

## ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΩΝ ΠΗΓΩΝ Ν. ΑΠΟΛΛΩΝΙΑΣ (ΛΕΚΑΝΗ ΜΥΓΔΟΝΙΑΣ, ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ)\*

Γ. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ<sup>1</sup>, Α. ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ<sup>1</sup>, Μ. ΦΥΤΙΚΑΣ<sup>1</sup>

### ΣΥΝΟΨΗ

Από δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις που ανοίχθηκαν στην περιοχή των θερμών πηγών Ν. Απολλωνίας διαπιστώθηκε ότι τα γεωθερμικά νερά των γεωτρήσεων όπως και της θερμής πηγής, είναι του τύπου  $\text{Na-SO}_4\text{HCO}_3$ . Ο χημικός παραμένει σταθερός με την μεταβαλλόμενη παροχή άντλησης (Q) και με τον χρόνο (t), δείχνοντας την υδραυλική ανεξαρτησία του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Παρατηρείται μικρή έλλυση αερίων, στα οποία κυριαρχεί το  $\text{N}_2$ . Η παρουσία  $\text{H}_2\text{S}$ , κατά θέσεις, είναι αποτέλεσμα βιοχημικών διαδικασιών από οργανικά υπολείμματα.

### ABSTRACT

From the pumping tests in wells G5 and G6 drilled in the area of Nea Apollonia thermal springs, it was found out that the geothermal waters are classified as  $\text{Na-SO}_4\text{HCO}_3$  type like the ones from the spring. The  $\text{F}^-$  content of the waters is high and it ranges from 8.7 to 11.2 mg/l. The chemical composition is independent of pumping rate and duration of pumping. This behaviour is the result of the independence of the geothermal reservoir. Poor release of gas mainly  $\text{N}_2$  has been ascertained. The presence of  $\text{H}_2\text{S}$  in some sites is the result of biochemical processes of organic remnants.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Υδροθερμικός υδροφορέας, Νέα Απολλωνία,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$

**KEY WORDS:** Hydrothermal aquifer, Nea Apollonia,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία αξιολογούνται τα αποτελέσματα ερευνητικού προγράμματος που έγινε για να διαπιστωθούν, εκτός των άλλων, τα υδροχημικά χαρακτηριστικά του θερμού υδροφορέα της περιοχής της πηγής της Νέας Απολλωνίας και να διερευνηθούν ενδεχόμενες μεταβολές τους με την πάροδο του χρόνου και η τυχόν επίδραση της παρακείμενης λίμνης Βόλβης στη χημική σύσταση των θερμών νερών.

Στην περιοχή υπήρχε η αναγνωρισμένη ιαματική πηγή Ν. Απολλωνίας (Λουτρό Βόλβης) θερμοκρασίας 48-50°C, η οποία τα τελευταία χρόνια έπαψε να βγαίνει στην επιφάνεια και η ανάβλυσή περιοριζόταν στον πυθμένα φρεατίου βάθους 3 m περίπου. Η στάθμη των θερμών νερών παρουσίασε πρόσφατα σημαντική ταπείνωση, κάτω από τον πυθμένα του φρεατίου, με αποτέλεσμα την εξοφάνιση και της ανάβλυσής αυτής. Η ταπείνωση φαίνεται ότι οφείλεται στην υποχώρηση της στάθμης της παρακείμενης λίμνης Βόλβης.

Στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος έγιναν 3 γεωτρήσεις στην περιοχή των πηγών: Μία ερευνητική γεώτρηση (Γ5Ε), βάθους 27 m και μικρή σχετικά διαμέτρου, ανοίχθηκε δίπλα στο χώρο του φρεατίου για να διαπιστωθούν οι υδρογεω-λογικές συνθήκες στον χώρο των ζυγίων πηγών. Δύο ακόμη ερευνητικές - παραγωγικές γεωθερμικές γεωτρήσεις: η Γ5 βάθους 40 m έγινε σε απόσταση 1 m από το φρεάτιο των πηγών και η Γ6 βάθους 37 m σε απόσταση 70 m ανατολικά της Γ5.

Εκτός από τις γεωτρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη και 3 υπάρχουσες γεωτρήσεις: η Γ1 σε απόσταση 53.3 m Δ της Γ5, η Γ2 σε απόσταση 124.3 m ΔΝΔ της Γ5 και η Γ8 σε απόσταση 255.5 m ΑΝΑ της Γ5 και 207.6 m ΑΝΑ της Γ6. Τέλος, η πηγή Π-3 βρίσκεται σε απόσταση 41.9 m Β της Γ5 και σε κατώτερο τοπογραφικά σημείο, δίπλα στις ακτές της λίμνης.

\* HYDROCHEMICAL BEHAVIOUR AND CHARACTERISTICS OF HYDROTHERMAL AQUIFER IN THE AREA OF NEA APOLLONIA THERMAL SPRINGS (MYGDONIA BASIN, MACEDONIA)

1. Τομέας Γεωλογίας & Φυσ. Γεωγραφίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 54006 Θεσσαλονίκη

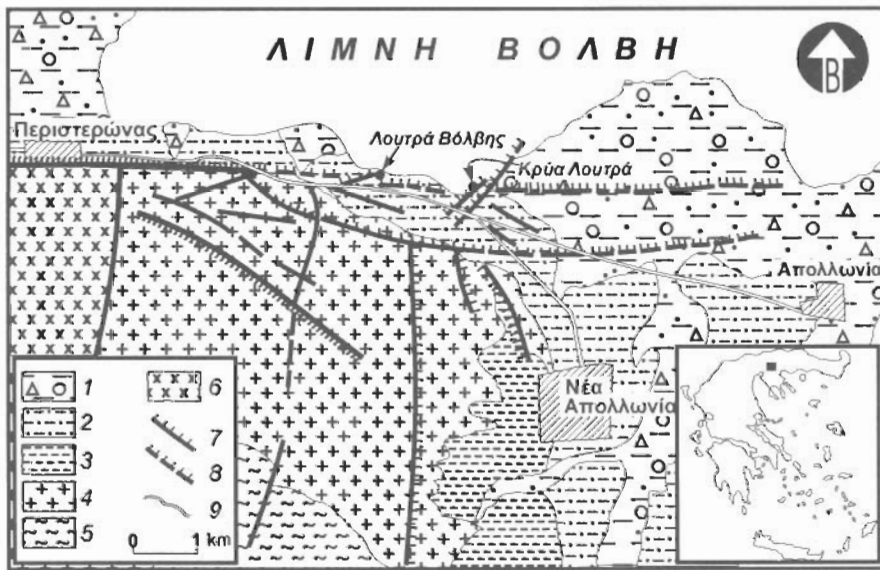
## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ Ν. ΑΠΟΛΛΩΝΙΑΣ

