

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΩ ΣΟΥΛΙΟΥ ΜΑΡΑΘΩΝΑ (ΒΑ ΑΤΤΙΚΗ)

Σωτηρόπουλος Π.¹, Τζάνης Α.²

¹ TerraMentor E.O.O.Σ., Σαρανταπόρου 26 και Στρατηγού Τόμπρα, Αγ. Παρασκευή 15342.
E-mail terramen@otenet.gr

² Τομέας Γεωφυσικής – Γεωθερμίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών,
Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου 15784. E-mail: atzanis@geol.uoa.gr

Περίληψη

Οι επιφανειακοί και υπόγειοι υδάτινοι πόροι αποτελούν σημαντικότατο παράγοντα οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας για τον πληθυσμό μίας περιοχής· είναι ανανεώσιμοι και με την κατάλληλη διαχείριση μπορούν να συμβάλλουν στην αειφόρο ανάπτυξη. Δυστυχώς, η επέκταση της βιομηχανικής και αγροτικής δραστηριότητας οδηγεί σε αυξανόμενη άντληση υπογείων υδάτων, υπέρμετρη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων και (συχνά) παράνομη διάθεση των βιομηχανικών αποβλήτων. Αυτά συνεπάγονται την δραματική μείωση και υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών αποθεμάτων. Κατά συνέπεια, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη ανάπτυξης προηγμένων τεχνικών ολιγοδάπανης παρακολούθησης και αποτίμησης των ποσοτικών και ποιοτικών στοιχείων των υδατινών πόρων. Η εργασία αυτή περιγράφει ένα πολυ-οδικό σύστημα μέτρησης και ψηφιακής καταγραφής έως και 15 φυσικών και χημικών παραμέτρων (συγκέντρωση ρυπαντών) που αποτιμούν την ποιότητα των υδατινών πόρων σε πραγματικό χρόνο, το οποίο αναπτύχθηκε για να καλύψει τις απαιτήσεις και προδιαγραφές της Κοινοτικής Οδηγίας 2000/60. Το σύστημα (Ονομαζόμενο Watertool™), χρησιμοποιεί τεχνολογία ιοντοεπιλεκτικών ηλεκτροδίων και οι επιδόσεις και αποτελεσματικότητά του παρουσιάζονται διεξοδικά με εφαρμογή στην περιοχή του Κάτω Σουλίου (ΒΑ Αττική), η οποία εμφανίζει σημαντικά προβλήματα υφαλμύρισης και ρύπανσης του υπογείου υδροφορέα. Καταδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για ταχεία, ολιγοδάπανη και ακριβή αποτύπωση της ποιότητας των υπόγειων υδατικών πόρων και τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρονται στους διαχειριστές υδατινών πόρων.

Abstract

Surface and groundwater resources are important assets for the economic and social welfare of the population of a given area; they are renewable and with proper management, they contribute substantially to sustained development. Unfortunately, the expansion of industrial and agricultural activities lead to increasing withdrawal of water from the aquifers, excessive use of pesticides and fertilizers and (frequently illicit) disposal of industrial waste. This results in rapid reduction in the quantity and quality of water reserves. There is a compelling call for the development of advanced and inexpensive means to monitor the quantitative and qualitative characteristics of water resources. This paper introduces a multi-channel system, developed in response to the requirements specified by Directive 2000/60 of the European Commission for water quality monitoring. The system can measure up to 15 physical and chemical parameters (pollutant concentration) facilitating the evaluation of water quality in real time. It implements the Ion-Selective Electrode technology and its effectiveness is demonstrated with an application in the area of Kato Souli (NE Attica), which suffers from intense salination (sea-water intrusion) and pollution of the aquifer. It is shown that the system comprises an inexpensive, accurate and fast method to map the quality of groundwater reserves and assist aquifer managers in making effective decisions.

Λέξεις κλειδιά: Ποιότητα νερού, ρύπανση υδάτων, διαχείριση υδροφορέων, ιοντοεπιλεκτικά ηλεκτρόδια.

Key words: Water quality, water pollution, aquifer management, Ion-selective electrodes.

1. Εισαγωγή

Η δραματική ελάττωση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη επιδείνωση της ποιότητας του νερού λόγω διαφόρων μορφών ρύπανσης αποτελούν δύο σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τους διαχειριστές υδατικών πόρων. Τα προβλήματα αυτά έχουν αρκετές αρνητικές επιδράσεις στην αγροτική δραστηριότητα, την οικονομία, το φυσικό περιβάλλον και, το σημαντικότερο, στην υγεία των καταναλωτών νερού. Εάν αφεθούν ανεξέλεγκτα μπορούν να διακυβεύσουν την ευημερία ολοκλήρων πληθυσμών! Η πρόληψη και μετρίαση τέτοιων κινδύνων απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και τολμηρά διοικητικά μέτρα, τα οποία για να είναι αποτελεσματικά, ιδίως σε περιπτώσεις εξελισσομένων κρίσεων, πρέπει να ληφθούν στην βάση αξιόπιστης πληροφόρησης, παραδοτέας στους σχεδιαστές και λήπτες αποφάσεων με ασφάλεια και ταχύτητα.

