

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΧΝΗΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ Β. ΟΣΣΑΣ / ΒΑ-ΘΕΣΣΑΛΙΑ

Σταμάτης Γ.¹ και Ζαγγανά Ε.²

¹ Τομέας Γεωλογικών Επιστημών και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος, Γενικό Τμήμα, Γ. Π. Α, Ιερά
Οδός 75, 118 55 Αθήνα, stamatis@aua.gr,

² Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών, Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας, Τ.Θ. 712, 19013 Ανάβυσσος,
Αττική, eleza@ncmr.gr

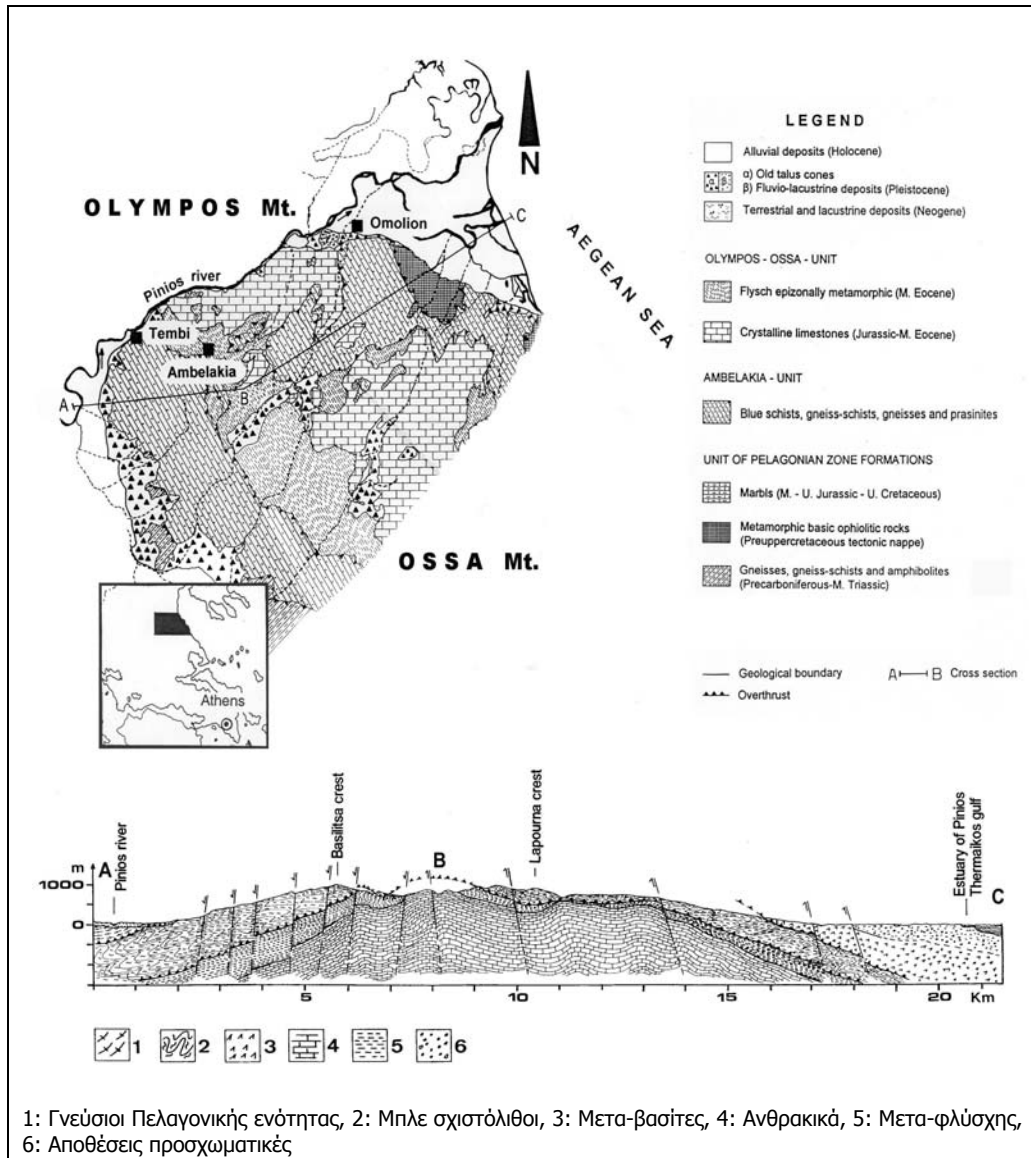
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Περιγράφονται οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο βόρειο τμήμα της Όσσας. Η έρευνα που στηρίχθηκε στην εφαρμογή υδροχημικών και ιχνηθετικών μεθόδων, με χρήση NaCl και ουρανίνης ως ιχνηθέτες, επικεντρώνεται στον καρστικό υδροφορέα και εξετάζονται οι πηγές προέλευσης της παρατηρούμενης οργανικής μόλυνσης του. Από πλευράς ανόργανου χημικού φορτίου τα καρστικά νερά είναι καλής ποιοτικής σύστασης και δεν εμφανίζουν επιφανειακές επιβαρύνσεις λόγω της αραίωσης τους. Οι ιχνηθετήσεις αποκαλύπτουν υψηλές τιμές πραγματικής ταχύτητας V_a των υπόγειων ροών, οι οποίες κυμαίνονται από 82 m/h έως 146 m/h και φανερώσουν την έντονη καρστικοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών και την σπηλαιώδη κατάσταση που επικρατεί. Η υπόγεια ροή έχει ΒΑ/κή διεύθυνση και η εκτόνωση του καρστικού υδροφορέα συντελείται στην κοιλάδα των Τεμπών. Η παρατηρούμενη μόλυνση συνδέεται άμεσα με ανθρωπογενείς επιδράσεις εντός της περιοχής τροφοδοσίας των καρστικών πηγών και απαιτεί την άμεση λήψη μέτρων προστασίας του υδροφορέα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο καθορισμός της κατεύθυνσης ροής των υπόγειων νερών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίλυση υδρογεωλογικών προβλημάτων και κυρίως για την οικονομική ανάπτυξη μιας περιοχής. Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες σε νερό από τη μια πλευρά και η παρατηρούμενη αδιάπλητη τάση ρύπανσης των νερών κυρίως από ανθρωπογενείς επιδράσεις από την άλλη πλευρά, αποτελούν τους δυο βασικούς λόγους που επιβάλλουν τη συστηματική διερεύνηση του δικτύου των υπόγειων ροών, τη λειτουργία του συστήματος υπόγειων νερών και την οριοθέτηση της περιοχής τροφοδοσίας του. Η αναγκαιότητα αυτή αποκτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον, όταν πρόκειται για καρστικά υδροσυστήματα, καθότι αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλες ταχύτητες υπόγειας ροής και μειωμένη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού των ποιοτικά επιβαρημένων, από επιφανειακούς κυρίως παράγοντες, κατεισδύσεων. Στην περιοχή έρευνας αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών σχηματισμών της Όσσας ένας σημαντικής δυναμικότητας καρστικός υδροφορέας. Η εκτόνωση του συντελείται στο βόρειο τμήμα της Όσσας μέσω των καρστικών πηγών που αναβλύζουν στην κοιλάδα των Τεμπών κατά μήκος της νότιας κοίτης του Πηνειού, όπως του Αχιλλέα, της Δάφνης, του Απόλλωνα και της Αφροδίτης. Οι υδροχημικές αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς δεν αποκαλύπτουν την επιφανειακή επιβάρυνση καθ' όσον οι τιμές συγκέντρωσης των δεικτών ανόργανης ρύπανσης, όπως Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , εμφανίζονται αρκετά χαμηλές, προφανώς λόγω του βαθμού αραίωσης. Η παρουσία όμως κολοβακτηριδίων, που εντοπίζονται σε δείγματα των υδρομαστευμένων πηγών Αχιλλέα και Δάφνης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για υδροδότηση του Δήμου Ομόλιου, μαρτυρούν την μόλυνση του καρστικού υδροφορέα (πληροφορία του κ. Δημάρχου του Δήμου Ομόλιου). Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα του χαμηλού δυναμικού αυτοκαθαρισμού που διακρίνει την έντονα καρστικοποιημένη ακόρεστη ζώνη και συνδέεται άμεσα με ανθρωπογενείς επιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή τροφοδοσίας του καρστικού υδροφορέα, όπως η ύπαρξη ποιμνιοστασιών κλπ.

