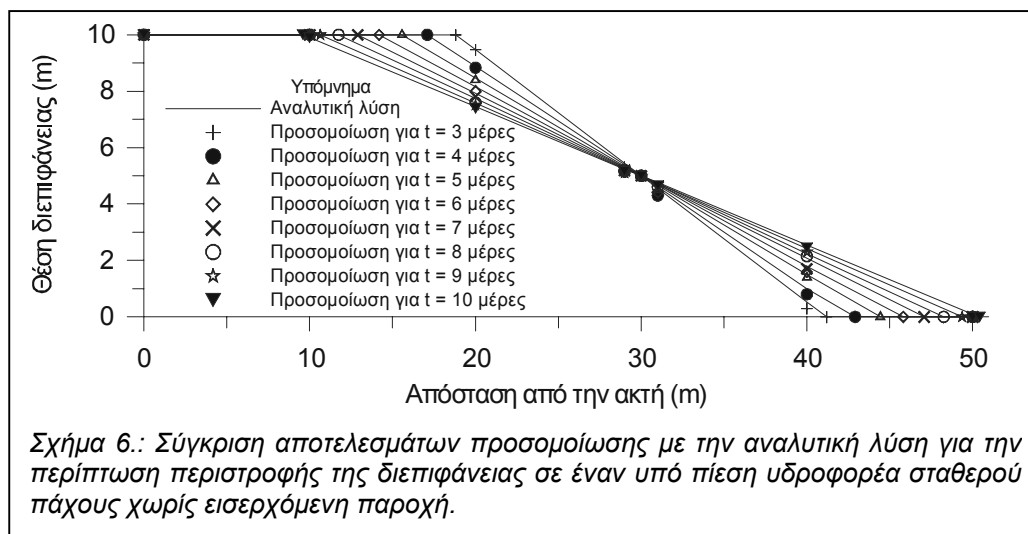
Στα σχήματα 4 και 5 παρατίθεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με την αναλυτική λύση για υπό πίεση και ελεύθερο υδροφόρα αντίστοιχα για την περίπτωση του μόνιμου φαινομένου. Παρατηρείται ότι η ταύτιση της αναλυτικής με την προσομοιωμένη λύση είναι εξαιρετικά καλή.



Για την περίπτωση του μη μόνιμου φαινομένου σε υπό πίεση παράκτιο υδροφορέα χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική λύση που παρουσιάστηκε από τον *Keulegan* (*Keulegan, 1954*) και καθορίζει τη θέση της τομής της διεπιφάνειας με τον αδιαπέρατο πυθμένα (κρουφή διεπιφάνειας) και την αδιαπέρατη οροφή (πόδι διεπιφάνειας) μιας αρχικά κάθετης διεπιφάνειας η οποία περιστρέφεται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας, σε έναν υπό πίεση υδροφορέα με σταθερό πάχος:

$$\tau(t) = \frac{K}{n} \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \frac{t}{b} \quad L(t) = \pm b\sqrt{\tau(t)} \quad b^s = \frac{1}{2} \left[b + \frac{x}{\sqrt{\tau}} \right] \quad (13)$$

όπου $L(t)$ είναι η απόσταση του σημείου τομής της διεπιφάνειας με τον αδιαπέρατο πυθμένα από την αρχική του θέση (L) κατά τη χρονική στιγμή t , $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ (ML^{-3}) είναι η διαφορά των πυκνοτήτων μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού, b είναι το πάχος του υδροφορέα (L), ενώ b_s είναι το πάχος της ζώνης θαλασσινού νερού (L) σε απόσταση x από το αρχικό σημείο ισορροπίας.



Η αρχική θέση της διεπιφάνειας ορίστηκε στο $L = 1\text{m}$, θέση που αντιστοιχεί σε χρόνο $t = 0.024$ ημέρες περιστροφής από την αρχική κάθετη θέση, ενώ το χρονικό βήμα ορίστηκε σε $\Delta t = 1$ ημέρα. Η προσομοίωση διενεργήθηκε για χρόνο 10 ημερών και τα αποτελέσματά της σε σύγκριση με την αναλυτική λύση εκθέτονται στο σχήμα (6).

Για να επαληθευτεί το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και για την περίπτωση των μη μόνιμων ροών σε ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική λύση που αναπτύχθηκε από τους *Vappichha* και *Nagaraja* (*Vappichha and Nagaraja, 1976*) η οποία όμως δεν είναι ακριβής αλλά προσεγγιστική, προσεγγίζοντας το μη μόνιμο φαινόμενο με μια αλληλουχία μόνιμων ροών. Η αναλυτική λύση που χρησιμοποιήθηκε περιγράφει τη θέση της διεπιφάνειας στην περίπτωση που υπάρχει μια απότομη αλλαγή της παροχής του γλυκού νερού από Q_0 σε Q_1 και αντίστοιχη αλλαγή του πάχους της ζώνης γλυκού νερού στην ακτή και άρα της οριακής συνθήκης στην ακτογραμμή από b_0^f σε b^f :

$$t = \frac{C}{A} \left(\frac{1}{b_0^f} - \frac{1}{b^f} - \frac{B}{A} \ln \frac{b^f}{b_0^f} \right) - \frac{G}{B} (b^f - b_0^f) - \left(\frac{BC}{A^2} + \frac{E}{B} - \frac{AG}{B^2} \right) \ln \left(\frac{A + Bb^f}{A + Bb_0^f} \right) \quad (14)$$

όπου t είναι ο χρόνος και :

$$A = \frac{6Q_1}{Nn\beta} \quad B = \frac{6MK}{Nn\beta^2 a_f} \quad C = b^3 \quad E = 3b \quad G = -4$$

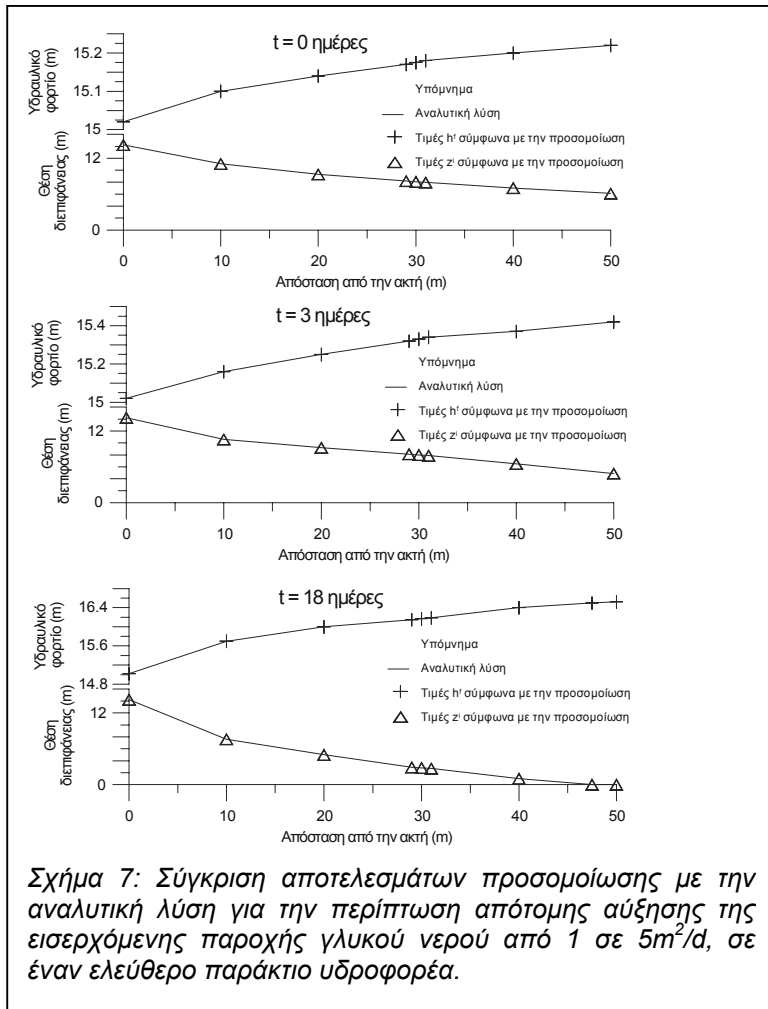
$$M = \frac{a_s}{a_f - 1} \quad N = \frac{a_s(a_f - 1)}{a_f} \quad a_f = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad a_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \quad \beta = 0.741$$

Στις παραπάνω σχέσεις θέτουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

b είναι το βάθος του υδροφορέα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας

Q_0 είναι η αρχική παροχή γλυκού νερού

Q_1 είναι η νέα παροχή γλυκού νερού



b_0^f είναι το πάχος ζώνης γλυκού νερού στην ακτογραμμή κατά το χρόνο $t=0$

b^f είναι το πάχος ζώνης γλυκού νερού στην ακτογραμμή κατά τον χρόνο t .

Αφού υπολογιστεί από τη σχέση 14 η ποσότητα b^f , είναι δυνατός ο υπολογισμός των προφίλ της πιεζομετρίας και του πάχους της υφάλμυρης σφήνας για κάθε χρονικό βήμα, από τις αντίστοιχες σχέσεις που δίνονται για την περίπτωση των μόνιμων ροών σε ελεύθερο υδροφόρα.

Στην περίπτωση που εξετάζεται στο συγκεκριμένο παράδειγμα η εισερχόμενη παροχή γλυκού νερού αυξάνεται απότομα από 1 σε 5m²/d. Αυτό προκαλεί μια μετατόπιση της διεπιφάνειας προς την ακτή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 7, ενώ η ταύτιση της αναλυτικής με την προσομοιωμένη λύση είναι προφανής.

7. Το πρόγραμμα προσομοίωσης "Hydra" και η διασύνδεσή του με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Το πρόγραμμα προσομοίωσης "Hydra" έχει αναπτυχθεί ως ένα εργαλείο των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, εντούτοις αποτελεί ένα απολύτως αυτόνομο πρόγραμμα το οποίο μπορεί να διερευνήσει την κίνηση της υφάλμυρης σφήνας στους παράκτιους υδροφορείς, εφόσον τροφοδοτηθεί με τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου. Έτσι δεν θα πρέπει να θεωρηθεί προαπαιτούμενο του προγράμματος η

γνώση ή η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, τα οποία όμως αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία η οποία είναι δυνατό να προσφέρει σημαντικότερη βοήθεια στο σχεδιασμό της διαχείρισης των φυσικών συστημάτων γενικά, αλλά και ειδικότερα των παράκτιων υδροφορέων που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

Για τη δημιουργία του προγράμματος "Hydra", χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Η γλώσσα αυτή επιλέχθηκε επειδή αποτελεί



ένα από τα πιο σύγχρονα προγραμματιστικά εργαλεία, είναι εύχρηστη, διαθέτει πλήθος έτοιμων εργαλείων, συναρτήσεων, βιβλιοθηκών, ενώ όντας ένα εξ ορισμού παραθυριακό πρόγραμμα εκμεταλλεύεται όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το περιβάλλον των *Windows*. Σημαντικότερο πλεονέκτημα αποτελεί επίσης και η εύκολη διασύνδεση των εφαρμογών της *Visual Basic* με όλα τα υπόλοιπα προγράμματα των *Windows* και ειδικότερα με τις περισσότερες βάσεις δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί στα *Windows*.

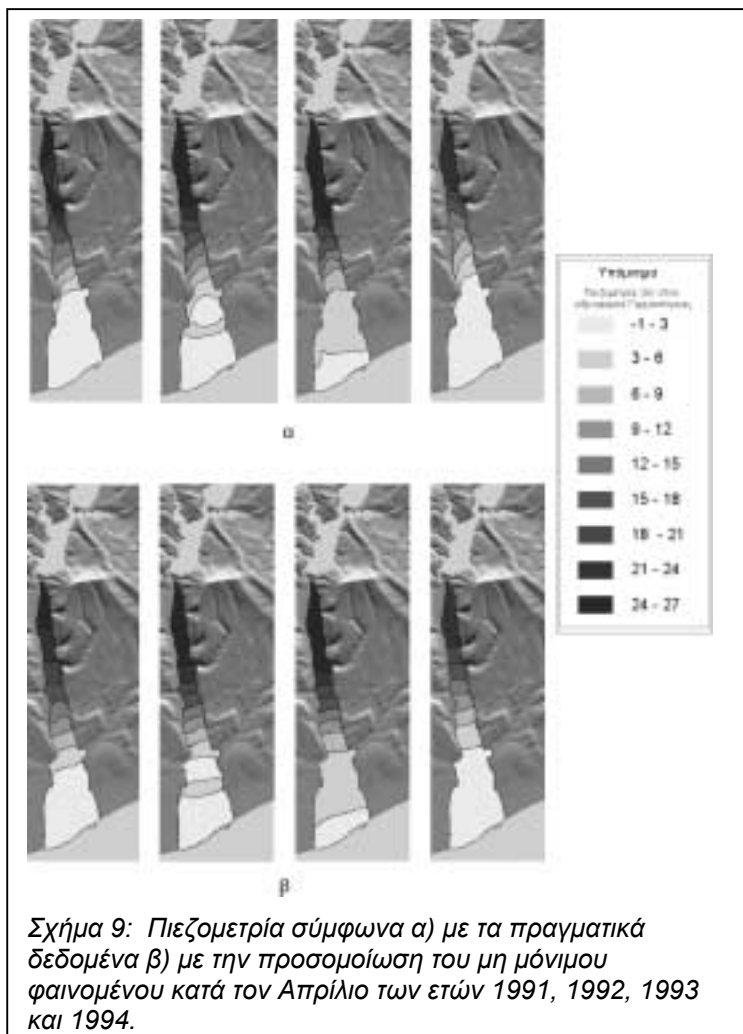
Ως πρόγραμμα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *MapInfo*, το οποίο επιλέχθηκε κυρίως για την ευχρηστία του και για την πλήρη συμβατότητα που εμφανίζει με τα περισσότερα προγράμματα των *Windows* και τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων. Με τη συνδυασμένη χρήση των δύο αυτών προγραμμάτων δημιουργείται το “ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων” (*Gemitzi και Tolikas, 2001*). Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών στη διαχείριση των συστημάτων των παράκτιων υδροφορέων, μέσω της εποπτικής αξιολόγησης διαφόρων σεναρίων διαχείρισης και της απόκρισης των παράκτιων συστημάτων στα συγκεκριμένα σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η χάραξη μακροχρόνιας πολιτικής διαχείρισης για αυτές τις τόσο σημαντικές για την Ελλάδα πηγές νερού.

8. Εφαρμογή του μοντέλου στον υδροφορέα Γερμασόγειας Κύπρου

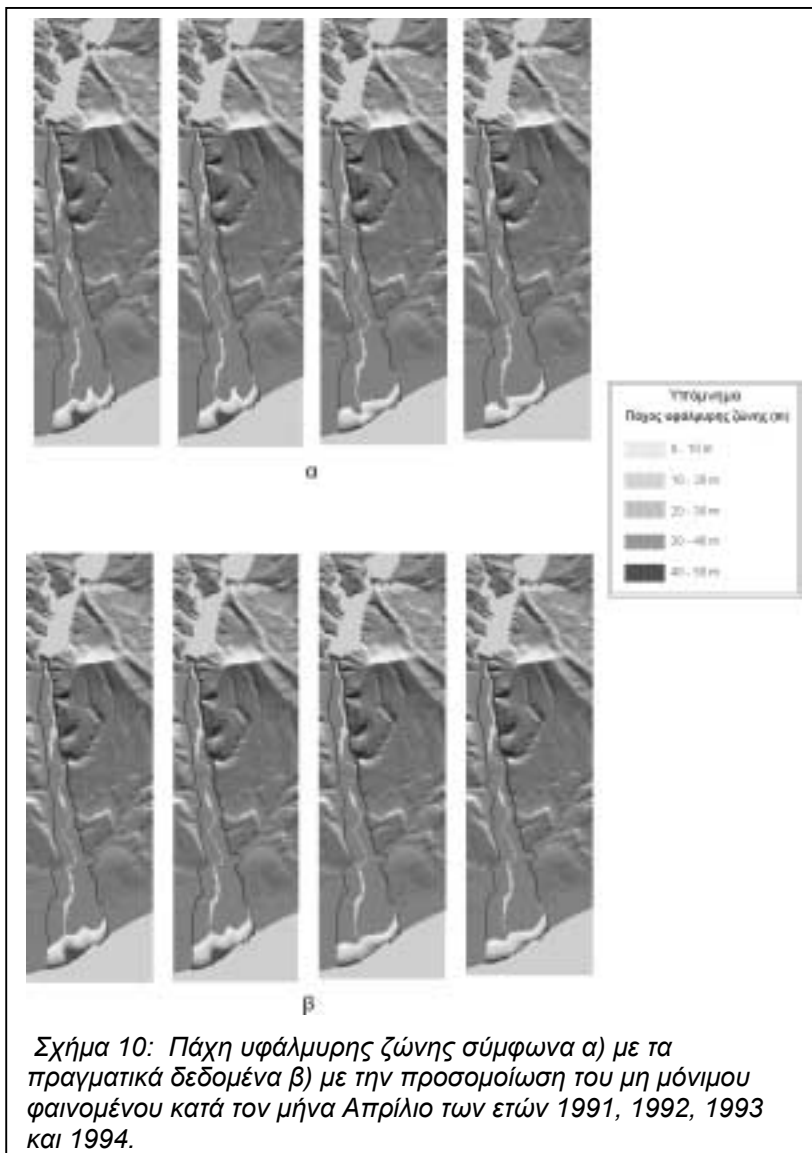
Ο παράκτιος υδροφορέας Γερμασόγειας βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Κύπρου, περίπου 5 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης της Λεμεσού. Η έκταση του υδροφορέα ανέρχεται στα 3km², ενώ το σχήμα του είναι επίμηκες με μέγιστο μήκος 5,5km. Το κλίμα στην περιοχή της Γερμασόγειας είναι ημίξηρο, ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται στα 640 mm.

Το φράγμα του ποταμού που κατασκευάστηκε το 1968 διέκοψε το φυσικό εμπλουτισμό του υδροφορέα. Το γεγονός αυτό σε σχέση με τις ελάχιστες βροχοπτώσεις και τις υψηλές θερμοκρασίες που μεγιστοποιούν την εξαμισιδιαπνοή, οδήγησε σε πτώση της στάθμης του υδροφορέα και ανάγκασε τις αρχές διαχείρισής του, από το 1982, στην εφαρμογή ενός προγράμματος τεχνητού εμπλουτισμού. Βάση αυτού του προγράμματος, ποσότητες νερού ελευθερώνονται από το φράγμα σε επιλεγμένες περιοχές της κοίτης του ποταμού, μετατρέποντας έτσι τον υδροφορέα σε φυσική μονάδα επεξεργασίας του νερού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται επαρκείς ποσότητες νερού καλής ποιότητας, ενώ ελαχιστοποιούνται οι απώλειες νερού προς τη θάλασσα και προστατεύεται ο υδροφορέας από τη διείσδυση της θάλασσας. Ο πλήρης έλεγχος των ποσοτήτων άντλησης και τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα καθιστά τον υδροφορέα ιδανικό για τη ρύθμιση και την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου, για αυτό το λόγο και επιλέχθηκε για την παρούσα εφαρμογή.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις που δομούν τον κύριο όγκο του υδροφορέα, συνίστανται κυρίως από άμμους με



ενστρώσεις ιλύων καθώς και από χαλίκια. Το πάχος του υδροφορέα ανέρχεται στα 50 μέτρα στην παράκτια περιοχή του δέλτα ενώ πλευρικά ο υδροφορέας αποσφηνώνεται και το πάχος του φτάνει το 1 μέτρο. Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν, δηλαδή της μεταφορικότητας *T* και υδραυλικής αγωγιμότητας *K* προέκυψαν από επεξεργασία στοιχείων 30 δοκιμαστικών αντλήσεων. Έτσι οι τιμές της



Σχήμα 10: Πάχη υφάλμυρης ζώνης σύμφωνα α) με τα πραγματικά δεδομένα β) με την προσομοίωση του μη μόνιμου φαινομένου κατά τον μήνα Απρίλιο των ετών 1991, 1992, 1993 και 1994.

