

## ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ\*

Ν. ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ<sup>1</sup>, Γ. ΣΤΑΜΑΤΗΣ<sup>2</sup>, Π. ΓΙΑΝΝΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ<sup>3</sup> & Α. ΒΟΙΒΟΝΤΑ<sup>4</sup>

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ποιότητα των υπόγειων νερών των τεταρτογενών αποθέσεων του Αργολικού πεδίου έχει υποβαθμιστεί εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που οδήγησαν στην αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών και στη διείσδυση της θάλασσας στην περιοχή. Η υποβάθμιση αυτή εκτείνεται στο παράκτιο και κεντρικό τμήμα του Αργολικού πεδίου. Οι συγκεντρώσεις των χλωριδίων στα υπόγεια νερά ξεπερνούν τα 600 mg/l, και των νιτρικών ιόντων τα 100 mg/l. Περιφερειακά των υφαλιμωρισμένων περιοχών διαπιστώθηκε το φαινόμενο της σταδιακής αποκατάστασης της ποιότητας των νερών των υδροφόρων σχηματισμών (freshening process) λόγω του τεχνητού εμπλουτισμού. Η προσομοίωση των υδροφόρων για συνθήκες μόνιμης μονοδιάστατης ροής, προς την κατεύθυνση της εκτίμησης του χρόνου αποκατάστασης της ποιότητας των υπόγειων νερών σε ορεινό καθολικού τεχνητού εμπλουτισμού και διακοπής των αντλήσεων έδειξε ότι ο χρόνος αποκατάστασης είναι βραχύς. Για τα μη δραστικά σχετικά ιόντα όπως είναι τα χλωριόντα και τα νιτρικά ιόντα κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες αλλά και για την κύρια μάζα των υπολοίπων ο χρόνος αυτός ανέρχεται σε 20-23 έτη ενώ για την πλήρη αποκατάσταση της ποιότητας των υπόγειων νερών απαιτείται χρόνος μεγαλύτερος των 1000 ετών.

### ABSTRACT

The quality of groundwater occurring within the alluvial sediments of the plain of Argos (Greece) has been seriously deteriorated due to human activities which have led both to saline intrusion and nitrate contamination. The chloride content of groundwater exceeds 600mg/l while nitrate concentrations are higher than 100mg/l. However, because of the artificial recharge applied partially some years ago, a "freshening process" has been identified along the periphery of the saline intrusion front. This paper studies the multicomponent ion exchange process and refreshing time according to a scenario of regional artificial recharge and cease of pumping. For the application of this scenario a recharge rate of 730mm per year was selected based on previous detailed studies in the region. One-dimensional flow and transport modeling was used to simulate refreshing process. In a theoretical chromatographic column of 6Km length, as it is the length of an assumed flow path, containing a number of cells, the aquifer has specified physicochemical properties such as cation exchange capacity, hydrogeological parameters etc, the values of which are taken from previous research in the region. The simulation led to the conclusion that the rehabilitation time is rather short. In fact, for the chemical species which were considered in the concrete conditions like conservative species, such as chlorides and nitrates as well as for the main mass of the other ions, the rehabilitation time has been calculated to be approximately between 20 and 23 years. For the complete restoration of the aquifers the refreshing time was found to be higher than 1000 years. It is obvious that in case of natural recharge conditions the refreshing process is much more time consuming in relation to the previous one (Lambrakis et Kallergis 2001).

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Υδρογεωλογία, υδροχημεία, υφαλιμύριση, αλλουβιακοί υδροφορείς, Αργολικό πεδίο.

**KEY WORDS:** Hydrogeology, hydrochemistry, saline intrusion, alluvial aquifers, Plain of Argos - Greece.

\* GROUNDWATER QUALITY AND ESTIMATION OF REHABILITATION TIME OF THE ARGOLID PLAIN'S AQUIFERS UNDER ARTIFICIAL RECHARGE CONDITIONS.