Ουσιώδη τέτοιου είδους πληροφόρηση είναι η ποιότητα του νερού των υδροφορέων και συγκεκριμένα η παρουσία ή μη, υψηλών συγκεντρώσεων ανεπιθύμητων χημικών ενώσεων (ρυπαντών). Οι συμβατικές μέθοδοι αποτίμησης της ποιότητας νερού απαιτούν άμεση δειγματοληψία του υδροφορέα (μέσω φρεάτων ή γεωτρήσεων) και χημική ανάλυση στο εργαστήριο, αν και ορισμένες παράμετροι μπορούν να μετρηθούν *in situ* με εξειδικευμένο χημικό εξοπλισμό. Σε κάθε περίπτωση, η χημική ανάλυση είναι ακριβής και αξιόπιστη, αλλά ταυτοχρόνως αργή και μάλλον δαπανηρή διαδικασία (π.χ. Wilson and Hunt, 1986, Clesceri *et al.*, 1989). Η ταχεία και ολιγοδάπανη πρόσκτηση έγκυρων δεδομένων απαιτεί την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, ελάχιστα εξαρτημένων από την χημική ανάλυση.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει την εφαρμογή μίας τέτοιας τεχνολογίας, η οποία εκμεταλλεύεται τις φυσικοχημικές ιδιότητες ιόντων εν διαλύσει, προκειμένου να μετρήσει την συγκέντρωσή τους: ουσιαστικά εκτελεί χημική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες των ιόντων. Η τεχνολογία αυτή υλοποιείται σε ένα πρωτοποριακό σύστημα μέτρησης έως και 15 φυσικοχημικών παραμέτρων ταυτοχρόνως (Watertool™), το οποίο περιγράφεται εν συντομία και επιδεικνύεται με μία εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες υπαίθρου, στην περιοχή Κάτω Σουλίου Μαραθώνα (BA Αττικής).

2. Συσκευή μετρήσεων και αισθητήρες

Το σύστημα αποτελείται από ένα βυθιζόμενο φωρατή που περιλαμβάνει τους αισθητήρες και περιέχεται σε μία στιβαρή κυλινδρική θήκη από τιτάνιο (Εικόνα 1). Έχοντας διαστάσεις 600×48mm, ο φωρατής μπορεί εύκολα να εισαχθεί σε σωλήνες γεωτρήσεων διαμέτρου 60mm. Άλλα σπουδαία εξαρτήματα του συστήματος είναι η μονάδα ψηφιοποίησης, η μονάδα ελέγχου/ αποθήκευσης δεδομένων και η μονάδα μετάδοσης δεδομένων.

Οι μετρούμενες παράμετροι περιλαμβάνουν θερμοκρασία, πυκνότητα, ολική σκληρότητα, ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, pH (με ακρίβεια 0,05 μονάδες), Eh, διαλυμένο οξυγόνο (με ακρίβεια 0,05mg/l) και συγκεντρώσεις ρυπαντών (NH_4^+ , NO_3^- , Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , F^- και H_2S , όλα με ακρίβεια τουλάχιστον 0,1 mg/l). Ο αισθητήρας αγωγιμότητας προσφέρει μεγάλο δυναμικό εύρος ($10 \cdot 10^{-2}$ S/m με ακρίβεια μέχρι 0,03%) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά τα περιβάλλοντα, από γλυκά νερά μέχρι και άλμη.

Οι ιοντικές συγκεντρώσεις μετρούνται με ιοντο-επιλεκτικά ηλεκτρόδια (ion-selective electrodes - ISE). Ένα ιοντο-επιλεκτικό ηλεκτρόδιο επίσης αποτελεί φωρατή που μετατρέπει την δραστηριότητα ενός συγκεκριμένου ιόντος σε ηλεκτρικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να μετρηθεί με βολτόμετρο. Η φυσική βάση όλων των ποτενσιομετρικών μετρήσεων αυτού του

είδους είναι η εξίσωση Nernst και οι φυσικές και κατασκευαστικές λεπτομέρειες των ISE μπορούν να μελετηθούν σε πληθώρα τυπικών δημοσιευμάτων (π.χ. Covington, 1979· Morf, 1981 Koryta and Stulik, 1983 Koryta, 1994 Christian, 1994 – για ταχεία αλλά σχεδόν πλήρη πληροφόρηση βλ. Wikipedia, 2006).

Η μονάδα μετρήσεων είναι ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο (ποτενσιομετρικό κύτταρο) που προσαρτάται στο κάτω άκρο του φωρατή και στο οποίο προσαρμόζονται πολλαπλά ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια μετρήσεων συνδέονται με τους ακροδέκτες υψηλής εμπέδησης εισόδου του ποτενσιόμετρου και το ηλεκτρόδιο αναφοράς με τον ακροδέκτη χαμηλής εμπέδησης εισόδου. Η ακρίβεια των ποτενσιομετρικών μετρήσεων είναι $\pm 1\text{mV}$ και η ευαισθησία $0,1\text{ mV}$. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται με το σύστημα Watertool™ γενικά διαθέτουν υψηλό συντελεστή επιλογής, τυπικά της τάξης 10^{-2} – 10^{-5} σε σχέση με τα αποκλειόμενα ιόντα.



Εικόνα 1. Αριστερά: Ο φωρατής, με προσαρτημένα ISE κατά την διάρκεια βαθμονόμησης με πρότυπα διαλύματα. Δεξιά: Ο φωρατής εισαγόμενος σε φρεάτιο γεωτρήσεως. Στην παρούσα περίπτωση το σύστημα έχει διαμορφωθεί για μετρήσεις μίας θέσης και μαζί με τον φωρατή αποτελείται από μία καταγραφική μονάδα και ένα Η/Υ (φορητό ή χειρός), για έλεγχο της διαδικασίας μετρήσεων και αποθήκευσης των δεδομένων.