υδραυλικής αγωγιμότητας K κυμαίνονται από 5×10^{-3} m/sec ως 2.1×10^{-4} m/sec, ενώ οι τιμές της μεταφορικότητας T κυμαίνονται από 5.84×10^{-3} m²/sec έως 6.1×10^{-2} m²/sec (Θ. Κουτσός, 1998).

Το μοντέλο εφαρμόστηκε στον υδροφορέα Γερμασόγειας, αφού πρώτα εκτελέστηκε η διαδικασία της ρύθμισής του για την περίπτωση του μόνιμου φαινομένου σύμφωνα με τα δεδομένα του έτους 1992 (Γκεμιτζή, 2002). Η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και η κατείσδυση ήταν οι παράμετροι του μοντέλου που ρυθμίστηκαν. Έτσι στις διαδοχικές προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, μεταβάλλονταν οι παραπάνω παράμετροι μέχρις ότου επιτευχθεί η ελάχιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα δεδομένα παρατήρησης. Ο υδροφορέας θεωρήθηκε ετερογενής και ισότροπος, ενώ η αρχική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας ορίστηκε όπως αυτή προέκυψε από τις αντλητικές δοκιμές. Εν συνεχεία και στις συγκεκριμένες περιοχές του κανάβου που παρουσίασαν τα μεγαλύτερα σφάλματα μεταβλήθηκε η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και με την κατείσδυση, έχοντας όμως σαν περιορισμό τα βροχομετρικά δεδομένα, με τα οποία οι τιμές της κατείσδυσης θα πρέπει να βρίσκονται σε συμφωνία. Γενικά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών

που επικρατούν στην περιοχή θεωρήθηκε ότι μικρό ποσοστό των βροχοπτώσεων κατείσδύει εμπλουτίζοντας τον υδροφορέα.

Ο υδροφορέας θεωρήθηκε ότι δέχεται εισροές από τα ανάντη, μέσω διαφυγών από το φράγμα της Γερμασόγειας. Τα πλευρικά όρια του υδροφορέα θεωρήθηκαν αδιαπέρατα, ενώ η ακτογραμμή θεωρήθηκε ως όριο γνωστού φορτίου, τόσο για το γλυκό όσο και για το θαλασσινό νερό.

Το μαθηματικό μοντέλο, μετά τη ρύθμιση, εφαρμόστηκε για τη σειρά ετών 1991 – 1994, προσομοιώνοντας το μη μόνιμο φαινόμενο για αυτή τη χρονική περίοδο. Για τα έτη αυτά υπήρχαν διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα δεδομένα (πιεζομετρικά, βροχομετρικά, αντλήσεις, εμπλουτισμοί), καθώς και καταγραφές των παχών της υφάλμυρης ζώνης για γεωτρήσεις πλησίον της ακτής. Έτσι κατέστη δυνατός ο έλεγχος του μοντέλου για τη συγκεκριμένη σειρά ετών. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα σχήματα 9 και 10, ενώ προκύπτει ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια να αναπαράγει τη συμπεριφορά του υδροφορέα.

9. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εκτέθηκε ο τρόπος ανάπτυξης ενός μοντέλου προσομοίωσης των διφασικών ροών στους παράκτιους υδροφορείς, με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την προσέγγιση της “οξείας διεπιφάνειας”, για το μόνιμο και το μη μόνιμο φαινόμενο. Οι εξισώσεις ροής ολοκληρώθηκαν ως προς την κάθετο σύμφωνα με την ημι-τριδιάστατη μέθοδο προσέγγισης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή της για την περίπτωση των διφασικών ροών. Έτσι σε κάθε κόμβο του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται δύο εξισώσεις, μια για το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού και μια για το υδραυλικό του θαλασσινού νερού. Οι δύο αυτές εξισώσεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω της οριακής συνθήκης

διεπιφάνειας, η οποία προσδιορίζει την ακριβή θέση της διεπιφάνειας στο χώρο, σε κάθε βήμα της επίλυσης του προβλήματος.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επαληθεύτηκε σύμφωνα με τις υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις και έτσι αποδείχτηκε η ικανότητά του να επιλύει τις εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο των διφασικών ροών στους παράκτιους υδροφορείς, τόσο για ελεύθερο όσο και για υπό πίεση υδροφορέα, για μόνιμες και μη μόνιμες ροές. Τέλος, η εφαρμογή του προγράμματος “Hydra” στον παράκτιο υδροφορέα της Γερμασόγειας Κύπρου, αποδεικνύει ότι είναι δυνατή η προσομοίωση της θέσης και της κίνησης της υφάλμυρης ζώνης, με το μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε στο Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων Κύπρου για την παραχώρηση των υδρογεωλογικών δεδομένων του υδροφορέα Γερμασόγειας Κύπρου, με βάση τα οποία έγινε η ρύθμιση και ο έλεγχος του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Ευχαριστούμε επίσης το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την οικονομική στήριξη που προσέφερε κατά τη διάρκεια της έρευνάς μας.

Βιβλιογραφία

- BADON-GHYBEN, W., 1889. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam (Notes on the probable results of well drilling near Amsterdam). Tijdschr. K. Inst. Ing., 8 – 22.
- BEAR, J., 1979. Hydraulics of groundwater, McGraw – Hill, New York.
- COOPER, H. H., 1959. A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. J. Geophys. Res., 64(4): 461-467.
- ESSAID, H. I., 1990. A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application, *Water Resour. Res.*, 26(7), 1431-1454.
- GEMITZI, A. and TOLIKAS, D., 2001. Numerical and GIS coupling model for the study of saline intrusion in coastal aquifers: A case study from Yermasogia aquifer (Limassol, Cyprus). In Tsihrintzis V. A. and Tsalides P. (Eds): Proceedings in the International Conference “Ecological Protection of Planet Earth I”, Volume 1, pp. 33 - 42 Xanthi, Greece.
- GLOVER, R.E., 1959. The pattern of fresh water flow in a coastal aquifer. *J Ground Water Resour.*, 64, 439-475.
- HERZBERG, A., 1901. Die wasserversorgung einiger Nordseebaden (The water supply on parts of the North Sea coast in Germany), *Z. Gasbeleucht, Wasserversorg.*, 44, 815-819, 824-844.
- HUBBERT, M. K., 1940. The theory of ground-water motion, *J. Geol.* 48(8), 785-944.
- HUYAKORN, P. S., Y. S. WU, and N. S. PARK, 1996. Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem, *Water Resour. Res.*, 32(1), 93-102.
- KEULEGAN, G. H., 1954. Ninth progress report on model laws for density currents; an example of density current flow in permeable media, Natl. Bur. Stand. U.S. Rep. 3411.
- MUSKAT, M., 1937. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. McGraw-Hill, New York, N.Y., 763pp.
- POLO, J. F., F. J. R. RAMIS, 1983. Simulation of salt water – fresh water interface motion, *Water Resour. Res.*, 19(1), 61 – 68.
- REILLY, T. E., A. S. GOODMAN, 1985. Quantitative analysis of saltwater – freshwater relationships in groundwater systems – A historical perspective, *J. of Hydrol.*, 80, 125 –160.
- RUMMER, R. R., AND D. R. F. HARLEMAN, 1962. Intruded salt water wedge in porous media, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 450-B.
- VAPPICHA, V. N., and NAGARAJA, S. H., 1976. An approximate solution for the transient interface in a coastal aquifer. *J. Hydrol.*, 31: 161 – 173.
- VAPPICHA, V. N., and NAGARAJA, S. H., 1975. Steady state interface in an unconfined aquifer with a vertical outflow face, paper presented at the National Symposium on Hydrology, Rurkee, India.
- VERRUIJT, A., 1968. A note on the Ghyben-Herzberg formula, *IASH Bull.* 13, 43-45.
- ΓΚΕΜΙΤΖΗ, Α., 2002. Προσομοίωση παράκτιων υδροφορέων με τη συνδυασμένη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και G.I.S. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- ΚΟΥΤΣΟΣ, Θ., 1998. Μελέτη του υδροφορέα της Γερμασόγειας (Κύπρου) με τη χρήση GIS. Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Α.Π.Θ.

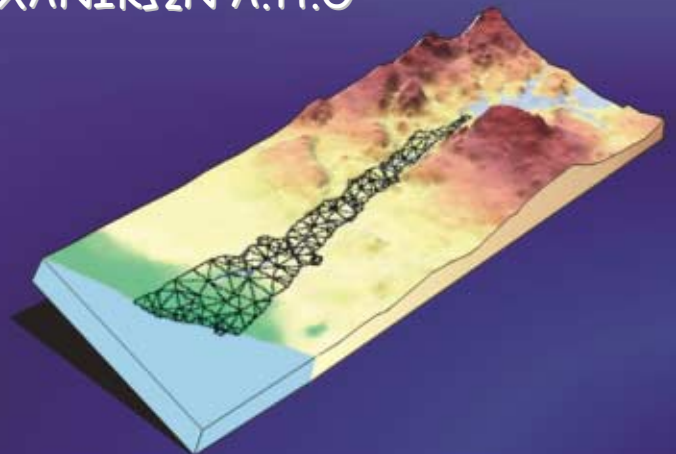
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΓΚΕΜΙΤΖΗ
ΔΡ. ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΟΛΙΚΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α.Π.Θ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003



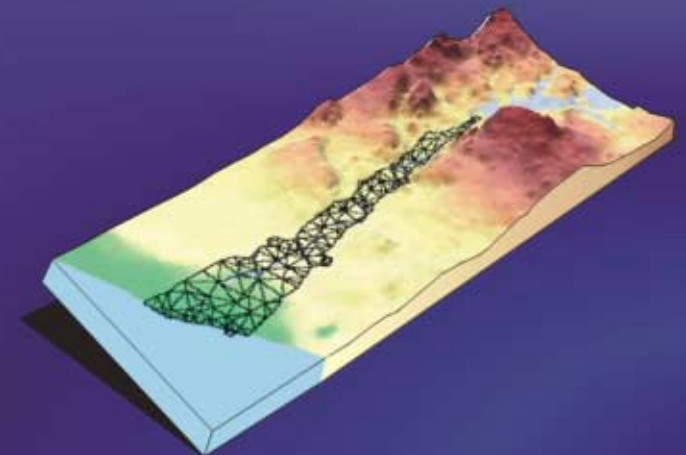
ΣΚΟΠΟΣ

- Η κατασκευή ενός πρωτότυπου και γενικού μαθηματικού μοντέλου που προσομοιώνει την αλληλεπίδραση μεταξύ θάλασσας και παράκτιων υδροφορέων.
 - Αυτό το μοντέλο αποτελεί τον πυρήνα του λογισμικού.
- Εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο δια μέσου Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (G.I.S.).
 - Χρήση χαρτών.
 - Εύκολη εισαγωγή δεδομένων
- Εποπτικά αποτελέσματα με τη διασύνδεση της εξόδου του μοντέλου με G.I.S.
 - Καμπύλες ίσου πάχους υφαλμύρωσης.
 - Κίνηση διεπιφάνειας αλμυρού - γλυκού νερού.



ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων
- Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic
- Η ομάδα προγραμμάτων G.I.S. της MapInfo



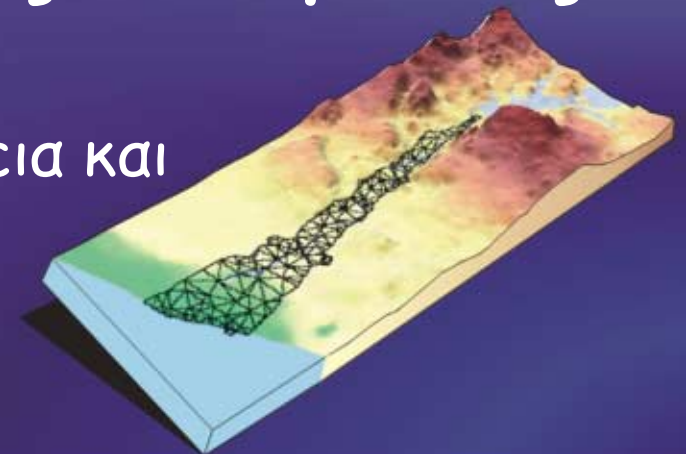
Η προσέγγιση του φαινομένου με τα μαθηματικά μοντέλα

● Μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς και διάχυσης

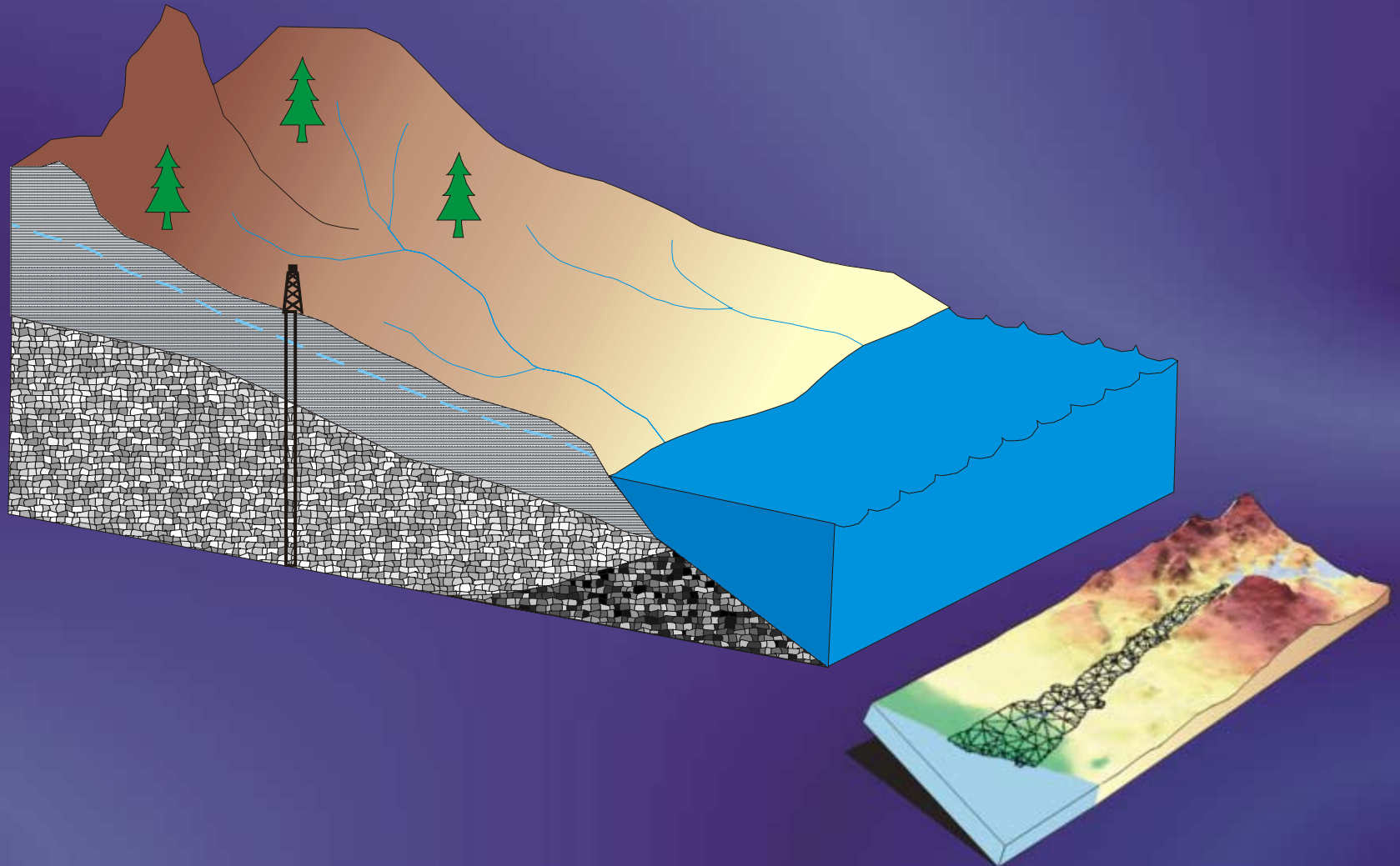
- Προσομοίωση της μεταβατικής ζώνης που διαχωρίζει τα δύο υγρά.

● Μαθηματικά μοντέλα οξείας διεπιφάνειας

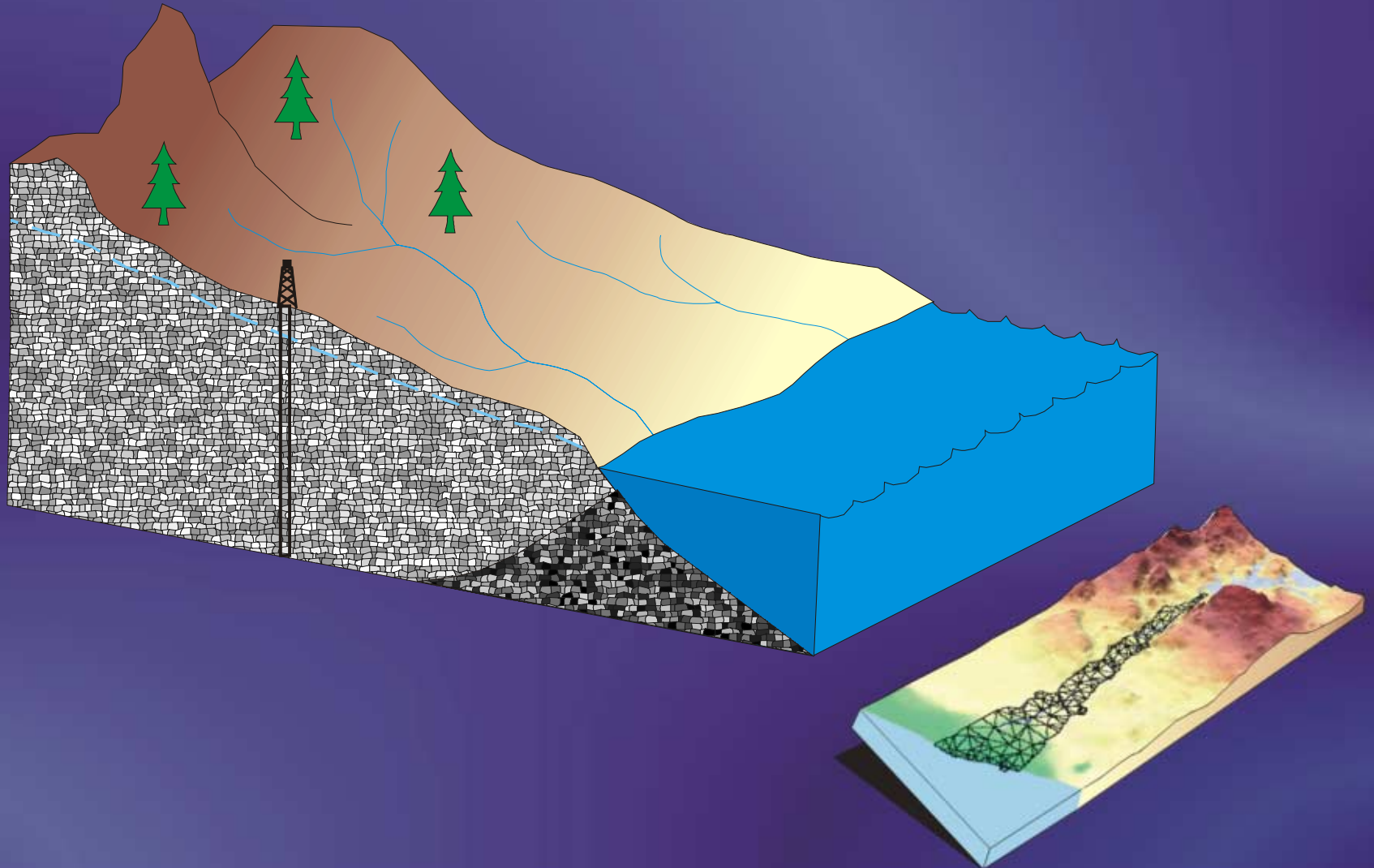
- Γίνεται η υπόθεση ότι τα δύο υγρά διαχωρίζονται από μια σαφή διεπιφάνεια και αντιμετωπίζονται ως μη αναμίξιμα.