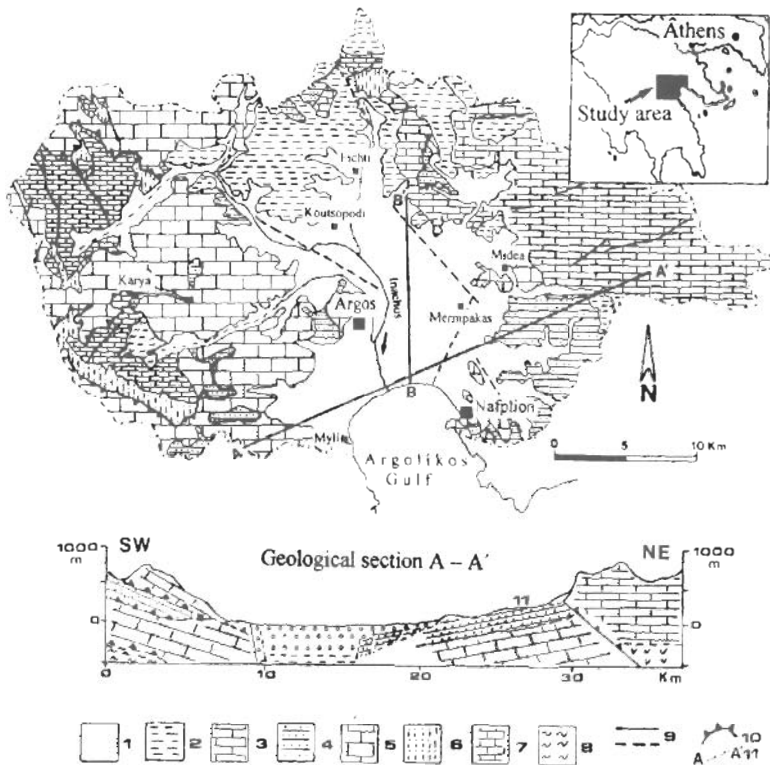
1. Εργαστήριο Υδρογεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

2. Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας, Γ. Π. Α. Γεωλ. Οδός 75, 118 55 Αθήνα

3. Εργαστήριο Γεωγραφίας Υδατολογίας, Γ. Π. Α.

4. Ναύπλιο

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Ειγ. 1: Γεωλογική δομή περιοχής μελέτης (απλοποιημένος χάρτης από Παπασταματίου et al., 1970, Τάταρης et al., 1970 και Jacobshagen, 1986), 1: Τεταρτογενείς αποθέσεις, 2: Νεογενείς σχηματισμοί, 3: Ανθρακικοί σχηματισμοί Ενότητας Πελαγονικής, 4: Φλύσχης Ενότητας Πίνδου, 5: Ανθρακικοί σχηματισμοί Ενότητας Πίνδου, 6: Φλύσχης Ενότητας Τρίπολης, 7: Ανθρακικοί σχηματισμοί Ενότητας Τρίπολης, 8: Σχιστόλιθοι-Φυλλίτες, 9: Ρήγμα, ορατό ή πιθανό, 10: Επώθηση-επίπλευση, 11: Γεωλογική τομή.

Figure 1: Geological structure of the study area (modified from Papastamatiou et al. 1970, Tataris et al. 1970 and Jacobshagen, 1986), 1: Quarternary deposits, 2: Neogene deposits, 3: Carbonates of Pelagonian units, 4: Flysch of Pindos units, 5: Carbonates of Pindos units, 6: Flysch of Tripolis units, 7: Carbonates of Tripolis units, 8: Schists-Phyllites, 9: Fault, visible or probable, 10: Overthrust-upthrust, 11: Geological section.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις της πεδιάδας του Αργους έχουν έκταση που ξεπερνά τα 200 Km<sup>2</sup> και μέσο πάχος που ξεπερνά τα 100m. Φιλόξενοιν επάλληλα υδροφόρα στρώματα των οποίων η ποιότητα του νερού είναι υποβαθμισμένη εξ' αιτίας των εντατικών αντλήσεων, των λιπάνσεων και των επιστρεφόμενων αρδευτικών υρών που γίνονται στην περιοχή. Οι αντλήσεις στο Αργολικό πεδίο παρουσίασαν κατακόρυφη αύξηση στην δεκαετία του 50 και οδήγησαν άμεσα στην υφαλμύριση των αβαθών υδροφορέων (Θεοδορόπουλος et al., 1970). Τα πρώτα πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού για την ενίσχυση του υδατικού δυναμικού της περιοχής και την αναβάθμιση της ποιότητας του νερού έγιναν το 1964 στις περιοχές Αγ. Αδριανού, Λευκαζίων και Δρεπάνου (Θάνος, 1994; Γιαννουλάπουλος, 2000).

Στην παρούσα ερευνητική εργασία επιχειρείται η εκτίμηση του χρόνου απορρύπανσης των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου σύμφωνα με ένα σενάριο καθολικού τεχνητού εμπλουτισμού βάσει νεότερων στοιχείων που συλλέχθηκαν την περίοδο 1994-1995 στα οποία απεικονίζεται η υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης τους.

## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Το Αργολικό πεδίο δομείται από πετρώματα του αλιζού οιστήματος καθώς και μεταλλικά ιζηματα (Ειγ. 1). Οι γεωτεκτονικές ενότητες είναι:



ματα στα οποία έγιναν πλήρεις αναλύσεις. Επί τόπου μετρήθηκαν οι φυσικοχημικές παράμετροι: θερμοκρασία (T°C), pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh) και διαλελυμένο οξυγόνο (DO). Επίσης προσδιορίστηκαν επί τόπου φωτομετρικά με φωροφότομετρο οι συγκεντρώσεις των ιόντων NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Στο Εργαστήριο Υδρογεωλογίας των Πανεπιστημίων Πατρών προσδιορίστηκαν με μεθόδους τιτλοδότησης οι συγκεντρώσεις των ιόντων Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και Cl<sup>-</sup>, φλογοφωτομετρικά τα κατιόντα Na<sup>+</sup> και K<sup>+</sup> και φασματοφωτομετρικά τα SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Το ποσοστό σφάλματος δεν υπερβαίνει το 5% όπως προκύπτει από την επεξεργασία των αναλύσεων για την οποία χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό (Λαμπράκης, 1991). Με την βοήθεια του λογισμικού αυτού έγινε και η κατασκευή του αναπτυγμένου διαγράμματος Durov της ειζ. 3.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Στον Πίνακα 1 παρατίθενται στατιστικά στοιχεία των χημικών αναλύσεων των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου και για τις δύο περιόδους δειγματοληψίας. Από τον Πίνακα αυτό διαπιστώνεται ότι τα υπόγεια νερά έχουν αλκαλικό χαρακτήρα και υψηλές μέσες τιμές συγκεντρώσεων NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και NH<sub>3</sub> που ξεπερνούν τις μέγιστες αποδεκτές τιμές για πόσιμα νερά (οδηγία 75/440/EE) και αποδίδονται προφανώς στις έντονες λιπάνσεις στην περιοχή. Διαπιστώνεται επίσης ότι έχουν υψηλές συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> που αποδίδονται στην επίδραση της θαλάσσιας διεύδυσης λόγω των εντατικών αντλήσεων. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, και HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> δεν ξεπερνούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες για πόσιμα νερά (οδηγία 75/440/EE) ενώ οι μικρές σχετικά τιμές των τυλικών αποζιόσεων επιτρέπουν με μικρές επιφυλάξεις την αποδοχή των μέσων όρων.

Η μέση τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh: 217.84 mV) διαμορφώνεται σε υψηλά επίπεδα και σε συνδυασμό με την υψηλή μέση τιμή της συγκέντρωσης του διαλελυμένου οξυγόνου (DO: 6.08 mg/l) προκύπτει ότι οι υδροφόροι ορίζοντες της περιοχής ευρισκονται κάτω από οξειδωτικές συνθήκες. Σε αυτό συμβάλλει η έντονη κυκλοφορία του νερού, η οποία συνδέεται με τις εντατικές αντλήσεις και τον τεχνητό εμπλουτισμό.

**Πίνακας 1: Στατιστικές παράμετροι των χημικών αναλύσεων περιόδων Ιουνίου και Οκτωβρίου 1995.**

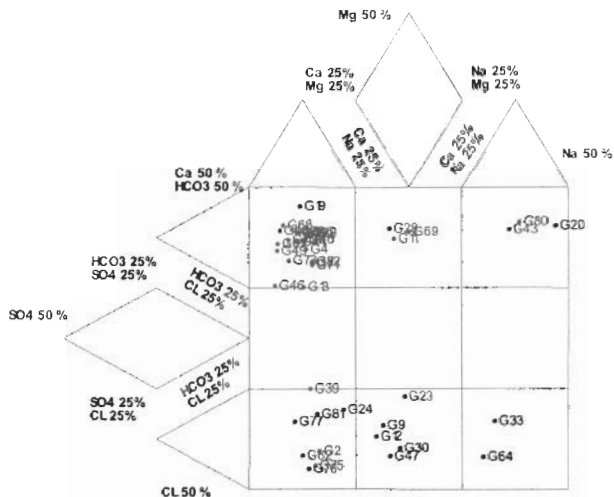
**Table 1: Statistical parameters of the chemical analyses conducted during June and October 1995.**

Παράμετρος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
T°C	18.65	20.29	17.0	0.87
pH	7.23	8.75	6.53	0.40
Eh	217.84	265	85	47.24
D.O	6.08	9.45	0.71	2.11
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.05	0.17	0.01	0.028
NH <sub>3</sub>	0.808	7.55	0.00	1.34
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.015	0.21	0.00	0.038
Mg <sup>2+</sup>	36.97	196.8	2.20	41.59
Ca <sup>2+</sup>	166.75	426.0	5.19	99.17
Na <sup>+</sup>	93.57	619.09	13.97	102.33
K <sup>+</sup>	2.65	11.39	0.75	2.38
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	306.88	568.5	168.4	95.50
Cl <sup>-</sup>	261.97	1330.0	9.0	314.54
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	76.84	650	0.0	118.43
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	63.56	369.6	3.96	86.59

Ετσι η αμιωνία των γεωργικών λιπασμάτων μετατρέπεται εύκολα σε νιτρικά ιόντα κατά την αντίδραση: 2NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + 4O<sub>2</sub> + 2NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 2H<sub>2</sub>O + 4H<sup>+</sup>. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες τα νιτρικά ιόντα εμφανίζονται σχετικώς αδρανή και μεταφέρονται από το υπόγειο νερό χωρίς να λαμβάνουν μέρος σε χημικές αντιδράσεις (Freeze and Cherry 1979, Antonakos @ Lambrakis, 2000).