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην έρευνα του καρστικού συστήματος της βόρειας Όσσας με χρήση ιχνηθετικών και υδροχημικών μεθόδων και έχει σκοπό την διερεύνηση των υπόγειων ροών, τον καθορισμό της περιοχής τροφοδοσίας και τον εντοπισμό των επιφανειακών πηγών μόλυνσης των καρστικών πηγών της Όσσας, οι οποίες εκτονώνονται στη κοιλάδα των Τεμπών.



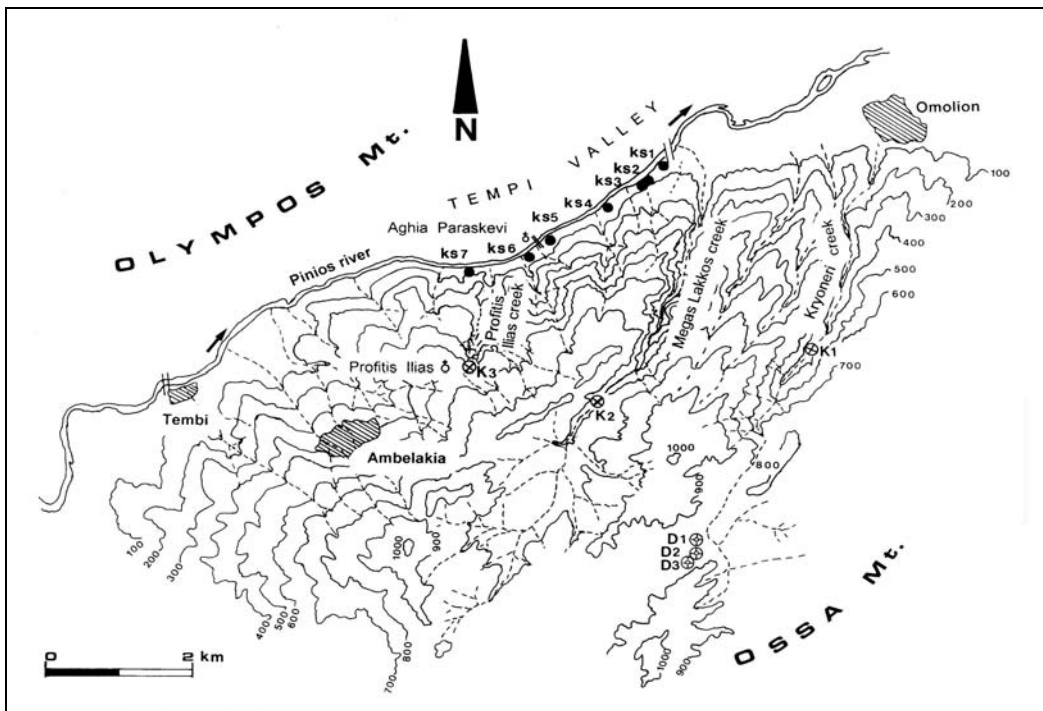
Σχήμα 1: Γεωλογική-τεκτονική δομή της βόρειας Όσσας

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 Γεωμορφολογικά στοιχεία

Η περιοχή μελέτης καλύπτει το βόρειο τμήμα του ορεινού όγκου της Όσσας που βρίσκεται στην Ανατολική Θεσσαλία (Σχ. 1). Το τμήμα αυτό στο ΒΔ άκρο του ορίζεται από την κοιλάδα των Τεμπών η οποία έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και διασχίζεται από τον Πηνειό ποταμό που στραγγίζει την υδρολογική λεκάνη του και εκβάλει στο Αιγαίο πέλαγος. Το μεγαλύτερο τμήμα της κοιλάδας δομείται από ανθρακικούς σχηματισμούς της ενότητας Όσσας, γεγονός που εξηγεί και τη γενικότερη γεω-

μορφολογική εικόνα. Οι ασβεστόλιθοι είναι έντονα καρστικοποιημένοι και κερματισμένοι. Σε ορισμένα σημεία η απότομη κλίση των τοιχωμάτων διακόπτεται και αναπτύσσονται υποτυπώδεις έως εμφανέστερες αναβαθμίδες οι οποίες αντιστοιχούν στις διάφορες φάσεις της μορφολογικής εξέλιξης της κοιλάδας. Η περιοχή διατέμνεται από βαθιές κοιλάδες οι οποίες στις περιοχές των ανθρακικών σχηματισμών έχουν τη μορφή κανονικών φαράγγιων. Τα κυριότερα από αυτά είναι το Μεγάλο Φαράγγι, ο Μέγας Λάκκος και το Κρουονέρι (Σχ. 2). Σε ορισμένα υψηλά τοπογραφικά σημεία αναπτύσσονται μικρές λεκάνες με ομαλή επιφάνεια. Περίπου στο 1/3 της επιφάνειας της περιοχής μελέτης αποκαλύπτονται τα ανθρακικά πετρώματα εξαιτίας τεκτονικής δομής και στα υπόλοιπα 2/3 αναπτύσσονται οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί, που οριοθετούν το γυμνό και καλυμμένο καρστικό σύστημα της Βόρειας Όσσας αντίστοιχα. Στην επιφάνεια των ανθρακικών σχηματισμών διακρίνονται έντονες καρστικές μορφές, όπως δολίνες, καταβόθρες, ξηρές κοιλάδες και φαράγγια, οι οποίες φανερώνουν την εξέλιξη της εξω- και ενδοκαρστικής διεργασίας στην περιοχή (Σχ. 2).