Σχηματική απεικόνιση ενός υπό πίεση παράκτιου υδροφορέα



Σχηματική απεικόνιση ενός ελεύθερου παράκτιου υδροφορέα

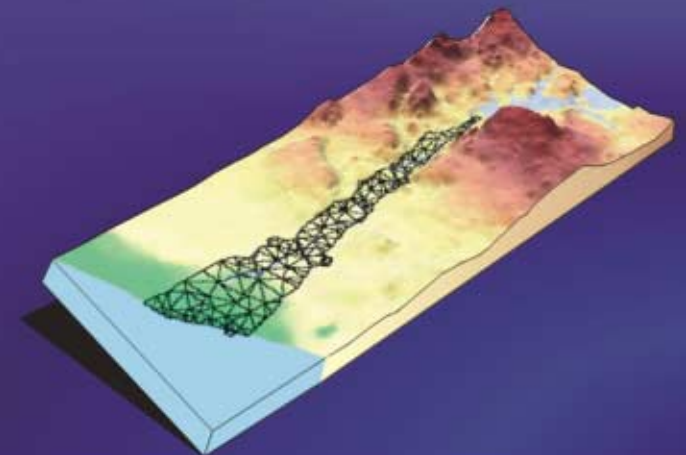


Είδη μοντέλων οξείας διεπιφάνειας

● Μοντέλα που προσομοιώνουν τη ροή μόνο στην περιοχή του γλυκού νερού

➤ Αρχή Ghyben-Herzberg:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h$$



Είδη μοντέλων οξείας διεπιφάνειας

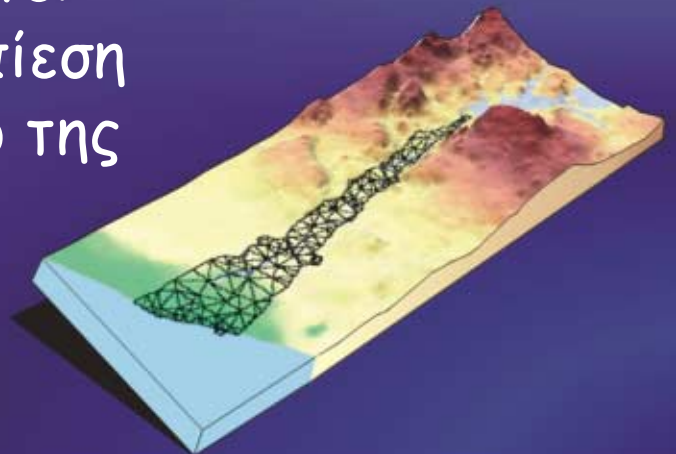
● Μοντέλα που προσομοιώνουν τη ροή και στα δύο υγρά

- Βασίζονται στην αρχή Hubbert η οποία συνδέει τα φορτία γλυκού και θαλασσινού νερού με τη θέση της διεπιφάνειας:

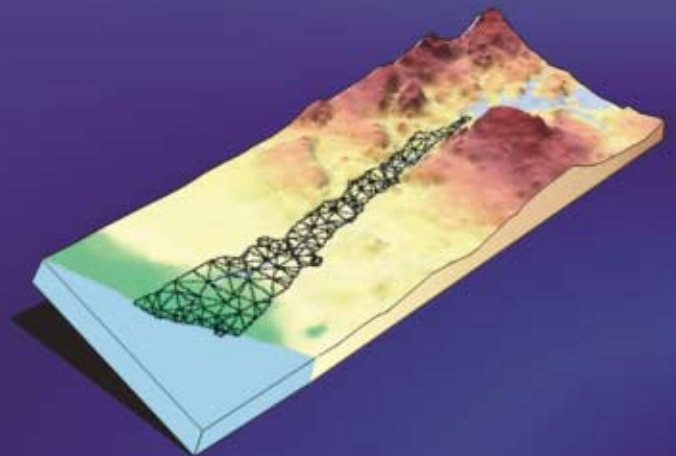
$$h_f = \frac{P}{\rho_f g} + Z \quad h_s = \frac{P}{\rho_s g} + Z$$

- Η εξίσωση της διεπιφάνειας προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πίεση των δύο υγρών είναι ίση σε κάθε σημείο της διεπιφάνειας:

$$Z = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} h_s - \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

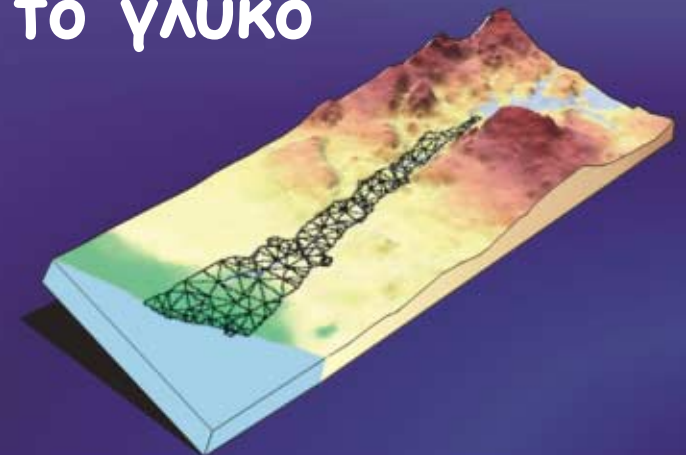


ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



Παραδοχές

- Το γλυκό και θαλασσινό νερό δεν αναμιγνύονται
- Η ροή έχει κυρίως οριζόντια συνιστώσα και οι εξισώσεις ολοκληρώνονται ως προς την κάθετο
- Ισχύει ο νόμος του Darcy
- Η υδραυλική αγωγιμότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα είναι ίσες για το γλυκό και το θαλασσινό νερό



Οι εξισώσεις

● Εξίσωση ροής γλυκού νερού:

$$S_f B_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + na \frac{\partial h_f}{\partial t} + \left(n\delta \frac{\partial h_f}{\partial t} - n(1+\delta) \frac{\partial h_s}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B_f K_{fx} \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(B_f K_{fy} \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + Q_f$$

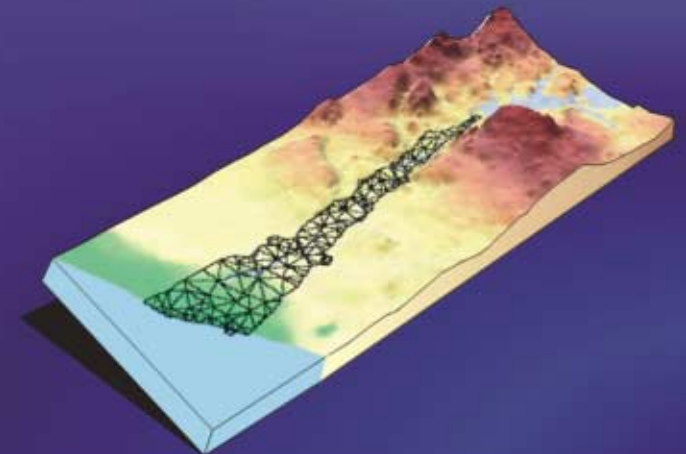
● Εξίσωση ροής θαλασσινού νερού:

$$S_s B_s \frac{\partial h_s}{\partial t} + \left(n(1+\delta) \frac{\partial h_s}{\partial t} - n\delta \frac{\partial h_f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B_s K_{sx} \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(B_s K_{sy} \frac{\partial h_s}{\partial y} \right) + Q_s$$

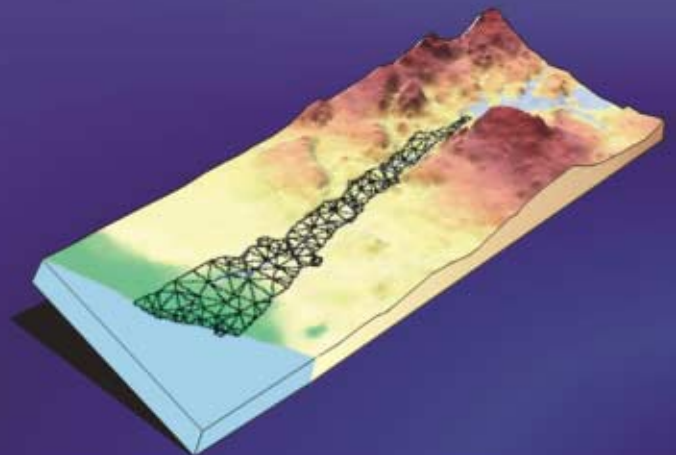
● Εξίσωση διεπιφάνειας:

$$Z = (1 + \delta)h_s - \delta h_f$$

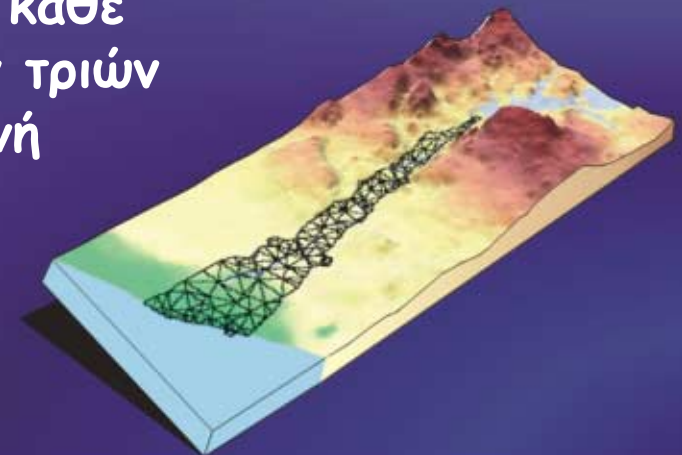
όπου
$$\delta = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s}$$



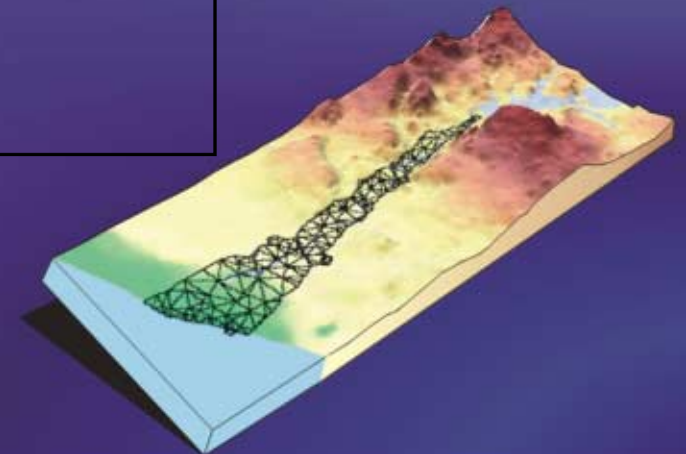
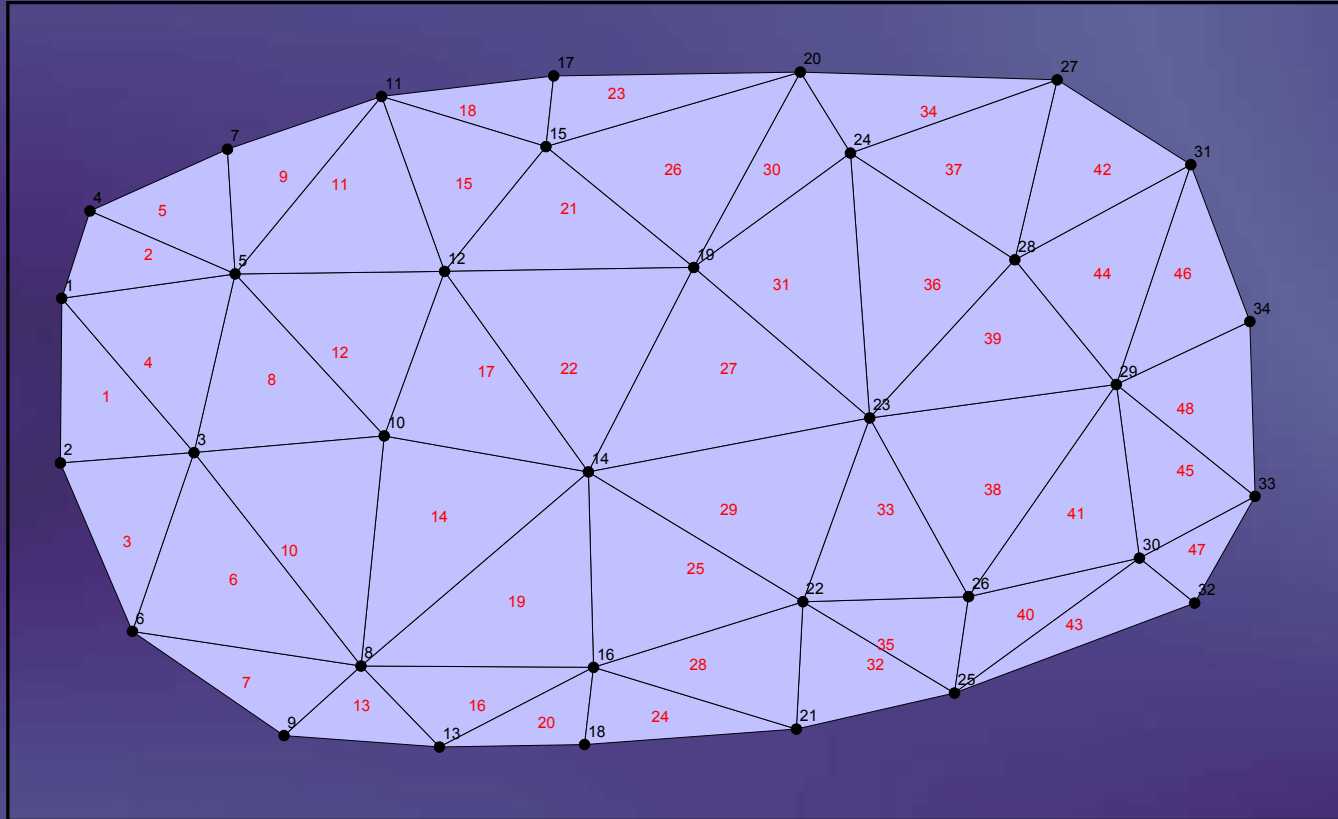
ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



- Υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων
- Οι εξισώσεις διακριτοποιούνται σύμφωνα με την μέθοδο σταθμισμένου υπολοίπου Galerkin
- Το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων που προκύπτει γραμμικοποιείται υπολογίζοντας τους συντελεστές των αγνώστων στο προηγούμενο επαναληπτικό βήμα (επαναλήψεις Picard)
- Το γραμμικοποιημένο σύστημα επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Seidel
- Το κορεσμένο πάχος της κάθε φάσης σε κάθε στοιχείο υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τριών κομβικών τιμών
- Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε στοιχείο υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των τριών κομβικών τιμών, όταν πρόκειται για ετερογενή υδροφορέα

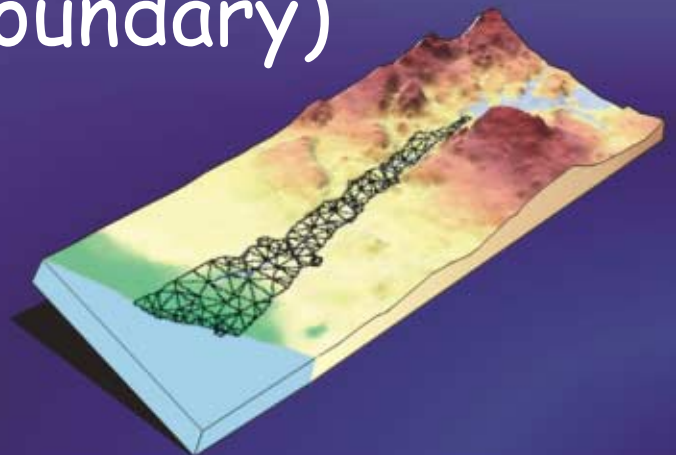


Ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων

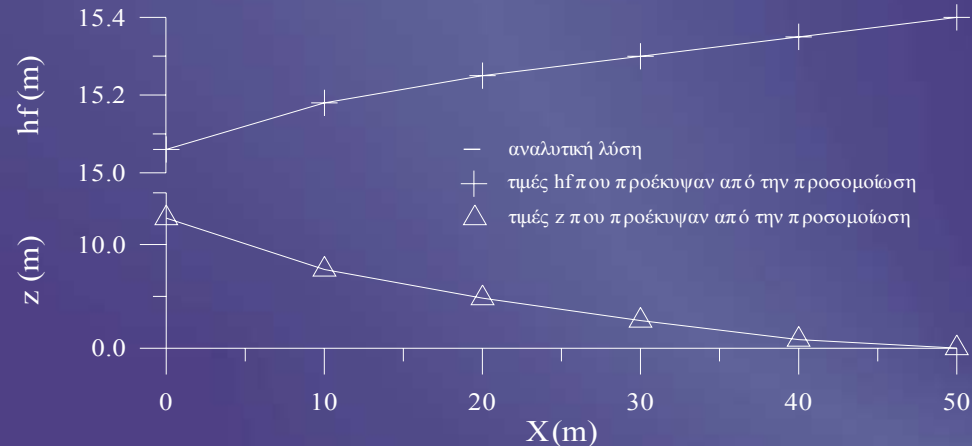
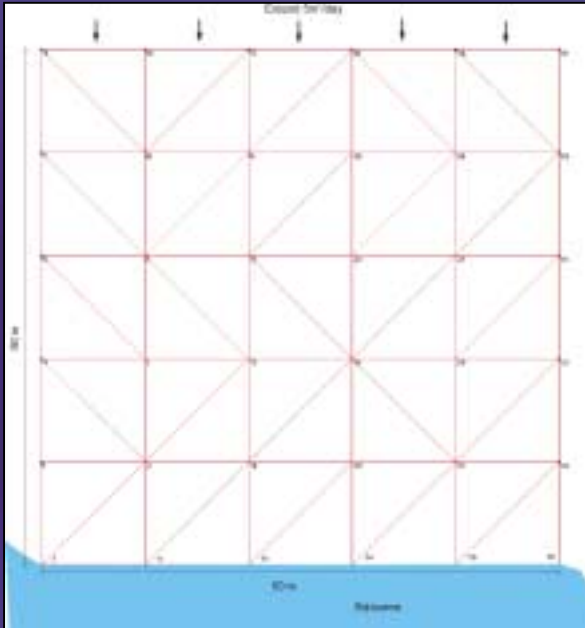


Οριακές συνθήκες

- Οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής (specified flow boundary)
 - Αδιαπέρατο όριο (no flow boundary)
- Οριακές συνθήκες καθορισμένου φορτίου (specified head boundary)