Η ευρύτερη περιοχή των πηγών της Ν. Απολλωνίας εντάσσεται στο τεκτονικό βύθισμα της Μυγδονίας λεκάνης. Γεωτεκτονικά ανήκει στη Σερβομακεδονική Μάζα και πιο συγκεκριμένα στη Σειρά Βερτίσκου. Το υπόβαθρο της περιοχής δομείται κυρίως από γνεύσιους, με εντορώσεις χαλαζιτών και μαυμάρων, σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μεταμορφωμένα βασικά πετρώματα Παλαιοζωικής ηλικίας, ενώ 700 m ΝΔ των Λουτρών εμφανίζεται ο Γρανίτης της Αρναίας.

Τα Πλειστοκαινικά ιζηματα, πάνω στο υπόβαθρο, έχουν πάχος μέχρι και 130 m. Συνίστανται κυρίως από μεσόζογες - λεπτόζογες άμιους (αδρυ-μερείς φάσεις) και λιγότερο από λεπτομερή υλικά (φαρκοειδείς οριζόντιες εντορώσεις), με μικρό ποσοστό ψηφιδών και χαλίκων και ακόμη μη-κρότερο των κροκαλιών που προέρχονται από τα μεταμορφωμένα πετρώματα και το γρανίτη. Στους Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς αναπτύσσονται θερμιοί υδροφόροι οριζόντες που εναλλάσσονται με λεπτά στρώματα αδιαπέρατης πράσινης αργίλου.

Στις θέσεις των θεριμών αναβλύσεων και στην ευρύτερη περιοχή συναντώνται τραβερτινικές αποθέσεις πάχους 0.5-8.0 m, που παρεμβάλλονται στα Πλειστοκαινικά ιζηματα ή επέρχονται αυτών.

Στην περιοχή των πηγών εμφανίζονται ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ. Στη θέση όπου διασταυρώνονται τα κανονικά ρήγματα Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ τοποθετείται η γένεση της θερμής πηγής των Λουτρών της Νέας Απολλωνίας.



Σχ.1. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Λουτρών Ν. Απολλωνίας (Φυτίκας κ.ά., 1997).

Fig.1. Geological map of the wider area of Nea Apollonia baths (Fytikas et al., 1997).

1.Αλλουβιακές αποθέσεις, ριπίδια προσχώσεων, αποθέσεις χεμάρων και σύγχρονα λιμναία ιζηματα, 2.Μυγδονιακό σύστημα Μ-Α. Πλειστόκαινον, 3.Προμυγδονιακό σύστημα ιζημάτων (ερυθρές άργιλοι, ερυθροστρώματα) (Κ.Πλειστόκαινον), 4.Γρανίτης Αρναίας, 5.Παλαιοζωικοί σχιστολίθοι, 6.Γνεύσιοι και αμφιβολίτες Παλαιοζωικού, 7.Ρήγματα ορατά, 8.Ρήγματα πιθανά, 9. Οδικό δίκτυο

## 3. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΙΑΜΑΤΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ Ν. ΑΠΟΛΛΩΝΙΑΣ

Στον Πίν.1 δίνονται τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα θερμιά νερά της ιαματικής πηγής των λουτρών Ν. Απολλωνίας σε διάφορα έτη, στο διάστημα που υπήρχε ακόμη η επιφανειακή ανάβλυση των πηγών. Διαπιστώνεται ο σχετικά σταθερός χημισμός τους στο χρόνο.

### α. Μεθοδολογία Έρευνας

Προεξιμένοι να διαπιστωθούν τυχόν επιδράσεις των νερών της λίμνης στη χημική σύσταση των νερών των γεωτρήσεων κατά την [Ηλεκτρονική Βιβλιοθήκη Θεόφραστου](#) Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ. ενδεχόμενες φυσικές

μεταβολές τους, οργανώθηκε ειδική δειγματοληψία νερού σε διάφορα στάδια άντλησης:

- α) Πριν από την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης της γεώτρησης Γ5: Από τη λίμνη, την πηγή Π-3 και τις γεωτρήσεις Γ1, Γ2, Γ6 και Γ8.
- β) Μετά από 30' δοκιμαστική άντληση: Στις γεωτρήσεις Γ1 και Γ2.
- γ) Κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών αντλήσεων στη γεώτρηση Γ5 :
- κατά την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης (2/1/1997) με παροχή 40 m<sup>3</sup>/h.
  - κατά το τέλος της δοκιμαστικής άντλησης (2/1/1997) με παροχές 40, 72, 118 και 140 m<sup>3</sup>/h.
  - κατά την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης (3/1/1997) με παροχή 130 m<sup>3</sup>/h
  - μετά από 15 ώρες δοκιμαστικής άντλησης (3/1/1997) με παροχή 130 m<sup>3</sup>/h
  - μετά από 36 ώρες (τέλος) δοκιμαστικής άντλησης με παροχή 130 m<sup>3</sup>/h
- δ) Κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών αντλήσεων στη γεώτρηση Γ6 :
- κατά την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης (10-11/1/1997) με παροχές 34, 95 και 120 m<sup>3</sup>/h
  - κατά την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης (11/1/1997) με παροχή 158.5 m<sup>3</sup>/h
  - μετά από 15 ώρες δοκιμαστικής άντλησης (11/1/1997) με παροχή 158.5 m<sup>3</sup>/h
  - μετά από 24 ώρες (τέλος) δοκιμαστικής άντλησης με παροχή 158.5 m<sup>3</sup>/h

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρουσιάζονται στους Πιν. 2 και 3.

Προσδιορίστηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, ακόμη και μερικά ιχνοστοιχεία, για να υπάρξει πλήρης εικόνα της ποιότητας του νερού σε συνθήκες άντλησης - εκμετάλλευσης. Η τυχόν μεταβολή κάποιων στοιχείων, από τα κύρια ή τα δευτερεύοντα, θα μπορούσαν να αποτελούν ενδείξεις μεταβολών που αποδίδονται στη συμπεριφορά των υδροφόρων και του ενδεχόμενου επιρροασμού τους από τη λίμνη ή από άλλους παράγοντες (π.χ. την ανθρώπινη δραστηριότητα).

Στον Πίν. 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων των γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ6, Γ8, της πηγής Π3 καθώς και της λίμνης πριν από την έναρξη των δοκιμαστικών αντλήσεων. Στον Πίν. 3 παρατίθενται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων του νερού των παραγωγικών - γεωθερμικών γεωτρήσεων Γ5 και Γ6.

**Πιν. 1. Χημικές αναλύσεις από την πηγή Λουτρών σε διάφορα έτη.**  
**Table 1. Chemical analyses from the main spring of baths at various years.**

	Χαριτάντης, 14/6/1933 (ΕΟΤ, 1966)	1/9/1977 Ι.Γ.Μ.Ε. (Σπυρόπου- λος & Σπυ- ρίδης, 1990)	3/6/1981 Ι.Γ.Μ.Ε. (Σπυρόπου- λος & Σπυ- ρίδης, 1990)	12/7/1984 (Σπυρόπου- λος & Σπυ- ρίδης, 1990)	Σεπτ. 1990 (Vatseris, 1992)	Πουτούκης & Ντότσικας, 1994
T (oC)	50.4	50.2	51.0	49.2	46.0	46.0
Αγωγιμότητα	....	1570	1650	1540	1226	2070
pH	7.50	7.85	7.65	7.70	7.87	7.80
ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (mg/l)						
Na+	297.50	278.30	278.30	292.00	277.10	339.00
K+	8.30	8.99	10.16	7.30	7.51	7.00
Ca <sup>2+</sup>	21.50	20.04	20.44	16.70	18.90	11.50
Mg <sup>2+</sup>	3.60	2.43	1.70	1.90	1.95	6.00
Fe <sup>2+</sup>	0.22	....	0.09	0.00	0.04	....
Mn <sup>2+</sup>	0.008	....	....	0.00	0.00	....
Li+	0.075	....	0.19	0.11	0.08	....
Sr <sup>2+</sup>	....	....	0.56	0.94	0.81	....
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.20	0.01	0.20	....	0.20	....
Cl <sup>-</sup>	39.20	42.55	40.77	71.90	40.98	34.00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	381.00	329.40	331.94	339.00	365.95	336.00
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F <sup>-</sup>	....	....	12.00	9.80	8.20	....
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	333.10	329.50	354.48	254.57	303.55	362.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	....	8.68	0.00	0.19	0.19	0.20
SiO <sub>2</sub>	....	43.00	37.00	38.00	39.40	39.10

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

#### 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την απεικόνιση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων πάνω στο διάγραμμα Piper (τριγωνικό - trilinear) και την ταξινόμηση κατά Davis & De Wiest (1966) προέκυψε ότι :

(α) Όλα τα νερά των γεωτρήσεων και της πηγής Π3, πλην του νερού της λίμνης, ανήκουν στον ίδιο τύπο νερού. Πρόκειται για  $\text{Na-SO}_4\text{HCO}_3$  γεωθερμικά νερά.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων πριν τις δοκιμαστικές αντλήσεις.  
Table 2. The results of chemical analyses before pumping tests.

	ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΑΡΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ ΣΤΗ Γ5						30'	30'
	ΔΙΜΝΗ	Γεώτρηση Γ-1 (από ~10m)	Γεώτρηση Γ-2 (από ~3m)	Πηγή Π-3	Γεώτρηση Γ-6 (από ~10m)	Γεώτρηση Γ-8	ΑΝΤΛΗΣΗ στη Γ-1	ΑΝΤΛΗΣΗ στη Γ-2
<b>ΦΥΣΙΚΟ-ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</b>								
T (οC)	9.4	38.5	35.0	34.5	49	39.5	43.9	43.0
Αγωγιμότητα	1030	1160	1000	1450	1350	1230	1180	1080
pH	8.60	8.55	7.85	7.55	8.00	7.95	7.75	7.70
TDS (mg/l)	610	770	650	990	910	840	790	740
Αλκαλικ. P	0.30	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αλκαλικ. M	5.40	5.05	4.70	5.90	5.90	5.75	5.85	5.15
<b>ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (mg/l)</b>								
Na+	167.80	241.10	194.40	277.80	291.10	277.80	247.80	232.50
K+	6.70	7.50	5.40	8.60	7.90	7.00	7.60	5.70
Ca <sup>2+</sup>	22.20	20.00	24.80	54.00	20.80	13.70	22.10	22.30
Mg <sup>2+</sup>	29.50	2.90	1.40	5.50	1.90	1.30	2.90	1.20
Fe <sup>2+</sup>	0.27	2.90	1.90	0.16	0.59	0.11	0.16	0.48
Zn <sup>2+</sup>	0.00	0.37	0.19	0.00	0.63	0.02	0.02	0.07
Mn <sup>2+</sup>	0.04	0.13	0.09	0.07	0.08	0.05	0.04	0.07
Li+	0.00	0.10	0.006	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08
Sr <sup>2+</sup>	0.33	0.76	0.53	0.67	0.14	0.60	0.78	0.55
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.00	1.80	0.15	0.05	0.70	0.60	1.10	0.55
Cl <sup>-</sup>	131.40	37.30	42.60	41.90	35.50	36.20	40.80	42.60
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	329.40	308.10	286.70	359.90	359.90	350.80	356.80	314.20
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9.00	13.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F <sup>-</sup>	2.40	9.50	9.00	10.40	11.50	10.70	8.70	9.50
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	66.40	240.60	172.50	375.50	318.50	276.50	237.60	224.60
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.12	0.05	0.04	0.14	0.12	0.00	0.00	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.00	1.30	1.20	1.40	1.20	1.20	1.00	1.00
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Br <sup>-</sup>	0.70	0.00	0.44	0.50	0.47	0.56	0.00	0.50
SiO <sub>2</sub>	5.00	38.50	48.50	31.40	42.10	36.40	42.10	44.20
B	0.32	1.05	0.69	1.12	1.13	1.11	0.93	0.89