Όλα τα ηλεκτρόδια μετρήσεων, καθώς και το ηλεκτρόδιο αναφοράς μπορούν να αντέξουν σε πιέσεις μέχρι 25 Kg/cm^2 και να καταδυθούν σε βάθη μέχρι 250m , λειτουργώντας σε θερμοκρασίες μέχρι 60°C . Έχουν διαστάσεις $175\text{mm} \times 8\text{mm}$ και ο σχεδιασμός τους επιτρέπει την εύκολη και ταχεία εναλλαγή διαφορετικών ηλεκτροδίων και μετρουμένων παραμέτρων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της έρευνας ή την εξέλιξη της κατάστασης, ενώ επεκτείνει σημαντικά τον κατάλογο των ηλεκτροδίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιτρέπει επίσης την εφαρμογή ηλεκτροδίων κατάλληλων για ειδικές ή στοχευόμενες υδρογεωλογικές μελέτες. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς είναι προστατευμένο μέσα σε ειδική πλήμνη και είναι επίσης αντικαταστάσιμο.

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους: είτε ως φορητός σταθμός για μετρήσεις σε μία εκάστοτε θέση (Εικόνα 1), είτε ως δίκτυο σταθμών, εφόσον συμπληρωθεί με πομποδέκτες αμφίδρομης τηλεμετρίας (ενσωματωμένο πρωτόκολλο TCP/IP επί τηλεφωνίας GSM). Σε κάθε περίπτωση, το σύστημα υποστηρίζεται από λογισμικό αυτοματοποίησης των μετρήσεων, βαθμονόμησης των ηλεκτροδίων, αυτοδιαγνωστικών ελέγχων και πιστοποίησης, επεξεργασίας και απεικόνισης των δεδομένων (TerraMentor, 2004). Το λογισμικό μπορεί επίσης να προγραμματισθεί για να ειδοποιεί όταν οι συγκεντρώσεις ρυπαντών ξεπερνούν ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το σύστημα εγκαθίσταται ως δίκτυο σε περιοχές υψηλού κινδύνου, ή κατά την διάρκεια εξελισσομένων κρίσεων.

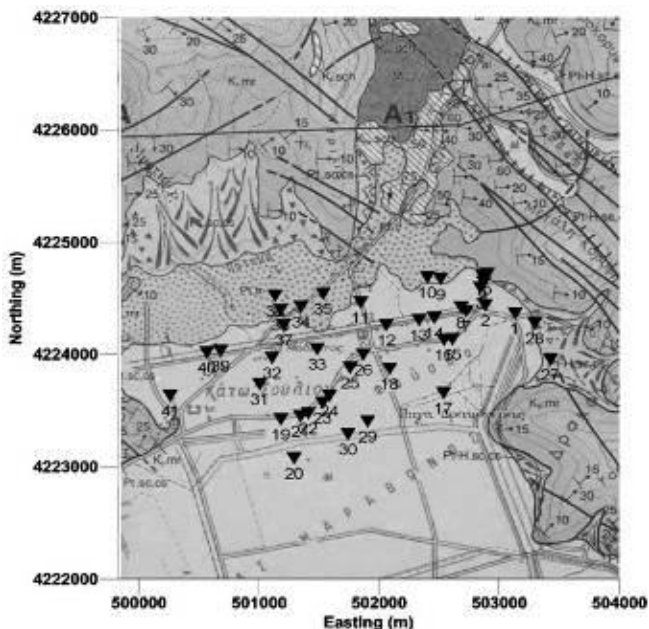
Περαιτέρω πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, επιδόσεις, επισημάνσεις και προφυλάξεις που πρέπει να ληφθούν σε περιπτώσεις ειδικών συνθηκών υπαίθρου μπορούν να αναζητηθούν στο Εγχειρίδιο Χρήσης (Terramentor, 2004), διαθέσιμο μέσω του πρώτου συγγραφέα του παρόντος.

3. Εφαρμογή στην περιοχή Κάτω Σουλίου (Μαραθώνας, ΒΑ Αττική).

Η γεωλογία και γεωμορφολογία της ευρύτερης περιοχής Κάτω Σουλίου περιγράφεται σε σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων (π.χ. Boetechtel and Papadeas, 1968· Lozios, 1991, 1993· Margonis *et al.*, 2002· Σενή *et al.*, 2004· Ρανλιουρος *et al.*, 2006). Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θα παρατεθεί μόνο σύντομη περιγραφή βασικών στοιχείων (βλ. Επίσης Εικόνα 2).

Η περιοχή μελέτης εκτείνεται στην πεδινή περιοχή του Κάτω Σουλίου, η οποία καλύπτεται από Ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις πάχους μέχρι 30m, αν και οι βορειότεροι σταθμοί μέτρησης τοποθετούνται σε Πλειστοκαινικά χερσαία ιζήματα (Pt.tr στην Εικόνα 2, με πάχος τουλάχιστον 30m). Τα ιζήματα υπερτίθενται ασύμφωνα επί του τοπικού υποβάθρου αποτελούμενου από Τριαδικά έως Άνω Κρητιδικά μάρμαρα με παρεμβολή σχιστόλιθων του Μέσου Κρητιδικού (σχιστόλιθοι Ραμνούντας, Km.sch στην Εικόνα 2). Τα πρανή των λόφων προς βορρά και ανατολάς της περιοχής μελέτης καλύπτονται από αδιαίρετους κώνους κορημάτων (Pt.sc.cs στην Εικόνα 2), αν και μόνον οι δύο ανατολικότεροι σταθμοί (27 και 28) έχουν εγκατασταθεί σε τέτοιο σχηματισμό.