Σχήμα 2: Γεωμορφολογικά και υδρογραφικά στοιχεία περιοχής έρευνας (ks1-ks7: σημεία καρστικών πηγών, K1-K3: καταβόθρες, D1-D3: δολίνες).

2.2 Γεωλογική-τεκτονική δομή

Την περιοχή ενδιαφέροντος δομούν προαλπικοί, αλπικοί και μετααλπικοί σχηματισμοί που ανήκουν γεωτεκτονικά, α) στην ενότητα Όσσας, β) στην ενότητα Αμπελακίων και γ) στην ενότητα Πελαγονικής (Σχ. 1). Η ενότητα Όσσας αποτελείται από μια σειρά κρυσταλλικών ασβεστολίθων και δολομιτών, οι οποίοι έχουν ορατό πάχος έως 1000 μέτρα. Η σειρά προς τα επάνω περνά κανονικά σε μετα-φλύσχη, ο οποίος αποτελείται από φυλλίτες, σχιστόλιθους, σχιστοψαμμίτες με ενστρώσεις μικρού πάχους ψαμμούχων κρυσταλλικών ασβεστολίθων, πάχους περίπου 20-30 μέτρων. Τα πετρώματα είναι έντονα τεκτονισμένα και εξαλλοιωμένα. Η ενότητα Αμπελακίων (ενότητα μπλε σχιστολίθων) αποτελείται από ιζηματογενούς προέλευσης πετρώματα, μεταπηλίτες και μεταγραουβάκες με παρεμβολές μεταβασιτών και ενστρώσεων μαρμάρων. Τα πετρώματα παρουσιάζονται έντονα πτυχωμένα, τεκτονισμένα και εξαλλοιωμένα. Το πάχος τους ξεπερνά κατά θέσεις τα 800 μέτρα. Η ενότητα της πελαγονικής αντιπροσωπεύεται με σχηματισμούς του προανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος, οι οποίοι αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μεταμορφωμένα οφιολιθικά πετρώματα, όπως σερπεντινίτες, αμφιβολίτες και πρασινίτες. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται

στο ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας και το πάχος τους υπερβαίνει τα 200 μέτρα. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί και αποθέσεις καταλαμβάνουν μικρή έκταση και περιορισμένο πάχος και απαντώνται κατά κανόνα στις περιοχές των ορεινών μικρών λεκανών και στα πρηνή τους και στις κοίτες των χειμάρρων. Οι Νεογενείς σχηματισμοί που είναι κυρίως υπολειμματικές εμφανίσεις και αποτελούνται από κροκαλοπαγή, μάργες, αργίλους και κοκκινοχώματα, αναγνωρίζονται κοντά στον Πηνειό ποταμό στο ύψος της Ιτέας και στο Ομόλιο. Οι Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί αντιπροσωπεύουν παλαιούς κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα, υλικά αναβαθμίδων των χειμάρρων και αποθέσεις λεκανών. Οι Ολοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται από ασύνδετα υλικά κοίτης και αναβαθμίδων χειμάρρων και υλικά εσωτερικών μικρολεκανών. Η ενότητα Όσσας, που θεωρείται αυτόχθονη έως τουλάχιστον παρααυτόχθονη, αποτελεί τεκτονικό παράθυρο υποκειμένη όλων των παλαιότερων μεταμορφωμένων σχηματισμών των ενότητων των Αμπελακίων και της Πελαγονικής. Η μάζα της Όσσας γενικά αποτελεί ένα αντικλινωριακό δόμο με κυριαρχούσα αξονική διεύθυνση ΒΒΑ/κή, αμφίπλευρης βύθισης. Από πλευράς διαρρηκτικής τεκτονικής εμφανίζονται εγκάρσιες δομές κύριας ΒΒΑ/κής και δευτερεύουσας Α-Δ διεύθυνσης (Jacobshagen 1986, Κατσικάτσος et al. 1980).

3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης εξαρτώνται άμεσα από την παρουσία των ανθρακικών σχηματισμών και την έντονη διαρρηκτική τεκτονική που επικρατεί. Στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες της ενότητας Όσσας αναπτύσσεται ένας αξιόλογος καρστικός υδροφόρος, σημαντικής δυναμικότητας. Τα κατεισδύοντα επιφανειακά νερά, τα οποία σε γενικές γραμμές ακολουθούν την κλίση των πετρωμάτων και τις διευθύνσεις των ζωνών διάρρηξης, εμφανίζονται και πάλι στην επιφάνεια στα χαμηλότερα τοπογραφικά σημεία της κοιλάδας των Τεμπών, δημιουργώντας χαρακτηριστικές καρστικές πηγές με υψηλές παροχές κοντά στην κοίτη ή και στην ίδια την κοίτη του Πηνειού ποταμού. Οι πλέον σημαντικές και γνωστές από αυτές είναι οι πηγές του Αχιλλέα (ks1), της Δάφνης (ks2 και ks3), του Απόλλωνα (ks4) και της Αφροδίτης (ks7) (Σχ. 2). Κατά την περίοδο διεξαγωγής των ερευνών, Ιανουάριο έως Μάρτιο 1992, οι παροχές τους κυμαίνονταν μεταξύ 120 l/s και 260 l/s (Πίν. 1). Σημαντική μείωση της παροχής τους παρατηρείται κατά την ξηρή περίοδο. Ιδιαίτερα σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας διαπιστώνεται πλήρης στήρευση των πηγών. Διατηρούνται όμως οι αναβλύσεις εντός της κοίτης του Πηνειού ποταμού που εντοπίζονται στο βορειοανατολικό τμήμα της κοιλάδας των Τεμπών λίγο πριν την έξοδο του Πηνειού από τα στενά προς τις δελταϊκές αποθέσεις. Τα διάφορα μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως οι φυλλίτες, οι σχιστόλιθοι, οι γνεύσιοι, οι αμφιβολίτες και ο μετα-φλύσχης, τα οποία βρίσκονται επωθημένα πάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς εμφανίζουν διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Πρόκειται θεωρητικά για σύνολο στεγανών σχηματισμών με σημαντική κατά θέσεις όμως αύξηση του ενεργού πορώδους εξαιτίας της λιθολογίας (ανθρακοψαμμιτικά μέλη) και της διαρρηκτικής τεκτονικής, έτσι ώστε να αποκτούν ιδιότητες ημιπερατών σχηματισμών. Οι πηγές που συνδέονται με τους προαναφερόμενους σχηματισμούς είναι κυρίως ρηματογενείς και παρουσιάζουν χαμηλές παροχές που κυμαίνονται από 0,05-6,6 l/s (Stamatis 1999).

