

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ - ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Γιαννουλόπουλος Π.

Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα., panosg@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις πρώτες περιοχές του Ελληνικού χώρου που έγιναν ευρύτερα γνωστές για το φαινόμενο της υφαλμύρωσης των υπόγειων νερών της, από το τέλος της δεκαετίας του 1950, είναι το Αργολικό πεδίο. Δεδομένα ποιότητας των υπόγειων νερών (Γιαννουλόπουλος κ.α 2002) δείχνουν ότι η μεταβολή της αλατότητας στον υδροφόρο παρουσιάζει μια σχετικά ήπια μορφή. Οι συνήθεις συγκεντρώσεις των χλωριόντων κυμαίνονται μεταξύ 15 και 2000 mg/l, ενώ τα συσπαστικά διαλυμένα στερεά (TDS) παρουσιάζουν εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 250 και 3000mg/l.

Το μεγάλο εύρος της ζώνης μεταβατικής ζώνης και οι σχετικά μικρές τιμές της αλατότητας στα υπόγεια νερά επιτρέπουν (Sun, 1996) την εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου μεταφοράς διασποράς για την προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρωσης και της μεταφοράς των χλωριόντων στα υπόγεια νερά του Αργολικού πεδίου.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε υπέστη επιτυχή ρύθμιση χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της περιόδου 1264-69 ενώ επαληθεύτηκε με δεδομένα της περιόδου 1969-75 καθώς και με χρήση πρόσφατων δεδομένων. Τέλος εξετάστηκε ένα θεωρητικό σενάριο παύσης των αντλήσεων και υπολογίστηκε ότι για την απομάκρυνση των χλωριόντων από τον υδροφόρο σχηματισμό θα απαιτηθεί τουλάχιστον μια εικοσαετία. Στα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας σχολιάζονται και διάφορα εννοιολογικά και αριθμητικά σφάλματα και αδυναμίες που υπεισέρχονται κατά την ανάπτυξη και εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η εξέλιξη του φαινομένου – χαρακτηριστικά του μετώπου υφαλμύρωσης

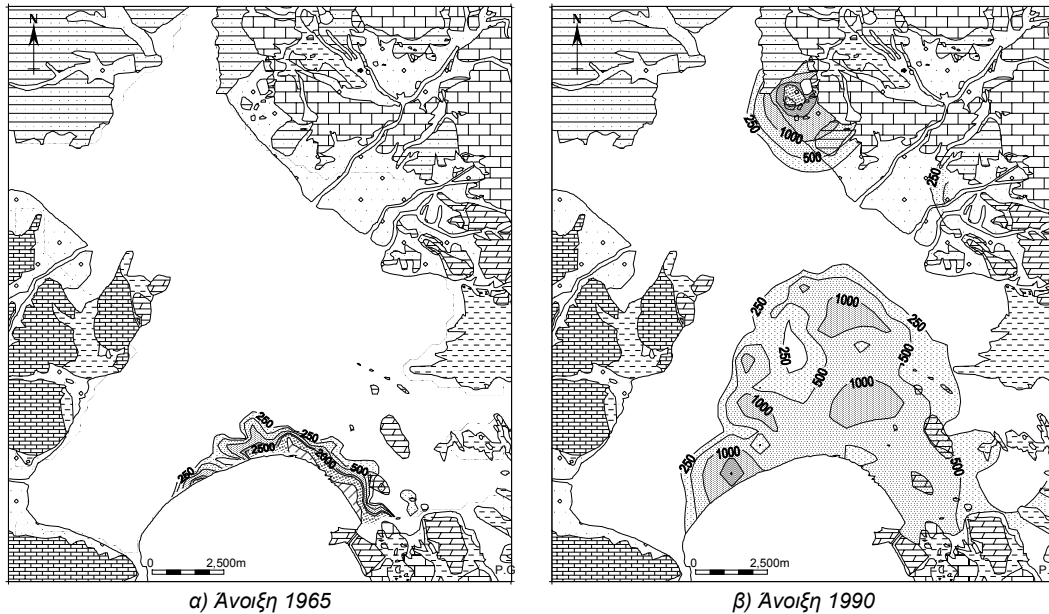
Η υφαλμύρωση του Αργολικού πεδίου άρχισε να γίνεται αισθητή κατά το τέλος της δεκαετίας του 1950 ως συνέπεια της αλματώδους ανάπτυξης των αρδευόμενων καλλιεργειών και ιδιαίτερα των εσπεριδοειδών. Εντονότερη ήταν στις ανατολικές περιοχές της Αργολικής πεδιάδας, στα όρια των οικισμών Ν. Τίρυνθας και Άριας καθώς και ανατολικότερα στην αλλουβιακή περιοχή της Ασίνης – Δρέπανου – Τολού.

Το φαινόμενο αυτό, προσέκλυσε το ενδιαφέρον διαφόρων υπηρεσιών και επιστημόνων από το τέλος της δεκαετίας του 1950. Μετά από προκαταρκτικές εργασίες, τον Απρίλιο του 1962 συστάθηκε ομάδα εργασίας αποτελούμενη από εκπροσώπους των ενδιαφερόμενων Υπουργείων (Υ.Σ., Υ.Δ.Ε, Υ.Γ, και ΙΓΕΥ) καθώς και από εμπειρογνώμονες του FAO και της TAHAL Ltd η οποία κατάρτισε ένα γενικό πρόγραμμα ερευνητικών εργασιών και μελετών για τον προσδιορισμό των υδάτινων πόρων της λεκάνης του Αργολικού Πεδίου και την αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης των υδροφόρων οριζώντων. Το σχετικό πρόγραμμα καταρτίστηκε τα έτη 1962-63 οπότε και άρχισε άμεσα η εφαρμογή του. Μεταξύ άλλων περιελάμβανε την ανόρυξη 59 πολυεπίπεδων πιεζομέτρων καθώς και πυκνό πρόγραμμα παρακολούθησης της στάθμης και της συγκέντρωσης των χλωριόντων τόσο στα πιεζόμετρα αυτά όσο και σε 290 περίπου φρέατα και γεωτρήσεις.

Η εξέλιξη του φαινομένου καταγράφηκε από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, με μέριμνα του ΥΠ.ΓΕ και ιδιαίτερα της ΥΕΒ σε δίκτυο ελέγχου φρεάτων και γεωτρήσεων ενώ στη συνέχεια από άλλους φορείς όπως το ΙΓΜΕ και ερευνητικά προγράμματα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

1962

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών της περιοχής και η εξέλιξη του φαινομένου αναλύονται διεξοδικά σε άλλες σχετικές εργασίες (Γιαννουλόπουλος, 2000, 2002). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, το μέτωπο της υπαλμύρωσης έκανε την εμφάνισή του αρχικά στο νοτιοανατολικό τμήμα του Αργολικού πεδίου και σταδιακά κάλυψε ένα σημαντικό τμήμα των αλλουβιακών υδροφόρων σχηματισμών.



Σχήμα 1. Ισοχλώριες καμπύλες (mg/l) που παρουσιάζουν τη χωρική εξέλιξη της υπαλμύρωσης των υπ. νερών του Αργολικού πεδίου

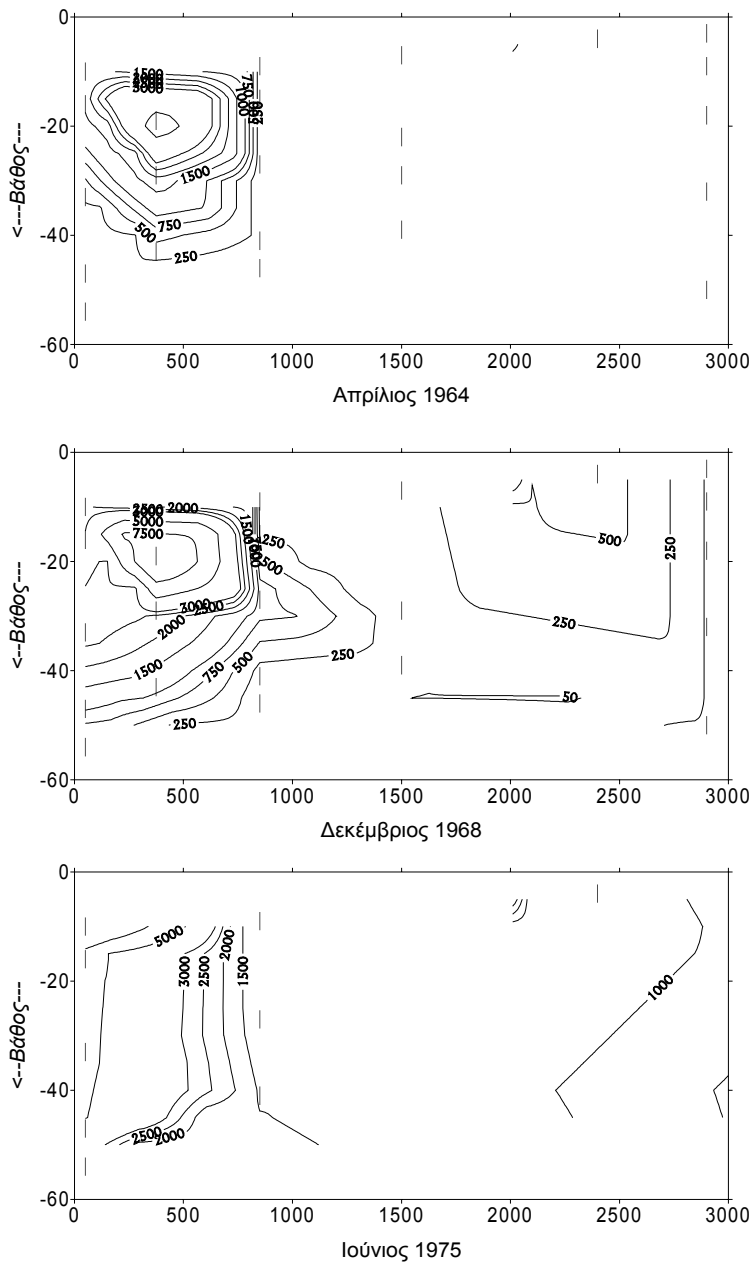
Η εκμετάλλευση παρακείμενων καρστικών υδροφορέων είχε ως αποτέλεσμα, στο τέλος της δεκαετίας του 1980, την εμφάνιση ενός δεύτερου μετώπου στο βορειοανατολικό του τμήμα, στους καρστικούς υδροφόρους του Αραχναίου όρους.

Από το Σχήμα 1 προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων σε ότι αφορά στην οριζόντια κατανομή τους, παρουσίαζαν αρχικά υψηλές τιμές κοντά στην παράκτια ζώνη ενώ στη συνέχεια οι συνήθεις τιμές δεν ξεπερνούσαν τα 1500mg/l.

Ανάλογη εικόνα ισχύει και για την κατακόρυφη κατανομή των χλωριόντων. Στο Σχήμα 2, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές υδροχημικές τομές κατά μήκος διεύθυνσης Β-Ν.

Το παραπάνω σχήμα δείχνει ότι η εξέλιξη του φαινομένου άρχισε στους ανώτερους υδροστρωματογραφικούς ορίζοντες της παράκτιας ζώνης, που υφίσταντο και την εντονότερη εκμετάλλευση την περίοδο εκείνη, στην παράκτια ζώνη, η οποία γινόταν αρχικά με αβαθή φρέατα και στη συνέχεια με γεωτρήσεις μικρού βάθους (30-40m) που ανορούσσονταν ως επί το πλείστον εντός των φρεάτων. Η εικόνα αυτή δείχνει επίσης ότι η διείσδυση του μετώπου της υπαλμύρωσης ακολούθησε αρχικά αδρομερέστερους ορίζοντες που αναπτύσσονταν στα αντίστοιχα βάθη ενώ στη συνέχεια κατανεμήθηκε σχετικά ομοιόμορφα σε βαθύτερους ορίζοντες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αλατότητα του υπόγειου νερού δεν παρουσιάζει αύξηση με το βάθος, όπως θα αναμενόταν σύμφωνα με το πρότυπο "Ghyben-Herzberg", αλλά αντίθετα σε βαθύτερους ορίζοντες απαντούσε αρχικά καλής ποιότητας υπόγειο νερό. Επίσης, από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μορφή το μέτωπο της υπαλμύρωσης δεν χαρακτηρίζεται από μια απότομη μετάβαση γλυκού – αλμυρού νερού ("sharp front") αλλά από μια ευρεία ζώνη υπάλμυρου νερού ("dispersion zone"), χαμηλών σχετικά συγκεντρώσεων, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μεταβατική ζώνη διασποράς – διάχυσης και μίξης γλυκού και υπάλμυρου νερού



Σχήμα 2. Υδροχημικές τομές κατανομής χλωριόντων (mg/l) κατά μήκος της διεύθυνσης Β-Ν [| σημείο δειγματοληψίας].

1.2 Μεθοδολογία προσομοίωσης – το μαθηματικό μοντέλο

Τα μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά διακρίνονται σε τέσσερις διαφορετικές ενότητες (Sun, 1996),

- στα μοντέλα μεταφοράς - διασποράς (*advection - dispersion models*),
- σε συνδυασμένα μοντέλα ροής και μεταφοράς ρύπων (*coupled groundwater flow and transport models*),
- σε μοντέλα αποκλειστικής μεταφοράς (*pure advection models*) και
- σε ενιαία - μονοκυτταρικά μοντέλα (*lumped parameter models*).

1964

Η επίλυση του προβλήματος "μεταφοράς - διασποράς" διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά (σε κορεσμένη ζώνη) απαιτεί την επίλυση του παρακάτω συστήματος των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων:

- Εξίσωση της υδροδυναμικής διασποράς

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} \left[D \rho \text{grad} \left(\frac{C}{\rho} \right) \right] - \text{div}(CV) + I \quad (1)$$

- Εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (2)$$

- Εξισώσεις κίνησης

$$V = - \frac{k}{\mu n} (\text{grad} p + \rho g \cdot \text{grad} z) \quad (3)$$

- Εξισώσεις κατάστασης

$$\rho = \rho(C, p), \quad \mu = \mu(C, p) \quad (4)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση, p η πίεση, ρ και μ η πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού, D ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς, V_1, V_2, V_3 οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας, k_{ij} οι συνιστώσες του ταυστή της ενδογενούς περατότητας, n το ενεργό πορώδες και I ο όρος πηγής - καταβόθρας.

Οι παραπάνω εξισώσεις περιέχουν επτά αγνώστους, $C, p, \rho, \mu, V_1, V_2$ και V_3 , οι οποίοι προσδιορίζονται με τη βοήθεια κατάλληλων οριακών και αρχικών συνθηκών. Το σύστημα των εξισώσεων αυτών αποτελεί το "μοντέλο της υδροδυναμικής διασποράς" ή το "γενικευμένο μοντέλο της μεταφοράς - διασποράς" διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά. Στο μοντέλο αυτό, το πορώδες μέσο είναι ανομοιογενές, ανισότροπο και πολύπλοκης γεωμετρικής δομής. Επιπλέον το ρευστό είναι ομοιογενές ή ανομοιογενές ενώ η συγκέντρωσή του μεταβάλλεται ανάλογα με την πυκνότητα και το ιξώδες της διαλυμένης ουσίας.

Στο σημείο αυτό γίνεται μια διάκριση ανάμεσα στο "ομογενές ρευστό" (ρ, μ σταθερές) και στο "ετερογενές ρευστό". Εάν οι συγκεντρώσεις της διαλυμένης ουσίας είναι αρκετά μικρές τότε το ρευστό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ομογενές και η διαλυμένη ουσία ως ένας τέλειος "ιχνηθέτης".

Συνεπώς διακρίνονται δυο διαφορετικές οπτικές στο πρόβλημα μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά, αυτή του *ιχνηθέτη* όπου οι μεταβολές της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας δεν επιφέρουν μεταβολές της πυκνότητας και του ιξώδους (ομογενές ρευστό) του ρευστού και η "γενικευμένη" περίπτωση (ετερογενές ρευστό) όπου οι μεταβολές της συγκέντρωσης του ρευστού επιφέρουν ανάλογες μεταβολές στην πυκνότητα και στο ιξώδες του.

Στην περίπτωση του "ιχνηθέτη", η πυκνότητα ρ και το ιξώδες μ του ρευστού παραμένουν σταθερές. Έτσι, το σύστημα των εξισώσεων μεταφοράς - διασποράς (εξισ. 1-3) δεν επηρεάζει τις εξισώσεις κατάστασης (εξισ. 4). Η επίλυση του προβλήματος αυτού περιλαμβάνει δύο στάδια, το πρώτο που αποτελείται από την επίλυση των εξισώσεων *συνέχειας* (2) και *κίνησης* (3) οδηγεί στον υπολογισμό της κατανομής των ταχυτήτων ροής ενώ το δεύτερο οι ταχύτητες αυτές εισάγονται στην εξίσωση *μεταφοράς - διασποράς* (1) με την οποία υπολογίζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων της διαλυμένης ουσίας.

Τα περισσότερα προβλήματα κίνησης διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά εντάσσονται στην πρώτη περίπτωση του "ιχνηθέτη". Εξάιρεση αποτελούν για παράδειγμα οι περιπτώσεις προβλημάτων υφαλμύρωσης υπόγειων νερών, όπου η αλατότητα επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού, τα οποία αντιμετωπίζονται με τη "γενικευμένη" περίπτωση (Sun, 1996).

Οι Bear et al (1999), διερεύνησαν διάφορα μαθηματικά (αριθμητικά) μοντέλα που έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε ποικίλα πρακτικά προβλήματα υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων. Από τους δεκαοχτώ κώδικες που εξετάστηκαν συνολικά, ένας μόνο ("SHARP", Essaid, 1990) ήταν τύπου "sharp front", ενώ οι υπόλοιποι ήταν τύπου "advection - dispersion". Επίσης οχτώ από αυτούς είχαν αναπτυχθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. ενώ οι υπόλοιποι με άλλες μεθόδους όπως, πεπερασμένα και αναλυτικά στοιχεία.

Ο Sun (1996), αναφέρει επίσης ότι, όταν η "μεταβατική ζώνη" έχει σχετικά μεγάλο εύρος, τότε κατάλληλα μοντέλα για την προσομοίωση της υφαλμύρωσης είναι τα μοντέλα τύπου "μεταφοράς - διασποράς (advection - dispersion)". Στην περίπτωση αυτή η άγνωστη μεταβλητή ή η μεταβλητή κατάστασης είναι η κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων (χλωριόντων) και όχι η θέση της διεπιφάνειας.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένα (βλ. §1.1), στην περίπτωση του Αργολικού πεδίου απαντούν μικρές σχετικά συγκεντρώσεις χλωριόντων ενώ το μέτωπο της υφαλμύρωσης δεν χαρακτηρίζεται από μια απότομη μετάβαση γλυκού – αλμυρού νερού ("sharp -front") αλλά από μια ευρεία ζώνη υφάλμυρου νερού, χαμηλών σχετικά συγκεντρώσεων, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μεταβατική ζώνη διασποράς – διάχυσης και μίξης γλυκού και υφάλμυρου νερού.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω και θεωρώντας ότι οι συγκεντρώσεις χλωριόντων που καταγράφηκαν στα υπόγεια νερά επηρεάζουν ασήμαντα την πυκνότητα του ρευστού, το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στην παρούσα εργασία εξετάζεται από την οπτική ενός "ομογενούς ρευστού" ($\rho, \mu = \text{σταθερά}$) ενώ η διαλυμένη ουσία (χλωριόντα) αντιμετωπίζεται ως τέλειος "ιχνηθέτης".

Τα αριθμητικά μοντέλα που επιλέχθηκαν για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι το γνωστό μοντέλο με το ακρώνυμο MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) και ο κώδικας MT3DMS (Zheng, 1990, Zheng and Wang, 1999).

Το μοντέλο προσομοίωσης της ροής που αφορά στην επίλυση των εξισώσεων κίνησης (2) και συνέχειας (3) έχει αναπτυχθεί και παρουσιαστεί διεξοδικά σε προηγούμενες εργασίες (Γιαννουλόπουλος 2000, 2002).

Η εξίσωση μεταφοράς - υδροδυναμικής διασποράς που επιλύεται αριθμητικά από τον παραπάνω κώδικα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (5)$$

Όπου,

C	είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, $[ML^{-3}]$,
t	ο χρόνος, $[T]$
x_i	η απόσταση κατά μήκος των καρτεσιανών συντεταγμένων, $[L]$
D_{ij}	ο συντελεστής της υδροδυναμικής διασποράς, $[L^2T^{-1}]$
v_i	η ταχύτητα διήθησης (seepage velocity), $[LT^{-1}]$
q_s	η συνιστώσα ροής (παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου) που περιγράφει τις πηγές και τις καταβόθρες (source/sink term), $[T^{-1}]$
θ	το ενεργό πορώδες (αδιάστατο) και,
$\sum_{k=1}^N R_k$	ο όρος χημικών αντιδράσεων, $[ML^{-3}T^{-1}]$

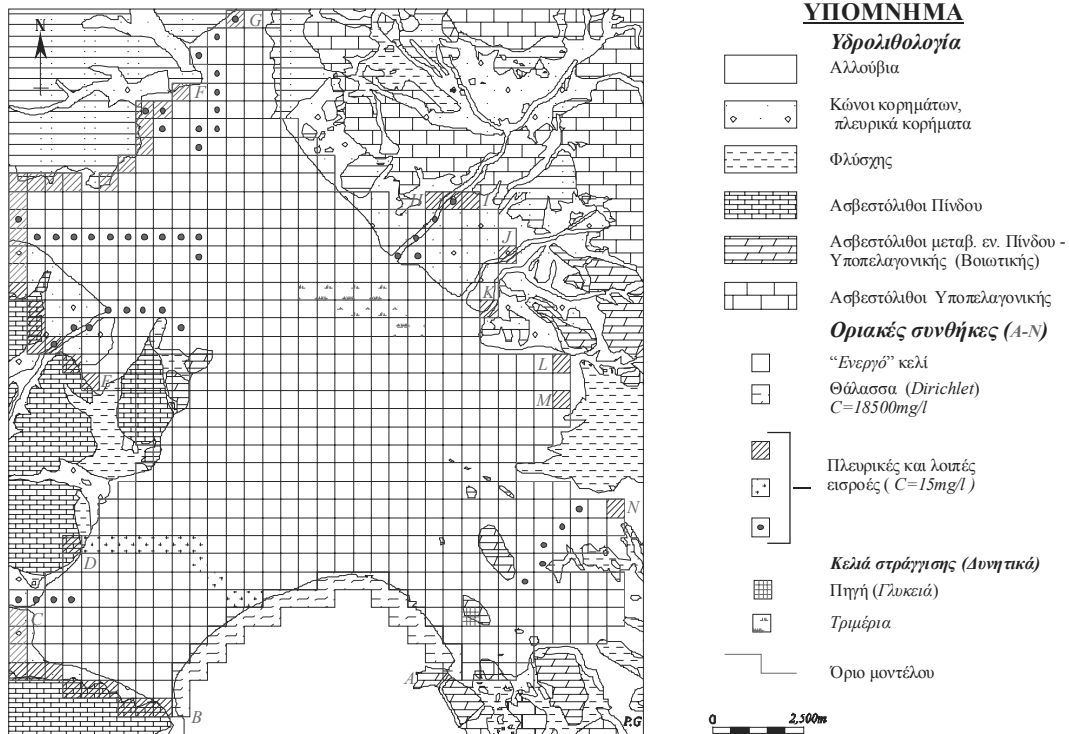
Το δεξιό τμήμα της παραπάνω εξίσωσης περιλαμβάνει τέσσερις όρους που από αριστερά προς τα δεξιά περιγράφουν αντίστοιχα τους μηχανισμούς της υδροδυναμικής διασποράς, της μεταφοράς της πηγής – καταβόθρας και των χημικών αντιδράσεων. Σε ότι αφορά στην αριθμητική του επίλυση ο σχετικός κώδικας χρησιμοποιεί για τον όρο της μεταφοράς "Lagrangian" προσέγγιση (πεπερασμένες διαφορές), ενώ οι υπόλοιποι όροι προσεγγίζονται αριθμητικά με "Eulerian" μεθόδους.

2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

2.1 Ανάπτυξη μοντέλου

Η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών απαιτεί τη διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος σε τετραγωνικά κελιά ή ορθογωνικά πρίσματα σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους. Στο Σχήμα 3 φαίνονται τα βασικά υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά του Αργολικού πεδίου, καθώς και ο κάρναβος των πεπερασμένων διαφορών (διακριτοποίηση) που αναπτύχθηκε. Ο κάρναβος αποτελείται από ορθογωνικά κελιά διαστάσεων 500x500m και καλύπτει μια έκταση διαστάσεων 17.5x20km.

Στην παρόν στάδιο έγινε η παραδοχή ότι οι υδροφόροι σχηματισμοί του Αργολικού πεδίου αποτελούν ένα ενιαίο υδροφόρο σχηματισμό δηλαδή ένα υδροφόρο στρώμα (k) το οποίο θα έχει ισοδύναμες υδραυλικές ιδιότητες που προκύπτουν από αυτές των επιμέρους στρωμάτων.



Σχήμα 3 Διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος και οριακές συνθήκες.

Η βάση του υδροφόρου αυτού στρώματος αντιστοιχεί στο υπόβαθρο των αλλουβιακών αποθέσεων του Αργολικού πεδίου όπως αυτό προέκυψε από τη στρωματογραφική έρευνα (Γιαννουλόπουλος 2000, 2001). Η οροφή του στρώματος αυτού στην περιοχή των υπό πίεση υδροφόρων σχηματισμών όπου αναπτύσσεται το αργιλικό κάλυμμα ταυτίζεται με τη βάση του καλύμματος αυτού ενώ στο υπόλοιπο τμήμα των ελεύθερων υδροφόρων σχηματισμών περιορίζεται από τις ανώτερες διακυμάνσεις της ελεύθερης επιφάνειας των υπόγειων νερών (π.χ. η επιφάνεια του εδάφους).

Ως αρχικές συνθήκες, αντίστοιχα με το μοντέλο ροής, τίθενται οι αντίστοιχες τιμές και γενικά η κατανομή των χλωριόντων της άνοιξης του 1964.

Η βασικότερη οριακή συνθήκη του μοντέλου είναι η παρουσία της θάλασσας στο νότιο τμήμα. Η οριακή αυτή συνθήκη προσομοιώνεται με κελιά σταθερής συγκέντρωσης (*Dirichlet*). Η σταθερή συγκέντρωση που αποδίδεται στα κελιά αυτά είναι η μέση συγκέντρωση της Μεσογείου σε χλωριόντα, που ανέρχεται περίπου σε 18.500 mg/l.

Οι υπόλοιπες εισροές στο μοντέλο που λαμβάνουν χώρα σε διάφορα υδραυλικά όρια όπως πλευρικές τροφοδοσίες, κατείσδυση, κλπ είναι γενικά μικρής συγκέντρωσης σε χλωριόντα. Αποτελούν επίσης οριακές συνθήκες σταθερής συγκέντρωσης (*Dirichlet*) που ισοδυναμεί με τις ελάχιστες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε περιοχές τροφοδοσίας (15 mg/l Cl⁻).

Οι ποσότητες χλωριόντων που εισρέουν στον υδροφόρο σχηματισμό απομακρύνονται στις γεωτρήσεις άντλησης που αποτελούν τις "καταβόθρες" του συστήματος και στα διάφορα σημεία εκφόρτισης του νερού. Για το λόγο αυτό η συγκέντρωση του νερού που απομακρύνεται είναι ίδια με τη συγκέντρωση του υδροφόρου.

Η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου είναι ανάλογη με αυτή του μοντέλου ροής. Οι περίοδοι εντατικών καταστάσεων (*stress periods*) αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ροής (Γιαννουλόπουλος 2000, 2002). Επιπλέον, τα επιμέρους χρονικά (*time steps*) βήματα διαμορφώνονται αντίστοιχα σε χρονικά βήματα μεταφοράς (*transport steps*) ανάλογα με τα εκάστοτε κριτήρια σταθε-

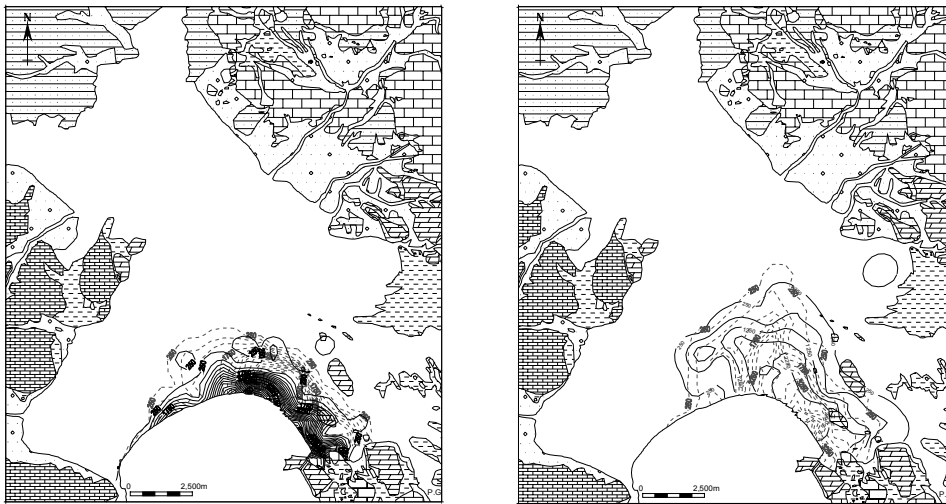
ρότητας του μοντέλου όπως αυτά καθορίζονται στους όρους διασποράς, πηγής / καταβόθρας και χημικών αντιδράσεων (Zheng, 1990, Zheng and Wang, 1999).

Οι μηχανισμοί που προσομοιώνονται στο μοντέλο είναι η μεταφορά και η διασπορά των χλωριόντων. Χημικές αντιδράσεις δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί όπως είναι γνωστό τα χλωριόντα χαρακτηρίζονται ως συντηρητικός ιχνηθέτης (*conservative tracer*).

2.2 Προσομοίωση

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (ASTM 1993, 1995) ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων στα υπόγεια νερά η προσομοίωση περιλαμβάνει μεταξύ άλλων δύο χαρακτηριστικά στάδια αυτά της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης. Τα διαθέσιμα δεδομένα για τη ρύθμιση και επαλήθευση του μοντέλου αφορούν στην περίοδο 1964-75.

Για τον έλεγχο της βαθμονόμησης επιλέχθηκαν τα δεδομένα της περιόδου 1964-69. Τα μοντέλα εκτελέστηκαν για την περίοδο αυτή με μηνιαίες δυναμικές περιόδους και με αρχικές συνθήκες την κατανομή της πιεζομετρίας και της συγκέντρωσης των χλωριόντων της Άνοιξης του 1964. Αφού προηγήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου που αφορά στη ροή των υπόγειων νερών (Γιαννουλόπουλος 2000, 2002) ακολούθησε η εκτέλεση του δεύτερου μοντέλου μεταφοράς – διασποράς (εξ. 5).



α) βαθμονόμηση (Φθιν. 1967)

β) επαλήθευση (Φθιν. 1975)

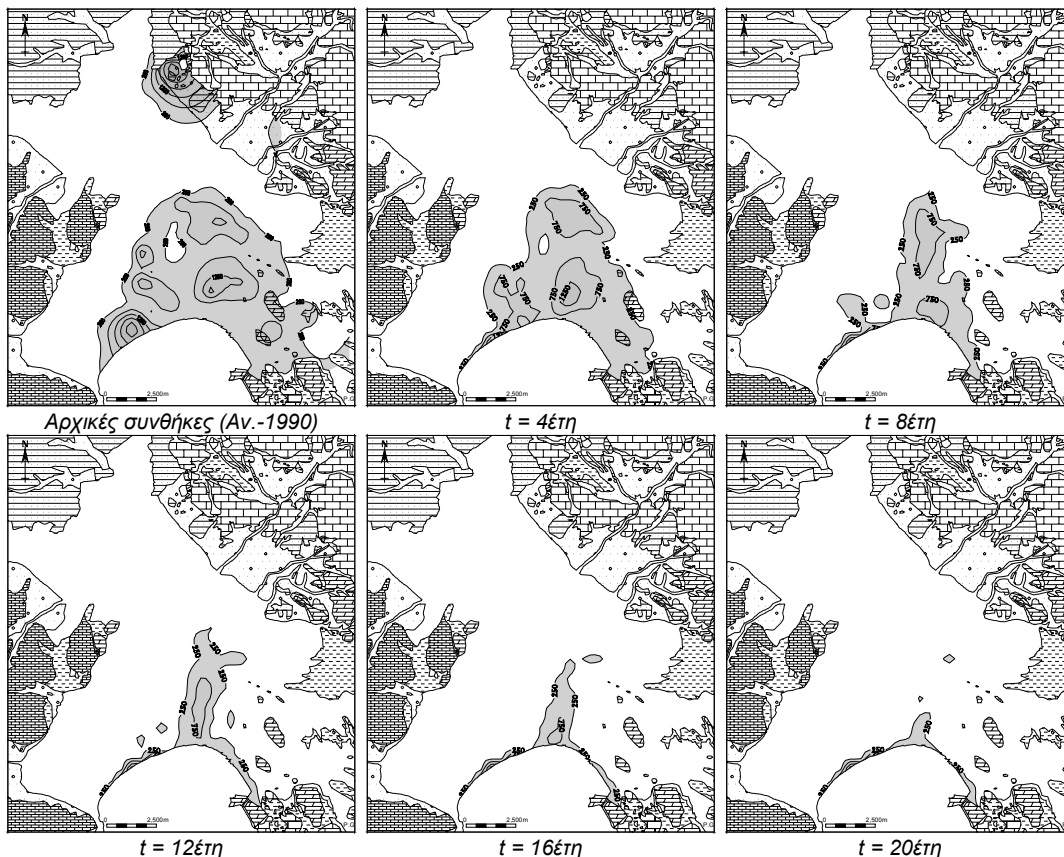
Σχήμα 4. Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του μοντέλου (διακεκ. γραμμές) σε σχέση με μετρημένες συγκεντρώσεις χλωριόντων από τα στάδια της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης.

Κριτήριο βαθμονόμησης ήταν η σχετική ταύτιση των υπολογισμένων τιμών του μοντέλου σε διάφορες χρονικές περιόδους με τις αντίστοιχες μετρήσεις υπαίθρου. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4α.

Η επαλήθευση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση των δεδομένων της περιόδου 1969-75. Τα παραπάνω μοντέλα εκτελέστηκαν με αρχικές συνθήκες στάθμης και ποιότητας των υπόγειων νερών της Άνοιξης του 1969 με μηνιαίες δυναμικές περιόδους έως το 1975. Τα αποτελέσματα τόσο της βαθμονόμησης όσο και της επαλήθευσης του μοντέλου κρίνονται ως ικανοποιητικά. Σχετικές αδυναμίες ή τυχόν σφάλματα που εισάγονται θα σχολιαστούν σε επόμενη παράγραφο.

2.3 Εφαρμογή - σενάριο φυσικού εμπλουτισμού και ισορροπίας

Τα παραπάνω μοντέλα εφαρμόστηκαν σε υποθετικό σενάριο ελέγχου αποκατάστασης της ποιότητας των υπόγειων νερών στην περίπτωση όπου θα σταματούσαν παντελώς οι αντλήσεις και οι υδροφόροι σχηματισμοί θα δέχονταν φυσική μόνο τροφοδοσία από κατακόρυφες και από πλευρικές εισροές. Η εκφόρτιση του υπόγειου νερού θα γινόταν προς της θάλασσα η οποία αποτελεί και όριο σταθερού υδραυλικού φορτίου και σταθερής συγκέντρωσης.



Σχήμα 5 Εκτιμώμενος ρυθμός αποκατάστασης της ποιότητας των υπόγ. νερών (ισοχλώριες καμπύλες, ppm)).

Το μοντέλο εκτελέστηκε με αρχικές συνθήκες αυτές της Άνοιξης του 1990. Ας σημειωθεί ότι η περίοδος 1989-90, λόγω και της ανομβρίας που επικράτησε την εποχή εκείνη, οδήγησε τόσο σε ότι αφορά στην ταπείνωση της στάθμης όσο και στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών σε μια κατάσταση που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως εφιαλτική. Η συγκέντρωση των χλωριόντων της περιόδου αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1β.

Το μοντέλο εκτελέστηκε και πάλι με μέσες μηνιαίες φυσικές τροφοδοσίες, χωρίς την παρουσία αντλήσεων και μηνιαίες δυναμικές περιόδους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5 σύμφωνα με το σενάριο αυτό η αποκατάσταση της ποιότητας των υπόγειων νερών σε ότι αφορά στα χλωριόντα θα απαιτούσε τουλάχιστον μια εικοσαετία. Η αποκατάσταση της στάθμης όμως είναι αρκετά πιο σύντομη και επιτυγχάνεται με την πάροδο 2 περίπου ετών από την παύση των αντλήσεων. Ας σημειωθεί τέλος ότι, τα παραπάνω αποτελέσματα αποκατάστασης της ποιότητας είναι σύμφωνα και με σχετικά αποτελέσματα που προέκυψαν με διαφορετική μεθοδολογία, με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqm (Λαμπράκης κ.α 2001).

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

Από τη μέχρι τώρα προσπάθεια προσομοίωσης της μεταφοράς χλωριόντων με τη χρήση των παραπάνω αριθμητικών μοντέλων, σε δύο διαστάσεις, προέκυψε ότι τα μοντέλα αυτά μπορούν με επιτυχία να προσομοιώσουν τη κατανομή των χλωριόντων σε δυναμικές συνθήκες στους παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς υπό τις συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Παρόλα αυτά μερικές αποκλίσεις που παρατηρούνται ως προς τις απόλυτες υπολογισμένες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις υπαίθρου αποδίδονται στα παρακάτω πιθανά σφάλματα:

Σε σφάλματα του εννοιολογικού μοντέλου: Η ακριβής προσομοίωση πραγματικών συγκεντρώσεων απαιτεί τον ακριβέστερο δυνατό προσδιορισμό της χωροχρονικής κατανομής των τάσεων που αποτελέσαν και το γενεσιουργό παράγοντα (*driving force*) της υφαλμύρωσης. Στο παρόν πρόβλημα οι τάσεις αυτές, και κυρίως η κατανομή των αντλήσεων την περίοδο της προσομοίωσης, δεν ήταν με ακρίβεια γνωστές αλλά προσεγγίστηκαν με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία. Μια ακριβέστερη γνώση των πιέσεων αυτών θα οδηγούσε σε προσομοίωση υψηλότερης πιστότητας όπου θα ήταν δυνατόν να ελεγχθεί τόσο το σφάλμα σε ότι αφορά στο εννοιολογικό μοντέλο όσο και τα υπόλοιπα αριθμητικά σφάλματα.

Σε αριθμητικά σφάλματα: Η *Eulerian* μέθοδος που εφαρμόζεται στην προσομοίωση των μηχανισμών της διασποράς και των χημικών αντιδράσεων, σε περιπτώσεις όπου κυριαρχεί ο μηχανισμός της μεταφοράς εισάγει αριθμητικά σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις περιορίζονται με χρήση μικρών χρονικών βημάτων και χωρικών διακριτοποιήσεων. Επίσης, επειδή η μέθοδος *MOC* όπως και κάθε άλλη "*Eulerian – Lagrangian*" μέθοδος δεν έχει αναπτυχθεί με βάση την αρχή της συνέχειας οδηγεί σε σφάλμα ισοζυγίου της μάζας. Εξαιτίας των σφαλμάτων αυτών είναι πιθανό να υπολογίζονται στον υδροφόρο σχηματισμό υψηλότερες σχετικά συγκεντρώσεις από τις αντίστοιχες πραγματικές (Sun, 1996). Πιθανοί επίσης μηχανισμοί μεταφοράς τύπου απότομου υφάλμυρου μετώπου (*sharp front*) τουλάχιστον στα αρχικά στάδια και κοντά στην ακτή, είναι δυνατό να εισάγουν πρόσθετο σφάλμα σε ότι αφορά στις μέγιστες συγκεντρώσεις. Επίσης, αξίζει να τονιστεί ότι η ανάπτυξη των παραπάνω μοντέλων έγινε σύμφωνα με την παραδοχή ενός "ομογενούς ρευστού". Η χρήση μοντέρνων λογισμικών τα οποία βασίζονται σε μαθηματικό μοντέλο "ετερογενούς ρευστού" (π.χ. Weixing and Langevin, 2002) θα μπορούσε πιθανόν οδηγήσει σε πιο ασφαλή συμπεράσματα ειδικά σε ότι αφορά στο ισοζύγιο μάζας.

Σε σφάλματα μετρήσεων: Όπως προκύπτει από τις σχετικές υδροχημικές τομές η συγκέντρωση των χλωριόντων στον υδροφόρο σχηματισμό παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές τόσο κατά την οριζόντια διεύθυνση όσο και κατά την κατακόρυφη. Οι μεταβολές της συγκέντρωσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση δεν ακολουθούν το πρότυπο των *Ghyben – Herzberg* αλλά παρατηρείται στρωμάτωση υψηλών συγκεντρώσεων, το οποίο πλαισιώνεται από βαθμιαία μικρότερες συγκεντρώσεις. Η πραγματική αυτή εικόνα, σε προβλήματα δυο διαστάσεων εξομαλύνεται και επισκιάζεται από μικρότερες μέσες συγκεντρώσεις που δίνουν μια σχετικά ψευδή εικόνα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ASTM - D 5447-93, 1993. Standard Guide for Application of a Ground - Water Flow Model to a Site Specific Problem, 6pp.
- ASTM - D 5880-95, 1995. Standard Guide for Subsurface Flow and Transport Modeling, 5pp.
- Bear J. A.H.-Dcheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera, 1999. Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices. Theory and Application of Transport in Porous Media. Kluwer Academic Publishers, 625pp.
- Γιαννουλόπουλος Π., 2000. Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο. Διδακτορική διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, 362pp.
- Γιαννουλόπουλος Π., 2001. Οι υδρολιθολογικές συνθήκες των αλλουβιακών ιζημάτων του Αργολικού πεδίου – υδροφόροι σχηματισμοί. Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ε.Γ.Ε, Τόμος 5, σελ.1793-1800.
- Γιαννουλόπουλος Π., 2002. Υπόγεια υδραυλική και μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών του Αργολικού πεδίου – Εννοιολογικό μοντέλο. Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. σελ. 35-46.
- Γιαννουλόπουλος Π., 2002α. Μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου. Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. σελ.223-234.
- Γιαννουλόπουλος Π., Αλεξανδρής Σ., Ψυχογιού Μ. και Πουλοβασίλης Α., 2002. Υφαλμύρωση και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου. Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. σελ. 1-12.
- Λαμπράκης Ν, Γ. Σταμάτης, Π. Γιαννουλόπουλος και Α. Βοϊβοντά, 2001. Ποιότητα των υπόγειων νερών και εκτίμηση του χρόνου απορρύπανσης των υδροφόρων οριζόντων του Αργολικού πεδίου κάτω από συνθήκες τεχνητού εμπλουτισμού. Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ε.Γ.Ε, Τόμος 5, σελ. 1819-1826.
- Essaid H. I., 1990. The computer model SHARP, a Quasi-Three-Dimensional Finite - Difference Model to Simulate Freshwater and saltwater flow in Layered coastal aquifer systems. U.S.G.S Water Resour. Inv. Rept. p90-4130

- Zheng C., 1990. MT3D, A Modular three - dimensional transport model for simulations of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground water systems. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, 170pp
- Zheng C. and P. Wang, 1999. A Modular three - dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions, of contaminants in groundwater systems. Documentation and user's guide. U.S. Army Corps of Engineers, Engineering Research and Development Center, 220pp.
- McDonald M.G. and Harbaugh A. W., 1988. A modular three – dimensional Finite Difference ground-water flow model. Techniques of Water Resources Investigations 06-A1, USGS, 576p.
- Sun N.-Z. 1996. Mathematical Modeling of Groundwater Pollution. Springer, 377pp
- Weixing G. and Langevin C., 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable – Density Groundwater Flow.

ABSTRACT

SIMULATION OF SEA WATER INTRUSION IN THE PLAIN OF ARGOS WITH ADVECTION – DISPERSION MODEL

Giannouloupoulos P.

Laboratory of Agricultural Hydraulics, Agricultural University of Athens, 75 Iera Odos str.118 55, Athens. panosg@aua.gr

The plain of Argos, southern Greece, is perhaps the first region in Greece where sea water intrusion in groundwater was noticeably observed since late fifties. Observed chloride concentrations, are mostly less than 1500 mg/l, in the affected zone, exhibiting smooth variations. Also, relevant water quality data, show that sharp fronts are not occurring. Thus, the transport of chlorides is assumed to be governed by advection and dispersion mechanisms rather than density dependent transport. In this paper the application of a distributed numerical model, based on advective and dispersive - chloride transport is described. Hence, the mathematical model of a "homogeneous fluid" and the "tracer" approach has been assumed rather than the "general" approach of the "heterogeneous fluid". This code has successfully replicated the measured concentrations of the calibration period (1964-69) and also the pertinent concentrations of the validation period (1969-750). In predictive simulation, a scenario of chloride flushing by natural recharge, without any pumping, was tested and it was calculated that rehabilitation period could be at least as long as twenty years. The weakness of this model involves both errors of conceptual model and numerical errors. The major conceptual problem is the lack of knowledge of pumping distribution, which constitutes the driving force of salinization, while numerical errors are mainly attributed to mass balance errors introduced in the Eulerian – Lagrangian implementation of the numerical model.