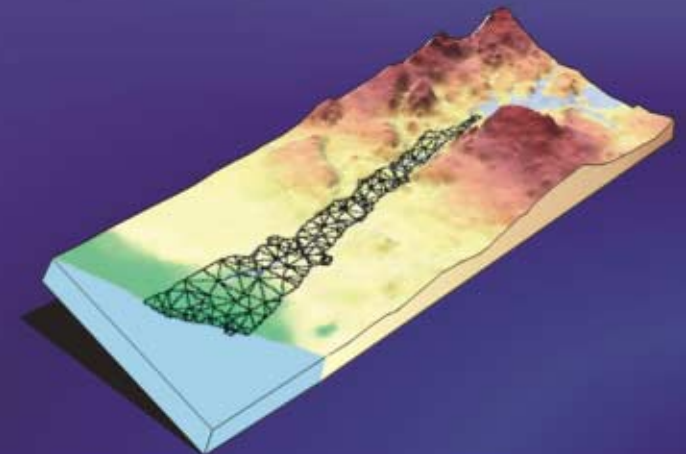


Επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση αναλυτικών λύσεων



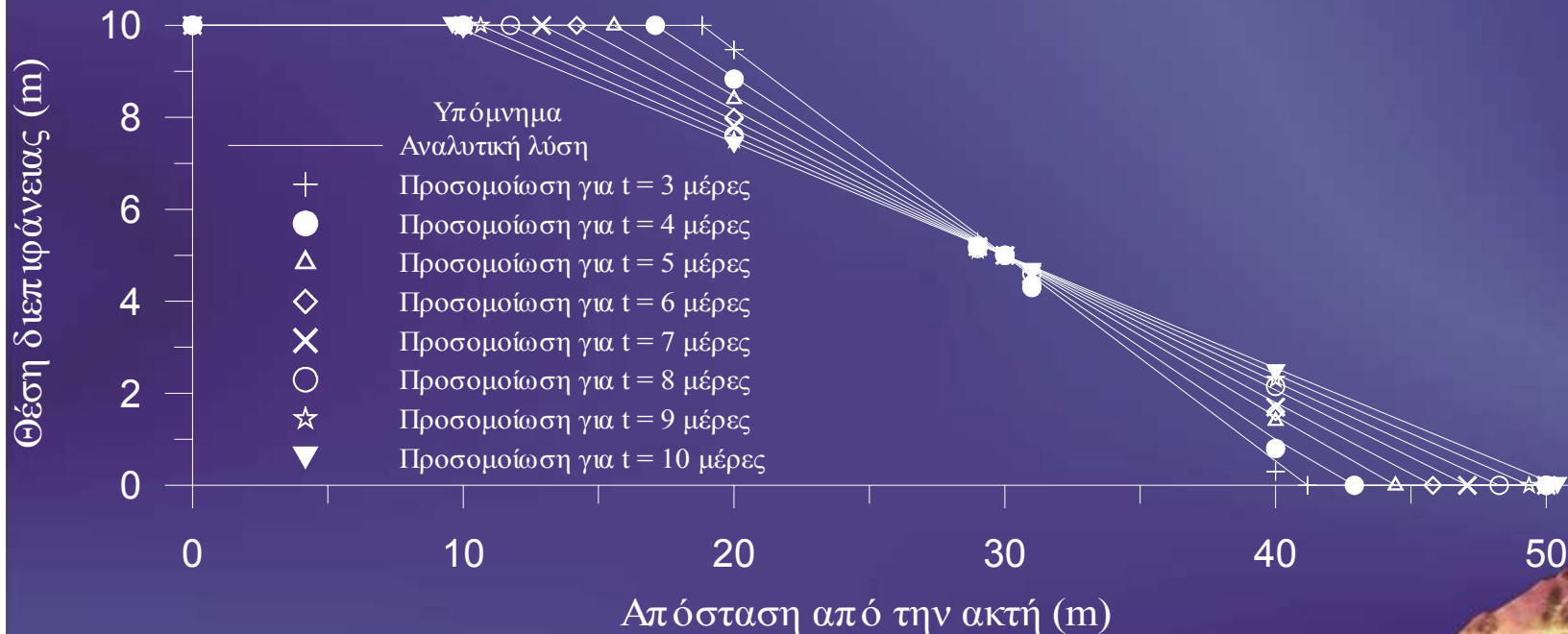
Σύγκριση αναλυτικής λύσης Verruijt, Varricha και Nagaraja, και προσομοιωμένης λύσης για το υδραυλικό φορτίο και τη θέση της διεπιφάνειας.

- Είδος υδροφορέα: Ελεύθερος, ομογενής, ισότροπος
- Έιδος ροής: Μόνιμη
- Διαστάσεις υδροφορέα: 50 X 50μ
- Υδραυλική αγωγιμότητα: 80μ/ημέρα
- Εισροή: 5μ²/ημέρα/μονάδα μήκους υδροφορέα
- Οριακές συνθήκες: αδιαπερατα όρια πλευρικά, συνθήκες γνωστού φορτίου στην ακτή, γνωστή εισροή από τα ανάντι

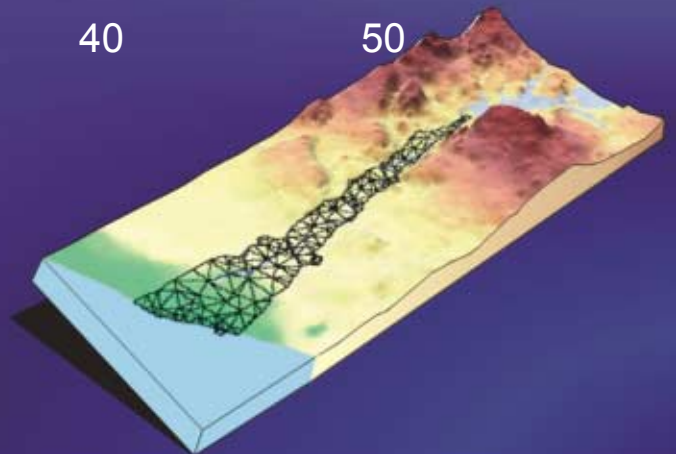


Επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση αναλυτικών λύσεων

Μη μόνιμη ροή σε παράκτιο υδροφορέα υπό πίεση χωρίς εισερχόμενη παροχή



Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με την αναλυτική λύση Keulegan για την περίπτωση περιστροφής της διεπιφάνειας

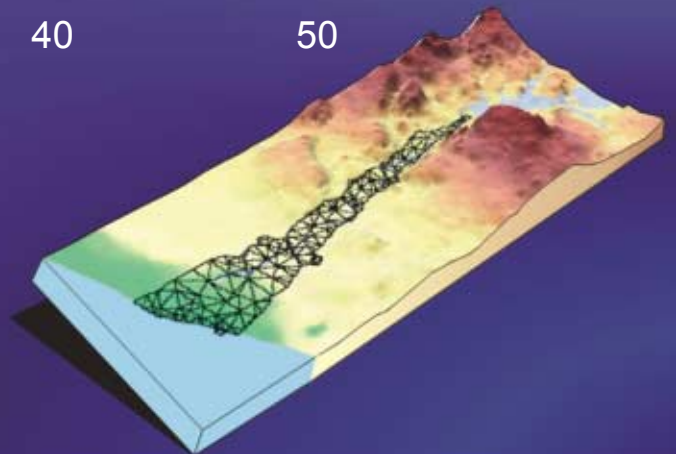


Επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση αναλυτικών λύσεων

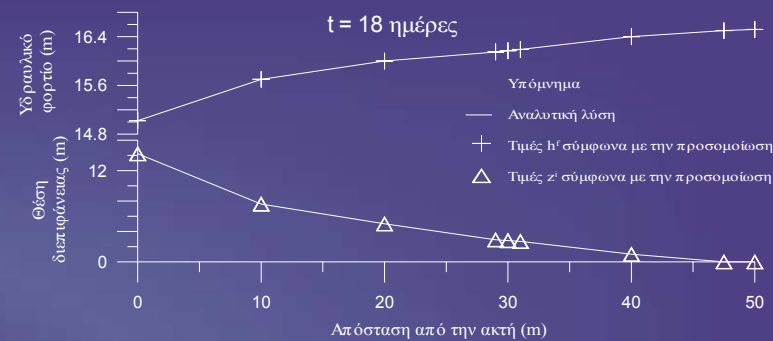
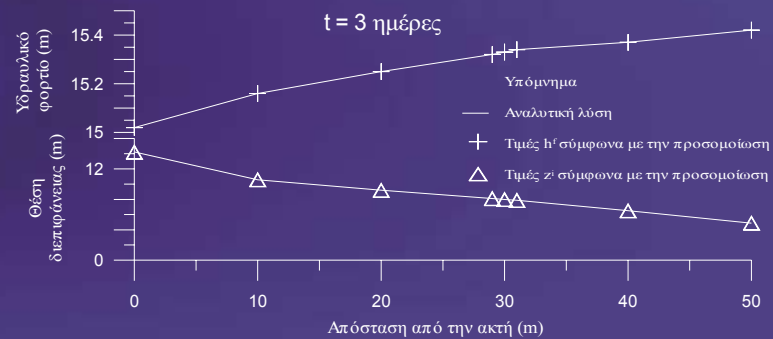
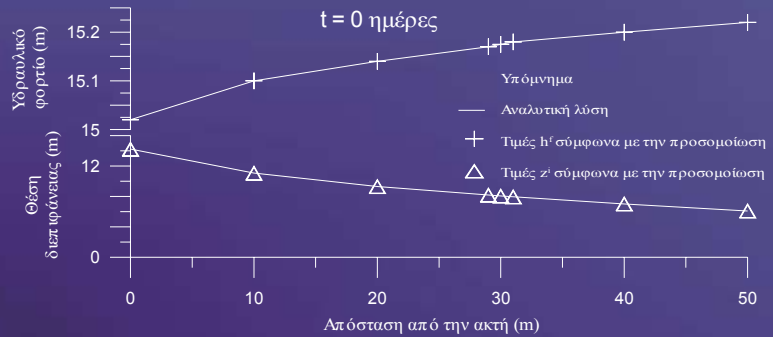
Μη μόνιμη ροή σε παράκτιο υδροφόρα υπό πίεση με εισερχόμενη παροχή



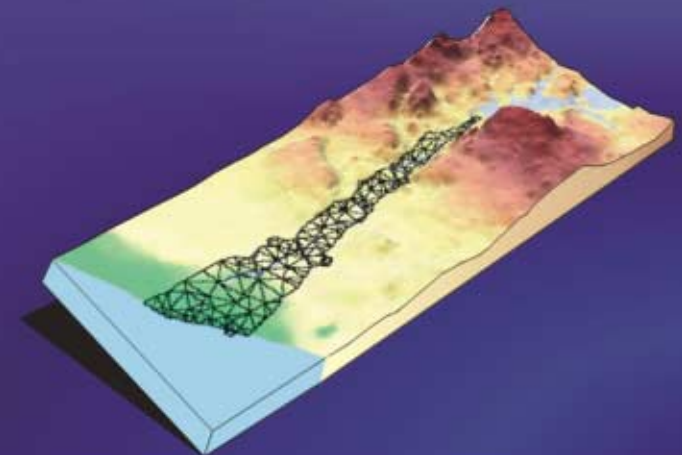
Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με την αναλυτική λύση Keulegan για την περίπτωση περιστροφής και μετατόπισης της διεπιφάνειας



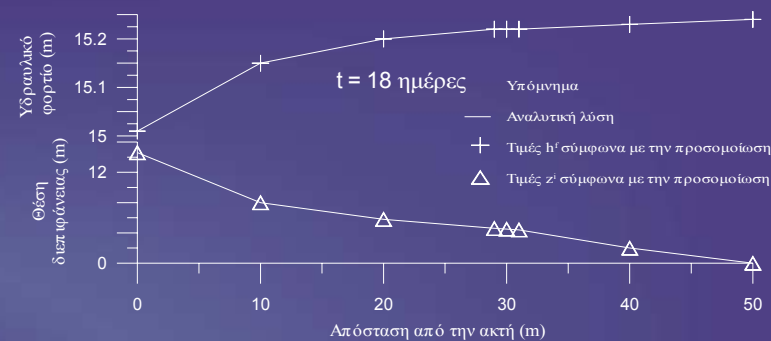
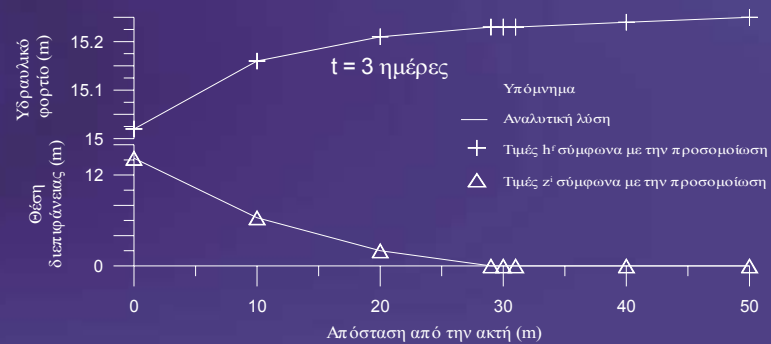
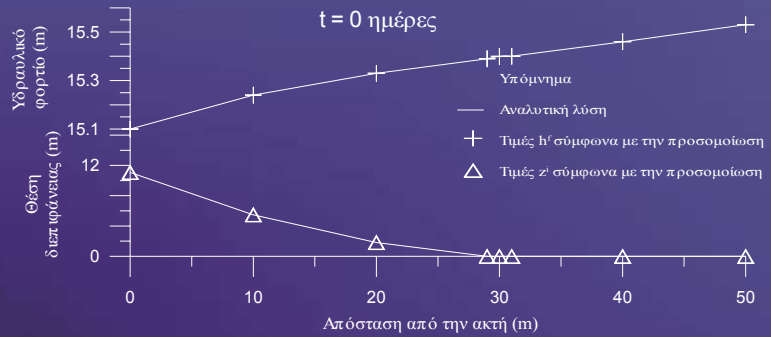
Επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση αναλυτικών λύσεων



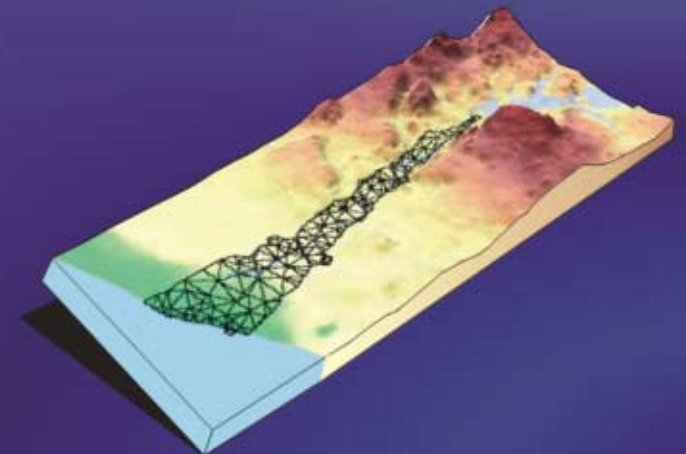
Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με την αναλυτική λύση Varricha και Nagaraja (1976) για την περίπτωση απότομης αύξησης της εισερχόμενης παροχής γλυκού νερού από 1 σε 5μ²/ημέρα/μονάδα μήκους υδροφορέα, τη χρονική στιγμή t = 3 ημέρες, σε έναν ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα



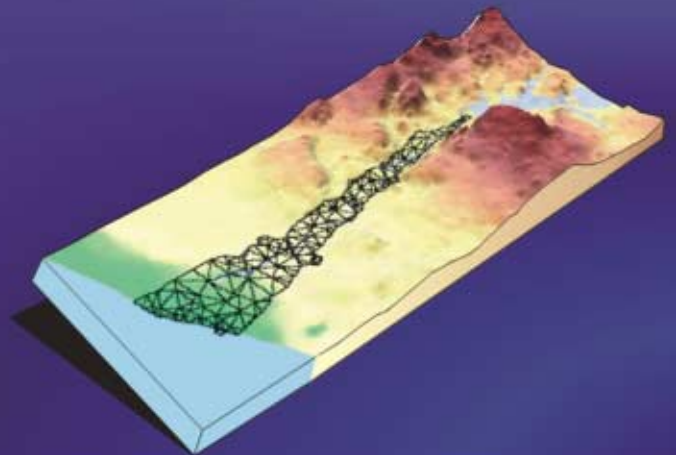
Επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση αναλυτικών λύσεων



Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με την αναλυτική λύση Varricha και Nagaraja (1976) για την περίπτωση απότομης μείωσης της εισερχόμενης παροχής γλυκού νερού από 5 σε $1\mu^2/\eta\mu\epsilon\rho\alpha/\mu\omicron\nu\alpha\delta\alpha$ μήκους υδροφορέα, τη χρονική στιγμή $t = 3$ ημέρες, σε έναν ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα

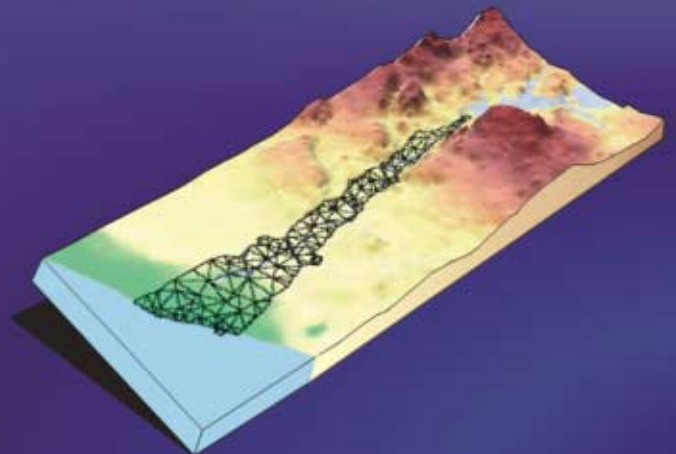


ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
HYDRA ΚΑΙ Η
ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ
ΤΟΥ ΜΕ ΤΑ
G.I.S.