4 ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

Στις 15 Φεβρουαρίου 1992 πραγματοποιήθηκε μια δειγματοληψία των καρστικών πηγών, που τροφοδοτούνται από την Όσσα και αναβλύζουν μέσα στην κοιλάδα των Τεμπών κατά μήκος της νότιας όχθης του Πηνειού ποταμού. Επίσης έγινε δειγματοληψία και των επιφανειακών νερών των ρεμάτων Κρουονέρι και Μέγας Λάκκος, στα σημεία πριν την κατείσδησή τους εντός της ανθρακικής μάζας, με σκοπό τη σύγκριση του ποιοτικού τους χαρακτήρα με αυτόν των υπογείων νερών. Επί τόπου μετρήθηκαν με φορητά όργανα οι φυσικοχημικές παράμετροι: θερμοκρασία T⁰C, pH, διαλυμένο οξυγόνο DO και ηλεκτρική αγωγιμότητα EC. Οι υδροχημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας του Γ.Π.Α για τον προσδιορισμό των κύριων ιόντων και σκληρότητας με εφαρμογή μεθόδων ατομικής απορρόφησης, φασματοφωτομετρίας και τιτλοδότησης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Οι πηγές ks1 έως ks4 παρουσιάζουν πανομοιότυπο χαρακτήρα και αποκαλύπτουν τον ενιαίο υδροφόρα προέλευσής τους. Η αλατότητα τους κυμαίνεται μεταξύ 676 και 716 mg/l TDS. Στις πηγές ks5 και ks6 διαπιστώνεται μείωση του ιοντικού φορτίου (627-446 mg/l) και μικρής κλίμακας επιφανειακών επιδράσεων (18,6-

24,5 mg/l Cl⁻, 5,6-10,6 mg/l NO₃⁻, 0,2-0,3 mg/l PO₄³⁻). Στη πηγή ks7 διαπιστώνεται έντονη διαφοροποίηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές. Η σημαντική μείωση του ιοντικού φορτίου της (273 mg/l TDS) σχετίζεται ενδεχομένως και με τις επιφανειακές καταισθήσεις, οι οποίες προέρχονται από τον ανώτερο υδροφόρο ορίζοντα του μετα-φλύσχη και των υπολοίπων επωθημένων μεταμορφωμένων σχηματισμών, που αναπτύσσονται στην περιοχή τροφοδοσίας της. Χαρακτηριστική είναι επίσης η χαμηλή θερμοκρασία της πηγής, γεγονός που συνδυάζεται με τα ψυχρά ρεύματα, που έχουν εντοπισθεί στο δυτικό τμήμα της ανθρακικής μάζας της Όσσας (Garagunis 1968). Γενικά όλες οι καρστικές πηγές, παρά την διαφοροποίηση τους στο σύνολο των διαλυμένων αλάτων, παρουσιάζουν κοινό ποιοτικό χαρακτήρα. Χαρακτηρίζονται γαιοαλκαλικά-οξιανθρακικά νερά και ανήκουν στον υδροχημικό τύπο Ca-HCO₃. Τα επιφανειακά νερά των ρεμάτων έχουν χαμηλή συγκέντρωση αλάτων (98-101 mg/l) και ανήκουν στην κατηγορία των γαιοαλκαλικών-οξιανθρακικών νερών Ca-Mg-HCO₃.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων των καρστικών υπόγειων και επιφανειακών νερών της Όσσας (15 Φεβρουαρίου 1992).

Σημεία δειγματοληψίας	Ks1	Ks2	Ks3	Ks4	Ks5	Ks6	Ks7	Κρυονέρι K1	Μ.Λάκκος K2
Θερμοκρασία °C	14,2	14,2	14,1	14,2	14,1	15,1	11,5	9,2	8,9
Αγωγ. μS/cm	634	650	648	649	597	525	252	98	69
pH	6,9	6,9	6,8	6,6	6,9	7	7,6	7	7,1
O ₂ mg/l	9,4	9,8	9,6	9,5	9,9	9,8	10,9	10,1	10
Ολική σκληρ. °dH	25,5	25,8	25,1	24,1	23,2	15,6	9	4	3,4
Παροδική "	23,8	23,8	23,2	22,4	19,6	13,8	7,8	2,8	2,2
Μόνιμη "	1,7	2	1,9	1,7	3,6	1,8	1,2	1,2	1,2
Ca ²⁺ mg/l	136,4	140	138	133	121	76,8	55,2	19,2	7
Mg ²⁺ "	24,4	26,9	25,1	24	17	20	5,6	5,5	10,5
Na ⁺ "	6,8	6,6	6,4	6,5	9,8	7,4	4,6	3,5	5,2
K ⁺ "	0,8	0,8	0,8	0,7	2	2	0,6	0,4	0,5
HCO ₃ ⁻ "	518,5	518,5	506	488	427	299	171	61	48,8
Cl ⁻ "	14,2	14,2	14,2	14,2	24,5	18,6	10,6	10,6	14,1
SO ₄ ²⁻ "	5	8	8,1	9	14,8	16,6	22	12,5	9,5
NO ₃ ⁻ "	1	1	1,2	1,3	10,6	5,6	3,1	1	2
PO ₄ ³⁻ "	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
TDS mg/l	714	716	700	676	627	446	273	101	98

5 ΙΧΝΗΘΕΤΗΣΕΙΣ

Οι ιχνηθετήσεις αποτελούν ένα βασικό εργαλείο στην έρευνα των καρστικών υδροσυστημάτων. Βασικός σκοπός της χρήση διαφόρων ιχνηθετών, όπως ευδιάλυτα άλατα (NaCl, KCl και LiCl), φθορίζουσες χρωστικές ουσίες (Ουρανίνη, Εωσίνη, Ροδαμίνη, κ.αλ.), αδιάλυτες ουσίες (μύκητες, σπόροι, βακτήρια κ.αλ.), ραδιενεργοί και μη ραδιενεργοί ιχνηθέτες, είναι: α) ο υπολογισμός της πραγματικής ταχύτητας του υπόγειου καρστικού νερού, β) ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων καρστικών νερών, και γ) ο καθορισμός της κατεύθυνσης ροής των υπόγειων νερών. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν βασικό κριτήριο στον καθορισμό της περιοχής τροφοδοσίας των καρστικών πηγών και κατ' επέκταση στην οριοθέτηση των ζωνών προστασίας τους (Käss 1992, Καλλέργης 2001).