(β) Το νερό της λίμνης έχει διαφορετική σύσταση και τοποθετείται στην κατηγορία των  $\text{Na-HCO}_3\text{Cl}$  νερών με προσέγγιση προς το πεδίο των  $\text{Na, Mg-HCO}_3\text{Cl-SO}_4$  νερών.

(γ) Σε όλη τη διάρκεια των δοκιμαστικών αντλήσεων της παραγωγικής γεώτρησης Γ5 ο τύπος των νερών της παρέμεινε αμετάβλητος ( $\text{Na-SO}_4\text{HCO}_3$ ) και μάλιστα οι θέσεις τους, προβαλλόμενες πάνω στο τριγωνικό διάγραμμα πέφτουν στο ίδιο σχεδόν σημείο (βλ. και Σχ. 3).

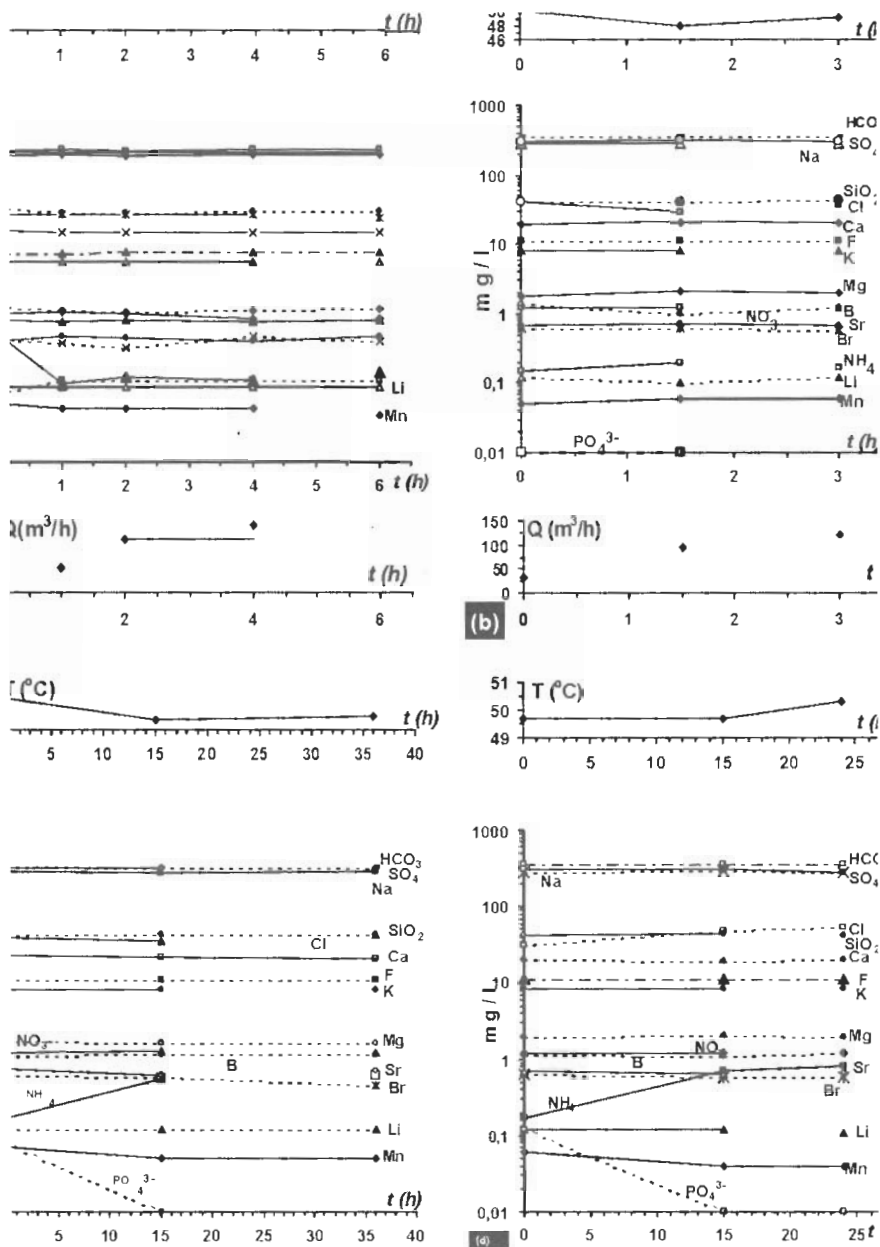
(δ) Ο τύπος των νερών της γεωθερμικής γεώτρησης Γ6 παρέμεινε αμετάβλητος ( $\text{Na-SO}_4\text{HCO}_3$ ) καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμαστικών αντλήσεων.