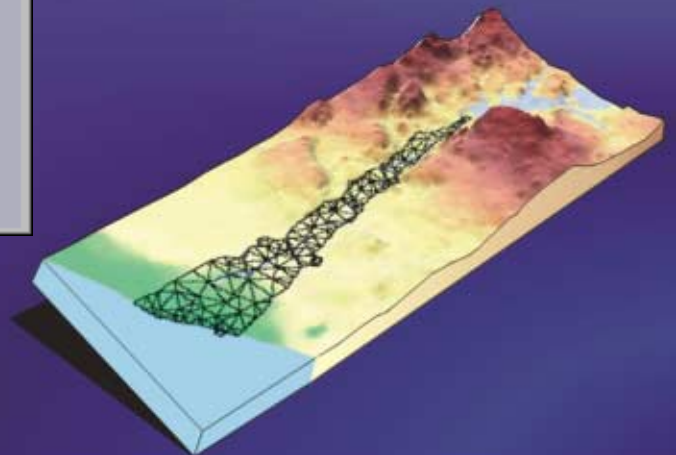
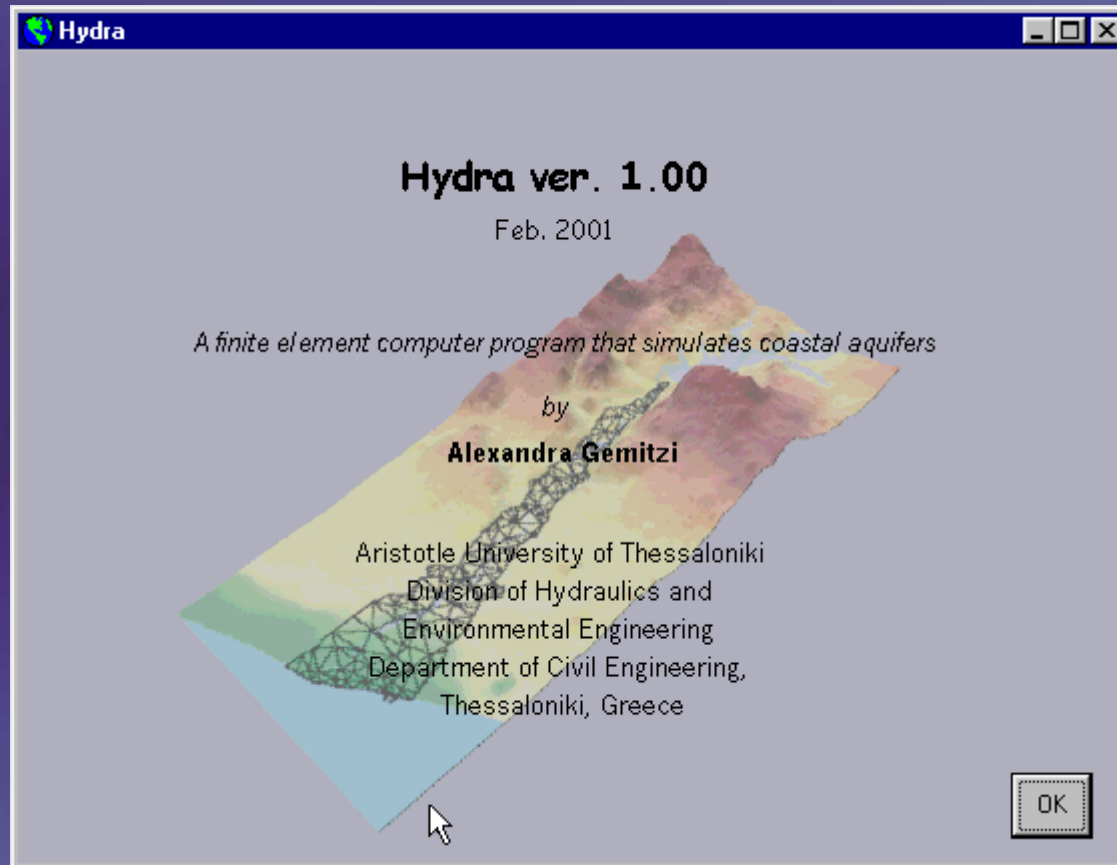


Το πρόγραμμα προσομοίωσης Hydra

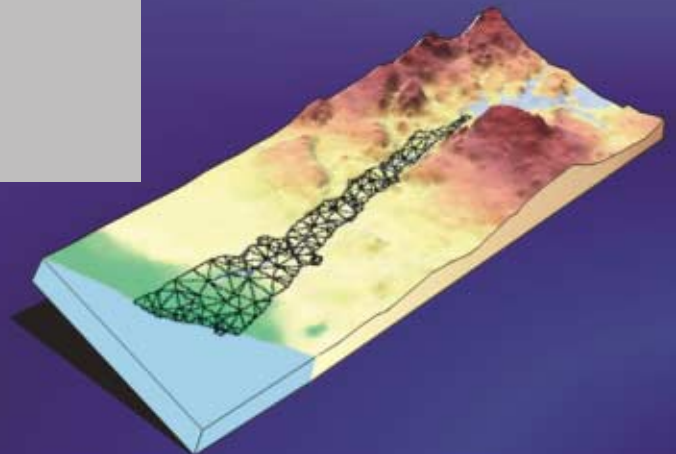
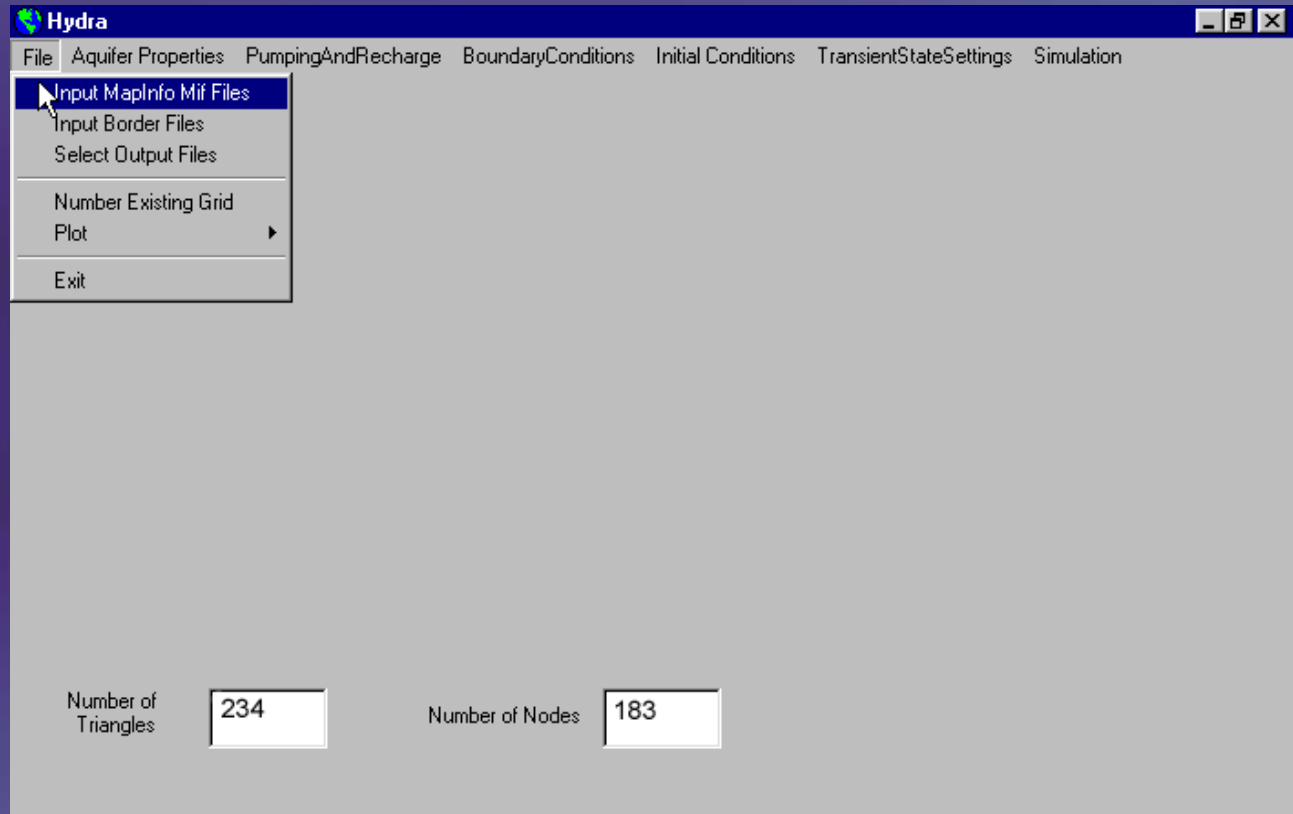
- Παραθυρικό περιβάλλον
- Γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic
- Αυτόνομη χρήση αν απαιτείται
- Διασύνδεση με τα δημοφιλέστερα προγράμματα G.I.S.



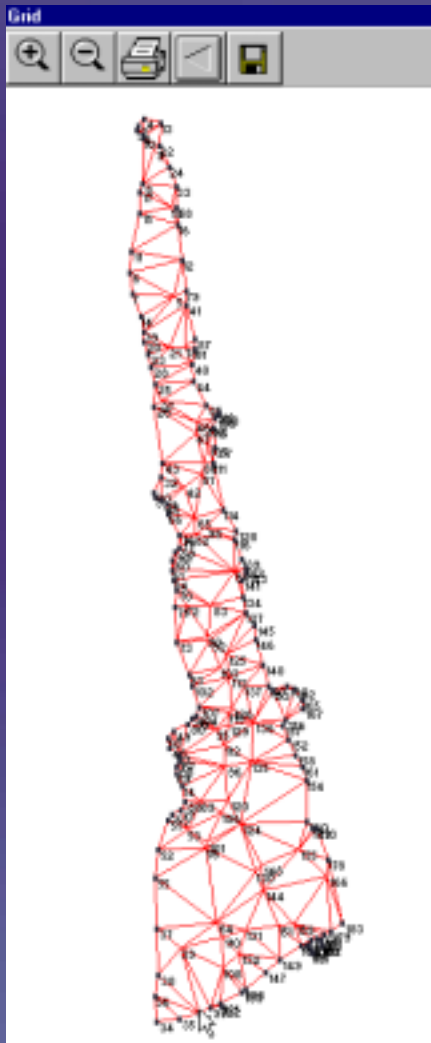
Φόρμα εισόδου στο πρόγραμμα προσομοίωσης Hydra



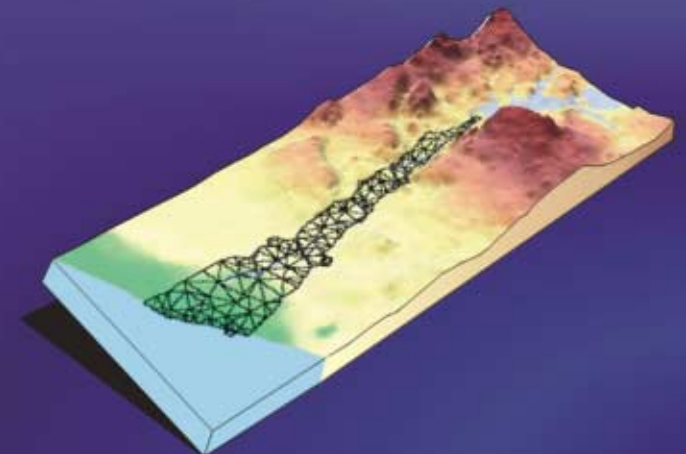
Κεντρική φόρμα προγράμματος προσομοίωσης Hydra



Φόρμα εκτύπωσης του προγράμματος Hydra



Αριθμημένος κάναβος
πεπερασμένων στοιχείων
στα οποία διακριτοποιήθηκε
ο υδροφόρας Γερμασόγειας
Κύπρου.



Φόρμα εισαγωγής των υδραυλικών και γεωμετρικών παραμέτρων του υδροφορέα

Aquifer Properties

Aquifer Type

Confined Unconfined

Aquifer Base

Flat Base Complex Base

Aquifer Base Elevation
(Above / below sea level)

Hydraulic Conductivity

Homogeneous Heterogeneous

Isotropic Anisotropic

Hydraulic Conductivity m / day

Hydraulic Conductivity/K m/day

Hydraulic Conductivity/Y m/day

Aquifer Top

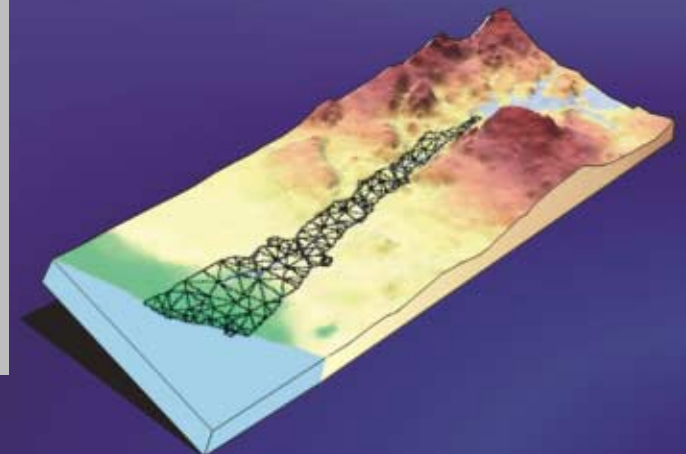
Flat Top Complex Top

Aquifer Top Elevation
(Above / below sea level)

Thickness

Datum

OK Cancel



Φόρμα εισαγωγής των εισροών και εκροών από τον υδροφόρα

Pumping and Recharge

File

Steady State

Natural Recharge

1 mm / day

Inflows / Outflows

25 m³ / day (discharge per unit width if equal)

Artificial Pumping and Recharge

Pumping Mode	Pumping Rate (m ³ /day)
46	-523
103	-980
137	-523
88	-980
96	-523
128	-980
86	-523
100	-523
135	-523
112	-523
120	-523
106	-523

Transient State

Natural Recharge

Time/Day	Rate (mm/day)
1	1
2	1.5
3	1.1
4	1.2
5	0.6
6	0.9
7	1.1
8	1.3
9	1.5
10	2.1

Inflows / Outflows

Time/Day	Inflows / Outflows (m ³ /day)
1	20
2	25
3	31
4	28
5	32
6	25
7	36
8	23
9	28
10	33

Artificial Pumping and Recharge

Time/Day	Pumping Mode	Pumping Rate (m ³ /day)
1	46	-523
1	103	-980
1	137	-523
1	88	-980
1	96	-523
1	128	-980
1	86	-523
1	100	-523
1	128	-523
1	112	-523
1	128	-523

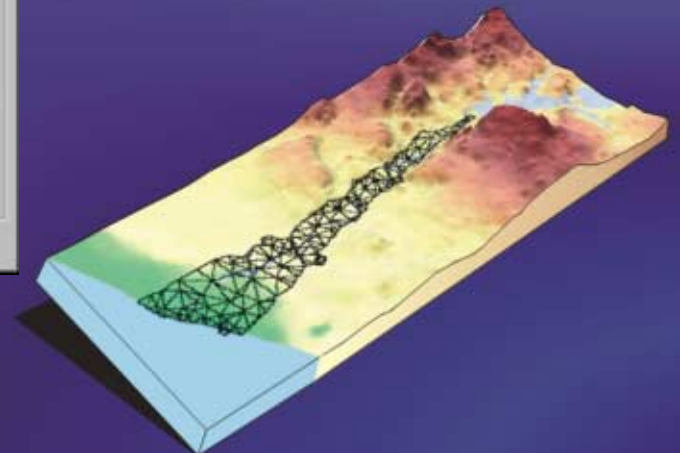
Use Steady State Natural Recharge Values for Transient Simulation

Use Steady State Inflow / Outflow Values for Transient Simulation

Use Steady State Pumping/Recharge Values for Transient Simulation

Select Number of Timesteps: 10

OK Cancel



Φόρμα εισαγωγής των οριακών συνθηκών του υδροφορέα

Boundary Conditions

File

- Open Steady State Boundary File
- Open Transient State Boundary File
- Save Steady State Boundary File
- Save Transient State Boundary File
- Exit

Add Flow

Delete Flow

Boundary Type	Boundary Node	Fresh Water Head	Salt Water Head
1	34	50.1	50
2	35	0	0
2	36	0	0
2	37	0	0
2	38	0	0
2	39	0	0
2	40	0	0
2	41	0	0
2	42	0	0
2	43	0	0
2	44	0	0
2	45	0	0
2	46	0	0
2	47	0	0
2	48	0	0
2	49	0	0
2	50	0	0
2	51	0	0
2	52	0	0
2	53	0	0
2	54	0	0
2	55	0	0
2	56	0	0
2	57	0	0
2	58	0	0
2	59	0	0
2	60	0	0
2	61	0	0
2	62	0	0
2	63	0	0
2	64	0	0
2	65	0	0
2	66	0	0
2	67	0	0
2	68	0	0
2	69	0	0
2	70	0	0
2	71	0	0
2	72	0	0
2	73	0	0
2	74	0	0
2	75	0	0
2	76	0	0
2	77	0	0
2	78	0	0
2	79	0	0
2	80	0	0
2	81	0	0
2	82	0	0
2	83	0	0
2	84	0	0
2	85	0	0
2	86	0	0
2	87	0	0
2	88	0	0
2	89	0	0
2	90	0	0
2	91	0	0
2	92	0	0
2	93	0	0
2	94	0	0
2	95	0	0
2	96	0	0
2	97	0	0
2	98	0	0
2	99	0	0
2	100	0	0
2	101	0	0
2	102	0	0

Boundary Type

- Fixed Head Boundary
- No Flow Boundary
- Fixed Flux Boundary

Steady State Settings

Show Steady State Fresh Water Boundary Conditions Map

Show Steady State Salt Water Boundary Conditions Map

Transient State Settings

Show Transient State Fresh Water Boundary Conditions Map

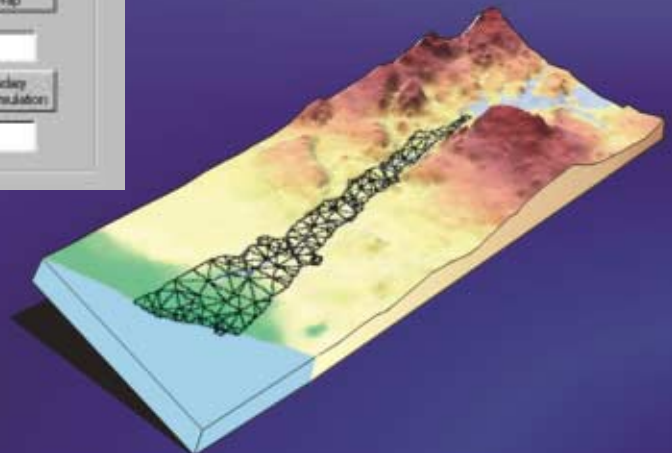
Show Transient State Salt Water Boundary Conditions Map

Select Time Step

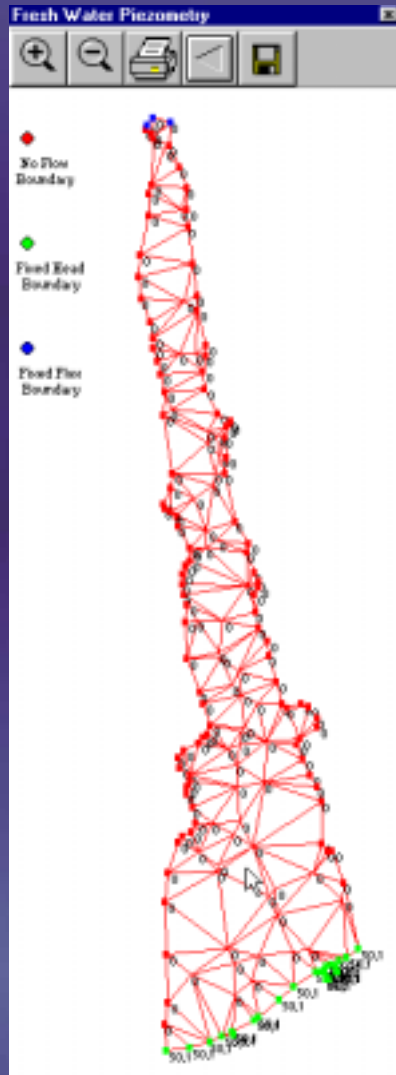
Use Steady State Boundary Conditions for Transient Simulation

Select Number of Time Steps

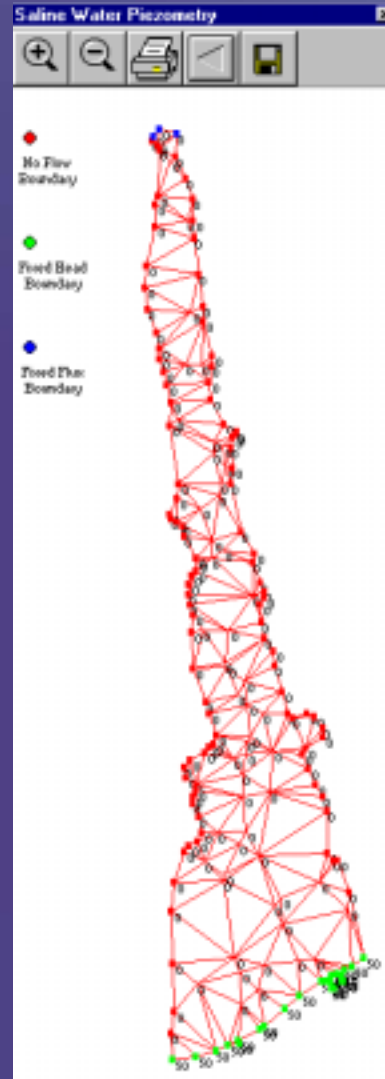
OK Cancel



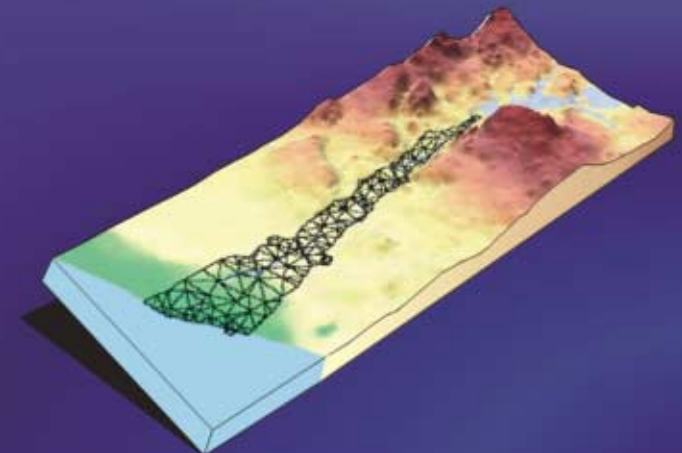
Φόρμα εκτύπωσης των οριακών συνθηκών του υδροφορέα