5.1 Υλικά και Μέθοδοι

Στα πλαίσια της έρευνας του καρστικού συστήματος της βόρειας Όσσας, η οποία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διερεύνηση των υπόγειων ροών, τον καθορισμό της περιοχής τροφοδοσίας και τον εντοπισμό των επιφανειακών πηγών μόλυνσης των καρστικών πηγών των Τεμπών, έγιναν δυο ιχνηθετήσεις στις καταβόθρες K1 και K2 που βρίσκονται εντός της κοίτης των ρεμάτων Κρυονέρι και Μέγας Λάκκος αντίστοιχα (Σχ. 2). Στην περίοδο που πραγματοποιήθηκαν οι ιχνηθετήσεις (Φεβρου-

άριος-Μάρτιος 1992) διαπιστώθηκε καθολική κατείσδυση του επιφανειακού νερού στα προαναφερόμενα σημεία. Πριν λάβει χώρα η ιχνηθέτηση έγιναν μετρήσεις των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των καρστικών πηγών παρακολούθησης ks1 έως ks7 και του επιφανειακού νερού των ρεμάτων (Πίν. 2).

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά στοιχεία πηγών δειγματοληψίας και σημείων ιχνηθέτησης (28.02.1992)

Σημεία δειγματοληψίας και ιχνηθέτησης	ks1	ks2	ks3	ks4	ks5	ks6	ks7	Κρυονέρι Κ1	Μ.Λάκκος Κ2
Απόλ. υψόμετρο (m)	15	15	16	18	18	19	20	465	680
Παροχή (l/s)	120	220	45	260	25	10	110	12	5
Αγωγιμότητα (μS/cm)	652	652	652	649	597	525	241	113	184
Θερμοκρασία °C	14,2	14,2	14,2	14,2	15,6	14,1	11.0	3,5	7,3
pH	6,9	6,9	6,9	6,7	6,9	7	7,6	8,3	8

¹ *Ιχνηθέτηση:* Στη καταβόθρα Κ1 έγινε η πρώτη ιχνηθέτηση, όπου χρησιμοποιήθηκαν 200 Kg υψηλής καθαρότητας NaCl, που είχε διαλυθεί προηγουμένως σε πλαστικά δοχεία συνολικού όγκου περίπου 100 λίτρα. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται υψηλές ποσότητες NaCl (>1000 Kg) για ιχνηθετήσεις καρστικών συστημάτων. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε σημαντικά χαμηλή ποσότητα NaCl με σκοπό να παραμείνει η επιβάρυνση του καρστικού υδροφορέα σε πολύ χαμηλά επίπεδα λόγω υδρευτικής χρήσεώς του. Το πυκνό διάλυμα διοχετεύθηκε στη καταβόθρα των νερών την 22.2.1992 στις 14⁰⁰. Την ίδια ημέρα με δυο ώρες περίπου καθυστέρηση ξεκίνησαν οι μετρήσεις παρακολούθησης των αναμενόμενων μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις πηγές ks1 έως ks7. Χρησιμοποιήθηκαν τρία φορητά αγωγιμόμετρα WTW-LF316. Οι μετρήσεις διήρκεσαν μέχρι την 12^η ώρα της 1.3.1992.

² *Ιχνηθέτηση:* Στην καταβόθρα Κ2 πραγματοποιήθηκε η δεύτερη κατά σειρά ιχνηθέτηση, όπου χρησιμοποιήθηκε 1 Kg Ουρανίνης. Η απαιτούμενη ποσότητα της χρωστικής ουσίας υπολογίστηκε ανάλογα με τις αποστάσεις των σημείων ρίψης και εκβολής, περίπου 2-10 g/10 m απόσταση, όπως αυτή προτείνεται από Bentz et al. 1969. Η χρωστική ουσία είχε διαλυθεί προηγουμένως με νερό σε πλαστικό δοχείο συνολικού όγκου περίπου 20 λίτρα. Το πυκνό διάλυμα διοχετεύθηκε στην καταβόθρα Κ2 την 1.3.1992, στις 17⁰⁰. Την ίδια ημέρα που έγινε η ρίψη της χρωστικής ουσίας, άρχισε περίπου στις 20⁰⁰ η δειγματοληψία των καρστικών πηγών παρακολούθησης ανά μία έως δύο ώρες, η οποία διήρκεσε μέχρι τις 4.3.1992. Συνολικά συλλέχθηκαν 262 δείγματα. Η συλλογή των δειγμάτων έγινε σε πλαστικά φιαλίδια πολυαιθυλενίου των 50ml και διατηρήθηκαν μέχρι την ανάλυση τους σε σκοτεινό περιβάλλον, με σκοπό την αποφυγή αλλοίωσης της χρωστικής ουσίας. Η ανίχνευση της συγκέντρωσης ουρανίνης στα δείγματα πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά το πέρας του πειράματος στο εργαστήριο της Διεύθυνσης Υδρογεωλογίας του ΙΓΜΕ-Αθηνών με το Spectrofluorometer της PERKIN ELMER model LS3.

5.2 Αποτελέσματα των ιχνηθετήσεων

5.2.1 Ιχνηθέτηση NaCl

Στο σχήμα 3 προβάλλονται οι θέσεις ιχνηθετήσεων και η εμφάνιση του ιχνηθέτη στα σημεία δειγματοληψίας. Στο σχήμα 4 προβάλλεται αντιπροσωπευτικά το υδρογράφημα της πηγής ks1 (καμπύλη χρόνος-αγωγιμότητα) όπου αποτυπώνονται οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές (t_1-t_4) της διέλευσης του NaCl. Επίσης προβάλλεται η καμπύλη χρόνος-εκροή του NaCl, που διέλευσε από το συγκεκριμένο σημείο. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν τα υδρογραφήματα όλων των πηγών παρατήρησης, δηλαδή η καμπύλη μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο χρόνο. Καταγράφηκαν οι ακόλουθες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές διέλευσης του ιχνηθέτη κατά Käss 1992, όπου t_1 = πρώτη εμφάνιση, t_2 = μέγιστη εμφάνιση, t_3 = διέλευση 1/2 της ποσότητας του ιχνηθέτη και t_4 = τελευταία εμφάνιση. Στις προαναφερόμενες χρονικές στιγμές υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες ταχύτητες V_{max} , V_{dom} , V_a , και V_{min} σε m/h. Στον υπολογισμό της ταχύτητας λαμβάνεται υπόψη σαν μήκος διαδρομής τόσο η οριζόντια απόσταση των δύο σημείων ιχνηθέτησης – εκροής, όσο και το κατακό-

