

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΔ ΑΧΑΪΑΣ

Βουδούρης Κ.<sup>1</sup>, Νίκας Κ.<sup>2</sup> και Αντωνάκος Α.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Εργ. Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, knvoudour@geo.auth.gr*

<sup>2</sup> *ΙΓΜΕ, Μεσογείων 70, 115 27 Αθήνα*

<sup>3</sup> *Εργ. Υδρογεωλογίας, Τμ. Γεωλογίας, Παν. Πατρών, 26110 Ρίο, Πάτρα*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προβλήματα θαλάσσιας διείσδυσης έχουν καταγραφεί σε πολλούς παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες, οι οποίοι αποτελούν την κυριότερη πηγή για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών των περιοχών αυτών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων 29 δειγμάτων υπόγειου νερού από την περιοχή της ΒΔ/κής Αχαΐας, όπου διαπιστώνεται ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο. Η χωρική κατανομή των υδροχημικών τύπων φανερώνει έντονες υδροχημικές διεργασίες στο υπόγειο νερό, λόγω κυρίως της διείσδυσης της θάλασσας, με κυριότερη αυτήν της κατιονταλλαγής. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων προκύπτει ότι στην πλειονότητα των δειγμάτων επικρατεί ο τύπος Ca-Cl, που υποδηλώνει προέλαση του μετώπου υφαλμύρισης. Επίσης από τη γεωγραφική κατανομή του δείκτη  $Ca_{react}$  εντοπίζονται περιοχές προέλασης και υποχώρησης του μετώπου υφαλμύρισης στην περιοχή έρευνας.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υπόγειο νερό είναι ένας ανανεώσιμος φυσικός πόρος με την προϋπόθεση της ύπαρξης ισορροπίας μεταξύ εμπλουτισμού και εκφόρτισης σε ένα υδροφορέα μιας λεκάνης. Όταν οι απολήψεις ποσότητες υπόγειου νερού υπερβούν την ικανότητα της ασφαλούς απόδοσης (safe yield) ενός παράκτιου υδροφορέα παρατηρούνται φαινόμενα θαλάσσιας διείσδυσης, που είναι ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών.

Γενικά η υφαλμύριση οφείλεται στην υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων, που οδηγεί στον υποβιβασμό της στάθμης και τη διείσδυση της θάλασσας. Η σημαντική αύξηση των αντλούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού τα τελευταία χρόνια από μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων με συνεχώς αυξανόμενο βάθος, οδήγησε στην ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού στις παράκτιες περιοχές σε επίπεδα κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας και αυτό είχε ως συνέπεια την προέλαση της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα, μέχρι να φθάσει σε μια νέα ισορροπία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης στην περιοχή της ΒΔ/κής Αχαΐας. Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο ΒΔ/κό τμήμα του Νομού Αχαΐας (ακρωτήριο Αράξου). Τα κύρια οικιστικά κέντρα είναι ο Λάπας, τα Σαγαΐικα και η Βάρδα. Εντός των ορίων της περιοχής βρίσκονται οι λιμνοθάλασσες Λάμια και Πρόκοπος, καθώς και το δάσος της Στροφυλιάς. Η περιοχή είναι αγροτική, ενώ παράλληλα αναπτύσσεται και τουριστικά. Υπάρχουν διάσπαρτες κτηνοτροφικές μονάδες, θερμοκήπια και συσκευαστήρια αγροτικών προϊόντων. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών γίνεται κυρίως με την εκμετάλλευση των υπόγειων νερών από μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων μεγάλου βάθους. Η εντατική εκμετάλλευση, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε ποσοτική μείωση με εγκατάσταση αρνητικού ισοζυγίου, καθώς και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών (Νίκας et al. 2001).

Οι Σταυρόπουλος & Κουμαντάκης (1992) διαπιστώνουν συνεχή πτώση της στάθμης των υδροφόρων οριζόντων κατά την περίοδο 1987-1991 σε δίκτυο 22 υδρογεωτρήσεων της περιοχής. Επί-

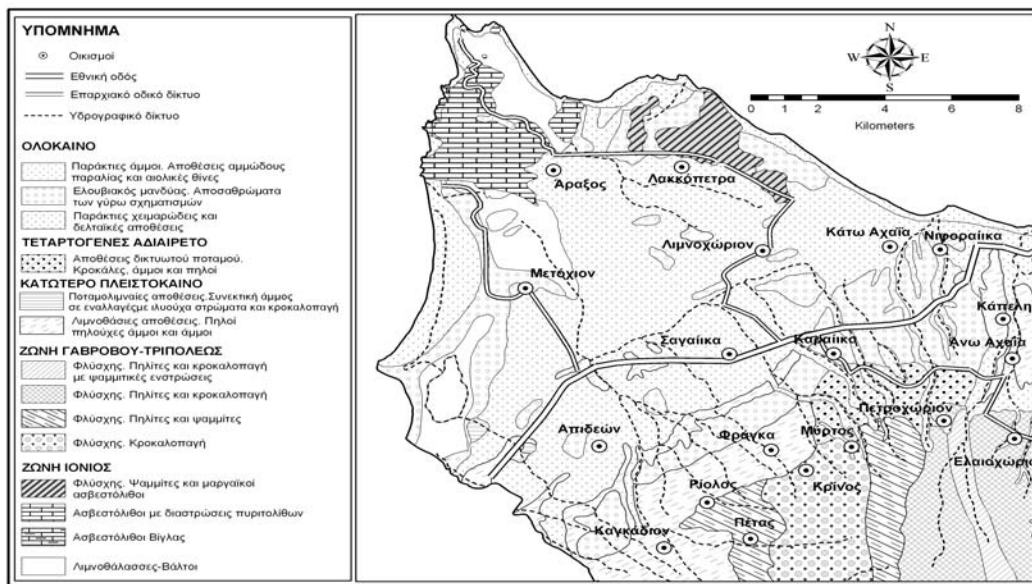
σης οι ίδιοι ερευνητές διαπιστώνουν αυξημένες συγκεντρώσεις σε ιόντα χλωρίου και νιτρικών με την υφαλμύριση να είναι πιο έντονη στη βόρεια παράκτια ζώνη.

Στα πλαίσια της έρευνας πραγματοποιήθηκε υδρογεωλογική αναγνώριση της περιοχής, πιεζομετρία και υδροχημική μελέτη. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 1997-1999. Η εκπόνηση της έρευνας έγινε στα πλαίσια προγράμματος του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) με χρηματοδότηση από το Β' Κ.Π.Σ.