Οριακές συνθήκες γλυκού νερού



Οριακές συνθήκες θαλασσινού νερού



Φόρμα εισαγωγής των αρχικών συνθηκών

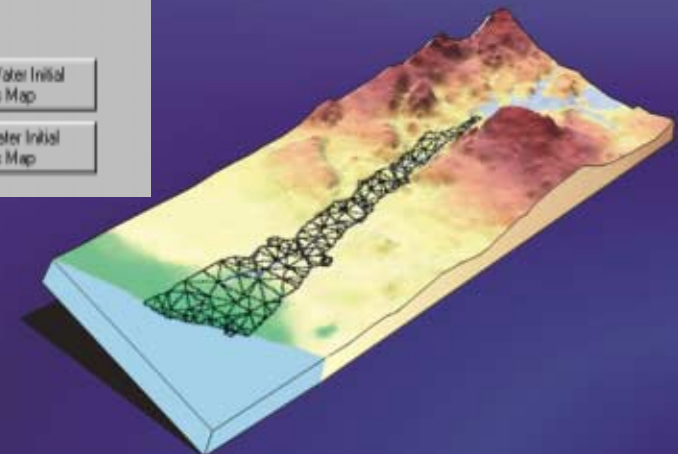
Initial Conditions

File

- Open Initial Conditions File
- Save Initial Conditions File
- Exit

Node Number	Fresh Water Head	Salt Water Head
1	77.235	49.99
2	78.149	49.99
3	77.913	49.99
4	78.541	49.99
5	64.395	49.99
6	65.769	49.99
7	64.949	49.99
8	71.93	49.99
9	75.364	49.99
10	76.653	49.99
11	66.525	49.99
12	66.019	49.99
13	77.071	49.99
14	63.89	49.99
15	69.03	49.99
16	68.146	49.99
17	71.113	49.99
18	69.741	49.99
19	63.149	49.99
20	62.024	49.99
21	62.413	49.99
22	75.968	49.99
23	62.366	49.99
24	73.154	49.99
25	61.177	49.99
26	60.332	49.99
27	60.490	49.99
28	61.866	49.99
29	57.749001	49.99

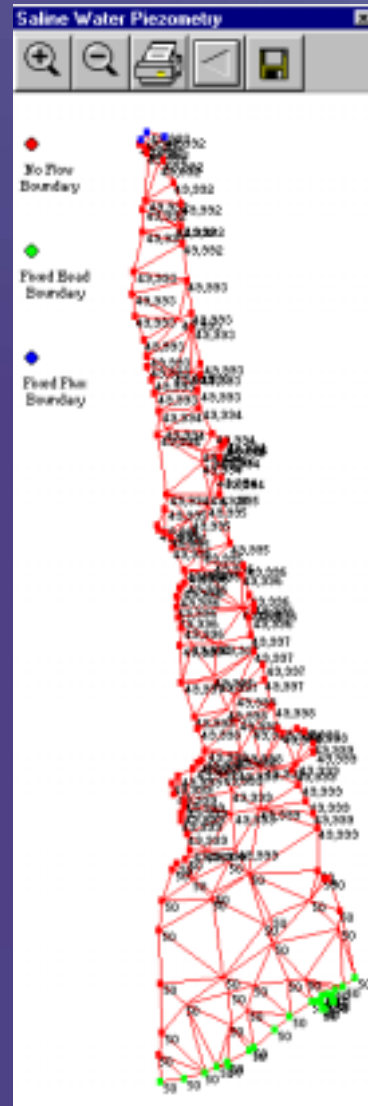
Buttons: AddRows, DeleteRows, Show Fresh Water Initial Conditions Map, Show Salt Water Initial Conditions Map, OK, Cancel



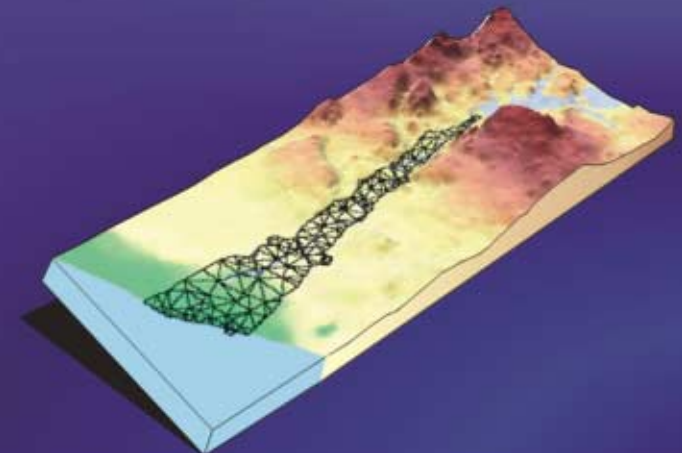
Φόρμα εκτύπωσης των αρχικών συνθηκών του υδροφορέα



Αρχικές συνθήκες γλυκού νερού



Αρχικές συνθήκες θαλασσινού νερού



Φόρμα καθορισμού των παραμέτρων του μη μόνιμου φαινομένου

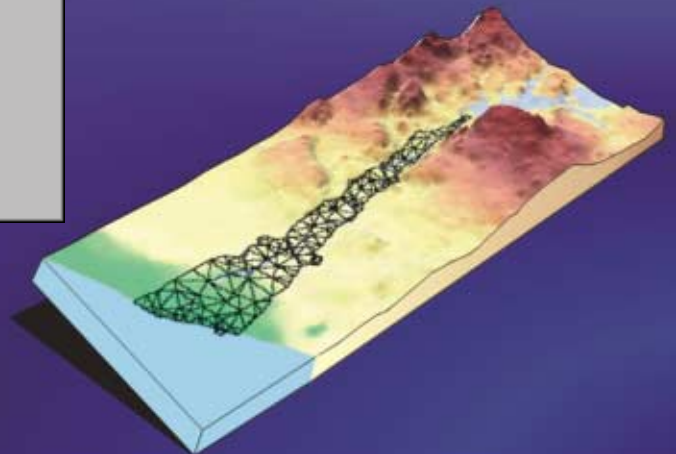
Transient State Settings

Porosity

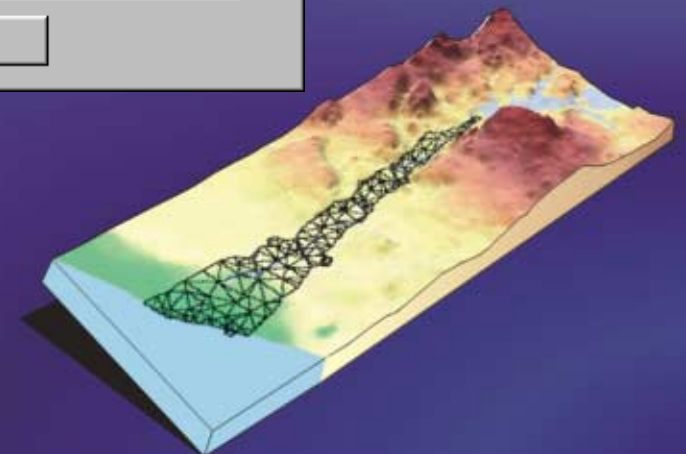
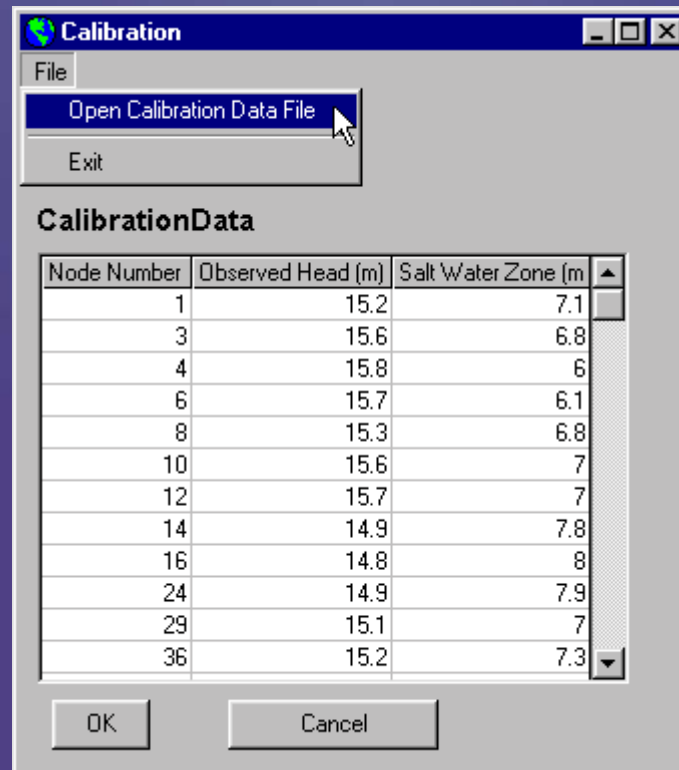
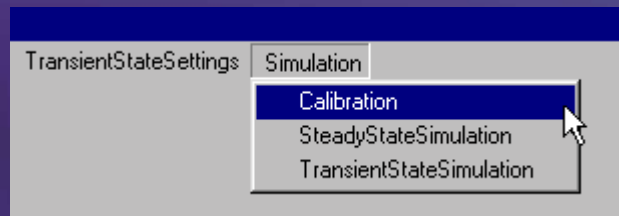
Specific Storage m⁻¹

Time Step days

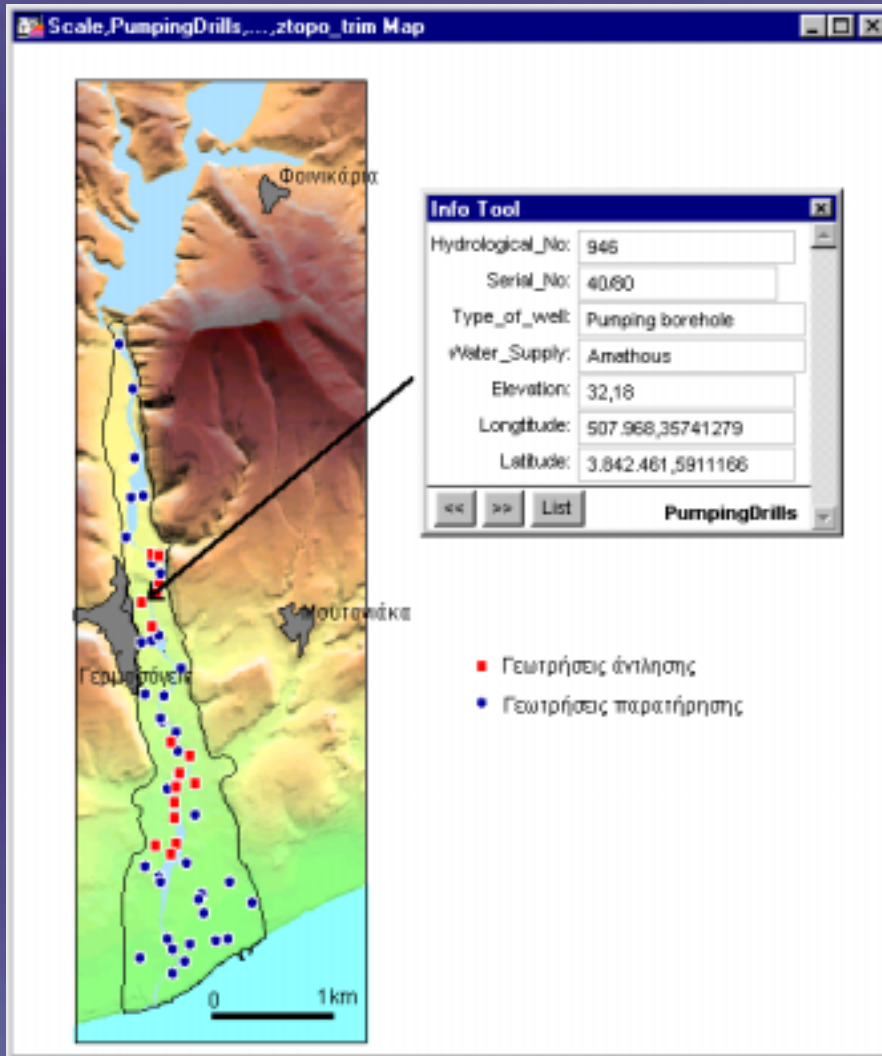
Number of Time Steps



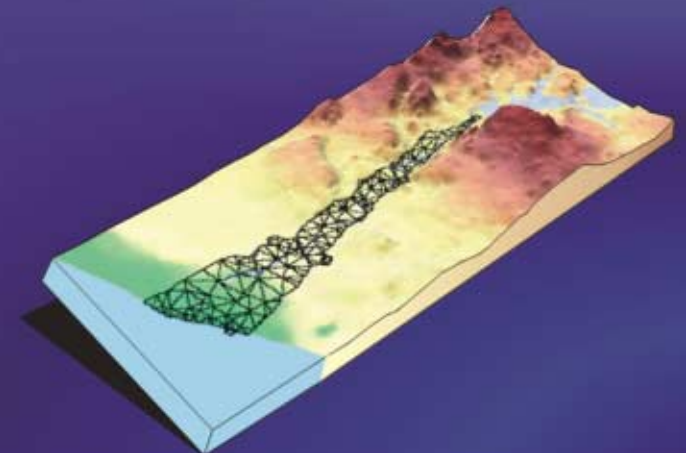
Ρύθμιση του μοντέλου



Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών



- Τα δεδομένα αποθηκεύονται ως επίπεδα πληροφοριών ώστε να γίνεται δυνατή η εκτέλεση πολύπλοκων αναλύσεων
- Τα χωρικά δεδομένα με γεωγραφική πληροφορία συνδέονται με ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό στο χάρτη
- Κατασκευή θεματικών χαρτών που να απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά σύμφωνα με το είδος της πληροφορίας που χρειάζεται να δειχθεί
- Μοναδική ευελιξία στην παρουσίαση δεδομένων με γεωγραφική πληροφορία και εντοπισμού καταλληλότητας συγκεκριμένων περιοχών για ορισμένες χρήσεις



Το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης

MS Access 97

Δημιουργία σχεσιακής βάσης δεδομένων
Εισαγωγή υδροδυναμικών και υδροχημικών δεδομένων.

Διασύνδεση με GIS
μέσω ODBC

MapInfo Professional ver. 6 + Vertical Mapper ver. 2.0

Εισαγωγή χαρτών, τοπογραφικών, γεωλογικών δεδομένων, οριοθέτηση περιοχής ενδιαφέροντος.
Δημιουργία κανάβου τριγώνων Delauny.
Δημιουργία αρχείων τροφοδοσίας για το πρόγραμμα προσομοίωσης.

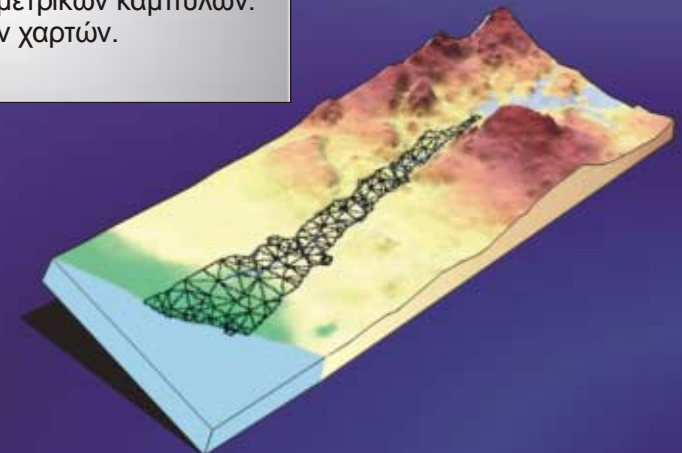
Διασύνδεση με Hydra
μέσω αρχείων MIF

Hydra ver. 1.0

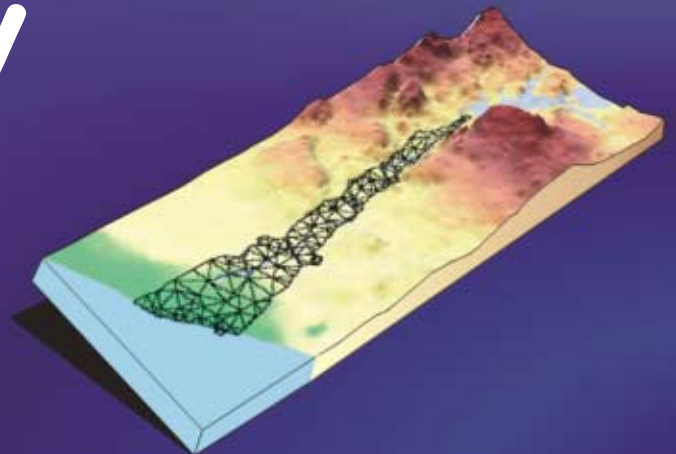
Ανάγνωση κανάβου τριγώνων.
Ανάγνωση δεδομένων εισόδου.
Προσομοίωση μόνιμου φαινομένου.
Προσομοίωση μη μόνιμου φαινομένου.
Εκτύπωση αποτελεσμάτων.
Δημιουργία αρχείων για επιστροφή στο πρόγραμμα MapInfo.

MapInfo Professional ver. 6 + Vertical Mapper ver. 2.0

Δημιουργία ισοπαραμετρικών καμπυλών.
Εκτύπωση θεματικών χαρτών.
Λήψη αποφάσεων.