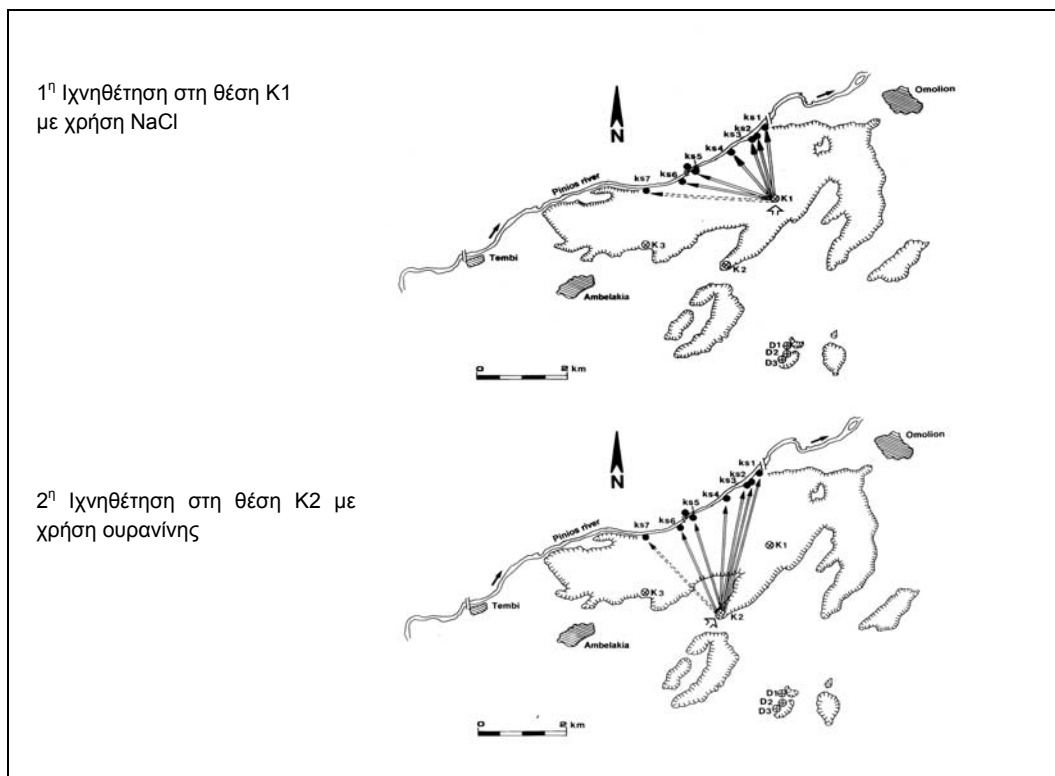
ρυφο διάστημα των απόλυτων υψομέτρων των δυο σημείων. Υπολογίσθηκε η περιοδική και η ολική ποσότητα του ιχνηθέτη που έφθασε στο σημείο εκροής με βάση τη σχέση (Matthess 1973):

$$\text{Συγκέντρωση NaCl στο νερό (g/l) / Ηλ. Αγωγιμότητα (mS/cm)} = \text{Συντελεστής } f = 0,65$$

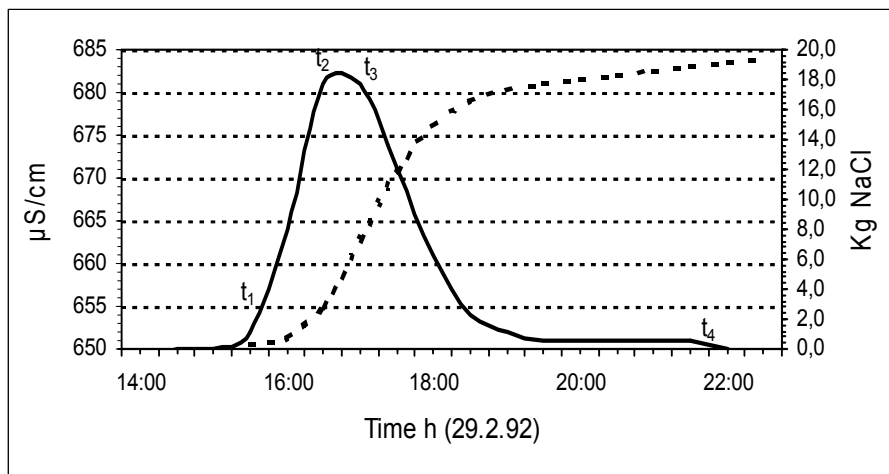
$$\text{NaCl -Εκροής (g/min)} = 0,65 \cdot \text{Παροχή (l/min)}.$$

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιχνηθέτησης με χρήση NaCl.

Κατά την ιχνηθέτηση με NaCl στη καταβόθρα K1 διαπιστώνεται αύξηση των τιμών αγωγιμότητας στις πηγές ks1 έως και ks6. Αντίθετα η πηγή ks7 δεν παρουσιάζει καμία αισθητή διαφοροποίηση των τιμών. Στις πηγές ks1 και ks2 διαπιστώνεται η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας 682 $\mu\text{S/cm}$ σε σχέση με τη βασική τιμή τους 650 $\mu\text{S/cm}$ μετά την πάροδο περίπου 25 ωρών από την στιγμή της ιχνηθέτησης. Στις πηγές ks4 και ks5 διαπιστώνεται μια υστέρηση της αύξησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά 30 λεπτά περίπου σε σχέση με τις ks1 και ks2. Στην πηγή ks6 η υστέρηση αυτή ανέρχεται σε 60 λεπτά περίπου σε σχέση με τις ks1 και ks2. Η πηγή ks7 δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση των τιμών αγωγιμότητας και κατ' επέκταση καμία επικοινωνία της υπόγειας ροής με το σημείο ιχνηθέτησης K1. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει την επικρατούσα ΒΑ κατεύθυνση της υπόγειας ροής. Οι τιμές της μέγιστης ταχύτητας V_{max} , η οποία προκύπτει από την πρώτη εμφάνιση του ιχνηθέτη, κυμαίνεται από 137 m/h έως 150 m/h. Οι τιμές της επικρατέστερης ταχύτητας V_{dom} , η οποία προκύπτει κατά τη μέγιστη εμφάνιση του ιχνηθέτη, κυμαίνεται από 133 m/h έως 148 m/h. Η μέση πραγματική ταχύτητα του υδροφορέα V_a , η οποία προκύπτει στη χρονική στιγμή όπου διέλευσε η μισή ποσότητα του ιχνηθέτη στο συγκεκριμένο σημείο παρατήρησης, κυμαίνεται από 132 m/h έως 146 m/h. Τέλος οι τιμές της χαμηλότερης ταχύτητας V_{min} , που προκύπτουν στη χρονική στιγμή της εξάντλησης του ιχνηθέτη, κυμαίνονται μεταξύ 104 m/h και 126 m/h. Η μέση τιμή όλων των επιμέρους υπολογιζόμενων ταχυτήτων ανέρχεται σε 133 m/h. Η ποσότητα εκροής του NaCl, που υπολογίσθηκε στις πηγές παρατήρησης, ανήλθε σε 121,3 Kg, η οποία αντιστοιχεί σε 61 % της ολικής χρησιμοποιηθείσας ποσότητας των 200 Kg. Τα υπόλοιπα 39 %, δηλαδή τα 78,7 Kg του NaCl, προφανώς διέρρευσαν σε σημεία εκροής καρστικού νερού εντός της κοίτης του Πηνειού ή επίσης σε παρόχθια μη προσπελάσιμα σημεία.