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή της ΒΔ/κής Αχαΐας (Σχ. 1) καλύπτεται από μεταλλικές αποθέσεις μεγάλου πάχους, εντός των οποίων αναπτύσσονται επάλληλοι υδροφόροι ορίζοντες. Η ηλικία των αποθέσεων είναι ανωπλειοκαινική έως ολοκαινική (Σταυρόπουλος & Κουμαντάκης 1992). Το αλπικό υπόβαθρο αντιπροσωπεύεται από φλύσχη (λόφος Λάκκα Ντράσα) και ασβεστολίθους (λόφος Μαύρα Βουνά).

Οι πλειοτεταρτογενείς αποθέσεις χαρακτηρίζονται από στρωματογραφική ανομοιογένεια και αποτελούνται από εναλλαγές αργίλων, μαργών, ψαμμιτών, χαλίκων, άμμων και χαλαρών κροκαλοπαγών. Οι εναλλαγές στη λιθολογία είναι απότομες και συχνά εμφανίζονται μεικτοί χαρακτήρες. Το πάχος των αποθέσεων είναι μεγάλο και φθάνει μέχρι 1000 m (Βουδούρης 1995).



Σχήμα 1. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

Εντός των ανωτέρω αποθέσεων φιλοξενούνται σημαντικοί επάλληλοι υδροφόροι ορίζοντες, υπό πίεση ή μερικής υπό πίεση, από την εκμετάλλευση των οποίων καλύπτονται οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Η υδροφορία κατά τόπους εξαρτάται από το πάχος, την κοκκομετρία και τη στρωματογραφική διάταξη. Η τροφοδοσία των υδροφόρων οριζόντων κυρίως από τη διήθηση νερών από τις κοίτες των υδρορευμάτων και από την απευθείας κατείσδυση νερού της βροχόπτωσης στις περιοχές όπου τα αδρομερή μέλη αναπτύσσονται επιφανειακά.

## 3 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

Όταν η στάθμη του υπόγειου νερού κοντά στην ακτή είναι κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας δεν ισχύει ο γνωστός νόμος του Ghyden-Herzberg υδροστατικής προσέγγισης για μη αναμίξιμα υγρά (Todd 1980). Στις περιπτώσεις αυτές λαμβάνεται υπόψη η δυναμική προσέγγιση, που θεωρεί μια μεταβατική ζώνη μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού, με αυξανόμενη συγκέντρωση ιόντων Cl<sup>-</sup> από το γλυκό προς το θαλασσινό νερό. Ανάλογα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της πε-

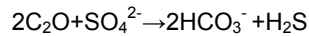
ριοχής μια υποθετική ζώνη αντιπροσωπεύει τη ζώνη ανάμιξης (μεταβατική ζώνη) μεταβλητού πάχους, στην οποία το ανώτερο και το κατώτερο όριο συμμετοχής του θαλασσινού νερού είναι 1% και 95%, αντίστοιχα (Ergil 2000). Πράγματι το θαλασσινό και το γλυκό νερό είναι αναμίξιμα υγρά και η μεταβατική ζώνη προκαλείται κυρίως από υδροδυναμική διασπορά.

Η ανάπτυξη του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης σχεδόν συμπίπτει με την περιοχή, όπου η στάθμη του υπόγειου νερού είναι κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Η αύξηση της ταχύτητας ροής σε περιοχές με έντονες αντλήσεις επιταχύνει τη θαλάσσια διείσδυση (Xue et al. 1993).

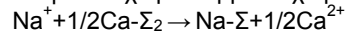
Από υδρογεωχημική άποψη η υπαλμύριση των υδροφόρων συνίσταται από ένα υψηλής αλατότητας διάλυμα (θαλασσινό νερό) αναμειγμένο με ένα αραιωμένο διάλυμα (γλυκό νερό) σε ένα πορώδες μέσο, που περιέχει πολλά δραστικά στερεά (ορυκτά) (Martinez & Bocanegra 2002).

Οι Walraevens et al. (1993) αναφέρουν ότι η υπαλμύριση αρχίζει με αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων που ακολουθείται από ανταλλαγή κατιόντων, κατά την οποία απελευθερώνεται  $Ca^{2+}$  και απορροφώνται ιόντα θαλάσσιας προέλευσης  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ . Η ανταλλαγή κατιόντων είναι ένας ρυθμιστικός παράγοντας των ιοντικών συγκεντρώσεων στο νερό και αποτελεί μια από τις πλέον σημαντικές γεωχημικές διαδικασίες της θαλάσσιας διείσδυσης (Gimenez & Morell 1997, Hafı 1997).

Η αναγωγή των θειικών είναι μια τυπική αντίδραση σε μερικά μείγματα θαλασσινού/γλυκού νερού (Bosch & Custodio 1993). Η αντίδραση περιλαμβάνει οξείδωση του οργανικού υλικού σε ένα αναερόβιο περιβάλλον:



Όταν διεισδύσει θαλασσινό νερό στην ενδοχώρα λαμβάνει χώρα ιοντοανταλλαγή:



όπου  $\Sigma$  είναι η στερεά φάση στην οποία λαμβάνει χώρα η ανταλλαγή (ιοντοανταλλάκτης).

Κατά τη διάρκεια της μετατόπισης του γλυκού ή του θαλασσινού νερού, τα διαλυμένα κατιόντα μπορεί να διαχωρισθούν, εξαιτίας της κατιονταλλαγής, φαινόμενο που είναι γνωστό ως ιοντική χρωματογραφία (ion chromatography), (Arello & Postma 1996). Στη διαδικασία αυτή λόγω της διαφορετικής επιλεκτικότητας των φυσικών κατιονταλλακτών στα διάφορα κατιόντα, τα διαλυμένα κατιόντα διαχωρίζονται στον χώρο. Έτσι προκύπτει η κατανομή των υδροχημικών φάσεων του υπόγειου νερού από τη διείσδυση της θάλασσας.

#### 4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ -ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τη μελέτη της ποιότητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων σε 29 δείγματα υπόγειου νερού (Σχ. 2). Τα δείγματα συλλέχθηκαν τις υγρές περιόδους 1997 και 1999 και οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ΙΓΜΕ. Προσδιορίστηκαν οι εξής παράμετροι και δείκτες (Πίν. 1):  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , pH, αγωγιμότητα, TDS, ο δείκτης Revelle και η ιοντική ισχύς.