Πηγή: Γεωγραφική Βιβλιοθήκη "Θεόφραστους", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

	ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΑΦΕΡΙΣ ΣΤΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ5										ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΑΦΕΡΙΣ ΣΤΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ6									
	Εναρξη άντλησης 40m <sup>3</sup> /h	λήξη άντλησης 72m <sup>3</sup> /h	λήξη άντλησης 118m <sup>3</sup> /h	λήξη άντλησης 140 m <sup>3</sup> /h	Εναρξη άντλησης 130 m <sup>3</sup> /h	15 h άντλησης 130 m <sup>3</sup> /h	λήξη (36h) άντλησης 130 m <sup>3</sup> /h	Εναρξη άντλησης 34 m <sup>3</sup> /h	Εναρξη άντλησης 95 m <sup>3</sup> /h	Εναρξη άντλησης 120 m <sup>3</sup> /h	Εναρξη άντλησης 158.5 m <sup>3</sup> /h	15 h άντλησης 158.5 m <sup>3</sup> /h	λήξη (24h) άντλησης 158.5 m <sup>3</sup> /h							
ΦΥΣΙΚΟ- ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																				
T (oC)	55.3	55.3	55.1	55.7	57.3(7)	53.6	54.2	50.0	48.0	49.1	49.7	50.3								
Αγωγιμότητα	1320	1350	1380	1380	1320	1300	1316	1320	1340	1320	1350	1320								
pH	7.70	7.70	7.70	7.70	7.90	7.70	7.70	7.90	7.80	7.80	7.80	7.80								
SS (mg/l)	910	930	920	940	910	910	910	910	890	890	920	910								
Α.Ο.Α.Κ. Ρ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
Α.Ο.Α.Κ. Μ	5.30	5.25	5.25	5.30	5.35	5.40	5.50	5.75	5.80	5.75	5.85	5.85								
ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (mg/l)																				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	284.40	293.30	291.70	298.20	293.90	287.30	285.10	287.30	285.10	287.30	285.10	285.10								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	8.30	8.30	8.30	8.30	8.30	8.20	8.30	8.20	8.30	8.30	8.30	8.20								
Ca <sup>2+</sup>	23.60	21.90	21.50	21.70	23.20	21.50	21.30	19.70	21.10	20.30	19.30	19.90								
Mg <sup>2+</sup>	1.80	1.60	1.50	1.60	1.70	1.60	1.60	1.80	2.10	2.00	2.00	1.90								
Fe <sup>2+</sup>	0.25	0.27	0.18	0.18	0.27	0.18	0.15	0.14	0.16	0.66	0.20	0.00								
Zn <sup>2+</sup>	0.11	0.08	0.03	0.00	0.00	0.08	0.00	0.12	0.10	0.11	0.10	0.02								
Mn <sup>2+</sup>	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04								
Cl <sup>-</sup>	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11								
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.56	0.67	0.64	0.58	0.67	0.62	0.71	0.69	0.71	0.69	0.62	0.71								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17	0.55	0.15	0.20	0.17	0.70	0.60								
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	40.80	40.80	40.80	40.80	35.50	39.80	35.50	42.60	40.80	30.20	31.90	53.20								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	323.30	320.30	320.30	323.30	326.40	329.40	335.50	350.80	353.80	350.80	353.80	356.80								
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
FA	11.00	11.00	11.10	11.10	11.10	11.10	10.90	11.10	11.00	11.10	11.20	11.20								
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	330.80	347.50	342.20	352.80	352.80	333.60	328.80	320.20	304.80	324.00	313.40	304.80								
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.72	0.14	0.17	0.15	0.20	0.08	0.01	0.00	0.01	0.00	0.12	0.01								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.40	1.50	1.40	1.20	1.20	1.30	1.20	1.40	1.00	1.20	1.20	1.20								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
Br <sup>-</sup>	0.61	0.55	0.45	0.66	0.57	0.62	0.58	0.60	0.62	0.58	0.63	0.58								
SiO <sub>2</sub>	48.50	42.80	42.10	43.80	44.20	43.50	44.20	42.10	42.10	43.50	42.10	42.10								
B	1.18	1.12	1.15	1.12	1.14	1.12	1.18	1.23	1.20	1.16	1.10	1.18								

Πίνακας 3. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των υδρών από τις δοκιμαστικές αντλίες των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6.

Table 3. The results of water chemical analyses from the pumping tests in the wells Γ5 and Γ6.



Σχ.2. Διαγράμματα μεταβολής της χημικής σύστασης με το χρόνο ( $t$ ) τόσο για τη δοκιμαστική άντληση με κλιμακούμενη παροχή όσο και με την άντληση με σταθερή παροχή για τις γεωτρήσεις Γ5 και Γ6 (a: κατά βαθμίδες δοκιμαστική άντληση στη Γ5, b: κατά βαθμίδες δοκιμαστική άντληση στη Γ6, c: άντληση με σταθερή παροχή στη Γ5, d: άντληση με σταθερή παροχή στη Γ6). Παράλληλα με τη μεταβολή της χημικής σύστασης με το  $t$ , παρουσιάζεται και η μεταβολή της χημικής σύστασης με της παροχής ( $Q$ ) (a,c) και της θερμοκρασίας  $t$  (a,b,c,d) αντίστοιχα.

Fig.2. Diagrams with the changes of chemical compositions vs time ( $t$ ) for the pumping tests at variable pumping rates and for the pumping tests at constant pumping rate for the wells Γ5 and Γ6 (a: pumping test in Γ5 at variable pumping rates, b: pumping test in Γ6 at variable rates, c: pumping test in Γ5 at a constant pumping rate, d: pumping test in Γ6 at a constant rate). Parallel to the changes of chemical composition vs  $t$ , in these diagrams we present the changes of pumping rate vs time (a,c) and the temperature  $t$  (a,b,c,d) vs time respectively.

Τα αποτελέσματα αυτά, όπως και το σχ. 2 δίνουν σαφέστατα τον αμετάβλητο χημικό χαρακτήρα, ακόμη και στα περιεχόμενα ιχνοστοιχεία, του γεωθερμικού νερού των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6. Επίσης επιβεβαιώθηκε η απουσία οποιουδήποτε αισθητής επίδρασης του νερού της λίμνης στον χημισμό τους. Το γεγονός αυτό θεωρούμε ότι είναι πολύ σημαντικό, αφού δείχνει τη μικρή έως ανύπαρκτη υδραυλική επικοινωνία του γεωθερμικού ταμιευτήρα με το νερό της λίμνης και επομένως την ανεξαρτησία του συστήματος. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψή μας ότι οι αντλούμενες ποσότητες γεωθερμικού νερού επηρεάζεται ελάχιστα από τους ψυχρότερους δευτερογενείς ανώτερους υδροφόρους ορίζοντες και συνεπώς προέρχονται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του από τον πρωτογενή γεωθερμικό ταμιευτήρα.