Αναφορικά με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, οι ιζηματογενείς και καρστικοί υδροφορείς



Εικόνα 2. Το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης ποιότητας νερού (ανεστραμμένα τρίγωνα) και το γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης: al: Αλλουβιακά ιζήματα Pt.sc.cs: Αδιαίρετοι Πλειστοκαινικοί κώνοι κορημάτων Pt.tr: Πλειστοκαινικά χερσαία ιζήματα· M.ms: Μέσο - Άνω Μειοκαινικά λιμναία ιζήματα Ks.mr: Άνωκρητιδικά μάρμαρα· Km.sch: Σχιστόλιθοι Ραμνούντας Kj.mr: Κάτω Κρητιδικά μάρμαρα. Η εικόνα βασίζεται στον τυπικό χάρτη κλίμακας 1:50000 που δημοσιεύει το ΙΓΜΕ.

που αναπτύσσονται κάτω από την πεδιάδα του Κάτω Σουλίου υποφέρουν από έντονη υφαλμύριση. Ο πανταχού υπάρχων φρεάτιος υδροφορέας, ο οποίος αναπτύσσεται στα αλλουβιακά και χερσαία ιζήματα, επίσης υποφέρει από υφαλμύριση και αναμένεται να υποβαθμίζεται περαιτέρω από ρύπανση εξ αιτίας της έντονης αγροτικής δραστηριότητας και άλλων ανθρωπογενών παραγόντων. Η περιοχή διέρχεται περίοδο έντονης ανάπτυξης, ενώ υπάρχει και σημαντική ανησυχία για την περιβαλλοντική επιβάρυνση του παρακείμενου υδροβιότοπου και πευκοδάσους του Σχοινιά.

Η ποιότητα του νερού του φρεατίου υδροφορέα παρακολουθείται σε ένα δίκτυο 41 φρεάτων και γεωτρήσεων (Εικόνα 2).

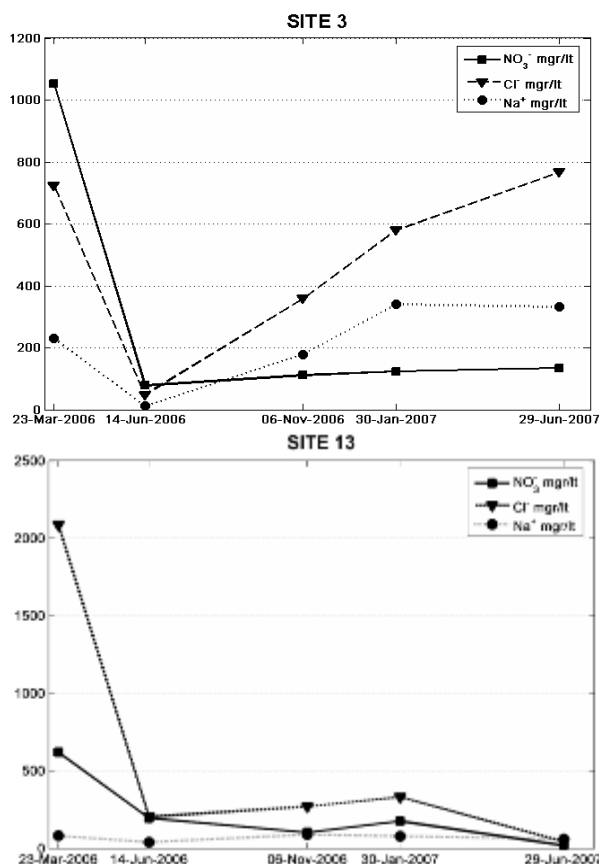
Οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά διαστήματα, με το σύστημα διαμορφωμένο για μετρήσεις σε ένα εκάστοτε σταθμό και διενεργούνται από πλήρωμα δύο παρατηρητών σε χρόνο λιγότερο της μίας εργάσιμης ημέρας (ένας παρατηρητής μπορεί επίσης να διεκπεραιώσει την ίδια εργασία αλλά με σχετικά βραδύτερους ρυθμούς). Των εργασιών υπαίθρου *προηγείται* και *έπεται* βαθμονόμηση των ηλεκτροδίων με πρότυπα διαλύματα, προκειμένου να ελεγχθεί η σταθερότητα της απόδοσής τους. Πλέον τούτου, κατά καιρούς λαμβάνονται δείγματα νερού από τυχαία επιλεγόμενες γεωτρήσεις και φρέατα, τα οποία αναλύονται με τις κλασσικές και δοκιμασμένες μεθόδους της αναλυτικής χημείας προκειμένου να ελεγχθεί η πιστότητα των αποτελεσμάτων του αυτοματοποιημένου Watertool™. Παράδειγμα τέτοιων συγκρίσεων παρατίθεται στον Πίνακα 1, στον οποίο καταφαίνεται η σχεδόν απόλυτη συμβατότητα μεταξύ των δύο αναλυτικών μεθόδων.