Η συγκέντρωση  $Cl^-$  είναι ένας ιδανικός ιχνηθέτης για να εξακριβωθεί η θαλάσσια διείσδυση. Γενικά μια συγκέντρωση των  $Cl^-$  της τάξεως των 100 mg/L στα υπόγεια νερά θεωρείται σαν δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης. Για την πιστοποίηση της προέλευσης των χλωριόντων έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες, οι οποίοι προσδιορίζουν τη συνεισφορά της διείσδυσης της θάλασσας στην αύξηση της συγκέντρωσης χλωριόντων στο υπόγειο νερό (Revelle, ιοντική ισχύς κ.ά).

Ο δείκτης Revelle (R) εκφράζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{rCl^-}{rCO_3^{2-} + rHCO_3^-} \quad (1)$$

Τιμές του δείκτη Revelle μεγαλύτερες του 1 υποδηλώνουν ρύπανση του υπόγειου νερού από διείσδυση της θάλασσας.

Η ιοντική ισχύς είναι ένα μέτρο της ολικής συγκέντρωσης των ιόντων και δίνεται από τον τύπο:

$$I=0,5 \sum M_i Z_i^2 \quad (2)$$

όπου  $M_i$  είναι η μοριακή συγκέντρωση (mol/L) του i-οστού ιόντος και  $Z_i$  είναι το φορτίο του. Οι Domenico & Schwartz (1990) αναφέρουν ότι το γλυκό νερό έχει ιοντική ισχύ  $I < 0,005$ .

Τα δείγματα του υπόγειου νερού στους παράκτιους υδροφόρους εμφανίζουν πλεόνασμα  $\text{Ca}^{2+}$ , που υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση ή πλεόνασμα  $\text{Na}^+$ , που υποδηλώνει διείσδυση γλυκού νερού.

Σύμφωνα με τους Appelo & Postma (1996), όταν στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες υπάρχει μείξη γλυκού και θαλασσινού νερού, η συγκέντρωση  $m_{i,mix}$  του τυχαίου ιόντος  $i$  προσδιορίζεται ως κλάσμα συμμετοχής των δύο ακραίων μελών, που είναι το θαλασσινό και το γλυκό νερό, με μέσες συστάσεις που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την εξίσωση:

$$M_{i,mix} = f_{sea} \cdot M_{i,sea} + (1 - f_{sea}) \cdot M_{i,fresh} \quad (3)$$

όπου  $M_i$  = η συγκέντρωση ιόντος  $i$  (mmol/L)

$f_{sea}$  = το κλάσμα του θαλασσινού νερού που συμμετέχει στο δείγμα

$M_{i,sea}$  = η συγκέντρωση του ιόντος  $i$  στο θαλασσινό νερό

$M_{i,fresh}$  = η συγκέντρωση του ιόντος  $i$  στο γλυκό νερό

Έτσι κάθε μεταβολή στη χημική σύσταση του υπόγειου νερού, που οφείλεται σε αντιδράσεις (εκτός της μείξης), μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$M_{i,react} = M_{i,sample} - M_{i,mix} \quad (4)$$

όπου  $M_{i,react}$  = συγκέντρωση του ιόντος  $i$  που μεταβάλλεται, λόγω διαδικασιών πλην της μείξεως

$M_{i,sample}$  = συγκέντρωση του ιόντος  $i$  που μετρήθηκε στο δείγμα υπόγειου νερού

Το κλάσμα συμμετοχής του θαλασσινού νερού υπολογίζεται με βάση τη συγκέντρωση  $\text{Cl}^-$  στο δείγμα, διότι το  $\text{Cl}^-$  θεωρείται συντηρητικό ιόν, δηλ. δεν μεταβάλλεται αισθητά λόγω υδροχημικών διεργασιών και δίνεται από τη σχέση:

$$f_{sea} = \frac{M_{\text{Cl}^-,sample} - M_{\text{Cl}^-,fresh}}{M_{\text{Cl}^-,sea} - M_{\text{Cl}^-,fresh}} \quad (5)$$

Δεδομένου ότι η συγκέντρωση  $\text{Cl}^-$  στο γλυκό νερό θεωρείται 0 meq/L, ενώ στο θαλασσινό 566 meq/L, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η εξίσωση παίρνει την κάτωθι απλοποιημένη μορφή:

$$f_{sea} = \frac{M_{\text{Cl}^-,sample}}{566} \quad (6)$$

Πίνακας 1. Τυπικές συστάσεις των ακραίων μελών γλυκού και θαλασσινού νερού που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της μείξης.

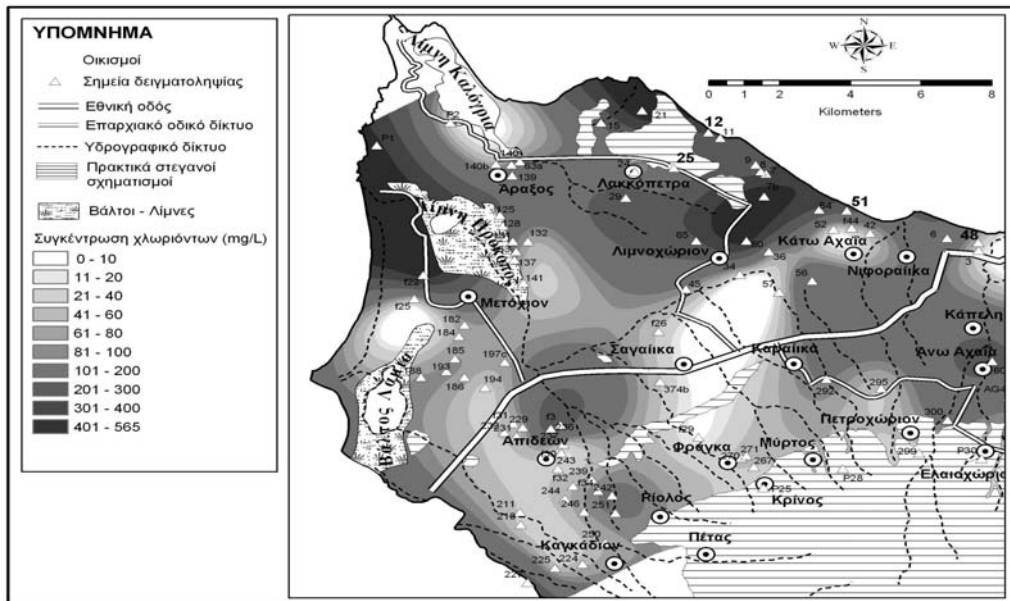
	Τυπική σύσταση θαλασσινού νερού (meq/L)	Τυπική σύσταση θαλασσινού νερού (mg/L)	Τυπική σύσταση γλυκού νερού πριν τη δράση υδροχημικών διεργασιών (meq/L)	Τυπική σύσταση γλυκού νερού πριν τη δράση υδροχημικών διεργασιών (mg/L)
$\text{Na}^+$	485,0	11.155	0,0	0,0
$\text{K}^+$	10,6	414,5	0,0	0,0
$\text{Mg}^{2+}$	55,1	669,8	0,0	0,0
$\text{Ca}^{2+}$	10,7	214,4	3,0	60,1
$\text{Cl}^-$	566,0	20.063,8	0,0	0,0
$\text{HCO}_3^-$	2,4	146,4	6,0	366,0
$\text{SO}_4^{2-}$	29,3	1.407,3	0,0	0,0