### 5.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΤΑ DUROV

Η ταξινόμηση των διαφορετικών χημικών τύπων των υπόγειων νερών έγινε με την βοήθεια του αναπτυγμένου διαγράμματος Durov, (Burdon and Mazloum, 1958). Όπως φαίνεται στην Ειζ. 3 στη περιοχή έρευνας διαπιστώνονται δύο κύριες ομάδες υπόγειων νερών. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι κατηγορίες των Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, και Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> χημικών τύπων νερών, ενώ στην δεύτερη οι κατηγορίες των Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>,



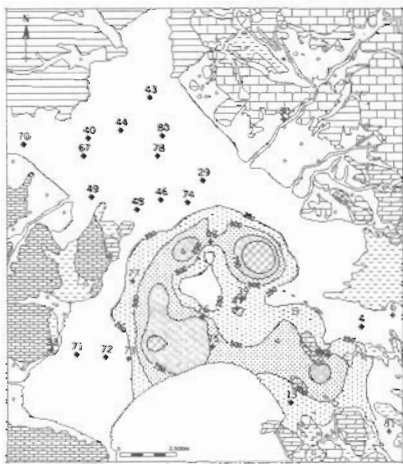
Εικ. 3: Κατανομή των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου στο αναπτυγμένο διάγραμμα Durov.  
 Fig. 3: Expanded Durov diagram showing the groundwater chemical types of the study area.

$Mg^{2+}-Cl^-$  και  $Ca^{2+}-Cl^-$  υδροχημικών τύπων. Οι δύο αυτές ομάδες δείχνουν φαινόμενα ιοντοανταλλαγής (Lloyd and Heathcote, 1985).

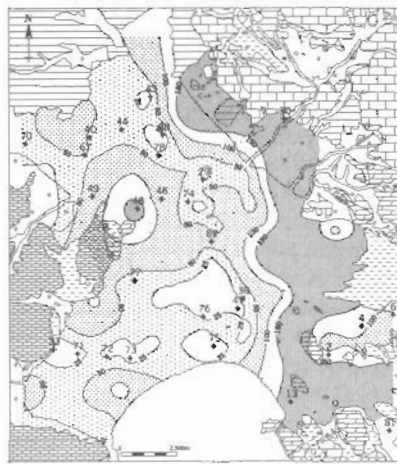
Η εμφάνιση των  $Ca^{2+}-Cl^-$  και  $Na^+-HCO_3^-$  υδροχημικών τύπων είναι ενδεικτική των φαινομένων υφαλιμύρισης και αποκατάστασης της ποιότητας των υπόγειων νερών και οφείλεται σε διαδικασίες ιοντοανταλλαγής μεταξύ των ιόντων Ca, Mg και Na. (Appelo and Postma 1994; Πεταλάς, 1997; Petalas and Diamantis, 1999, Lambrakis and Kallergis 2000). Από το διάγραμμα Durov (Εικ. 3) γίνεται φανερό ότι και οι δύο αναφερόμενες ανταγωνιστικές διαδικασίες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Ετσι η διαδικασία υφαλιμύρισης πιστοποιείται σε δείγματα υπόγειων νερών των γεωτρήσεων της παραλιακής και κεντρικής ζώνης της λεκάνης ενώ στην περιφέρεια λαμβάνει χώρα το αντίστροφο φαινόμενο λόγω τεχνητού εμπλουτισμού.

### 5.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ $Cl^-$ ΚΑΙ $NO_3^-$

Στην Εικ. 4α παρουσιάζεται η κατανομή των ιόντων χλωρίου και στην Εικ. 4β των νιτρικών ιόντων των υδροφόρων του Αργολικού πεδίου. Παρατηρείται ότι αυξημένες τιμές χλωριδίων παρουσιάζονται στο νότιο



Εικ. 4α: Κατανομή των χλωριδίων (ppm) στο Αργολικό πεδίο - 1995.



Εικ. 4β: Κατανομή των νιτρικών ιόντων (ppm) στο Αργολικό πεδίο - 1995.