Πίνακας 1. Σύγκριση συγκεντρώσεων ιόντων από μετρήσεις Watertool™ (WT) και κλασσικές χημικές αναλύσεις (XA). Όλες οι τιμές πλην της αγωγιμότητας (σ) και pH δίδονται σε mg/lit. Μετρήσεις Watertool™ και δειγματοληψία έγινε στις 29/6 και 3/7/2007. Οι χημικές αναλύσεις έγιναν στο υδρογεωχημικό εργαστήριο του παραρτήματος Ξάνθης του Ι.Γ.Μ.Ε.

Θέση	Ημ/νία	σ (S/m), WT	σ (S/m), XA	NO_3^- , WT	NO_3^- , XA
16	29/06/07	0,40	0,40	252	251
20	03/07/07	0,12	0,13	162	144
30	03/07/07	0,81	0,79	286	287
37	29/06/07	0,12	0,14	100	67
Θέση	Ημ/νία	NH_4^+ , WT	NH_4^+ , XA	pH, WT	pH, XA
16	29/06/07	0,45	0,42	7,1	7,1
20	03/07/07	0,19	0,18	7,8	7,8
30	03/07/07	0,26	0,20	6,8	6,8
37	29/06/07	0,73	0,10	7,5	7,3
Θέση	Ημ/νία	Na^+ , WT	Na^+ , XA	Cl^- , WT	Cl^- , XA
16	29/06/07	112	118	984	989
20	03/07/07	268	270	105	117
30	03/07/07	409	410	2552	2585
37	29/06/07	60	56	234	220
Θέση	Ημ/νία	F^- , WT	F^- , XA	Ca^{2+} , WT	Ca^{2+} , XA
16	29/06/07	0,27	0,33	410	409

Πίνακας 1. (συνέχεια)

Θέση	Ημ/νια	σ (S/m), WT	σ (S/m), XA	NO_3^- , WT	NO_3^- , XA
20	03/07/07	0,49	0,42	155	128
30	03/07/07	0,18	0,27	958	957
37	29/06/07	0,02	0,18	237	193



Εικόνα 3. Μεταβολές στην συγκέντρωση NO_3^- , Cl^- και Na^+ στους σταθμούς 3 (πάνω) and 13 (κάτω).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δεδομένα από πέντε περιόδους μετρήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα κατά την άνοιξη, θέρος και φθινόπωρο 2006, και χειμώνα και θέρος 2007, εστιάζοντας σε παραμέτρους σχετιζόμενες με μεταβολές της υφαλμύρισης (συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^-), και ρυπαντών που προέρχονται από αγροτικές δραστηριότητες (NO_3^-).

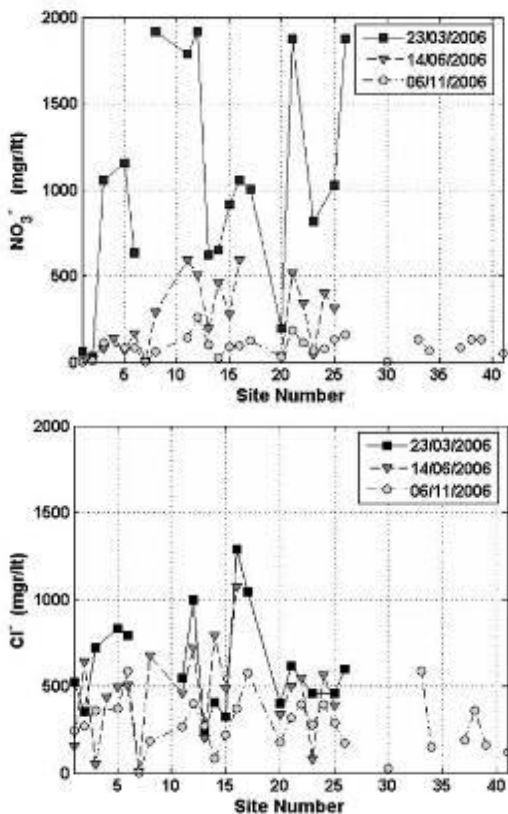
Η Εικόνα 3 εμφανίζει την μεταβολή στην συγκέντρωση ρυπαντών συναρτήσει του χρόνου

στις θέσεις 3 και 13. Σ' αμφοτέρες τις περιπτώσεις, τα επίπεδα NO_3^- εμφανίζουν υπερβολικά υψηλή συγκέντρωση τον Μάρτιο 2006, (11 και 6 φορές υψηλότερη του επιπέδου συναγερμού των 50 mg/lit). Η καταχρηστική εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων κατά τους ευαίσθητους εαρινούς μήνες πιθανόν να εξηγήει αυτή την συμπεριφορά, δεδομένου ότι αμφοτέροι οι σταθμοί 3 και 13 ευρίσκονται σε οικίες στα όρια εντατικά καλλιεργούμενης γης. Η συγκέντρωση νιτρικών ελαττώνεται σε σχετικά σταθερά επίπεδα των 100 – 200 mg/lit για όλη την υπόλοιπη περίοδο μετρήσεων, αλλά και πάλι παραμένει 2-4 φορές μεγαλύτερη του ορίου συναγερμού. Συγκεντρώσεις τέτοιου μεγέθους υποδεικνύουν εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων καθ' όλη την διάρκεια του έτους, με πιθανό μέγιστο κατά τους εαρινούς μήνες. Δυστυχώς, δεν υπήρξε δυνατότητα επαλήθευσης των υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών κατά τον Μάρτιο 2007, λόγω εξάντλησης του ωφέλιμου χρόνου ζωής των παλαιότερων ISE και καθυστέρησης της νέας παραλαβής μέχρι τον Μάιο.