Με βάση τις εξισώσεις 3, 4, 5 και 6 υπολογίζονται οι ποσότητες  $M_{i,mix}$  και  $M_{i,react}$  για όλα τα βασικά ανιόντα και κατιόντα των 29 δειγμάτων υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας, στα οποία η συγκέντρωση  $\text{Cl}^-$  υπερέβαινε τα 100 mg/L (Πίν. 2).

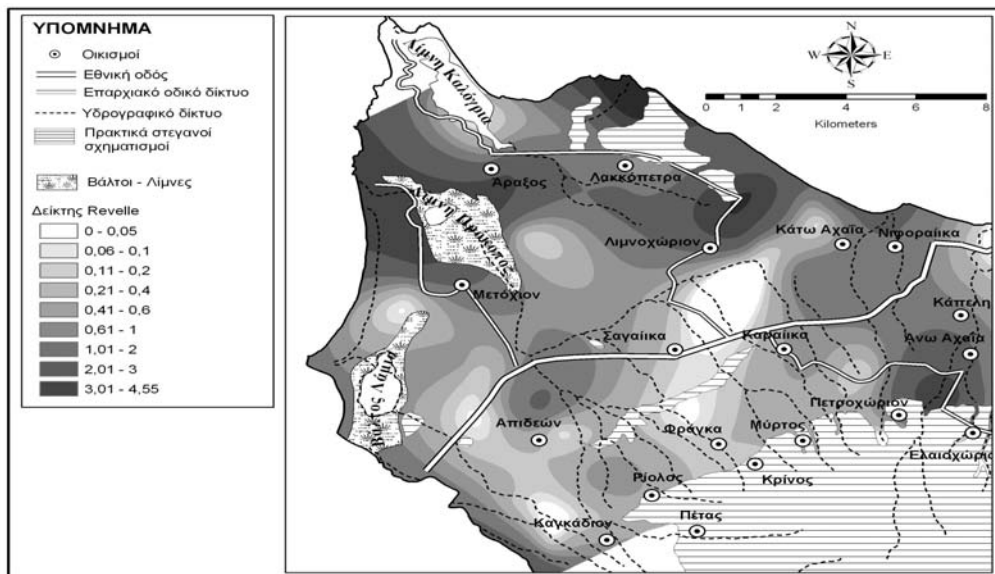
Θετικές τιμές της ποσότητας  $\text{Ca}_{react}$  και αντίστοιχα αρνητικές τιμές της ποσότητας  $\text{Na}_{react}$  φανερώνουν επικράτηση του υδροχημικού τύπου νερού Ca-Cl, που υποδηλώνει προέλαση του μετώ-

που υφαλμύρινσης. Η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η υποχώρηση του μετώπου εκδηλώνεται με την επικράτηση του υδροχημικού τύπου Na-HCO<sub>3</sub>, δηλ. θετικό Na<sub>react</sub> και αρνητικό Ca<sub>react</sub>.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων σε διαγράμματα Piper διευκολύνει την αναγνώριση γεωχημικών διαδικασιών, που λαμβάνουν χώρα κατά τη ρύπανση των υπόγειων νερών. Τα αποτελέσματα της ανταλλαγής κατιόντων είναι ιδιαίτερα εμφανή στο διάγραμμα αυτό (Πεταλάς et al. 1997, Edet & Okereke 2001). Όταν λαμβάνει χώρα μόνο κατιοανταλλαγή τα σημεία προβάλλονται παράλληλα προς την εξωτερική πλευρά του ρόμβου, ενώ όταν συμβαίνουν άλλες αντιδράσεις τα σημεία αποκλίνουν από την εξωτερική πλευρά. Διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου αντικατοπτρίζεται από τη μετακίνηση των σημείων προς τη γωνία Ca<sup>2+</sup> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Η αναγωγή των SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> μετακινεί τα σημεία σε θέση παράλληλη με τον άξονα των ανιόντων. Απόθεση του CaCO<sub>3</sub> οδηγεί τα σημεία προς τη γωνία Na<sup>+</sup> και (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+Cl<sup>-</sup>).



Σχήμα 2. Χάρτης κατανομής των χλωριόντων (mg/L) στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 3. Χάρτης κατανομής του συντελεστή Revelle στην περιοχή έρευνας

Πίνακας 2. Υπολογισμός του κλάσματος  $f_{sea}$ , των ποσοτήτων  $M_{i,mix}$  και  $M_{i,react}$  (mgr/L) για τα κυριότερα κατιόντα και ανιόντα, καθώς και της ιοντικής ισχύος (Μάιος 1997).