Fig. 4a: Chloride distribution (ppm) in Argos plain - 1995. Fig. 4b: Nitrate distribution (ppm) in Argos plain - 1995.

παράκτιο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης. Στην εικόνα αυτή παρατηρείται επίσης ότι τα σημεία δειγματοληψίας που αντιστοιχούν στο τμήμα των υδροφόρων που συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία υφαλμύρινσης (βλ. διάγραμμα Durov, σημεία G39, G77, G75, G76, G2) βρίσκονται εντός της ζώνης με τις υψηλές τιμές συγκεντρώσεων χλωριόντων, ενώ τα σημεία που αντιστοιχούν στην διαδικασία αποκατάστασης (βλ. διάγραμμα Durov, σημεία G80, G43) βρίσκονται στην περιφέρεια της παραπάνω ζώνης. Από την κατανομή των νιτρίων ιόντων (Σχήμα 4β) προκύπτουν υψηλές σχετικά συγκεντρώσεις στο ανατολικό κυρίως τμήμα καθώς και στα περιθώρια της πεδιάδας. Το γεγονός αυτό σχετίζεται προφανώς με την ανάπτυξη ρηχών ελεύθερων υδροφορέων στις αντίστοιχες περιοχές καθώς και με την παρουσία αδρομερών υλικών στο αζόμεστο τμήμα.

## 6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η προσομοίωση του υδροφόρου ορίζοντα προς την κατεύθυνση της εκτίμησης του χρόνου απορρύπανσης επιχειρείται με την χρήση του κώδικα PHREEQM (Parkhurst et al., 1980; Appelo and Postma, 1994) για ένα σενάριο καθολικού τεχνητού εμπλουτισμού. Με τη χρήση μαθηματικού μοντέλου (Γιαννουλόπουλος, 2000) έχει υπολογιστεί ότι με τη συστηματική εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού η περιοχή μπορεί να δεχθεί  $30 \times 10^6 \text{ m}^3$  νερού ετησίως. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε 580 mm δεδομένου ότι η επιφάνεια υποδοχής (ελεύθεροι υδροφόροι σχηματισμοί) ανέρχεται σε  $120 \times 10^6 \text{ m}^2$ . Σημειώνεται ότι οι ελεύθεροι υδροφόροι της περιοχής αναπύσσονται κυρίως προς τα περιθώρια της πεδιάδας σε μια απόσταση 5 έως 7 Km από την αμμή. Η τροφοδοσία των υδροφορέων αντιστοιχεί στην κατείδυση λόγω βροχοπτώσεων (δεχόμαστε την τιμή των 150 mm) και λόγω τεχνητού εμπλουτισμού (580 mm) σε σύνολο δηλαδή 730 mm. Ο παραπάνω κώδικας προσομοιώνει την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης ροής με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών επί μιας γραμμής ροής για μονοδιάστατη ροή (Lambrakis et Kallergis, 2001). Μια υποτιθέμενη στήλη το μήκος της οποίας (6 Km ταυτίζεται με αυτό της γραμμής ροής) περιλαμβάνει τον υδροφόρο με τα χαρακτηριστικά δεδομένα του Πίνακα 2, ενώ τα ελάλληλα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα ενοποιούνται σε ένα συνολικό πάχος 56 μέτρων που μεταπίπτει σε ελεύθερο στα περιθώρια της λεκάνης.

**Πίνακας 2: Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων οριζόντων του Αργολικού πεδίου (T: Υδραυλική αγωγιμότητα, L: Μήκος της υποτιθέμενης «στήλης» ή γραμμής ροής, b: μέσο πάχος υδροφόρων στρωμάτων, Sy: Αποθηκευτικότητα, I: Κατείδυση, <sup>(1)</sup>(Γιαννουλόπουλος, 2000) α<sub>L</sub>: παράγον διασποράς, CEC: Ικανότητα ιοντοανταλλαγής.**

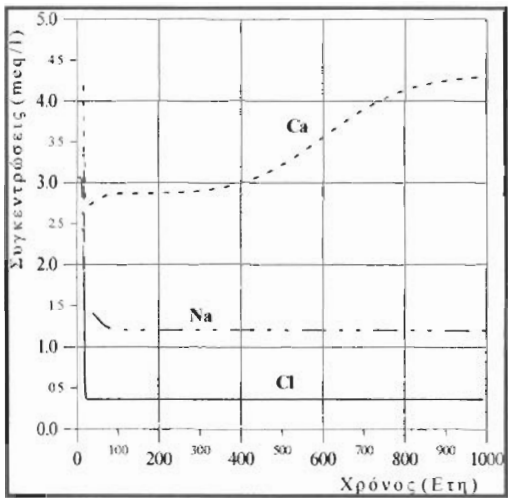
**Table 2: Hydrogeological parameters of the alluvial aquifers of the plain of Argos. (T: Transmissivity, L: Length of a hypothetical aquifer column or length of a flow line, b: average aquifer thickness, Sy: Storage I: average direct recharge, α<sub>L</sub>: dispersivity, <sup>(1)</sup>(Giannouloupoulos, 2000) CEC: Cation exchange capacity.**