Οι συγκεντρώσεις χλωριδίου (Cl^-) και νατρίου (Na^+) εμφανίζονται σημαντικές, με εξαίρεση τον Ιούνιο 2006 και Ιούνιο 2007. Οι παρατηρούμενες τιμές είναι γενικά συμβατές με καθεστώς ήπιας υπαλμύρισης του φρεατίου υδροφορέα, γύρω από τις θέσεις 3 και 13, η οποία όμως εμφανίζει σημαντική διακύμανση συναρτήσει του χρόνου. Οι παρατηρούμενες ελάχιστες συγκεντρώσεις (~40–100 mg/lit) είναι δύσκολο να εξηγηθούν με βεβαιότητα. Ορισμένες πιθανόν να οφείλονται σε τοπική εξάρτηση των διεργασιών υπαλμύρισης ή προσωρινή ελάττωση της αλατότητας λόγω προσφάτων αυξημένων βροχοπτώσεων (π.χ. Ιούνιος 2007), αλλά και λόγω δευτερογενών ανθρωπογενών επεμβάσεων. Τέτοια επέμβαση, για παράδειγμα, μπορεί να είναι η διοχέτευση νερού της εταιρείας ύδρευσης στα φρέατα μετά από οικιακή χρήση· με δεδομένο ότι πολλές κατοικίες χρησιμοποιούνται ως εξοχικές, πιθανόν έτσι να εξηγείται η ανώμαλη ελάττωση της αλατότητας κατά τους πρώτους θερινούς μήνες σε ορισμένα σημεία. Φυσικά τέτοιες εξηγήσεις πρέπει να θεωρούνται το πολύ προκαταρκτικές και το πρόβλημα εξακολουθεί να τελεί υπό διερεύνηση. Σε κάθε περίπτωση όμως, είναι σαφείς οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά την ερμηνεία δεδομένων ποιότητας νερού και το βάθος της οφειλόμενης έρευνας προτού δοθούν ικανοποιητικές απαντήσεις.

Η Εικόνα 4 εικονίζει την συγκέντρωση νιτρικών και χλωριδίου σε όλους τους σταθμούς συναρτήσει του χρόνου (2006). Αν και μη άμεσα τεκμαρτό από την Εικόνα 4 μόνο, είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι σε σταθμούς ευρισκόμενους στην γειτονία εντατικών γεωργικών δραστηριοτήτων η συγκέντρωση νιτρικών είναι εξαιρετικά υψηλή κατά την διάρκεια του Μαρτίου (αρκετές φορές άνω του ορίου) και βαίνει ελαττούμενη προς το τέλος του έτους, αν και παραμένει υπεράνω των ανεκτών ορίων. Η παρατηρούμενη σημαντική διαφοροποίηση στην συγκέντρωση νιτρικών μεταξύ σταθμών είναι συνάρτηση της έντασης της παρακείμενης αγροτικής δραστηριότητας και είναι επίσης συστηματική ως συνάρτηση του χρόνου. Η διαφοροποίηση στην συγκέντρωση χλωριδίου είναι επίσης ενδιαφέρουσα. Σε γενικές γραμμές, αναμένεται ότι η φυσική διεργασία υπαλμύρισης θα επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης Cl^- και Na^+ το θέρος και ελάττωση τον χειμώνα. Αυτό όντως παρατηρείται σε αρκετές θέσεις, ειδικότερα αυτές που σχετίζονται με ασθενή παρακείμενη αγροτική δραστηριότητα (βλ. επίσης την Εικόνα 4). Παρ' όλα αυτά υπάρχουν θέσεις όπου η συγκέντρωση χλωριδίου κατά τον Μάρτιο του 2006 είναι σημαντικά υψηλότερη από την υπόλοιπη περίοδο. Οφείλει επίσης να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση χλωριδίου στις θέσεις αυτές συσχετίζεται αρκετά καλά με υψηλή περιεκτικότητα σε νιτρικά. Αυτό πιθανόν σημαίνει ότι στις θέσεις αυτές υπάρχουν διεργασίες παραγωγής χλωριδίου *επιπλέον* της φυσικής υπαλμύρισης, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με αγροτικές και άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Όπως και προηγουμένως, η εξήγηση αυτή είναι προκαταρκτική. Άλλωστε, η λεπτομερής ανάλυση και συζήτηση τέτοιων διεργασιών εκφεύγει του σκοπού της παρούσας και θα δοθεί αλλού.