Κωδικός	$f_{sea}$ %	$Ca^{+2}$	$Ca^{+2}_{mix}$	$Ca^{+2}_{react}$	$Mg^{+2}$	$Mg^{+2}_{mix}$	$Mg^{+2}_{react}$	$Na^+$	$Na^+_{mix}$	$Na^+_{react}$	$K^+$	$K^+_{mix}$	$K^+_{react}$	$HCO_3^-$	$HCO_3^-_{mix}$	$HCO_3^-_{react}$	$Cl^-$	$SO_4^{-2}$	$SO_4^{-2}_{mix}$	$SO_4^{-2}_{react}$	I
12	1,50	262,9	62,4	200,5	51,1	10,1	41,0	149,0	167,5	-18,5	3,5	6,2	-2,7	280,7	362,8	-82,1	301,4	278,6	21,1	257,4	0,0057
125	1,01	161,1	61,7	99,4	31,6	6,7	24,9	94,3	112,3	-18,0	10,2	4,2	6,0	152,6	363,9	-211,3	202,1	159,5	14,2	145,3	0,0043
139	0,72	110,6	61,2	49,4	17,5	4,9	12,6	69,0	80,8	-11,8	2,0	3,0	-1,0	139,1	364,5	-225,4	145,4	122,0	10,2	111,8	0,0030
15	1,08	178,0	61,8	116,2	30,2	7,2	22,9	128,7	120,2	8,5	2,0	4,5	-2,5	299,0	363,7	-64,7	216,3	144,1	15,2	128,9	0,0038
21	2,35	280,6	63,7	216,8	28,7	15,7	13,0	137,9	262,0	-124,1	3,1	9,7	-6,6	212,4	360,9	-148,6	471,6	155,1	33,1	122,1	0,0059
227	1,22	166,7	62,0	104,7	19,9	8,2	11,8	85,1	136,0	-50,9	2,0	5,1	-3,1	262,4	363,4	-101,0	244,7	98,0	17,2	80,8	0,0026
236	1,20	32,1	62,0	-29,9	7,3	8,0	-0,7	275,9	134,0	141,9	3,1	5,0	-1,9	436,9	363,4	73,5	241,1	2,4	16,9	-14,5	0,0025
242	0,57	83,4	61,0	22,4	32,6	3,8	28,8	77,2	63,0	14,2	3,1	2,3	0,8	383,2	364,8	18,4	113,5	33,6	8,0	25,7	0,0025
25	0,67	22,4	61,2	-38,7	4,9	4,5	0,4	306,9	74,9	232,0	3,1	2,8	0,3	482,1	364,6	117,5	134,7	144,1	9,5	134,7	0,0033
29	1,27	44,9	62,1	-17,2	26,3	8,5	17,7	229,9	141,9	88,0	15,6	5,3	10,4	412,5	363,3	49,2	255,3	37,9	17,9	20,0	0,0035
292	0,51	118,6	60,9	57,7	34,1	3,4	30,6	33,3	57,1	-23,8	1,2	2,1	-1,0	390,5	365,0	25,6	102,8	27,4	7,2	20,2	0,0026
300	0,58	16,0	61,0	-45,0	7,8	3,9	3,9	89,7	65,0	24,7	2,7	2,4	0,3	79,3	364,8	-285,5	117,0	36,0	8,2	27,8	0,0021
36	0,62	77,0	61,1	15,9	22,4	4,1	18,2	93,1	69,0	24,1	4,7	2,6	2,1	363,7	364,7	-1,0	124,1	20,2	8,7	11,5	0,0012
51	1,12	118,6	61,9	56,8	36,5	7,5	29,0	117,3	125,1	-7,9	3,5	4,7	-1,1	393,0	363,6	29,4	225,2	48,0	15,8	32,2	0,0025
54	1,41	35,3	62,3	-27,0	27,2	9,5	17,8	410,4	157,6	252,8	5,1	5,9	-0,8	856,7	363,0	493,7	283,7	0,5	19,9	-19,4	0,0043
56	0,90	113,8	61,5	52,3	37,0	6,0	30,9	124,1	100,5	23,6	7,0	3,7	3,3	402,7	364,1	38,6	180,8	128,7	12,7	116,0	0,0028
6	0,82	109,0	61,4	47,6	44,7	5,5	39,2	137,9	91,6	46,3	12,5	3,4	9,1	429,6	364,3	65,3	164,9	149,4	11,6	137,8	0,0029
60	2,14	181,2	63,4	117,7	56,4	14,3	42,1	158,6	238,4	-79,8	5,9	8,9	-3,0	305,1	361,4	-56,3	429,0	164,3	30,1	134,2	0,0057
65	1,45	163,5	62,4	101,2	43,3	9,7	33,6	137,9	161,6	-23,7	9,8	6,0	3,8	316,1	362,9	-46,8	290,7	223,8	20,4	203,4	0,0035
7b	2,30	166,7	63,7	103,1	37,5	15,4	22,1	252,9	256,1	-3,3	7,0	9,5	-2,5	274,6	361,0	-86,4	460,9	144,1	32,3	111,8	0,0050
9	1,18	168,3	61,9	106,4	28,2	7,9	20,3	133,3	132,0	1,3	3,1	4,9	-1,8	353,9	363,5	-9,6	237,6	134,0	16,7	117,3	0,0036
AF48	0,67	112,2	61,2	51,0	19,9	4,5	15,4	149,4	74,9	74,5	2,7	2,8	-0,1	360,0	364,6	-4,6	134,7	163,3	9,4	153,9	0,0027
AG46	0,95	102,6	61,6	41,0	32,1	6,4	25,7	110,4	106,4	4,0	4,3	4,0	0,3	244,1	364,0	-119,9	191,5	122,5	13,4	109,1	0,0046
AG47	1,18	165,9	61,9	104,0	25,3	7,9	17,4	62,1	132,0	-69,9	1,6	4,9	-3,3	317,3	363,5	-46,2	237,6	36,5	16,7	19,8	0,0051
AG49	0,60	150,7	61,0	89,7	13,1	4,0	9,1	29,2	67,0	-37,8	1,2	2,5	-1,3	357,6	364,8	-7,2	120,6	24,0	8,5	15,5	0,0023
F17	0,54	128,3	61,0	67,3	14,1	3,6	10,5	46,9	60,1	-13,2	5,1	2,2	2,8	396,6	364,9	31,7	108,1	12,0	7,6	4,4	0,0024
F25	2,17	272,5	63,5	209,1	53,0	14,6	38,5	258,6	242,3	16,3	269,8	9,0	260,8	373,4	361,3	12,1	436,1	270,9	30,6	240,3	0,0053
F48	0,67	112,2	61,2	51,0	19,9	4,5	15,4	149,4	74,9	74,5	2,7	2,8	-0,1	360,0	364,6	-4,6	134,7	163,3	9,4	153,9	0,0031
F4b	2,12	139,5	63,4	76,1	41,8	14,2	27,6	220,7	236,4	-15,7	5,5	8,8	-3,3	341,7	361,4	-19,7	425,5	119,1	29,8	89,3	0,0043

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται από τη γεωγραφική κατανομή των χλωριόντων στην περιοχή έρευνας (Σχ. 2), αλλά και του δείκτη Revelle (Σχ. 3), καθώς και τις τιμές της ιοντικής ισχύος (Πίν. 2), το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο στη ΒΔ/κή Αχαΐα, όπου εντοπίζονται διάφορα μέτωπα υφαλμύρισης, π.χ. Λακόπετρα, Άραξος, Μετόχι.