Υδροφόροι ορίζοντες	Υδρολιθολογία	Υδραυλικά χαρακτηριστικά	Αντιπροσωπευτικά δείγματα χημικών αναλύσεων (mmol/l)
Υδροφόρος ορίζοντας τειαρτ. σχηματ. Αργολικού πεδίου	Επάλληλα υδροφόρα στρώματα σε αδρομερή κλαστικά υλικά εναλλάσσονται με λεπτ.στεγαν	T=726-1425 m <sup>2</sup> /d <sup>(1)</sup> L=5-7 Km <sup>(1)</sup> b=56 m <sup>(1)</sup> Sy =0.0018 <sup>(1)</sup> I= 730 mm <sup>(1)</sup> α <sub>L</sub> =5.6 m	<u>Brackish water</u> Ca <sup>2+</sup> : 6.60, Mg <sup>2+</sup> : 4.10, Na <sup>+</sup> : 3.06, K <sup>+</sup> : 0.15, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 2.76, Cl <sup>-</sup> : 20.79, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 0.01, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 0.98, pH: 7.29, CEC: 395 meq/l <sup>(1)</sup> <u>Fresh water</u> Ca <sup>2+</sup> : 2.16, Mg <sup>2+</sup> : 0.21, Na <sup>+</sup> : 1.21, K <sup>+</sup> : 0.02, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 4.95, Cl <sup>-</sup> : 0.36, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 0.24, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 0.17, PH: 7.20

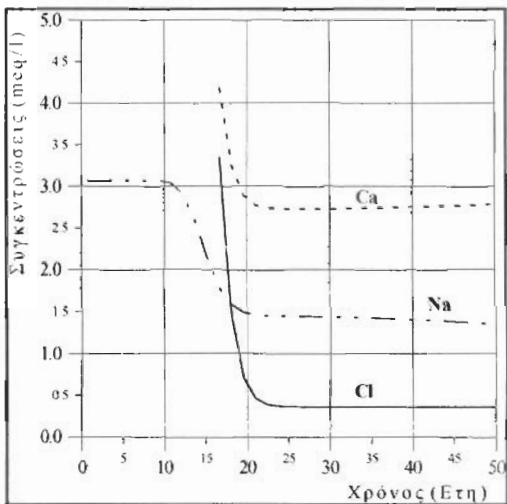
Οι Ειζ. 5α και 5β περιγράφουν τις μεταβολές της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού στο τέλος της γραμμής ροής για την χρονική περίοδο από την έναρξη του τεχνητού εμπλουτισμού έως την στιγμή που τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού αποκτήσουν τις συγκεντρώσεις του φρέσκου νερού που εισάγεται στους υδροφόρους. Όπως φαίνεται στην Ειζ. 5 τα σχετιζόμενα αδρανή στοιχεία Cl και NO<sub>3</sub> απομακρύνονται σε μικρούς χρόνους. Για την πλήρη απομάκρυνση των στοιχείων Ca, Mg, Na και K που συμμετέχουν στην διαδικασία ιοντοανταλλαγής απαιτείται πολύ μεγαλύτερος χρόνος. Στην εικόνα 5α παρατηρείται μία απότομη μείωση της συγκέντρωσης του Ca στα περιθώρια της πεδιάδας, ενώ τα στοιχεία Mg και Na που ακολουθείται από μια παρόμοια μείωση των συγκεντρώσεων του Mg και του Na. Κατά το στάδιο αυτό οι συγκεντρώσεις του Ca

είναι μικρότερες ακόμα και από αυτές του φρέσκου νερού.