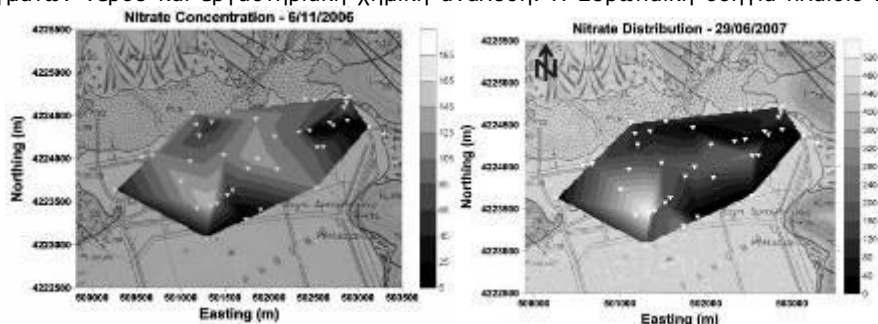
Οι Εικόνες 5 παρουσιάζουν την χωρική κατανομή της συγκέντρωσης νιτρικών κατά την 6^η Νοεμβρίου 2006 (αριστερά) και 29^η Ιουνίου 2007 (δεξιά). Η κατανομή εμφανίζει τα ίδια περίπου γενικά χαρακτηριστικά σ' αμφότερους τους χάρτες: η συγκέντρωση νιτρικών είναι χαμηλή στην βόρεια, ανατολική και νότια περίμετρο της ερευνηθείσας περιοχής, όπου γενικά υπάρχουν οικιστικές ζώνες και δεν καλλιεργούνται εντατικά. Αντιθέτως, η πλέον έντονα καλλιεργούμενη έκταση γης περί το μέσο της περιοχής μελέτης εμφανίζει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών. Είναι επίσης σαφής η ύπαρξη δυναμικών μεταβολών. Για παράδειγμα είναι εμφανής η χρονικά και τοπικά εντοπισμένη αγροτική δραστηριότητα στην περιοχή της θέσης 17 (βλ. Εικόνα 5, χάρτη 6/11/2006), και οι σημαντικές αλλαγές στο μέγεθος των συγκεντρώσεων μεταξύ Νοεμβρίου 2006 και Ιουνίου 2007, ιδίως στα ΝΔ της μελετηθείσας περιοχής. Οι Εικόνες 6 παρουσιάζουν την χωρική κατανομή της συγκέντρωσης χλωριδίου κατά την 6^η Νοεμβρίου 2006 (αριστερά) και 29^η Ιουνίου 2007 (δεξιά). Γενικά παρατηρείται σημαντική πλευρική διαφοροποίηση, με υψηλότερες συγκεντρώσεις στα ΒΑ και ΝΑ άκρα της μελετηθείσας περιοχής και δυναμικές μεταβολές συναρτήσει του χρόνου. Η τοπική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων χλωριδίου εν μέρει μπορεί να αποδοθεί σε αντίστοιχη τοπική εξάρτηση των διεργασιών υφαλμύρισης και δι' αυτής στην δομή και περατότητα των υποκείμενων ιζηματογενών σχηματισμών και του υποβάθρου. Σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να δοθεί λεπτομερής και εμπεριστατωμένη εξήγηση των παρατηρήσεων με τα υπάρχοντα και μόνο δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση, αμφότερες οι Εικόνες 5 και 6 καταδεικνύουν πόσο περίπλοκες μπορεί να είναι οι κατανομές ρυπαντών στους φρεάτιους υδροφορείς και συνεπώς το πλέγμα των περιφερειακών και τοπικών διεργασιών που τις δημιουργούν.



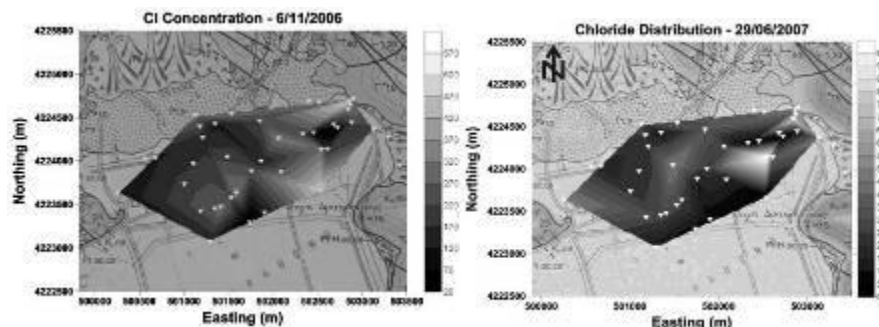
Εικόνα 4. Η μεταβολή της συγκέντρωσης NO_3^- (πάνω) και Cl^- (κάτω) σε όλους τους σταθμούς συναρτήσει του χρόνου για το έτος 2006.

4. Συζήτηση και Συμπεράσματα

Η ποιότητα των επιφανειακών και υπογείων υδατικών πόρων παρακολουθείται συστηματικά σε πολλές προηγμένες χώρες, αν και κυρίως κατά τρόπο συμβατικό: με λήψη δειγμάτων νερού και εργαστηριακή χημική ανάλυση. Η Ευρωπαϊκή οδηγία-πλαίσιο 2000/60



Εικόνα 5. Πλευρική κατανομή των συγκεντρώσεων NO_3^- την 6η Νοεμβρίου 2006 (αριστερά) και 29η Ιουνίου 2007 (δεξιά).



Εικόνα 6. Πλευρική κατανομή των συγκεντρώσεων Cl^- (δεξιά) την 6η Νοεμβρίου 2006 (αριστερά) και 29η Ιουνίου 2007 (δεξιά).