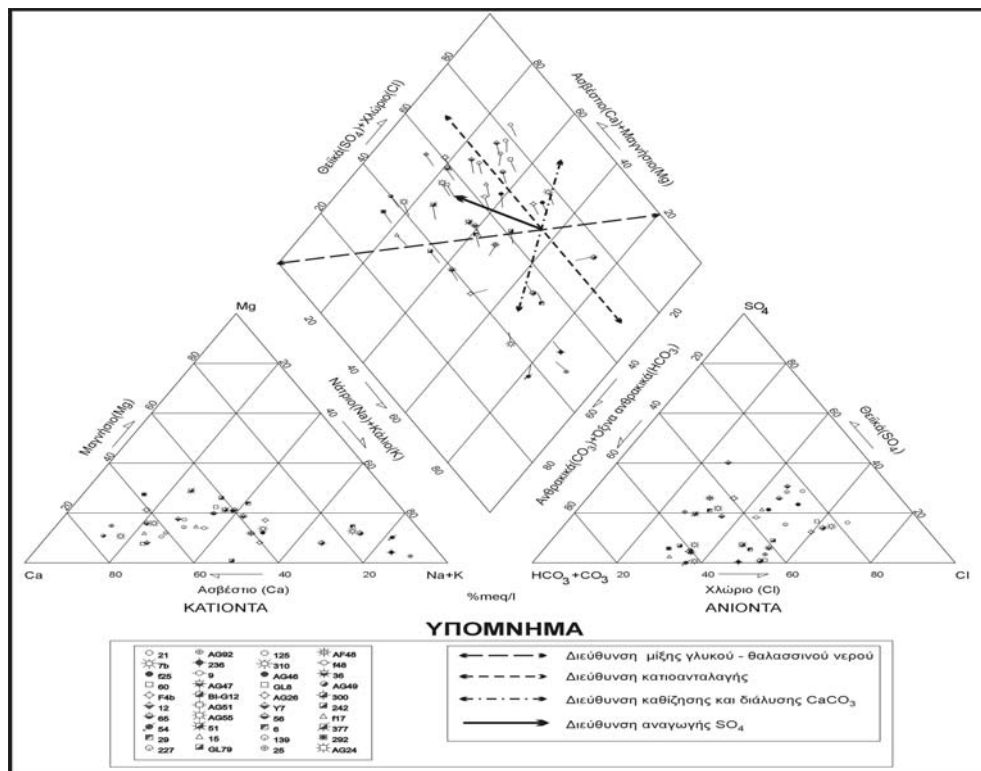
Στο διάγραμμα Piper του Σχήματος 4 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των κυριότερων υδροχημικών διαδικασιών. Η γραμμή που ξεκινάει από κάθε σημείο φανερώνει τη διεύθυνση που ενώνει τη θέση του δείγματος ( $M_{i,sample}$ ) στο διάγραμμα με τη θέση που θα είχε η ποσότητα  $M_{i,mix}$  και προσδιορίζει με τον τρόπο αυτό ποια είναι η κυρίαρχη υδροχημική διεργασία που επηρεάζει τη χημική σύσταση του δείγματος. Από το Σχήμα αυτό προκύπτει ότι, η κυρίαρχη διεργασία είναι η κατιοαναλλαγή.

Η γεωγραφική κατανομή των δεικτών και των παραμέτρων έγινε με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και γεωστατιστικών μεθόδων (μέθοδος Kriging).

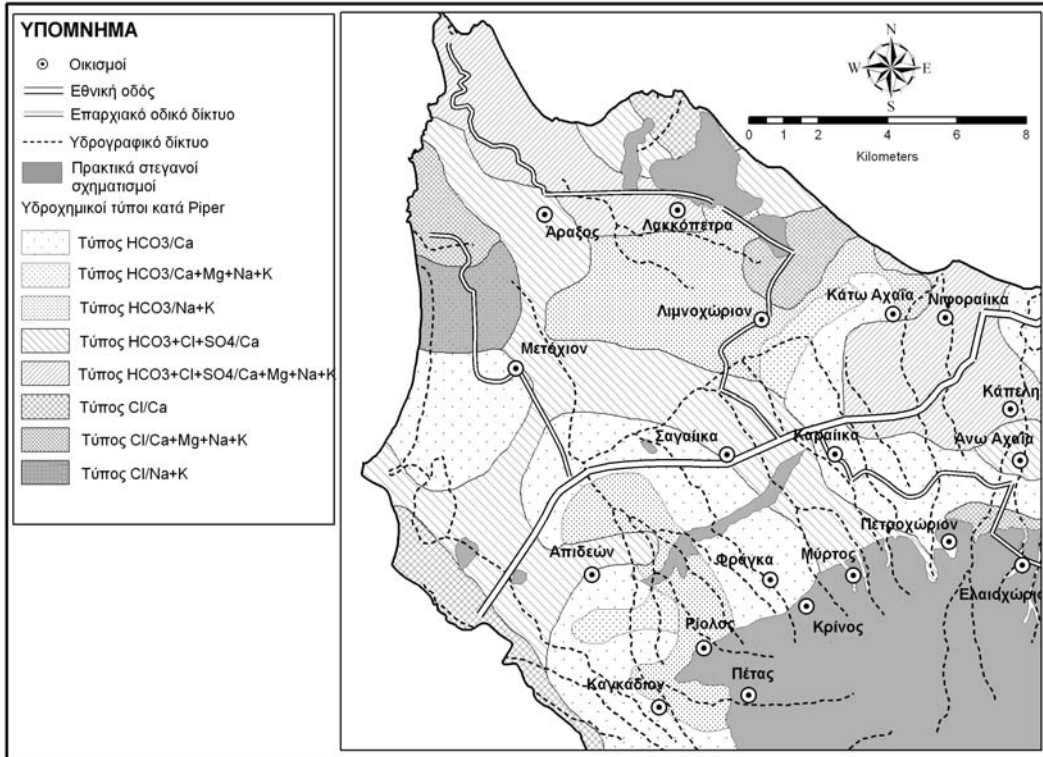
Στο χάρτη του Σχήματος 5 παρουσιάζεται η κατανομή των υδροχημικών τύπων με βάση το διάγραμμα του Piper. Διαπιστώνεται ότι, η περιοχή της ΒΔ/κής Αχαΐας χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία υδροχημικών τύπων με επικράτηση του τύπου Ca-Cl στην πλειονότητα των δειγμάτων.