Σχήμα 3: Θέσεις ιχνηθετήσεων και σημείων δειγματοληψίας (συνεχόμενη γραμμή βέλους: εμφάνιση ιχνηθέτη στην αντίστοιχη πηγή, διακεκομμένη γραμμή βέλους: μη εμφάνιση του ιχνηθέτη).



Σχήμα 4: Αντιπροσωπευτικό υδρογράφημα της καρστικής πηγής ks1, όπου προβάλλονται σε συνεχόμενη γραμμή η καμπύλη «χρόνος-αγωγιμότητα» και σε διακεκομμένη γραμμή η προσθετική καμπύλη εκροής του ιχνηθέτη.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά στοιχεία που προκύπτουν από την ιχνηθέτηση στην καταβόθρα K1 από 28 Φεβρουαρίου έως 1 Μαρτίου 1992 με χρήση 200 Kg NaCl.

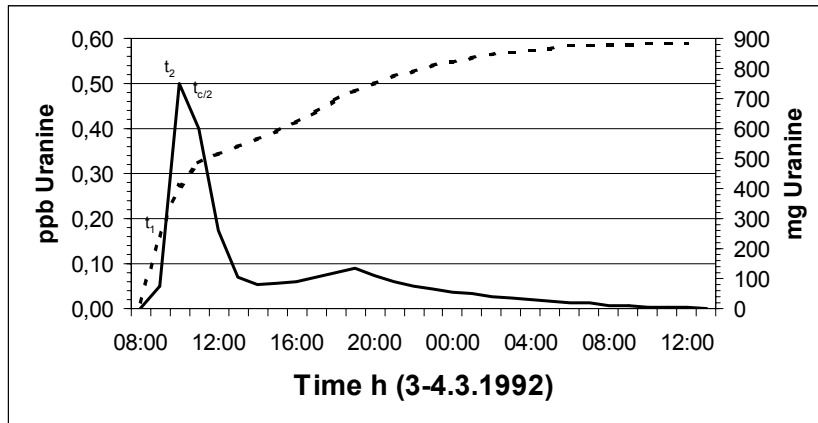
Πηγές δειγματοληψίας	ks1	ks2	ks3	ks4	ks5	ks6	ks7	M. τιμή
Απόσταση από K1 (m)	3550	3600	3650	3500	3800	3900	4300	
t ₁ (h)	25 ⁰⁰	25 ⁰⁰		25 ³⁰	25 ³⁰	26 ⁰⁰		25³⁰
t ₂ (h)	26 ⁴⁰	26 ⁴⁰	δ.μ.	25 ⁵⁰	27 ¹⁰	26 ¹⁵	δ.αν.	26³⁰
t ₃ (h)	26 ⁵⁰	26 ⁵⁰		26 ⁰⁵	27 ²⁰	26 ⁴⁵		26⁴⁰
t ₄ (h)	34 ⁰⁰	34 ⁰⁰		33 ⁰⁰	32 ⁰⁰	31 ⁰⁰		32⁵⁰
V _{max} (m/h)	142	144		137	149	150		144
V _{dom} (m/h)	133	135		135	140	148		138
V _a (m/h)	132	134		134	139	146		137
V _{min} (m/h)	104	106		106	118	126		112
Vμ. τ. (m/h)	128	130		128	136	142		133
Εκροή NaCl (Kg)	19,3	39,4		58,2	3,5	0,9		Σ=121,3 Kg =61%

δ.μ.: δεν μετρήθηκε, δ.αν.: δεν ανιχνεύθηκε NaCl

5.2.2 Ιχνηθετήσεις ουρανίνης

Στο σχήμα 5 προβάλλεται αντιπροσωπευτικά το υδρογράφημα της πηγής ks1 "χρόνος-συγκέντρωση ιχνηθέτη" όπου αποτυπώνονται οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές (t₁-t₃) της διέλευσης της ουρανίνης. Επίσης προβάλλεται η καμπύλη "χρόνος-εκροή" της ουρανίνης, που διέρρευσε από το συγκεκριμένο σημείο. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης κατά σειρά ιχνηθέτησης. Οι τιμές της μέγιστης ταχύτητας V_{max}, η οποία προκύπτει από την πρώτη εμφάνιση του ιχνηθέτη, κυμαίνεται από 89 m/h έως 156 m/h. Οι τιμές της V_{Cmax}, η οποία προκύπτει στη χρονική στιγμή t₂ κατά τη μέγιστη εμφάνιση του ιχνηθέτη, κυμαίνεται από 85 m/h έως 148 m/h. Η μέση πραγματική ταχύτητα του υδροφορέα V_{C/2}, η οποία προκύπτει στη χρονική στιγμή t_{C/2}, όπου διέρρευσε η μισή ποσότητα του ιχνηθέτη στο συγκεκριμένο σημείο παρατήρησης, κυμαίνεται από 82 m/h έως 144 m/h. Η μέση τιμή όλων των επιμέρους υπολογιζόμενων ταχυτήτων ανέρχεται σε 109 m/h. Η συνολική ποσότητα εκροής της ουρανίνης, η οποία υπολογίστηκε στις πηγές παρατήρησης, ανήλθε σε 1,5 g. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί περίπου σε 0,2% στην ολική ποσότητα 1 Kg που χρησιμοποιήθηκε. Προφανώς ένα ποσοστό του ιχνηθέτη κατακρατήθηκε εντός των ρωγμών του καρστικού συστήματος ή διέρρευσε σε σημεία εκροής καρστικού νερού εντός της κοίτης του Πηγαίου ποταμού και σε παρόχθια μη προσπελάσιμα σημεία. Γενικά παρατηρούνται σημαντικά

υψηλές τιμές ταχύτητας των υπόγειων ροών του καρστικού υδροφορέα, οι οποίες αποκαλύπτουν την έντονη καρστικοποίησή του. Οι τιμές που διαπιστώνονται στη συγκεκριμένη περιοχή είναι συγκρίσιμες με τις τιμές άλλων περιοχών του ελληνικού χώρου που διερευνήθηκαν (Morris et al. 1986).



Σχήμα 5: Αντιπροσωπευτικό υδρογράφημα της καρστικής πηγής ks1, όπου προβάλλονται σε συνεχόμενη γραμμή η καμπύλη «χρόνος–συγκέντρωση ουρανίνης» και σε διακεκομμένη γραμμή η προσθετική καμπύλη εκροής του ιχνηθέτη.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά στοιχεία που προκύπτουν από τις ιχνηθετήσεις στην καταβόθρα K2 από 1-4 Μαρτίου 1992 με χρήση 1 Kg ουρανίνης.

Πηγές δειγματοληψίας	ks1	ks2	ks3	ks4	ks5	ks6	ks7	M. τιμή
Απόσταση από K2 (m)	4265	3915	3814	3462	3062	2961	3210	
t_1 (h)	40 ⁰⁰	40 ⁰⁰	42 ⁰⁰	39 ⁰⁰	22 ⁰⁰	19 ⁰⁰	δ.αν.	33 ⁴⁰
T_2 (h)	41 ⁰⁰	41 ⁰⁰	43 ⁰⁰	41 ⁰⁰	24 ⁰⁰	20 ⁰⁰	"	35 ⁰⁰
$t_{C/2}$ (h)	41 ³⁰	41 ³⁰	43 ³⁰	42 ⁰⁰	24 ³⁰	20 ³⁰	"	35 ³⁵
V_{max} (m/h)	107	99	91	89	139	156	"	114
V_{Cmax} (m/h)	104	96	89	85	128	148	"	108
$V_{C/2}$ (m/h)	102	93	87	82	125	144	"	105
Vμ. τ. (m/h)	104	96	89	85	130	149	"	109
Εκροή ουρανίνης (gr)	0,9	0,16	0,03	0,38	0,012	0,004	"	Σ=1,5 gr = 0,2%

δ.αν.: δεν ανιχνεύθηκε ουρανίνη

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υδρογεωλογική έρευνα που στηρίχθηκε στην εφαρμογή υδροχημικών και ιχνηθετικών μεθόδων, με χρήση NaCl και Uranin ως ιχνηθέτες, και πραγματοποιήθηκε στο καρστικό σύστημα της βόρειας Όσσας έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η εκτόνωση του καρστικού υδροφορέα συντελείται μέσω των καρστικών πηγών που αναβλύζουν στην κοιλάδα των Τεμπών κατά μήκος της νότιας όχθης του Πηγείου ποταμού και ένα σημαντικό ποσοστό εντός της κοίτης ή στις δελταϊκές προσχώσεις και στο Θερμαϊκό κόλπο. Η υπόγεια ροή παρουσιάζει Β-ΒΑ κατεύθυνση, η οποία καθορίζεται άμεσα από την τεκτονική δομή της Όσσας.
- Οι τιμές της πραγματικής ταχύτητας είναι υψηλές και κυμαίνονται μεταξύ 82 m/h και 146 m/h, γεγονός που φανερώνει την έντονη καρστικοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών και προφανώς την σπηλαιώδη κατάσταση που επικρατεί. Η βόρεια περιοχή της Όσσας αποτελεί τμήμα της περιοχής τροφοδοσίας των καρστικών πηγών των Τεμπών.
- Τα υπόγεια καρστικά νερά παρουσιάζουν ιοντικό φορτίο που κυμαίνεται μεταξύ 206 mg/l και 760 mg/l και ανήκουν στην υδροχημική κατηγορία των Ca-HCO₃. Οι τιμές συγκέντρωσης των δεικτών

ανόργανης ρύπανσης, όπως Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , είναι αρκετά χαμηλές και δεν αποκαλύπτουν λόγω του βαθμού αραίωσης επιφανειακή επιβάρυνση.

- Οι υδρομαστευμένες πηγές παρουσιάζουν μικροβιακό φορτίο, που συνδέεται προφανώς με ανθρωπογενείς δραστηριότητες εντός της περιοχής τροφοδοσίας των πηγών καθώς επίσης και με άλλες πηγές μόλυνσης. Η εμφανιζόμενη μόλυνση αντικατοπτρίζει το χαμηλό δυναμικό αυτοκαθαρισμού της έντονα καρστικοποιημένης ακόρεστης ζώνης. Η λήψη μέτρων προστασίας του καρστικού υδροφορέα θεωρείται αναγκαία, λόγω υδρευτικής χρήσης του.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Καλλέργης, Γ., 2001. Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. -2^η Έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα.
- Κατσικάτσος, Γ., Μιγκίρος, Γ. και Παπαζέτη, Ε., 1980. Γεωλογική χαρτογράφηση Φύλλου Ραφάνης, 1/50 000. – ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Garagunis, C., 1968. Kalte Luftströme, die aus verkarsteten Brüchen im Tempital zwischen den Bergen Olymp und Ossa aytreten, Thessalien-Griechenland. –Annal. Géol. des Pays Hell., XIX:701-717, Athens.
- Jacobshagen, V., 1986. Geologie von Griechenland. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 363 pp.
- Käss, W. 1972. Zweite Internationale Fachtagung zur Untersuchung unterirdischer Wasserwege mittels künstlicher und natürlicher Markierungsmittel, Freiburg i. Br. 1970. – Geol. Jb., C2:382 S., Hannover.
- Käss, W., 1992. Geohydrologische Markierungstechnik. Band 9 Lehrbuch der Hydrogeologie, Herausgeber G. Matthes, Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Matthes, G., 1973. Die Beschaffenheit des Grundwassers. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 324 pp.
- Morfis, A. and Zojer, H. 1986. Karst Hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus (Greece). 5th International Symposium on Underground Water Tracing, Athens, 1986. – Steir. Beitr. Hydrogeologie, B.37/38: 301 S., Graz.
- Stamatis, G., 1999. Hydrochemische Untersuchungen der Grundwässer von Ossa/E-Thessalien (Zentral-Griechenland).-Z. d. Hydrogeologie und Umwelt H18:8/1-26, Wuerzburg.

ABSTRACT

APPLICATION OF TRECER METHODS AND HYDROCHEMICAL ANALYSIS ON THE KARST SYSTEM OF N. OSSA MOUNTAIN / NE-THESSALY

Stamatis G¹, Zagana E²

¹ *Department of Geological Science and Atmospherically Environment, Agricultural University of Athens, Iera str. 75, 118 55 Athens, stamatis@aua.gr,*

² *Hellenic Centre of Marine Research, Institute of Oceanography, P.O. 712, 19013 Anavissos, Attica, eleza@ncmr.gr*

In this paper the hydrogeological conditions of the north part of Ossa mountain are described. The research is focused on the karstic aquifer and the springs of its organic contamination are checked. Hydrochemical methods and tracer methods with NaCl and Uranine as tracers were applied. Regarding the inorganic chemical load, karstic waters show high quality status without any surface loading due to its dilution. Tracer tests reveal high groundwater flow velocity V_a values ranging from 82 m/h to 146 m/h due to the intense karst and the existence of caves. Groundwater flow present NE direction and the discharge of karst aquifer take place in the Tempi value. The recorded contamination within the recharge area of the karstic springs is directly connected to anthropogenic impacts and incomplete water collection infrastructure. Actions for the aquifer protection must be taken the soonest possible.