περί υδατικών πόρων καθιστά υποχρεωτική την παρακολούθηση της ποιότητας νερού και σύντομα όλες οι χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να ικανοποιήσουν αυστηρές προδιαγραφές εκτέλεσης τέτοιων εργασιών. Η ανάπτυξη προηγμένων φυσικοχημικών αισθητήρων (ISE), σε συνδυασμό με τις σύγχρονες δυνατότητες συλλογής, ανάλυσης και μετάδοσης δεδομένων μέσω τηλεπικοινωνιακών δικτύων, διευκολύνουν την παρακολούθηση της ποιότητας νερού *in-situ* και *on-line*. Επιπλέον, οι μετρήσεις που γίνονται με ISE έχουν το πλεονέκτημα να είναι κατά πολύ ταχύτερες από τις συμβατικές χημικές αναλύσεις, ενώ προσφέρουν ασύγκριτα μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση της ποιότητας νερού για πιστοποιημένες εφαρμογές (π.χ. προδιαγραφές πόσιμου νερού), για μη πιστοποιημένες εφαρμογές (π.χ. χαρτογράφηση της ρύπανσης υπογείων υδάτων), καθώς και για ακαδημαϊκή έρευνα (π.χ. εδαφολογικές μελέτες). Σε όλα τα ανωτέρω ερευνητικά πεδία, οι μετρήσεις με ISE προσφέρουν σημαντική προστιθέμενη αξία σε σύγκριση με τις εργαστηριακές χημικές αναλύσεις: για συχνές ή συνεχείς (αδιάκοπες) εφαρμογές είναι **σημαντικά φθηνότερες** και επιτρέπουν την συλλογή πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, παρέχοντας έτσι μία πολύ πιο περιεκτική και αναλυτική βάση δεδομένων επί της κατανομής, συμπεριφοράς και εξέλιξης της κατάστασης ρυπαντικών παραγόντων. Αυτό επιτρέπει την ταχεία απόσβεση του κεφαλαίου που επενδύθηκε στην εγκατάσταση του δικτύου παρακολούθησης και σημαντική

εξοικονόμηση πόρων απ' εκεί και πέρα.

Η μελέτη που λαμβάνει χώρα στην περιοχή Κάτω Σουλίου παρέχει μεγάλη ποσότητα in-situ δεδομένων για την ποιότητα και ποσότητα του υπογείου νερού, πράγμα που επιτρέπει την συσχέτιση χρονικών (εποχιακών) και χωρικών μεταβολών των μετρούμενων παραμέτρων με περιφερειακές και/ ή τοπικές φυσικές διεργασίες (υφαλμύριση) και ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (αγροτική δραστηριότητα και χρήση γης). Με τον τρόπο αυτό κατέδειξε την χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα της περιγραφείσας τεχνολογίας ISE στην διερεύνηση και αντιμετώπιση σύγχρονων περιβαλλοντικών κινδύνων που είναι αρκετά κοινοί στις παράκτιες περιοχές της νότιας Ευρώπης και ανά τον κόσμο γενικότερα.

Ευχαριστίες

Το έργο συλλογής και ανάλυσης δεδομένων ποιότητας νερού στην περιοχή Κάτω Σουλίου συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και Εθνικούς Πόρους (ΕΠΕΑΕΚ II) ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ.

Βιβλιογραφία

Λόζιος, Σ., 1993. *Τεκτονική ανάλυση των μεταμορφωμένων σχηματισμών της Νοτιοανατολικής Αττικής*. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών, σελ. 299.

Μαργώνη, Σ., Συρίδης, Γ., Ψιλοβίκος, Α., Τρώντισος, Γ., Σταϊνχάουερ, Γ., Βουβαλίδης, Κ. και Μουζούρη, Γ., 2002. *Η εξέλιξη του φυσικού περιβάλλοντος στην περιοχή του Σχοινιά Μαραθώνα από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα*, Πρακτικά, 6^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, 159-165.

Σενή, Α., Καψιμάλης, Β., και Παυλόπουλος, Κ., 2004. Προσδιορισμός των πρόσφατων μεταβολών στην παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα Αττικής, με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, Πρακτικά, 7^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο (κείμενο διαθέσιμο μέσω της δικτυακής διεύθυνσης <http://www.ath.aegean.gr/srcosmos>).

Boetechtel, J. and Papadeas, G., 1968. Tectonic aerial interpretation in the Mediterranean region exemplified by the metamorphic series at eastern Greece, near Marathon. *Photogrammetria*, 26, 201-210.

Christian, G.D., 1994. *Analytical chemistry*, Wiley.

Clesceri, L.S., Greenberg, A.E. and Trussel, R. Rhodes (eds), 1989. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Published by the Am. Publ. Health Assoc., Am. Water Works Assoc. and Water Pollution Control Fed.

Covington, A. K., (ed.) 1979. *Ion Selective Electrode Methodology*. Volumes 1 & 2, CRC Press. Boca Raton.

Koryta, J. and Stulik, K., 1983. *ISEs*, 2. edition, Cambridge University Press.

Koryta, J., 1994. *Principles of Electrochemistry*, Wiley.

Lozios, S., 1991. Microtectonic observations in the metamorphic system of the Varnavas – Ramnounta area, NE Attica, *Bull. Geol. Soc. Greece*, 25(1), 439-453 (in Greek).

Morf, W.E., 1981. *The Principles of ISEs and of Membrane Transport*, Elsevier.

Pavlopoulos, K., Karkanias, P., Triantaphyllou, M., Karymbalis, E., Tsourou, Th., and Palyvos, N., 2006. Paleoenvironmental Evolution of the Coastal Plain of Marathon, Greece, during the Late Holocene: Depositional Environment, Climate, and Sea Level Changes, *Journal of Coastal Research*, 22 (2), 424-438.

TerraMentor E.E.I.G, 2004. Information and measuring system for hydrological/hydrogeological investigations, Technical Description and Users Guide, Athens.

Wikipedia, 2006. Ion selective electrode. Retrieved 05:57, November 30, 2006, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ion_selective_electrode&oldid=90339686

Wilson A.L. and Hunt D.T.E., 1986. The Chemical Analysis of water: general principles and techniques, 2nd ed., The Royal Society of Chemistry, London.