Επίσης, τα νερά των νέων γεωτρήσεων Γ5 και Γ6 έχουν τον ίδιο χημικό χαρακτήρα με τα νερά της αναγνωρισμένης ιαματικής πηγής της Νέας Απολλωνίας.

Αυτά τα θερμά νερά παρουσιάζουν σχετικά πολύ μικρή αλατότητα (TDS ~920 mg/l) ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζει χαμηλές τιμές (~1350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Από την επεξεργασία των δειγμάτων στο εργαστήριο για τον υπολογισμό της ποσότητας των αιω-

ρούμενων σωματιδίων στα θερμά νερά των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6 προέκυψαν τιμές της τάξης των 1-2 mg/l, που θεωρούνται πάρα πολύ χαμηλές και γι' αυτό πολύ ικανοποιητικές. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την απευθείας διάθεση των γεωθερμικών νερών στο δίκτυο μεταφοράς.

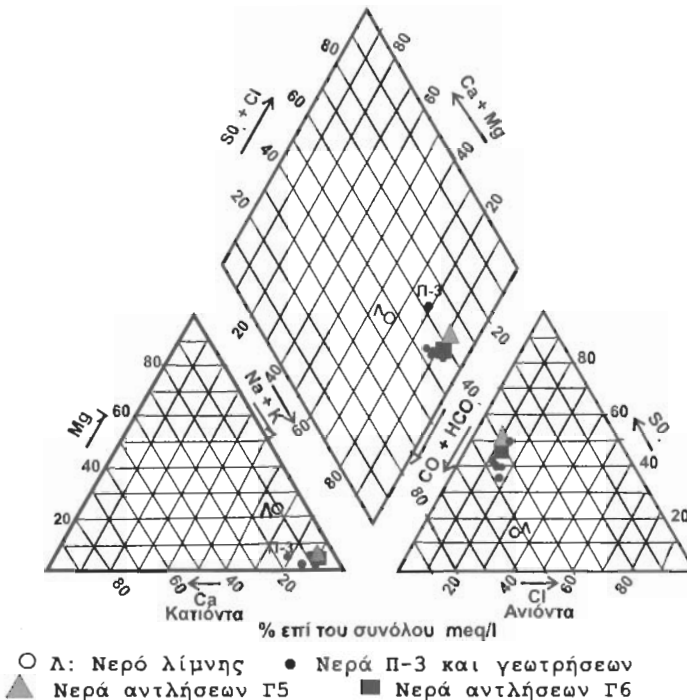
Τα  $\text{SO}_4^{2-}$  μετέχουν στη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών και οφείλονται σε διάλυση θειούχων αλάτων.

Τα νερά είναι πλούσια σε F, γεγονός που τα καθιστούν ακατάλληλα για πόση. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε F μπορεί να αποδοθεί στην υδρόλυση φθοριούχων ορυκτών (κυρίως απατίτη ή και βιοτίτη) του γρανίτη της Αρναίας και των γενεσιών του υποβάθρου μέσα από τα οποία διέρχονται τα γεωθερμικά ρευστά στις ρηξιγενείς δομές του πρωτογενούς ταμιευτήρα.

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  μπορεί να αποδοθούν στη διαλυτοποίηση Na-ούχων πλαγιοκλάστων (αλβίτη) που αποτελεί θεμελιώδες ορυκτό συστατικό του γρανίτη της Αρναίας και των γενεσιών.

Τα ιόντα  $\text{Li}^+$  και  $\text{Sr}^{2+}$  συμμετέχουν στη σύσταση των γεωθερμικών νερών μέσα στα φυσιολογικά, για κοινά υπόγεια νερά, όρια.

Επίσης η περιεκτικότητα των νερών τόσο σε  $\text{SiO}_2$  όσο και σε Cl δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.



Σχ.3. Απεικόνιση των χημικών επιδόσεων των γεωθερμικών νερών σε ένα τριγωνικό διάγραμμα κατά Piper.  
 Fig.3. Plot of the values of chemical analyses on a trilinear diagram according to Piper.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί η μικρή αύξηση της περιεκτικότητας των νερών σε  $\text{NH}_4^+$  μετά την έναρξη των δοκιμαστικών αντλήσεων, τόσο με άντληση κατά βαθμίδες όσο και με σταθερή παροχή, και για τις δύο γεωτρήσεις Γ5 και Γ6. Δηλ. μετά από παρέλευση μικρού χρονικού διαστήματος από την έναρξη της άντλησης και τη λήψη του πρώτου δείγματος η συγκέντρωση  $\text{NH}_4^+$  αυξάνει ελαφρώς απότομα και μετά σταθεροποιείται. Αυτό αποδίδεται στην άνοδο βαθύτερων γεωθερμικών νερών προς την επιφάνεια.

Και αντίστοιχο αλλά με αρνητική πορεία διαπιστώνεται για τα  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{PO}_4^-$  ιόντα, δηλ. παρατηρείται αρχικά μικρή ελάττωση της συγκέντρωσης αυτών, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην άνοδο βαθύτερων και απώλεστων από οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα και ούτο γεωθερμικών νερών.