Η απότομη μείωση στις συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών είναι το αποτέλεσμα της αραίωσης του υπόγειου νερού που ακολουθεί αμέσως μετά την εισαγωγή του φρέσκου νερού στους υδροφόρους. Για το ασβέστιο οι μειωμένες συγκεντρώσεις ακόμα και κάτω από αυτές του εισαγόμενου νερού κατά την διάρκεια του εμπλουτισμού, οφείλονται στην αντιζατάσταση του Na από το Ca στο σκελετό του υδροφόρου. Στην συνέχεια διαδικασίες εξισορρόπησης των συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών και ιοντοαντάλλαξης έχουν ως αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις του Ca και του Mg να αυξάνονται ενώ του Na συνεχίζουν να μειώνονται. Το Na ξεπλύνεται και αποβάλλεται από το σκελετό του υδροφόρου. Το ίδιο συμβαίνει και με το Mg η σταδιακή απομάκρυνση του οποίου είναι η αιτία των χαμηλών συγκεντρώσεων Ca αφού συνεχίζεται η αντιζατάσταση του στο σκελετό του υδροφόρου από το ασβέστιο. Αφού τέλος απομακρυνθούν τα στοιχεία Na, K και Mg οι συγκεντρώσεις Ca παίρνουν τις τιμές του νερού εμπλουτισμού και αυτό επιτυγχάνεται ολοκληρωτικά μετά από 1000 περίπου χρόνια. Οι παραπάνω περιγραφείσες μεταβολές στοιχειοθετούν και τα χαρακτηριστικά χρωματογραφίας που λαμβάνουν συγχρόνως χώρα στους υδροφόρους (Valocchi et al., 1981).



**Σχήμα 5α:** Υπολογισμένες μεταβολές των συγκεντρώσεων επιλεγμένων ιόντων του υπόγειου νερού σύμφωνα με το σενάριο του τεχνητού εμπλουτισμού.  
**Figure 5a:** Computed changes of the concentration of selected ions of groundwater according to the scenario of artificial recharge



**Σχήμα 5β:** Υπολογισμένες μεταβολές των συγκεντρώσεων επιλεγμένων ιόντων του υπόγειου νερού σύμφωνα με το σενάριο του τεχνητού εμπλουτισμού, Λεπτομέρεια από το Σχήμα 5<sup>α</sup>  
**Figure 5b:** Computed changes of the concentration of the selected ions of groundwater according to the scenario of artificial recharge – a detail of Figure 5<sup>a</sup>

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την επεξεργασία και την ανάλυση των υδροχημικών δεδομένων του Αργολικού πεδίου διαπιστώθηκε ότι τα υπόγεια νερά είναι υποβαθμισμένα λόγω της έντονης αγροτικής δραστηριότητας στη περιοχή καθώς και της επίδρασης της θάλασσας. Οι συγκεντρώσεις των αλάτων είναι υψηλές λόγω θαλάσσιας διείσδυσης με τις τιμές των χλωριόντων να ξεπερνούν κατά τόπους τα 600 mg/l. Λόγω εντατικών ληπίσεων οι τιμές των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων είναι επίσης πολύ υψηλές και ξεπερνούν κατά τόπους τα 100 mg/l, ενώ κάτω από συνθήκες οξειδωτικές (υψηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου (DO) και δυναμικού οξειδωτικού (Eh) τα νιτρικά ιόντα συμπεριφέρονται ως αδρανή ιόντα. Από τις προβολές στο αναπτυγμένο διάγραμμα Durov διαπιστώθηκε η παρουσία των  $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$  και  $\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$  υδροχημικών τύπων που αντιστοιχούν σε διαδικασίες ιοντοαντάλλαξης. Με την χρήση του λογισμικού PHREEQM εκτιμήθηκε ο χρόνος απορρύπανσης σε ένα υποθετικό σενάριο διακοπής των αντλήσεων και καθολικού τεχνητού εμπλουτισμού (περίπου 730 πμ/έτος) λαμβάνοντας υπόψη και το μηχανισμό της ιοντοαντάλλαξης. Υπολογίστηκε ότι ο χρόνος απορρύπανσης, για τα μη δραστηριοποιημένα ιόντα, είναι 18 με 22 έτη περίπου. Το ίδιο συμβαίνει και για την αποκατάσταση των συγκεντρώσεων της κύριας μάζας των

ιώντων Na, Ca, και Mg που επiplέζονται στο φαινόμενο της ιοντοανταλλαγής. Η πλήρης αποκατάσταση της ποιότητας του υπόγειου νερού σε σχέση με τα στοιχεία αυτά καθυστερεί και γ' αυτό απαιτούνται 1000 χρόνια περίπου. Είναι φανερό ότι για την πλέον πιθανή περίπτωση της μη εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού οι χρόνοι φυσικής αποκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτεροι (Lambrakis et Kallergis, 2001).