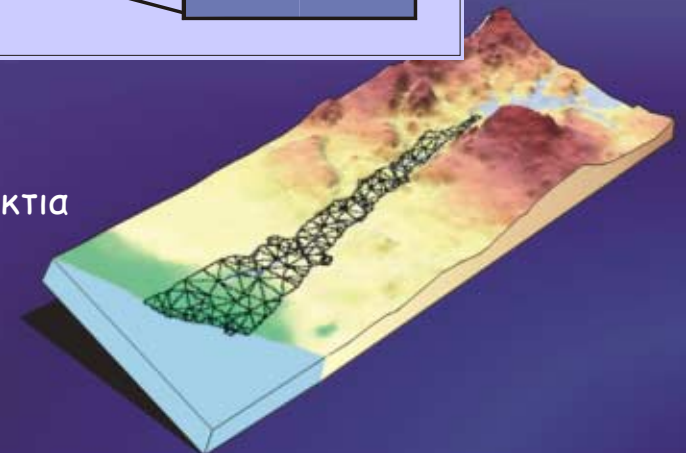
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ
ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ
ΚΥΠΡΟΥ



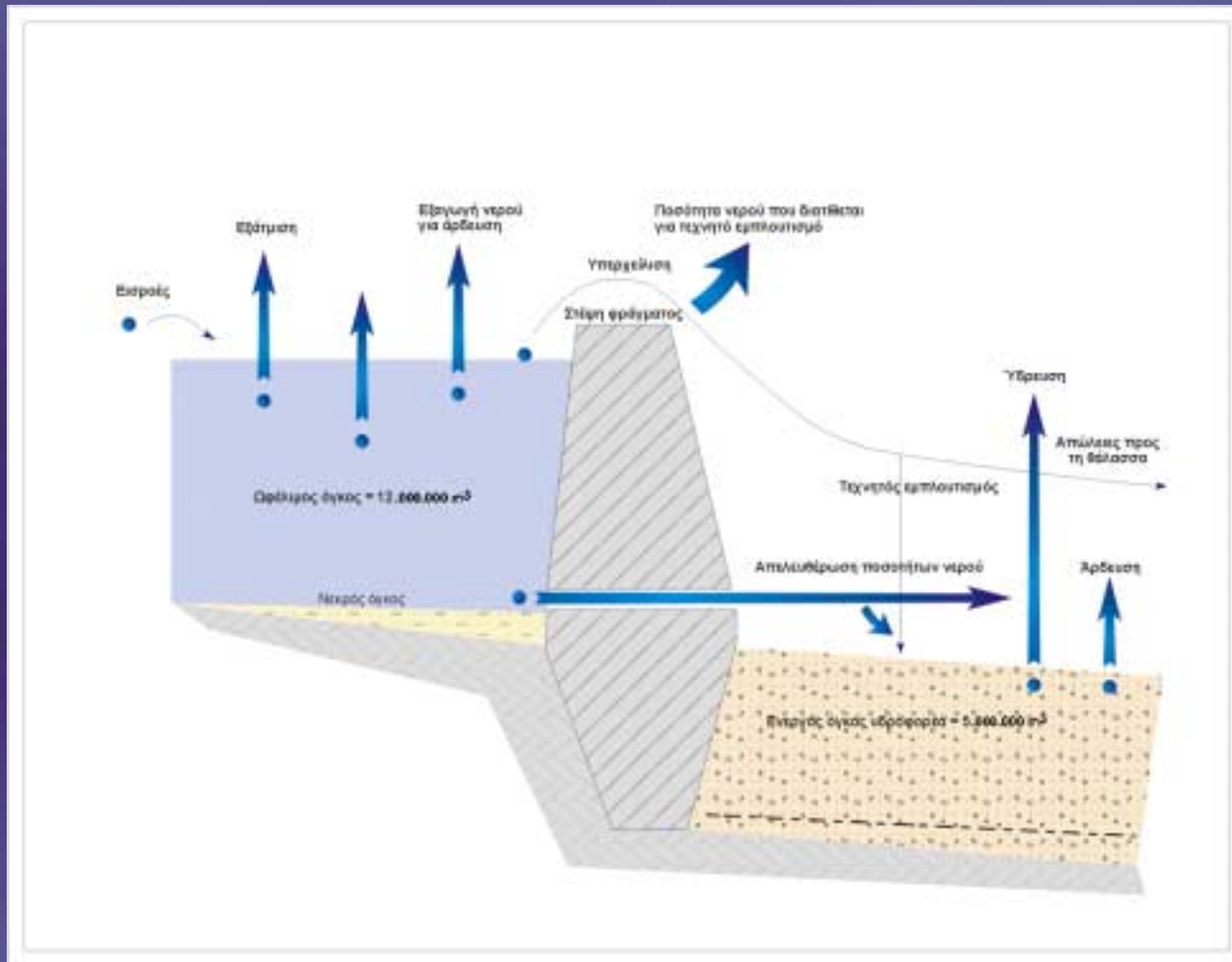
Ο υδροφόρας της Γερμασόγειας



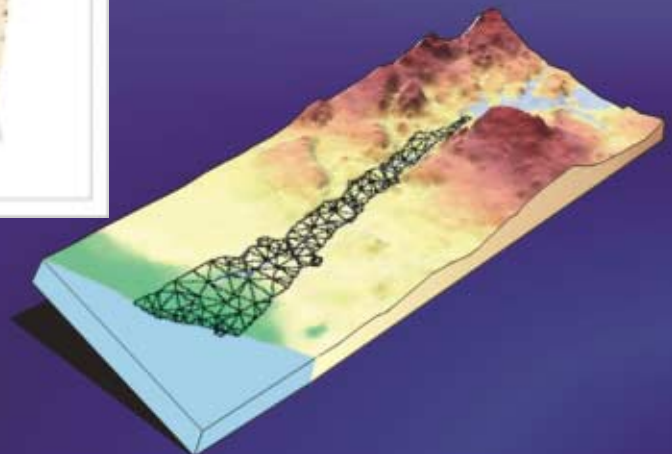
- Έκταση 3km²
- Μέγιστο μήκος 5.5 km
- Μέση ετήσια βροχόπτωση 640 mm
- 1968: Κατασκευή φράγματος
- 1982: Τεχνητός εμπλουτισμός
- Αλλουβιακές αποθέσεις
- Πάχος υδροφόρα στην παράκτια περιοχή: 50m



Η λειτουργία του συστήματος του υδροφorea














Από Θ. Κουσό στα πλαίσια της διατριβής ειδίκευσης «Μελέτη του υδροφorea της Γερμασόγειας με τη χρήση G.I.S.»

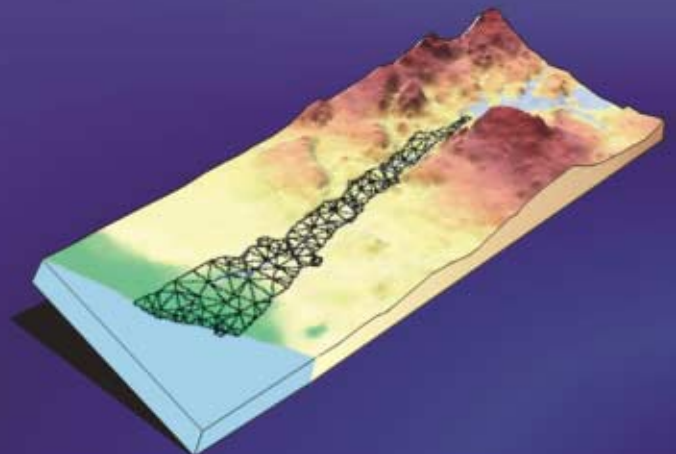


Γεωλογική - υδρογεωλογική τοποθέτηση



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	11 Αλλουβιακός αποθέσιος Πλειστόκαινο		13 Κρηπίδα- κρηπιδικός κάρσιος Μυρκαίνιο
	12 Χαροαίος αποθέσιος Πλειστόκαινο		14 Κρηπίδα κς κρηπιδικός αισθητικός Άνω κρηπιδικό - Ολιγόκαινο
	11 Αποθέσιος ρηχής θάλασσας Πλειστόκαινο		8 Ραβδολιθίτης σε αναίθαγγος κς υγκριστοκόκκινος κρηπιδικός αργιλλίονος Κουρασικό - Τριαβικό
	11-φ Αποθέσιος ρηχής θάλασσας κς αισθητικός χαλκιώδης Πλειστόκαινο		μ Ρ Λ Βασάλτιος - Λιθοβουγιτής
	15 Εισθητικός γέφυρος Μυρκαίνιο		σ ήγμα
			Όρια υδροαφάρια

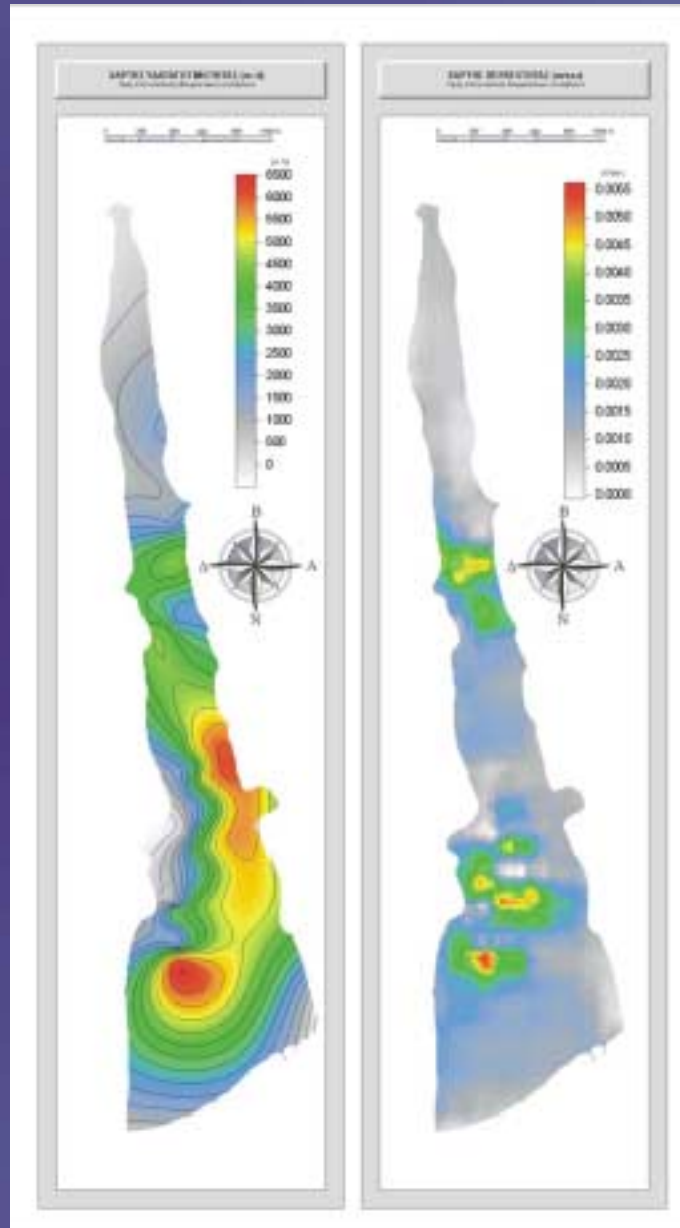


Υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα

Η υδραυλική αγωγιμότητα K μεταβάλλεται από $5 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ μέχρι $2.1 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$

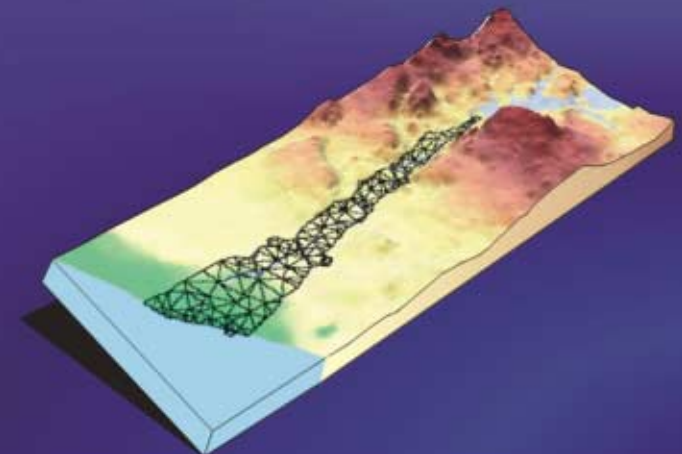
Η μεταφορικότητα T κυμαίνεται από $5.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ ως $6.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$

Η υδραυλική αγωγιμότητα K και η μεταφορικότητα T προέκυψαν από επεξεργασία στοιχείων 30 δοκιμαστικών αντλήσεων



Χάρτες μεταφορικότητας και υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα της Γερμασόγειας

Από Θ. Κουσό στα πλαίσια της διατριβής ειδίκευσης «Μελέτη του υδροφορέα της Γερμασόγειας με τη χρήση G.I.S.»



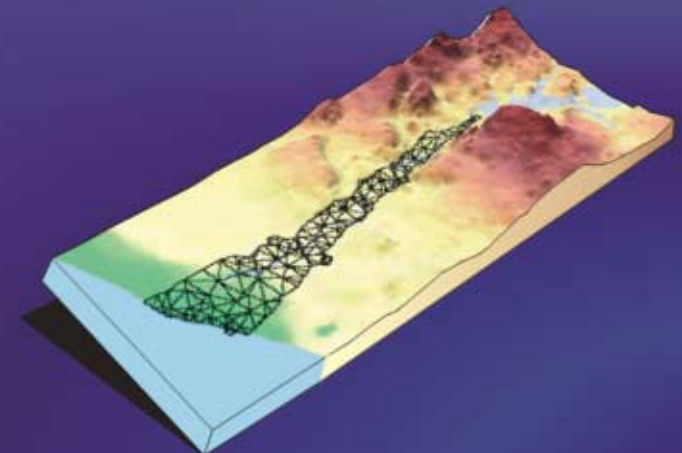
Αντλήσεις και εμπλουτισμοί



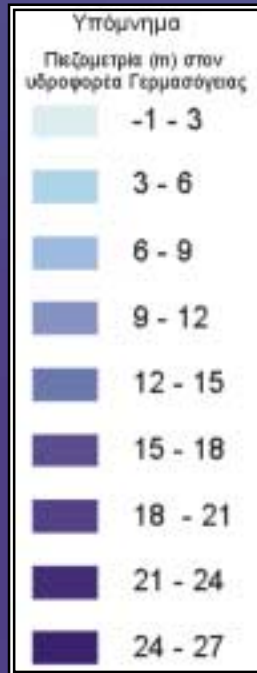
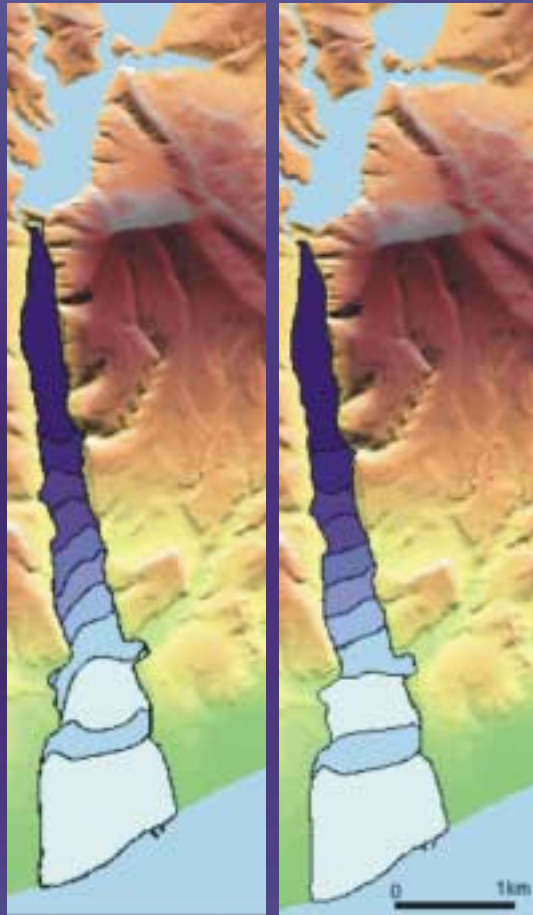
Υδατικό ισοζύγιο υδροφόρα Γερμασόγειας για το έτος 1995

Εισροές		Εκροές	
Τεχνητός Εμπλουτισμός	5,001	Άντληση	5,719
Απώλειες από φράγμα	2,100	Απώλειες από θάλασσα	0,230
Υπερχείλιση υδατοφράκτη	0,000		
Βροχόπτωση	0,400		
Βοθρολύματα	0,400		
Επιστροφή από άρδευση	0,050		
Θάλασσα	0,050		
Σύνολο	8,001	Σύνολο	5,949

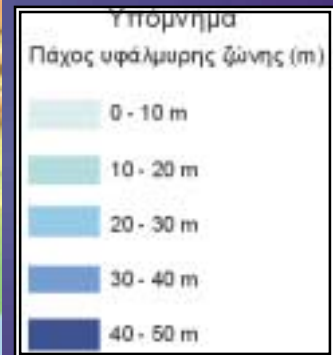
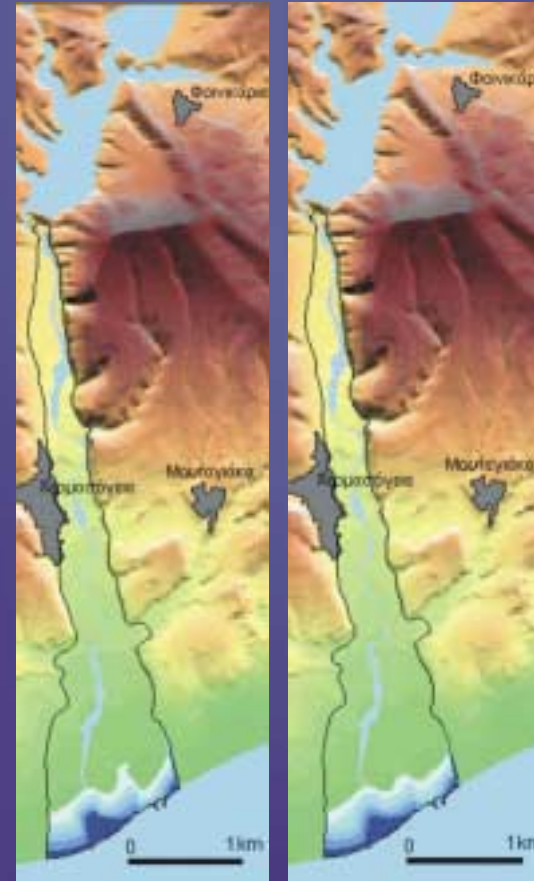
Από Θ. Κουτού στα πλαίσια της διατριβής ειδίκευσης «Μελέτη του υδροφόρα της Γερμασόγειας με τη χρήση G.I.S.»



Ρύθμιση του μοντέλου

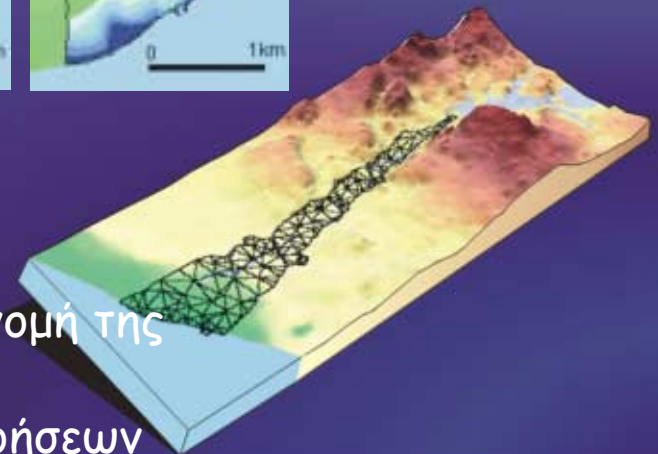


Πιεζομετρία σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση για τον Απρίλιο του 1992

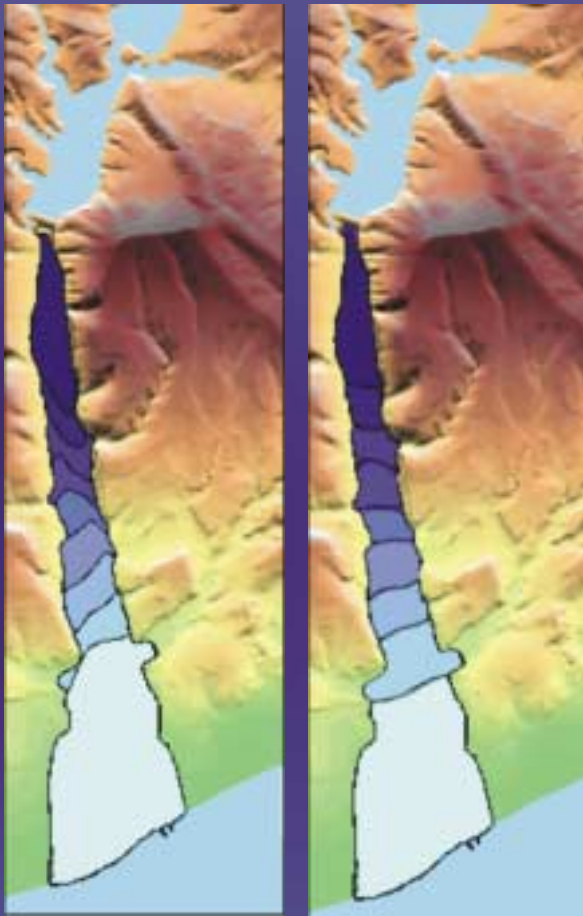


Πάχη υφάλμυρης ζώνης σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση για τον Απρίλιο του 1992

Για τη ρύθμιση του μοντέλου έγινε συστηματική ανακατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας και της κατεισδυσσης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μοντέλου - επί τόπου μετρήσεων



Ρύθμιση του μοντέλου

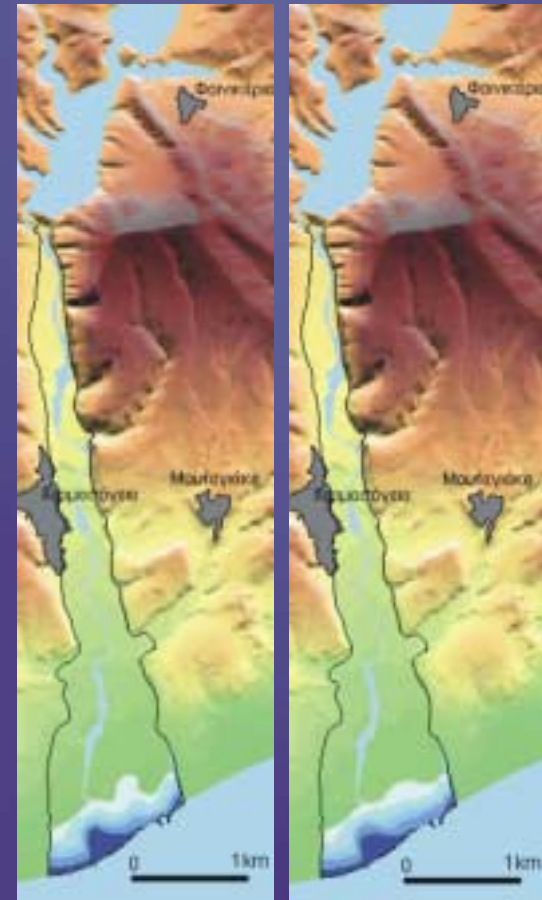


Υπόμνημα

Πιεζομετρία (m) στον υδροφόρο Γερμασόγους

Lightest Blue	-1 - 3
Light Blue	3 - 6
Medium Light Blue	6 - 9
Medium Blue	9 - 12
Dark Blue	12 - 15
Very Dark Blue	15 - 18
Dark Purple	18 - 21
Very Dark Purple	21 - 24
Black	24 - 27

Πιεζομετρία σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση για τον Σεπτέμβριο του 1992

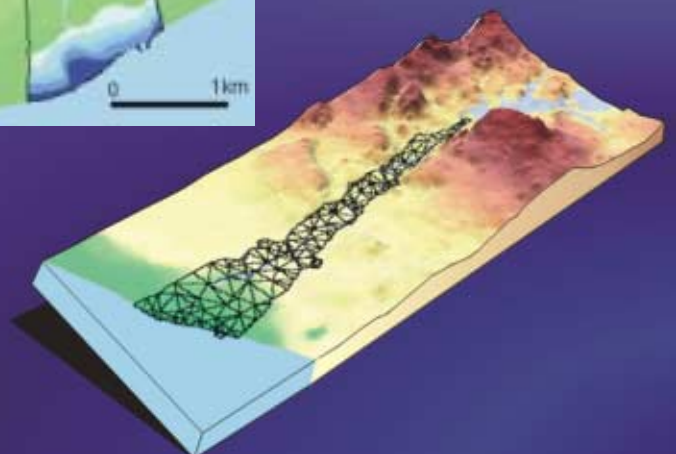


Υπόμνημα

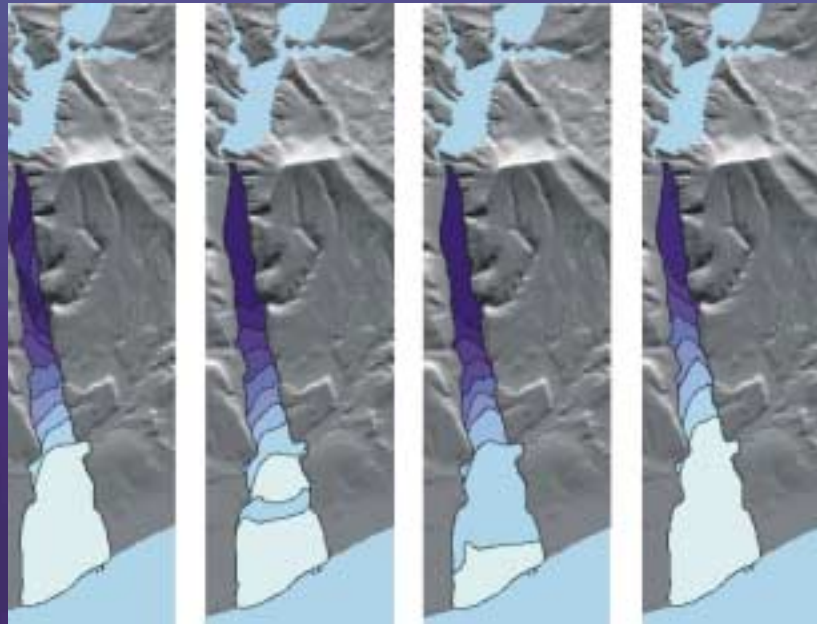
Πάχος υφάλμυρης ζώνης (m)

Lightest Green	0 - 10 m
Light Green	10 - 20 m
Medium Green	20 - 30 m
Dark Green	30 - 40 m
Blue-Green	40 - 50 m

Πάχη υφάλμυρης ζώνης σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση για τον Σεπτέμβριο του 1992

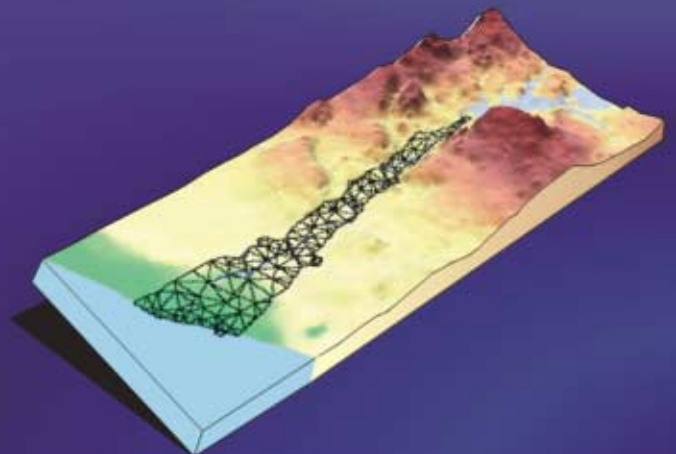
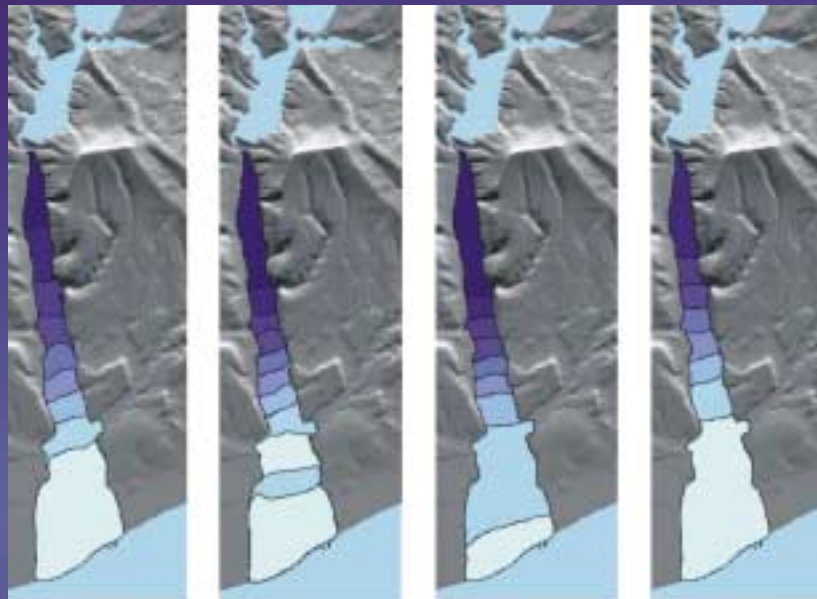


Εφαρμογή και έλεγχος του μοντέλου

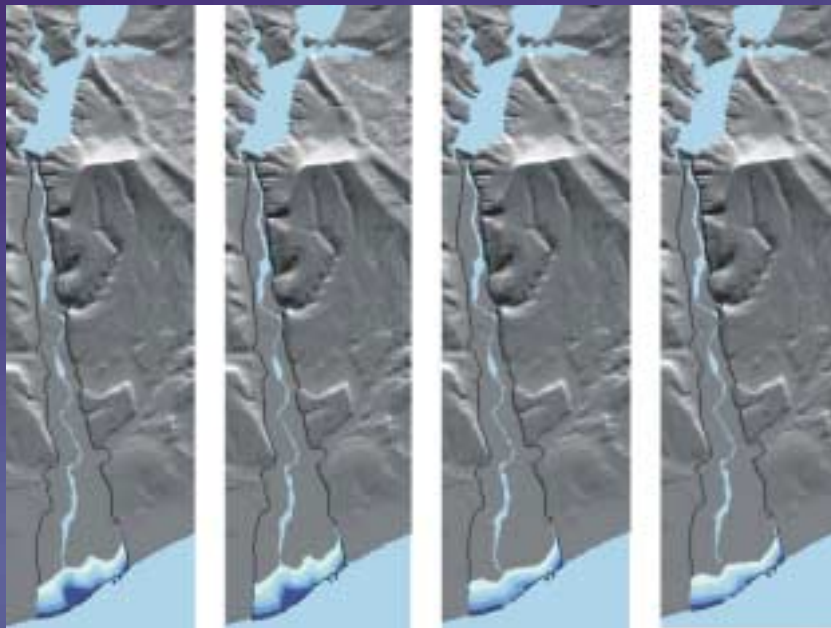
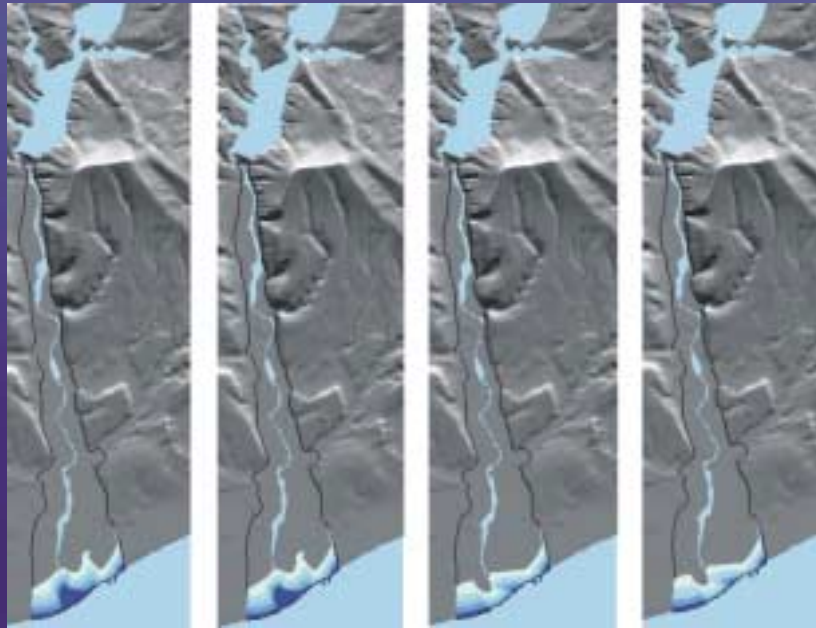


Υπόμνημα
Περίμετρο (m) στον υδροφόρο Γεμισόλοχος
-1 - 3
3 - 6
6 - 9
9 - 12
12 - 15
15 - 18
18 - 21
21 - 24
24 - 27

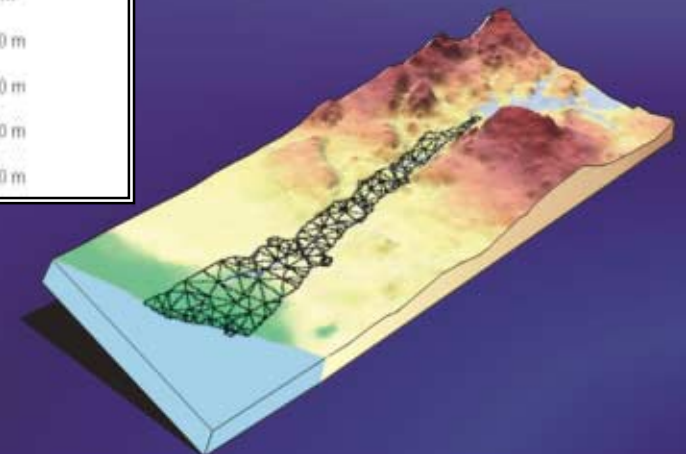
Πιεζομετρία σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση του μη μόνιμου φαινομένου κατά τον Αρπίλιο των ετών 1991, 1992, 1993 και 1994



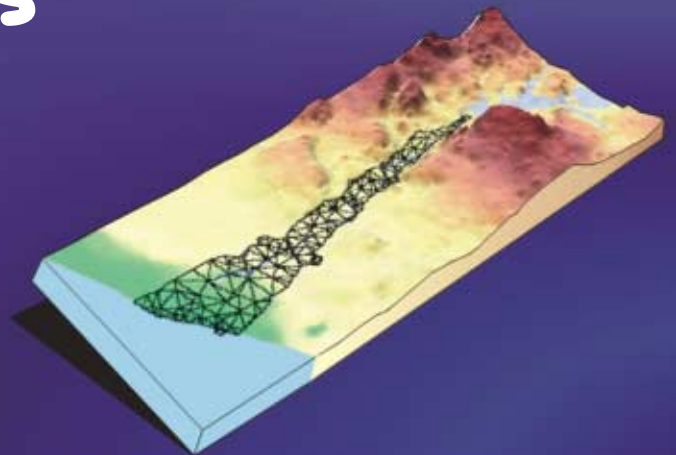
Εφαρμογή και έλεγχος του μοντέλου



Πάχη υφάλμυρης ζώνης σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα και σύμφωνα με την προσομοίωση του μη μόνιμου φαινομένου κατά τον Αρπύλιο των ετών 1991, 1992, 1993 και 1994



Εφαρμογή του μαθηματικού
μοντέλου για πρόγνωση της
συμπεριφοράς του υδροφορέα
της Γερμασόγειας σε κάποιο
υποθετικό σενάριο
διαχείρισης



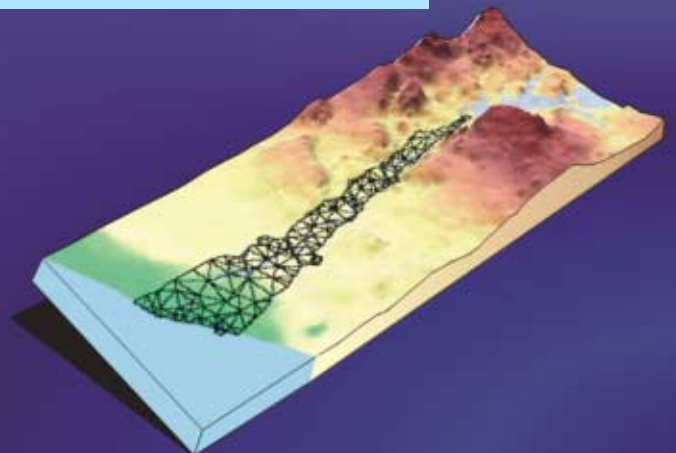
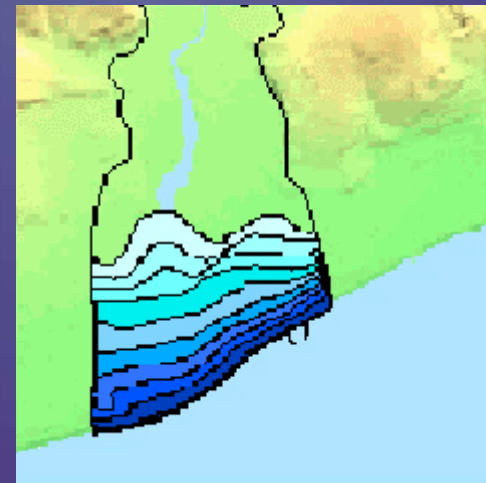


Γεωτρήσεις άντλησης
και εμπλουτισμού



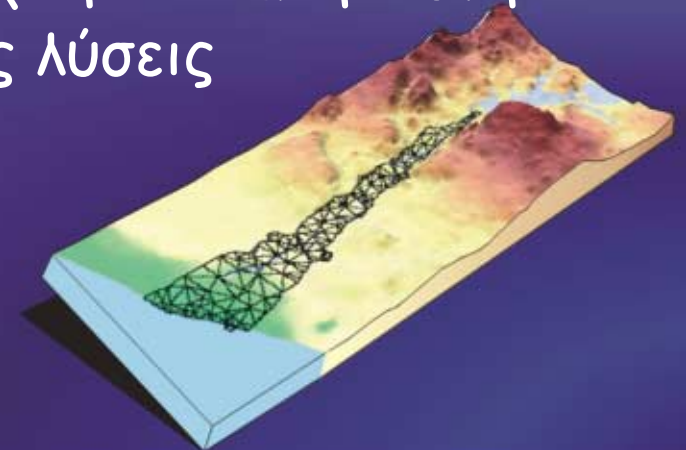
Πάχη υφάλμυρης ζώνης

Επτά γεωτρήσεις άντλησης
(κόκκινο χρώμα) αντλούν από
τον υδροφόρα $3000 \text{ m}^3 / \text{day}$.
Η προσομοίωση έγινε για δύο
χρόνια με χρονικό βήμα δέκα
ημερών



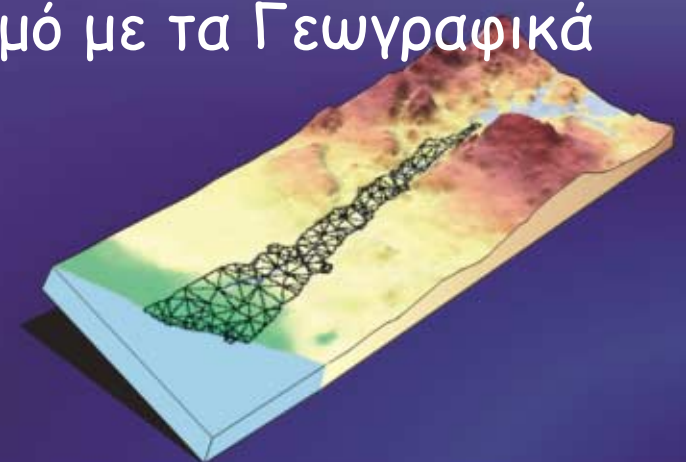
Συμπεράσματα

- Το πρωτότυπο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και την προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας, είναι δυνατό να προσομοιώσει τις μόνιμες και μη μόνιμες διφασικές ροές στους παράκτιους υδροφορείς
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή της για την περίπτωση των διφασικών ροών
- Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επαληθεύτηκε σύμφωνα με τις υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις



Συμπεράσματα

- Οι απλοποιητικές παραδοχές που υιοθετήθηκαν στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, όπως η χρήση της ίδιας τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας και ειδικής αποθηκευτικότητας και για τις δύο φάσεις υγρού, καθώς και η χρήση του μέσου όρου των κορεσμένων παχών της κάθε φάσης υγρού για κάθε πεπερασμένο στοιχείο, προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αναλυτικές λύσεις
- Το πρόγραμμα προσομοίωσης που κατασκευάστηκε αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομο ή σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών



Συμπεράσματα

- Η συνδυασμένη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και του προγράμματος Hydra συνιστά το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων, το οποίο καθιστά εμφανή τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι σύγχρονες τεχνολογίες στην προσομοίωση και διαχείριση των παράκτιων συστημάτων