Η εφαρμογή του θερμοδυναμικού μοντέλου WATEQ-F των Truesdell & Jones (1974) έδειξε ότι τα γεωθερμικά νερά της Νέας Απολλωνίας δεν παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές μερικής πίεσης  $p\text{CO}_2$ . Τα νερά των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6 παρουσιάζουν τιμές  $p\text{CO}_2$   $10^{-2.0177}$  ( $=9.60 \times 10^{-3}$ ) και  $10^{-2.1239}$  ( $=7.52 \times 10^{-3}$ ), παρόμοιες με αυτές ψυχρό-θερών νερών της περιοχής, γεγονός που ενισχύει την άποψη της βιογενούς προέλευσης του  $\text{CO}_2$ . Αξίωμα, τα γεωθερμικά νερά των γεωτρήσεων και των πηγών είναι ελαφρώς κορεσμένα ως προς τον ασβεστόητη (Is: 0.139-0.316) και υπέρκορα ως προς τον χυλάζια (Is: 0.442-0.594). Ο λόγος  $\text{Mg}/\text{Ca}$  λαμβάνει χαμηλές τιμές (0.09-0.22) σε αντίθεση με τις υψηλότερες (2.24) του νερού της λίμνης. Οι λόγοι  $\text{Cl}/\text{F}$ ,  $\text{Cl}/\text{B}$  και  $\text{Cl}/\text{HCO}_3$  παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές ( $\text{Cl}/\text{F}$ : 1.80-2.54,  $\text{Cl}/\text{B}$ : 9.93-14.5,  $\text{Cl}/\text{HCO}_3$ : 0.177-0.365) που δείχνουν την ύπαρξη ενός ουσιαστικά θερμοί υδροφόρου ορίζοντα, όπως άλλωστε διαπιστώθηκε και από τη μελέτη των υδραυλικών και γεωθερμικών χωρο-χρονιστικών (Φυτίλας κ.ά., 1997). Όλοι πάντως οι παραπάνω λόγοι διαφοροποιούνται από τους αντίστοιχους του νερού της λίμνης.

Στις γεωτρήσεις Γ5 και Γ6 παρατηρήθηκε αξιόλογη ελλύση αερίων με τη μορφή φυσαλίδων, όχι μόνο κατά τις αντλήσεις αλλά και πολλές μέρες μετά από αυτές. Με τη μέθοδο της ανεστραμμένης φιάλης βρέθηκε ότι η παροχή των αερίων στη Γ6 ήταν περίπου 5 l/h. Προκειμένου να προσδιοριστούν ποιοτικά και ποσοτικά τα ελλυόμενα αέρια πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία αερίων, που στη συνέχεια αναλύθηκαν στα Εργαστήρια του Τμ. Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ. με τη μέθοδο της αέριας χρωματογρα-φίας με χρωματογράφο αερίων Model 3400 Varian, ενώ ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του  $\text{H}_2\text{S}$  έγινε με τη χρήση του ανιχνευτή ECOLYZER Model 100- $\text{H}_2\text{S}$  Draeger Inc. Στα αέρια βρισκόταν και σημαντικές ποσότητες αέρα, κυρίως στο δείγμα που προέρχεται από τη Γ5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με δύο τρόπους: όπως μετρήθηκαν και όπως υπολογίζονται μετά την αφαίρεση του ατμοσφαιρικού αέρα (Πίν.4).

Το κυρίαρχο αέριο είναι το άζωτο ( $\text{N}_2$ ). Σε πολύ μικρότερα ποσά βρίσκονται το  $\text{CH}_4$  και το  $\text{CO}_2$ , ενώ δεν ανιχνεύθηκαν άλλοι υδρογονάνθρακες. Είναι πολύ πιθανό να υπάρχει  $\text{Ar}$  σε μικρές συγκεντρώσεις, αλλά το σημαντικό ποσοστό του αέρα στα δείγματα κάνει πολύ δύσκολη την ακριβή μέτρηση της συγκέντρωσής του.

Η παρουσία του  $\text{N}_2$  ίσως να συνδέεται με την αποσύνθεση οργανικών υλικών στα ιζηματογενή πετρώματα ή και να προέρχεται από τον αέρα που αρχικά έχει διαλυθεί στο κυκλοφορούν μετεωριζό νερό (Ellis & Mahon, 1977).

Πίν. 4. Σύσταση % κ.ο. των αερίων που ελλύονται με φυσικό τρόπο από την οπή των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6 της Ν. Απολλωνίας καθώς και της σύστασης του αέρα

Table 4. Composition in % by vol. of gasses that are released naturally from the holes of the wells Γ5 and Γ6 of Ν. Apollonia and the composition of the air.

ΑΕΡΙΟ	Γ5 (όπως μετρήθηκε)	Γ5 (χωρίς το $\text{O}_2$ )	Γ6 (όπως μετρήθηκε)	Γ6 (χωρίς το $\text{O}_2$ )	ΑΕΡΑΣ
$\text{I}_2$	5.1	---	1.3	---	78.08
$\text{I}_2$	90.8	97.1	95.3	96.2	20.95
$\text{CI}_2$	1.3	1.8	1.3	1.5	0.035
$\text{CH}_4$	0.8	1.1	2.2	2.3	---
$\text{Ar}$	*	*	*	*	0.93
$\text{H}_2\text{S}$	<2 ppm	<2 ppm	~ 250 ppm	~ 250 ppm	---

\* Ανιχνεύθηκε σε ποσοτά 0.2% ± 0.1, που πιθανώς να οφείλονται στην παρουσία του αέρα

Η ελαφρά οσμή υδροθείου, που διαπιστώθηκε κατά την άντληση της Γ6, μας οδήγησε στην ανάγκη συμπληρωματικής δειγματοληψίας για να προσδιορισθεί το διαλυμένο υδροθείο στο νερό. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν, ότι το νερό της γεώτρησης Γ5 περιέχει  $\text{HS}^-$  στην αμελητέα ποσότητα των 0.1 - 0.2 ppm (όριο χημικής ανίχνευσης της μεθόδου) ενώ το νερό της Γ6 περιέχει  $\text{HS}^-$  σε αξιοσημείωτη ποσότητα που φθάνει τα 8.58 ppm.

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



Η φυσική διαδικασία παραγωγής  $H_2S$  είναι βιοχημική και φαίνεται ότι αυτό προέρχεται από αναγωγή μέρους των  $SO_4^{2-}$  σε ένα αναερόβιο και αναγωγικό περιβάλλον υπό την επίδραση κάποιων βακτηρίων. Από τις γεωτρήσεις Γ-1, Γ-2 και Γ-6 της περιοχής των Λουτρών διαπιστώθηκε η πολύ μεγάλη παρουσία οργανικών υπολειμμάτων σε κατάσταση αποσύνθεσης, που δικαιολογούν αυτή τη διαδικασία. Τέτοια αναγωγικά περιβάλλοντα σε διάφορα σημεία της παραγωγής ζώνης της λίμνης Βόλβης και υπό την επίδραση βακτηρίων, που ζουν σε αναερόβιες συνθήκες, προσβάλλουν τα  $SO_4^{2-}$  και σχηματίζουν  $H_2S$ . Εκτός από την προσβολή των  $SO_4^{2-}$ , αυτά τα ίδια αναερόβια και αναγωγικά περιβάλλοντα θα μπορούσαν, λόγω της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών, να προκαλέσουν το σχηματισμό αυτού του αερίου. Αντίθετα, η οξείδωση του  $H_2S$  σε επιφανειακά νερά παράγει νερά πλούσια σε  $SO_4^{2-}$  (Ellis & Mahon, 1977). Επίσης, η επαφή υδροφόρων εμπλουτισμένων σε  $SO_4^{2-}$  με αργίλους πλούσιους σε οργανικά υπολείμματα δικαιολογεί την παραγωγή  $H_2S$ .

Η διαφορά στην περιεκτικότητα των νερών σε  $H_2S$  μεταξύ των γεωτρήσεων Γ5 και Γ6, που απέχουν μόλις 70 m, μπορεί να οφείλεται στην τοπική ύπαρξη ευνοϊκού αναερόβιου, αναγωγικού περιβάλλοντος. Άλλωστε, ανάμεσα στα υδροθερμικά ιζημάτα της Γ-6 παραβιάζονται κάποια μικρά στεγανά στρώματα που περιέχουν και σπορόφυτα υλικά (οργανικά υπολείμματα που αποτεθήκαν τοπικά, πιθανότατα φακοειδώς, σε παλαιότερο λιμναίο πυθμένα). Εξάλλου, από παλαιότερη έρευνα (PPC & ENEL, 1979) διαπιστώθηκε ότι το Eh δείγματος από τη πηγή των Λουτρών ήταν +0.285 Volts ενώ από την πηγή Π-3 ήταν Eh = +0.900 Volts, τιμές που δείχνουν οξειδωτικό περιβάλλον στις θέσεις αυτές. Ο οξειδωτικός χαρακτήρας στο νερό της πηγής των Λουτρών (Eh = +0.82 Volts) διαπιστώθηκε και από τον Vatsaris (1992). Σε ένα τέτοιο περιβάλλον το S βρίσκεται με τη μορφή  $SO_4^{2-}$ . Αντίθετα, νερό της λίμνης Βόλβης (από απόσταση 100 m από την ακτή, μπροστά από την πηγή Π-3) παρουσιάζει Eh = -0.100 Volts, που είναι δείκτης ελαφρώς αναγωγικού περιβάλλοντος. Τέλος, η βιολογικά ελεγχόμενη αναγωγή των  $SO_4^{2-}$  έχει αποδειχθεί από μία ένδειξη του  $^{34}S$  των 36‰ (Λίμνη Βόλβη, Γεώτρηση ΙΓΜΕ) (Jackelen H.P. et al., 1986). Το γεγονός ότι σε κάποια σημεία το Eh είναι αρνητικό ενώ σε άλλου θετικό, δείχνει τον τοπικό και περιορισμένο χαρακτήρα των αναγωγικών περιβάλλοντων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- DAVIS S.N. & DE WIEST R.J.M. 1966. *Hydrogeology*, New York, 463pp. (John Wiley & Sons).
- ELLIS, A.J. & MAHON, W.A.J. 1977. *Chemistry and Geothermal Systems*. 392pp. (Academic Press, Inc).
- ΕΟΤ 1966. *Λουτροπόλεις και Ιαματικά Πηγάι*, Αθήνα, 143 σελ.
- JACKELLEN, H.P., LOEHNERT E.P. & PAPAΚONSTANTINOY A. 1986. Natural Tracers (Chemical Parameters and Environmental Isotopes) in Groundwater of the Western Chalkidiki Peninsula (Greece). *Reprinted from Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Undergroundwater Water Tracing*, IGME, Athens, pp. 59-73.
- ΠΟΥΤΟΥΚΗΣ Δ. & ΝΤΟΤΣΙΚΑ Ε. 1994. Υδρογεωχημική και ισοτοπική έρευνα της περιοχής των Λουτρών Λαγκαδά και Βόλβης, *Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου*, Τόμος Β', σελ. 679-689, Αθήνα.
- ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΣ Ν. & ΣΠΥΡΙΔΗΣ Ε. 1990. Γεωλογική - Υδρογεωλογική Μελέτη Ιαματικών Νερών Νέας Απολλωνίας (Λουτρά Βόλβης), *Πρακτικά 2ου Συνεδρίου για τα Θερμομεταλλικά Νερά (Θεσ/νίκη, 7-9/10/1998)*, Θεσ/νίκη, σελ. 228-239.
- PPC & ENEL 1979. *Geothermal reconnaissance study of Macedonia and Chalcidice*, General Report, Geoth. Power Development Program in Greece, GR/R-4, 101 pp.
- TRUESDELL, A.H. & JONES, B.F. 1974. WATEQF, a computed programme for calculating equilibria of natural waters, *U.S. Geol. Surv. Journ. Res.* 2, 233-248.
- VATSARIS CH. 1992. *Hydrogeologie des Mygdonias - Beckens (Nord - Griechenland) unter Berücksichtigung der hydrochemischen und isotonenphysikalischen Komposition der Thermalwasser*. Doctorarbeit, Universität Munster, Scites 171.
- ΦΥΤΙΚΑΣ Μ., ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ Γ. & ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ Α. 1997. Γεωθερμικά και Υδρουλικά χαρρακτηριστικά του θερμοού υδροφορέα της περιοχής των πηγών Νέας Απολλωνίας Θεσ-σαλονίκης, *Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου*, σελ. 547-569.