Η επικράτηση του τύπου Ca-Cl φανερώνει προώθηση του μετώπου υφαλμύρισης σε αντίθεση με την επικράτηση του τύπου Na-HCO<sub>3</sub>, ο οποίος υποδηλώνει υποχώρηση του υφάλμυρου νερού. Οι υδροχημικοί τύποι, όπου δεν υπάρχει επικρατούν ανιόν ή κατιόν, φανερώνουν μια μείξη γλυκού-θαλασσινού νερού (Appelo & Postma, 1996).

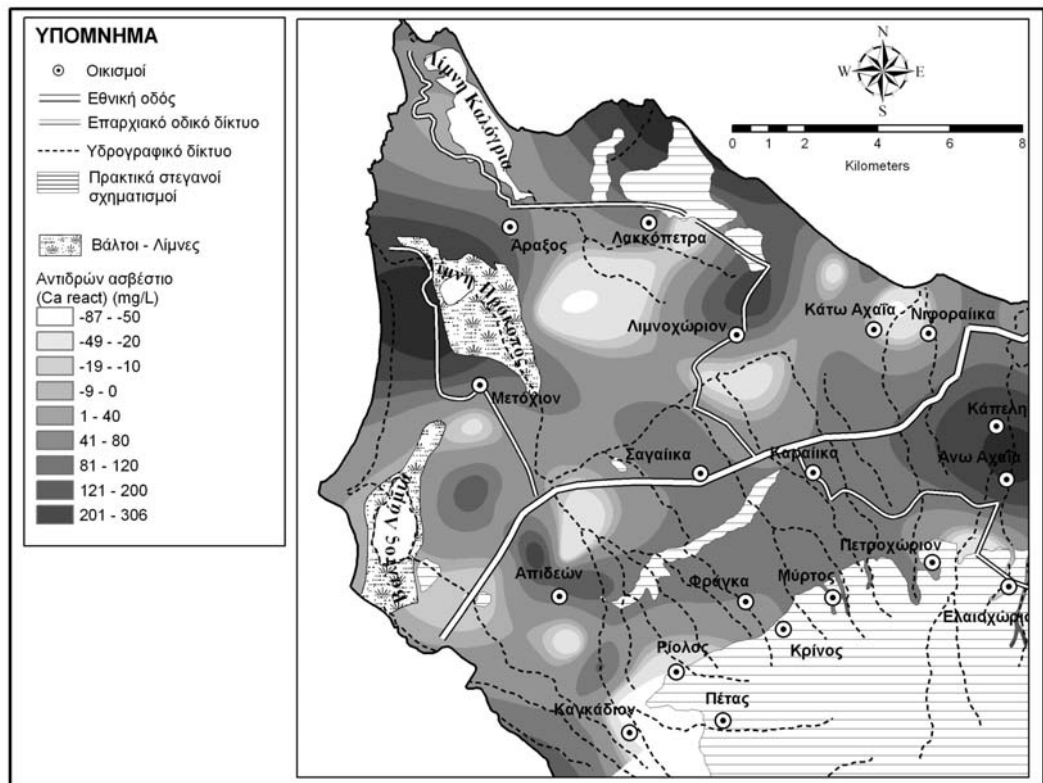
Όπως προκύπτει από την κατανομή της ποσότητας  $Ca_{react}$  (Σχήμα 6), προέλαση του μετώπου υφαλμύρισης διαπιστώνεται στις περιοχές Απιδεύνα-Σαγαϊίκων και Μετόχι. Υποχώρηση του μετώπου υφαλμύρισης εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές Λιμνοχωρίου, Καγκάδιο και Νότια της Λακόπετρας.



Σχήμα 4. Διάγραμμα Piper για την περίοδο Μαΐου 1997.



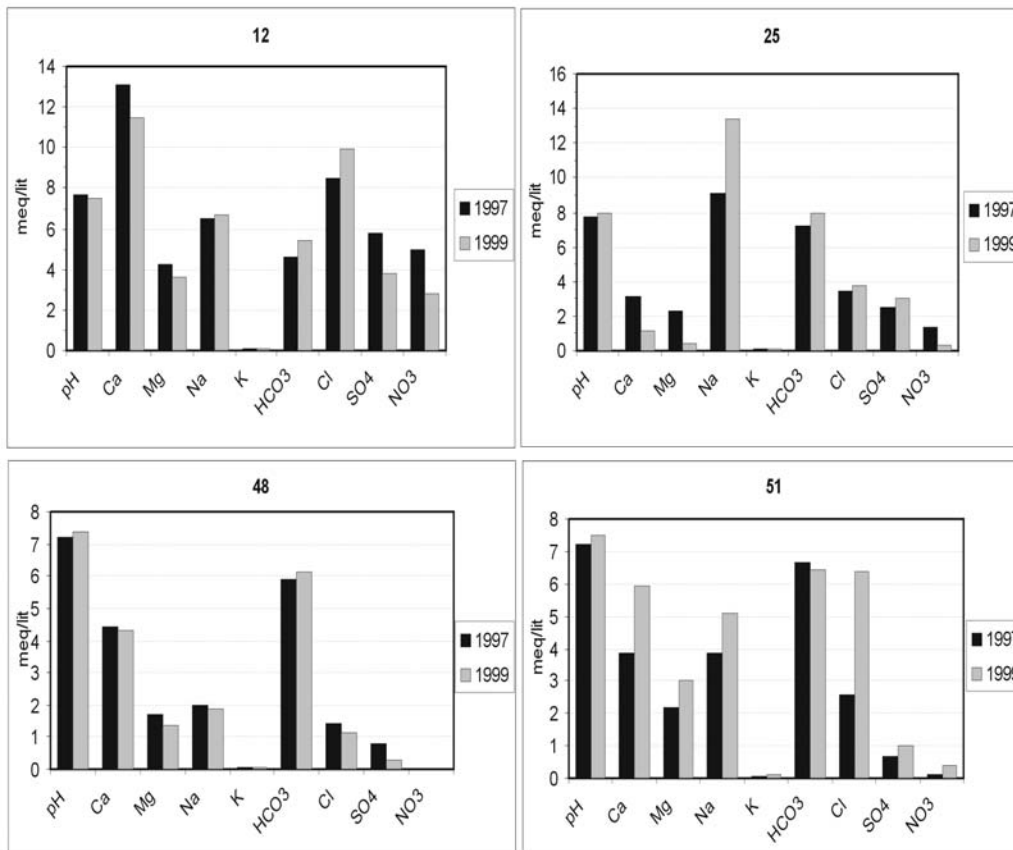
Σχήμα 5. Χάρτης υδροχημικών τύπων κατά Piper στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 6. Χάρτης κατανομής του Ca<sub>react</sub> στην περιοχή έρευνας.



Για τον έλεγχο της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων της περιόδου 1999. Παρατηρώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 7, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά οι χημικές αναλύσεις για τα έτη 1997 και 1999, από γεωτρήσεις της παράκτιας περιοχής διακρίνεται μια σαφής αυξητική τάση στις συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  για τα δείγματα 12, 25 και 51 της περιοχής Λακόπετρας σε αντίθεση με το δείγμα 48 της περιοχής Κάτω Αχαΐας, όπου οι συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  μειώνονται.



Σχήμα 7. Συγκριτικά αποτελέσματα για τις περιόδους 1997 και 1999.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αξιολόγηση των χημικών αναλύσεων δειγμάτων υπόγειου νερού στην περιοχή της ΒΔ/κής Αχαΐας και την ταυτόχρονη μελέτη της κατανομής των χλωριόντων, των υδροχημικών τύπων, του δείκτη Revelle και της ιοντικής ισχύος, εντοπίζονται έντονα προβλήματα υφαλμύρισης, τα οποία αναπτύσσονται κατά μήκος των μετώπων που προαναφέρθηκαν.

Από τους χάρτες κατανομής προκύπτει ότι η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία υδροχημικών τύπων κατά Piper με επικρατέστερο τον τύπο Ca-Cl. Η κυρίαρχη υδροχημική διεργασία είναι η κατιοανταλλαγή. Η προέλαση ή αποχώρηση του μετώπου υφαλμύρισης καθορίζεται από τη γεωγραφική εξάπλωση του δείκτη  $\text{Ca}_{\text{react}}$ .

Η γνώση της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη διαχείριση των υδροφόρων της περιοχής και στη λήψη κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό της υφαλμύρισης και των αρνητικών συνεπειών της. Για το λόγο αυτόν απαιτείται συνεχής καταγραφή (monitoring) της ποιότητας των υπόγειων νερών στις ευάλωτες περιοχές από θαλάσσια διείσδυση, όπως η περιοχή έρευνας, σε επιλεγμένες θέσεις.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Appelo C.A.J. & Postma D. 1996. *Geochemistry, groundwater and pollution*. A. A. Balkema. 536 p.
- Bosch X. & Custodio E. 1993. Dissolution processes in the freshwater-saltwater mixing zone in the Cala Jostel area (Tarragona). *Proc. of the XII Salt Water Intrusion Meeting, Barcelona, CIMNE-UPC edn*, 229-244.
- Βουδούρης Κ. 1995. Υδρογεωλογικές συνθήκες ΒΔ/κού τμήματος του Ν. Αχαιΐας. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 237σ.
- Domenico P.A. & Schwartz F.W. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley, N.Y.
- Edet A.E. & Okereke C.S. 2001. A regional study of saltwater intrusion in Southeastern Nigeria based on the analysis of geoelectrical and hydrochemical data. *Environmental Geology* 40:1278-1289.
- Ergil M. 2000. The salination problem of the Guzelyurt aquifer, Cyprus. *Water Resources*, Vol. 34, No 4, 1201-1214.
- Gimenez E. & Morell I. 1997. Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellon, Spain). *Environmental Geology* 29 (1/2) January 1997:118-131.
- Hafi Z.B. 1998. Hydrochemical evaluation of the coastal Quaternary aquifer east of Tripoli, Libya. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 26, No 4, 643-648.
- Martinez D.E. & Bocanegra E.M. 2002. Hydrogeochemistry and cation exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, Number 3, 2002:393-408.
- Νίκας Κ., Αγγελικάκης Ι., Βέργου Α., Βασιλειάδης Ε. 2001. Υδρογεωλογικές και γεωχημικές έρευνες στο Νομό Αχαιΐας. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελλ. Γεωλογικής Εταιρείας. Τόμος 5, 1875-1884.
- Πεταλάς Χ., Διαμαντής Ι., Πλιάκας Φ. 1997. Η συμβολή των διαφόρων χημικών και φυσικοχημικών παραμέτρων στη μελέτη των υδροφόρων οριζόντων και της υπαλμύρινσής τους. Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 444-465.
- Σταυρόπουλος Ξ. & Κουμαντάκης, Ι. 1992. Ποσοτική μείωση και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών της παράκτιας ζώνης της ΒΔ Αχαιΐας. Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ.
- Todd D.K. 1980. *Groundwater Hydrology*. Wiley, New York.
- Walraevens K., Boughrida M., de Breuck W. 1993. Groundwater quality evolution in the Black Sluice polder area around Assenede (Belgium). *Proc. XII Salt Intrusion Meeting, Barcelona, CIMNE-UPC edn*, 121-142.
- Xue Y., Wu J., Lui P., Wang J., Jiang Q., Shi H. 1993. Sea-water intrusion in the coastal area of the Laizhou Bay, China: 1. Distribution of seawater intrusion and its hydrochemical characteristics. *Ground Water* 31(4), 532-537.

## STUDY OF EVOLUTION OF THE SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS. CASE STUDY: THE COASTAL AQUIFER SYSTEM OF NW ACHAIIA

Voudouris K.<sup>1</sup>, Nikas K.<sup>2</sup>, Antonakos A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Lab. of Engineering Geology & Hydrogeology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, Greece, kvoudour@geo.auth.gr,*

<sup>2</sup> *I.G.M.E., Mesogion Str. 70, 115 27, Athens*

<sup>3</sup> *Lab. of Hydrogeology, Dept. of Geology, University of Patras, Rio, 261 10 Patras*

## ABSTRACT

Seawater intrusion problems are recorded in coastal aquifers, which constitute the main sources of drinking water and agricultural irrigation in many countries. The aim of this work is to describe the evolution of the salinity distribution by seawater intrusion, based on results from chemical analyses, of 29 groundwater samples in the NW Achaia area (Peloponnesus, Greece). The study of these data indicates that aquifer waters in large part of area reflect salinization related to seawater intrusion. The occurrence of Ca-Cl hydrochemical types of groundwater indicates active seawater intrusion. Cation exchange is the most noticeable hydrogeochemical process in the movement of the saline front in the coastal aquifer. Geographical distribution of  $Ca_{react}$  index was mapped. The areas with advance or decline of the seawater intrusion front are defined from this map.