**Ευχαριστίες:** Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε μερικώς, σε σχέση με τον πρώτο εκ των συγγραφέων από το Πρόγραμμα Καταθεδορική της Επιτροπής Ερευνών του Πανεπιστημίου Πατρών. Εμφράζονται θερμές ευχαριστίες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ANTONAKOS, A., LAMBRAKIS, N., 2000. Hydrodynamic characteristics and nitrate propagation in Sparta aquifer. *Wat. Res.* 34, 3977-3986.
- APPELO, C. A. J. AND POSTMA, D. 1993. *Geochemistry, Groundwater and pollution*, 535 pp. (A.A. Balkema), Rotterdam.
- BURDON, D.J. & MALZOU, F. 1958. Some chemical types of groundwater from Syria. *UNESCO Symposium, Teheran, Paris*, pp. 73-90.
- ΓΙΑΝΝΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ, Π. 2000. Υπόγεια υδραυλική και μαθηματικά μοντέλα στο Αργολικό πεδίο. Διδακτορική Διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, σελ. 362.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*, 604pp. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs), New Jersey.
- ΘΑΝΟΣ Μ. 1994. Παρατηρήσεις – συμπεράσματα από πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού υδροφόρων στο Αργολικό πεδίο. *Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας, Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Τόμος Α:* 119-134.
- ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΣ, Δ., Παπαπέτρου-Ζαμάνη, Α. 1970. Γεωλογικά και φυσιογραφικά έρευναι επί του Αργολικού Πεδίου. *Ann. Geol. Pays Hell.*, XXII, 267-294.
- JACOBSSHAGEN, V. 1986. *Geologic von Griechenland*. 363pp. (Gebröder Borntröger), Berlin-Stuttgart.
- JACOBSSHAGEN, V., RICHTER, D., ΜΑΚΡΗΣ, J., BACHMANN, G. H., GIESE, P. & RISCH, H. 1978. Alpidic development and structure of the Peloponnusus. In H. Closs et al. (eds): *Alps, Apennines, Hellenides.*, 38, 415-423.
- ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν. 1991. Επεξεργασία των δεδομένων των χημικών αναλύσεων των νερών. *Ορυκτός Πλούτος* 74,53-60.
- LAMBRAKIS, N., KALLERGIS, G. 2001. Reaction of subsurface coastal aquifers to climate and land use changes in Greece. *Modelling of groundwater refreshing patterns under natural recharge conditions. Journal of Hydrology*, 245,19-31.
- LLOYD, W. J. & HEATHCOTE A. J. 1985. *Natural inorganic chemistry in relation to groundwater*, 250 pp. (Clarendon Press), Oxford.
- ΠΑΠΑΣΤΑΜΑΤΟΥ, Ι., ΒΕΤΟΥΛΗΣ, Δ., ΤΑΤΑΡΗΣ, Α., ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ, Γ., ΜΠΟΡΝΟΒΑΣ, Ι., ΛΑΛΕΧΟΣ, Ν., ΚΟΥΝΗΣ, Γ. 1970. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Αργος, 1:50 000. Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήνα.
- ΠΕΤΑΛΑΣ, Χ. 1997. Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, σελ. 288.
- PARKHURST, D.L., THORSTENSON, D. C., AND PLUMMER, L. N. 1980. PHREEQE- A computer program for geochemical calculations. *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest.*, No 80-96, 210 pp.
- PETALAS C. P., DIAMANTIS, V.J. 1999. Origin and distribution of saline groundwaters in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northeastern Greece. *Hydrogeology Journal*, 7 (3), 305-316.
- ΠΟΥΛΟΒΑΣΙΛΗΣ, Α., ΚΕΡΚΙΔΗΣ, Π. & ΛΙΑΚΑΤΑΣ, Α. 1993. Λειψυδρία και Αρδεύσεις. Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρείου ΓΕΩΤΕΕ, Λειψυδρία και Πλυμμήνες, 17-18 Μαρτίου 1992, Θεσσαλονίκη, σελ 59-88.
- ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, Π., ΦΩΤΙΑΔΗΣ, Α. & ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ. 1995. Υδρογεωλογικές δομές ανατολικού ορεινού μετώπου του Αργολικού πεδίου-Φαινόμενα υφαλμύρωσης. Πρακτικά 3ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 3-5 Νοεμβρίου 1995, 380-392, Ηράκλειο.
- VALOCCHI, A. J, STREET, R. L. & ROBERTS, P. V. 1981. Transport of ion-exchanging solutes in groundwater: Chromatographic theory and field simulation, *Water Resour. Res.*, 17, 1517-1521.
- TAVITIAN, I., ΤΗΝΙΑΚΟΣ, Α. & ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν. 1993. Αξιολόγηση δεδομένων αντλητικών δικασιών και υδροχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών των κροκαλοπαγών βορειοδυτικά του Αργολικού πεδίου. Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28 Νοεμβρίου 1993, Πάτρα, Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος Α:387-401, Αθήνα.
- ΤΑΤΑΡΗΣ, Α., ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., ΚΟΥΝΗΣ, Γ., ΒΙΖΟΝ, G. & ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ, Γ. 1970. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Ναύπλιο, 1:50 000. Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήνα.