

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΙΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΝΗΣΟΥ ΙΚΑΡΙΑΣ

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ

Δρ. Γεωλόγος Μηχανικός

M.M. Κωνσταντίου 36, 691 00, Κομοτηνή, agelopulos@gmail.com,

1. Εισαγωγή

Στην νήσο Ικαρία εντοπίζονται τέσσερις περιοχές ανάβλυσης θερμομεταλλικών νερών, οι οποίες ερευνήθηκαν την περίοδο 2012-2013, στα πλαίσια της αναγνώρισης των έξι κύριων θερμών πηγών ως ιαματικών (Σχ. 1). Οι περιοχές αυτές είναι της Λευκάδας, του Αγίου Κηρύκου, των Θερμών και της Αγίας Κυριακής, ενώ οι αντίστοιχες πηγές είναι η πηγή Θερμό Λευκάδας (ΠΛ), η πηγή Ασκληπιού Αγίου Κηρύκου (ΠΑ), οι πηγές Απόλλωνα (ΠΘΑ), Κράτσα (ΠΘΚ) και Σπηλαιού (ΠΘΣ) Θερμών και η πηγή Αγίας Κυριακής (ΠΑΚ). Οι ιαματικές πηγές της Ικαρίας έχουν διεθνή παρουσία στον τομέα της υδροθεραπείας, καθώς η χρήση των ραδιενεργών νερών τους είναι γνωστή από τον 4ο π.Χ. αιώνα και συνεχίστηκε αδιάλειπτα στην ρωμαϊκή και τη βυζαντινή εποχή, την τουρκοκρατία και στα νεότερα και πρόσφατα χρόνια.



Σχήμα 1. Οι πηγές Θερμών (α), Θερμού Λευκάδας (β), Ασκληπιού (γ) και Αγ. Κυριακής (δ).

Figure 1. The springs of Therma (α), Lefkada (β), Asklepios (γ) and Ag. Kyriaki (δ).

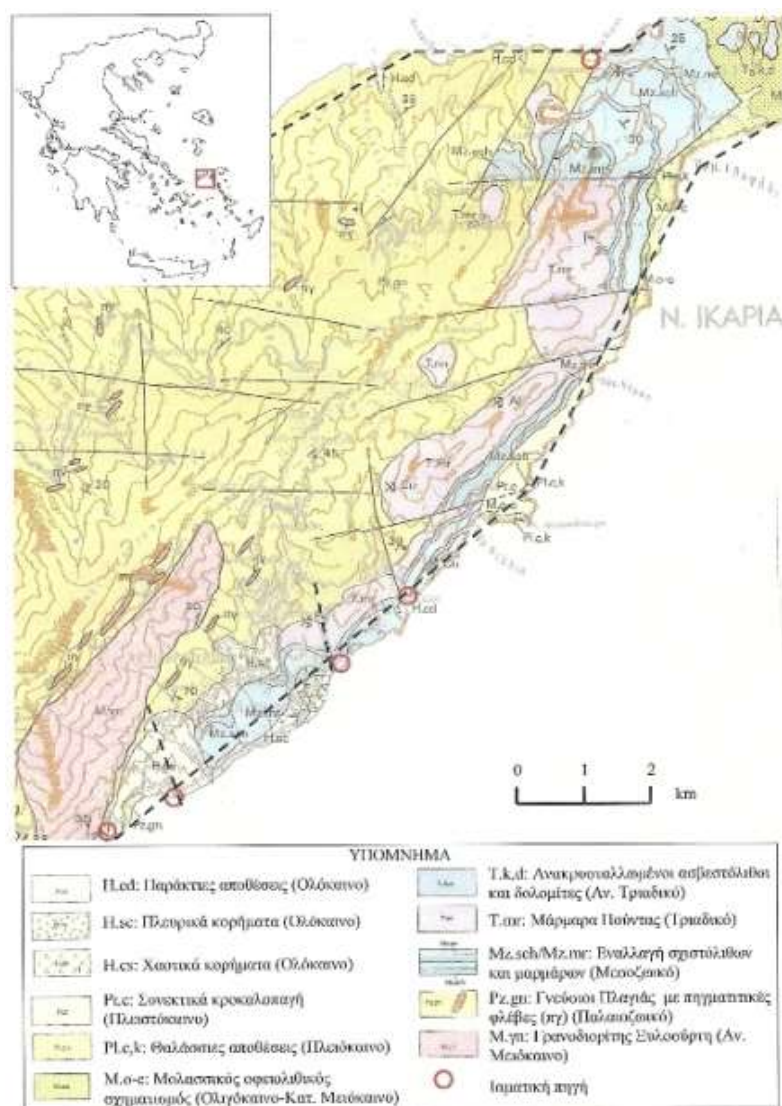
Η πρώτη επιστημονική προσέγγιση για το χημισμό και τη χρήση των νερών των ιαματικών πηγών οφείλεται στον Κ. Μακρή (1928), ενώ η πρώτη ολοκληρωμένη επιστημονική μελέτη των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των πηγών Ικαρίας πραγματοποιήθηκε από τον Μ. Περτέση, Διευθυντή του Χημείου της Γεωλογικής Υπηρεσίας, ο οποίος πρόβαλε για πρώτη φορά το υψηλό ποσοστό ραδιενέργειας των πηγών (1939). Στην απογραφή των ιαματικών πηγών της χώρας, από τον Ν. Λέκκα (1938), Διευθυντή της Διεύθυνσης Ιαματικών Πηγών, αυτές αναφέρονται ως χλωριονατριούχες (αλιπηγές), υπέρθερμες και ραδιενεργές, χαρακτηρισμοί που επαναλαμβάνονται και στις επόμενες ερευνητικές εργασίες. Οι πηγές, υδρογεωλογικά και σε σχέση με τη ραδιενέργεια, μελετήθηκαν από αρκετούς ερευνητές, μεταξύ των οποίων οι Βορεάδης (1965), Κτενάς (1969), ΙΓΜΕ (1982 και την περίοδο 2005-2009), Ζ. Αγγελίδης (2000) και Π. Νομικού (2002).

Γεωμορφολογικά, η Ικαρία κυριαρχείται από τον ορεινό όγκο του Αιθέρα, στο κέντρο περίπου του νησιού, ενώ μικροί λόφοι προβάλλουν γύρω από τις θέσεις των πηγών. Μεταξύ των λόφων αυτών αναπτύσσονται ρέματα, που αποστραγγίζουν το όρος Αιθέρας, με αρκετά πλατιές κοίτες και διαμορφωμένη κοίτη μορφής U, τα οποία εκβάλλουν στη θαλάσσια περιοχή.

Η ακτογραμμή παρουσιάζει μικρό οριζόντιο διαμελισμό με ελάχιστες εγκολπώσεις, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζονται αξιόλογοι όρμοι, ειδικά στην νότια πλευρά του νησιού. Ακόμη εντοπίζεται εκτεταμένη θαλάσσια αναβαθμίδα, ως επίπεδη σχεδόν επιφάνεια, σε υψόμετρα μεταξύ 20 και 80 μέτρων, κυρίως στην περιοχή Λευκάδας-Αγ. Κηρύκου, γεγονός που υποδηλώνει την έντονα ανοδική κίνηση της χέρσου σε σχέση με τη θάλασσα.

2. Γεωλογική δομή της περιοχής έρευνας

Η ευρύτερη περιοχή του χώρου έρευνας, γεωτεκτονικά ανήκει στον χώρο της Αττικο-Κυκλαδικής ζώνης, στην οποία περιλαμβάνονται και τα νησιά των Κυκλάδων, καθώς και νησιά ανατολικά αυτών, μεταξύ των οποίων και η Ικαρία.



Σχήμα 2. Γεωλογικός Χάρτης Ικαρίας (Ι.Γ.Μ.Ε. 2005, με προσθήκες).

Figure 2. Geological map of Icaria (I.G.M.E. 2005, with complements).

Η Ικαρία έχει σαν υπόβαθρο την ενότητα Ικαρίας, αποτελούμενη από τα μάρμαρα Νίκαρη (Παλαιοζωικό), τους γενεύσιους Πλαγιάς (Παλαιοζωικό), τα μάρμαρα Πούντας (Τριαδικό) και το σχηματισμό Πετροπουλίου (μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με μάρμαρα-Μεσοζωικό), την ενότητα Μεσαριάς, αποτελούμενη από εναλλαγές σχιστόλιθων και μαρμάρων (Μεσοζωικό), αλλά και την ενότητα Κεφάλας, που θεωρείται μολασσικός σχηματισμός με παρεμβολή οφιολιθικών πετρωμάτων, αποτελούμενη από ανακρυσταλλωμένα μάρμαρα και δολομίτες, ηφαιστειο-ιζηματογενή οφιολιθικά πετρώματα και μεταψαμμίτες (Ολιγόκαινο-Κατώτερο Μειόκαινο).

Εντός των γενεσίων Πλαγιάς υπάρχει ασύμφωνη γρανιτική διείδυση (γρανοδιορίτης Ξυλοσύρτη), με διεύθυνση άξονα ΒΑ-ΝΑ και με μεγάλο αριθμό συνοδών απλιτικών-πηγματιτικών φλεβών, μεγάλου μήκους, (Κτενάς 1969, Παπανικολάου 1978, ΙΓΜΕ 2005).

Επί του υποβάθρου αποτέθηκαν οι νεογενείς αποθέσεις, οι οποίες είναι θαλάσσιες αποθέσεις, αποτελούμενες από κροκαλο-λατυποπαγή, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (Πλειόκαινο), καθώς και οι τεταρτογενείς αποθέσεις, αποτελούμενες από συνεκτικά κροκαλοπαγή, χαοτικά κορήματα, που περιλαμβάνουν και θαλάσσια αναβαθμίδα στο παράκτιο νότιο τμήμα του νησιού, πλευρικά κορήματα και παράκτιες αποθέσεις (Σχ. 2).

Στην Ικαρία εντοπίζονται τρία κύρια συστήματα ρηγμάτων, με διεύθυνση Δ.ΒΔ- Α.ΝΑ, Α-Δ έως Δ.ΝΔ-Α.ΒΑ (παράλια ρήγματα) και Β-Ν έως Β.ΒΔ-Ν.ΝΔ, κάθετο στο προηγούμενο. Οι διακλάσεις στα πετρώματα του υποβάθρου παρουσιάζουν διευθύνσεις Β-Ν και Α-Δ, δηλαδή είναι παρόμοια με το σύστημα ρηγμάτων των περιοχών των πηγών, ενώ στην ευρύτερη περιοχή των πηγών εντοπίζονται δύο παράλια ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ, καθώς και αρκετά ρήγματα Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ έως Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ. Στη διασταύρωση αυτών των ρηγμάτων εκδηλώνεται η ανάβλυση των πηγών.

3. Μεθοδολογία

Για την εκπόνηση των υδρογεωλογικών μελετών των ιαματικών πηγών Ικαρίας, στα πλαίσια της αναγνώρισης αυτών, αρχικά έγινε συγκέντρωση όλων των διαθέσιμων βιβλιογραφικών δεδομένων και αξιολόγηση αυτών, ενώ ακολούθησαν επιτόπιες επισκέψεις, στις οποίες έγινε καταγραφή των πηγών και των πέριξ αυτών μικρότερων αναβλύσεων, καθώς και γεωλογική και υδρογεωλογική αναγνώριση της περιοχής των πηγών.

Σε όλη την περίοδο έρευνας, έγιναν ανά τρίμηνο μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH, παροχή) και διενέργεια δύο δειγματοληψιών νερού, μία κατά την ξηρή και μία κατά υγρή περίοδο ενός υδρολογικού έτους, για πλήρεις χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις.

Ακολούθησε η επεξεργασία των υδροχημικών δεδομένων, στην οποία, εκτός των εν λόγω πηγών, λήφθηκαν υπόψη για λόγους σύγκρισης και η πηγή Αθάνατο Νερό Ξυλοσύρτη (ΠΑΝ) και η γεώτρηση ύδρευσης Αγίου Κηρύκου (ΓΑΥ-1), από την οποία προέκυψε η χημική ταυτοποίηση του νερού, με βάση την προέλευση, τη θερμοκρασία και το στερεό υπόλειμμα του νερού, αλλά και τα χημικά στοιχεία ποσοτικής υπεροχής, τα χημικά στοιχεία-ιχνοστοιχεία ποιοτικού χαρακτήρα, τα αέρια και τη ραδιενέργεια.

Τα δεδομένα των ορίων για την ταυτοποίηση του νερού (Πίνακας 1), έγιναν σύμφωνα με τις αντίστοιχες παραδεκτές διεθνείς ταξινομήσεις, τις οποίες ακολουθεί και ο Ε.Ο.Τ. (Αγγελίδης, κ.ά. 2013).

Στη συνέχεια με βάση τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδροχημικά δεδομένα έγινε η μορφοποίηση του μοντέλου ανάβλυσης των πηγών, δηλαδή του μηχανισμού λειτουργίας αυτών και των αντίστοιχων θερμομεταλλικών υδροφόρων.

Τέλος, με την ανάλυση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και υδροχημικών δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων, αλλά και τις

πιθανές πηγές ρύπανσης και τις διαμορφωμένες χρήσεις γης, έγινε ο καθορισμός των ζωνών προστασίας των πηγών.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση βασικών κριτηρίων ταυτοποίησης νερού

Table 1. Classification of the basic criteria in thermal water identification

Κριτήρια νερών	Δεδομένα ταυτοποίησης ιαματικού φυσικού πόρου
Θερμοκρασία (°C)	Ψυχρά < 20 Υπόθερμα 20 - 34 Ομοιόθερμα 35 - 38 Υπέρθερμα > 38
Μεταλλικότητα (Στερεό υπόλειμμα, gr/l)	Ολιγομεταλλικά ≤ 0,20 Μεσομεταλλικά 0,21 - 1,00 Μεταλλικά ≥ 1,00 Αλατούχα (αλιπηγές) > 10
Μοριακή συγκέντρωση (mmol/l, σε σχέση με το κρυσκοπικό σημείο του αίματος, Δ=-0,56 °C)	Υποτονικά ≤ 300, Δ≤0,55°C Ισοτονικά 301-315, 0,56°C< Δ < 0,58°C Υπερτονικά ≥ 315, Δ≥ 0,59°C
Χημικά στοιχεία ποσοτικής υπεροχής	Υπερέχοντα ανιόντα: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ²⁺ Υπερέχοντα κατιόντα: HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ (>20% σε meq/l του συνόλου)
Ιχνοστοιχεία ποιοτικού χαρακτήρα (meg/lit)	K ⁺ 1,00 Li ⁺ 0,75 Sr ²⁺ 1,00 Ba ²⁺ 0,40 Br ⁻ 0,05 I ⁻ 0,05 F ⁻ 0,25 As 0,05 B χωρίς όριο (ανάλογα την περιεκτικότητα σε mg/l)
Σίδηρος (Fe ⁺⁺ , mg/lit)	1-10 ασθενώς σιδηρούχα >10 ισχυρά σιδηρούχα
Αέρια (mg/l)	CO ₂ : Ασθενώς ανθρακούχα 300 - 500 Μέτρια ανθρακούχα 501 - 1.000 Ισχυρά ανθρακούχα ≥ 1.000 H ₂ S: Ασθενώς θειούχα 1 - 10 Μέτρια θειούχα 11 - 100 Ισχυρά θειούχα ≥ 100
Ραδιενέργεια (Bq/l Rn)	Ασθενώς ραδιενεργά (ραδονούχα) 46,6 - 266,6 Μέτρια ραδιενεργά (ραδονούχα) 266,6 - 1.333 Ισχυρά ραδιενεργά (ραδονούχα) > 1.333

4. Αποτελέσματα

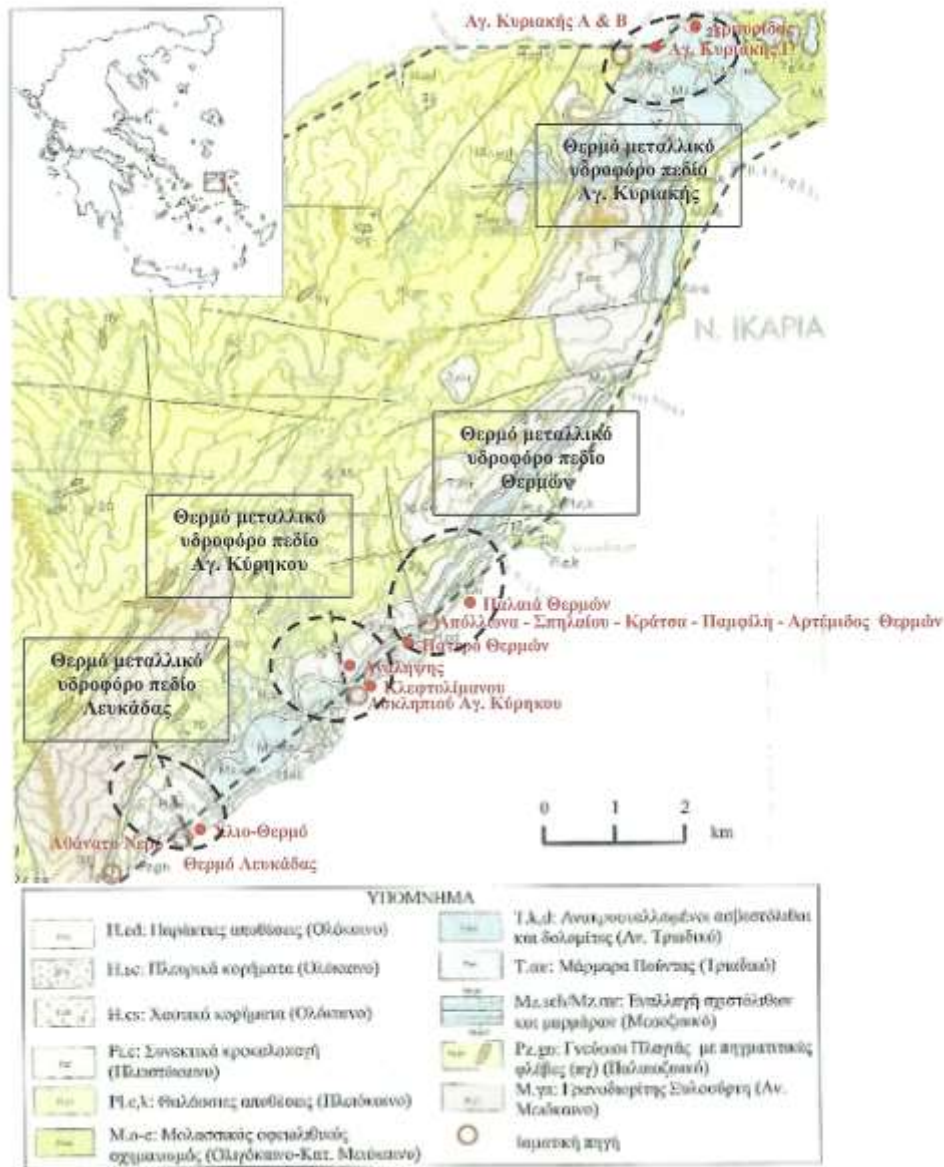
Οι ιαματικές πηγές Ικαρίας εντοπίζονται σε τέσσερα διακριτά τοπικά θερμά μεταλλικά υδροφόρα πεδία (Αγγελίδης 2000), τα οποία είναι τα εξής (Σχ. 3):

α) Λευκάδας: Θερμό (πηγές διάσπαρτες στην παραλιακή ζώνη) και Χλιο-Θερμό (μικρότερης θερμοκρασίας).

β) Αγίου Κηρύκου: Ασκληπιού (ή Μουσταφά Λίτζα), Κάτω Λουμακιάς (ή Ανάληψης) και Κλεφτολίμανου.

γ) Θέρμων: πηγές Απόλλωνα, Αρτέμιδος (επιχώθηκε μεταξύ 1980 και 1982), Παμφίλη (εγκαταλείφθηκε μετά το 1990), Κράτσα, Σηλαιίου, Χαλασμένα Θέρμα (Παλαιά Θέρμα-εγκαταλείφθηκε λόγω μείωσης της θερμοκρασίας) και Πατερό (άνευ εκμετάλλευσης).

δ) Αγίας Κυριακής: πηγές Αγίας Κυριακής (Α), Αγ. Κυριακής Β, Αγ. Κυριακής Γ και Αρμυρίδας (πολυάριθμες μικρές πηγές εντός του ομώνυμου όρμου).



Σχήμα 3. Θερμά μεταλλικά υδροφόρα πεδία Ικαρίας

Figure 3. Thermall-metallic fields of Icaria.

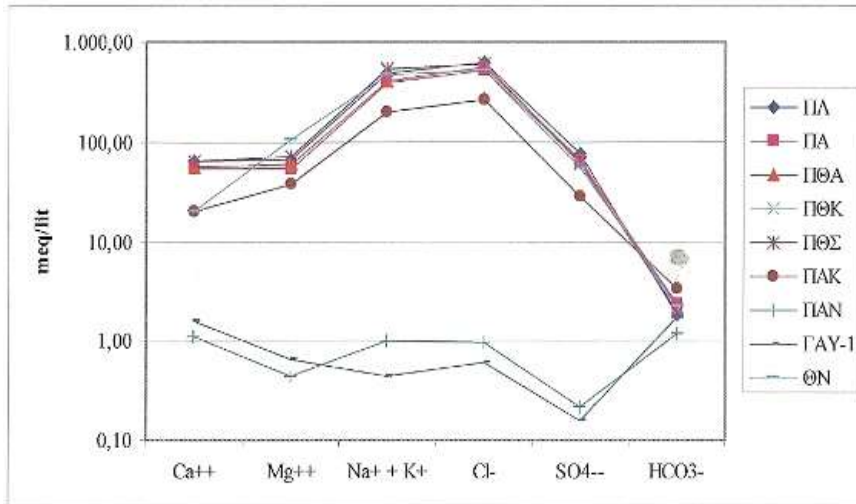
Οι επιτόπιες μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού των πηγών υποδεικνύουν ότι αυτά είναι υπέρθερμα, πολύ υψηλής αγωγιμότητας, ουδέτερα έως ελαφρώς αλκαλικά και οι παροχές των πηγών είναι σημαντικές (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Φυσικο-χημικές παράμετροι νερών ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Table 2. Physical and chemical parameters of the thermal springs of Icaria.

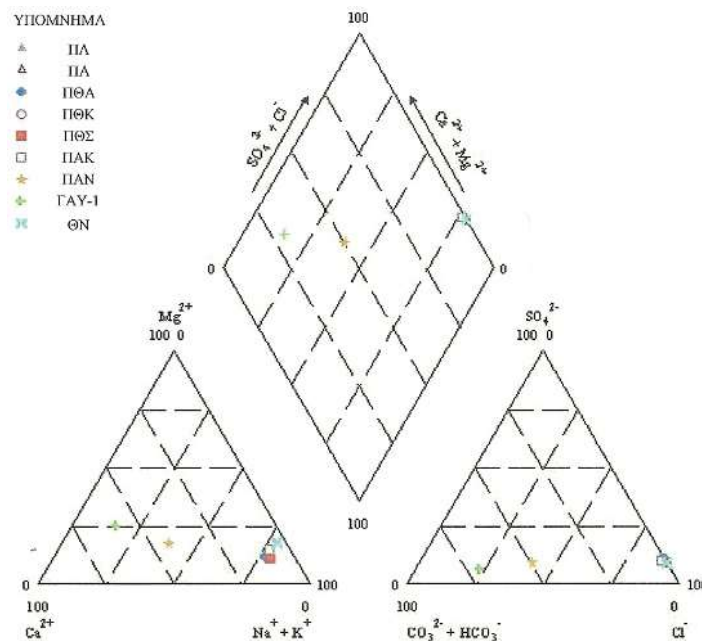
	T (oC)	ρ_a ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Q (m^3/h)
ΠΛ	57,9-58,4	55.200-55.500	7,3-7,4	170,0-200,0
ΠΑ	45,0-46,8	40.200-45.400	7,3-7,5	16,6-20,3
ΠΘΑ	45,0-46,8	40.200-45.400	7,3-7,5	35,3-44,2
ΠΘΚ	50,0-51,5	54.200-54.700	7,3-7,5	7,7-9,9
ΠΘΣ	54,7-56,5	54.100-55.400	7,0-7,3	23,8-25,0
ΠΑΚ	36,2-38,2	22.600-27.500	7,3-7,5	19,8-21,1

Από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα Schoeller (meq/lit) και Piper (meq%), από τα οποία προκύπτει η ομοιότητα του χημισμού των ιαματικών νερών, σε σχέση με τα υπόλοιπα ψυχρά νερά, αλλά και η συμμετοχή της θάλασσας στη χημική τους σύσταση, από την οποία διαφέρουν μόνο στην μικρότερη περιεκτικότητα σε Mg^{++} και την μεγαλύτερη σε Ca^{++} (Σχ. 4 & Σχ. 5).



Σχήμα 4. Διάγραμμα Schoeller των νερών των ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Figure 4. Schoeller diagram of the thermal springs of Icaria.



Σχήμα 5. Διάγραμμα Piper των νερών των ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Figure 5. Piper diagram of the thermal springs of Icaria.

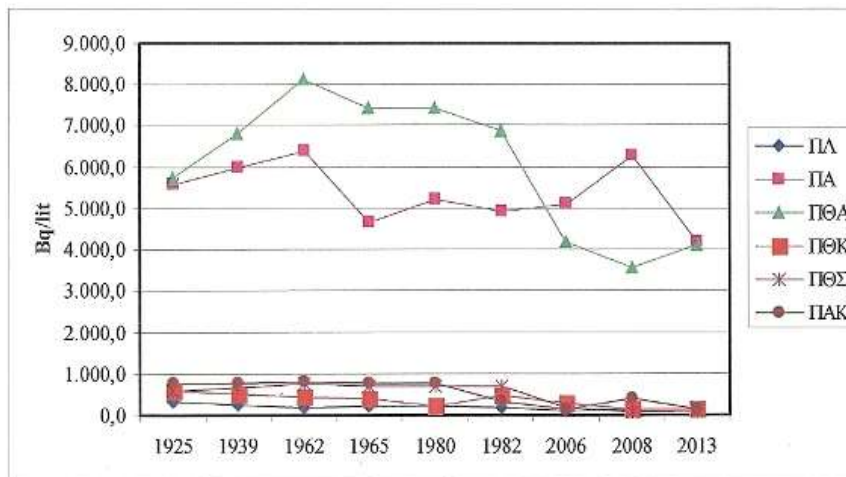
Από τις μετρήσεις ραδιενέργειας που έγιναν και σύμφωνα και με παλαιότερες μετρήσεις (Μακρής Κ. 1925, Περτέσης 1939, Μακρής Γ 1962, Μακρής κ.ά. 1965, Γκαραγκούνη κ.ά. 1980, Γκιώνη κ.ά. 1982, Αθανασούλης κ.ά. 2009), προκύπτει ότι τα νερά είναι ραδιενεργά,

με ισχυρές διακυμάνσεις μεταξύ των επιμέρους πηγών (Σχ. 6), έτσι ώστε να διακρίνονται σε ισχυρά ραδιενεργά, μέτρια ραδιενεργά και ασθενώς ραδιενεργά (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Κατάταξη ιαματικών πηγών Ικαρίας ως προς τη ραδιενέργεια ραδονίου (Bq/lit).

Table 3. Classification of the thermal springs of Icaria according to radon radioactivity content.

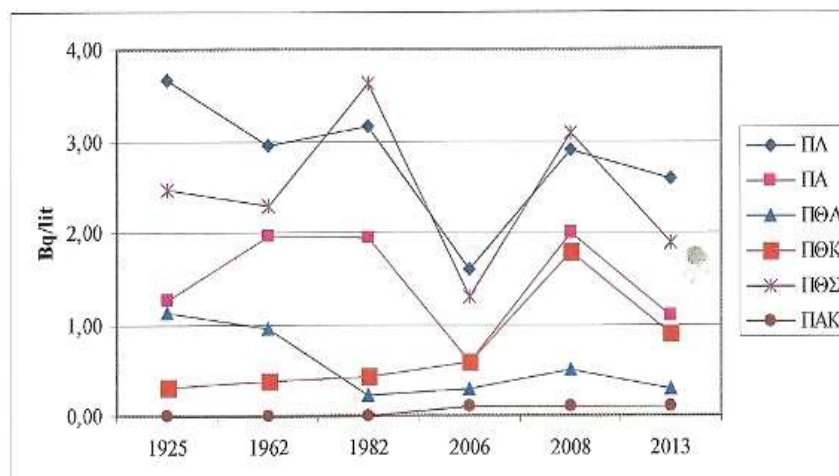
Κατάταξη	Πηγές
Ισχυρώς ραδιενεργές	Ασκληπιού (ΠΑ), Απόλλωνα Θερμών (ΠΘΑ)
Μέτρια ραδιενεργές	Κράτσα Θερμών (ΠΘΚ), Σπηλαιού Θερμών (ΠΘΣ), Αγ. Κυριακής (ΠΑΚ)
Ασθενώς ραδιενεργές	Θερμό Λευκάδας (ΠΛ)



Σχήμα 6. Ραδιενέργεια ραδονίου ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Figure 6. Radon radioactivity content of the thermal springs of Icaria.

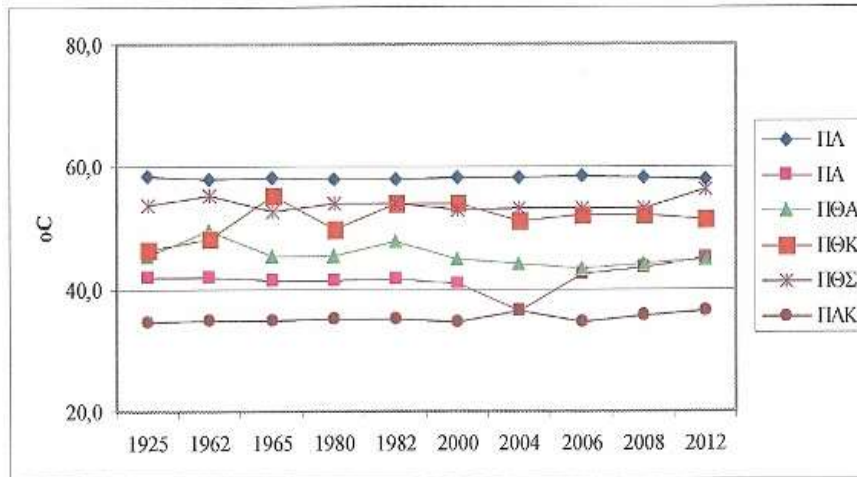
Οι μεταβολές και ο βαθμός της ραδιενέργειας δείχνουν να σχετίζονται με τη μεταβολή και το μέγεθος της παροχής στις πηγές και κυρίως της περιοχής των Θερμών (αύξηση της ραδιενέργειας με μείωση της παροχής και αντιστρόφως), όπως παρατηρήθηκε και παλαιότερα (Βορεάδης 1965). Ακόμη παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις του ραδονίου στα θερμομεταλλικά νερά των πηγών είναι γενικά αντιστρόφως ανάλογες των συγκεντρώσεων ραδίου (Σχ. 7).



Σχήμα 7. Ραδιενέργεια ραδίου ιαματικών πηγών Ικαρίας

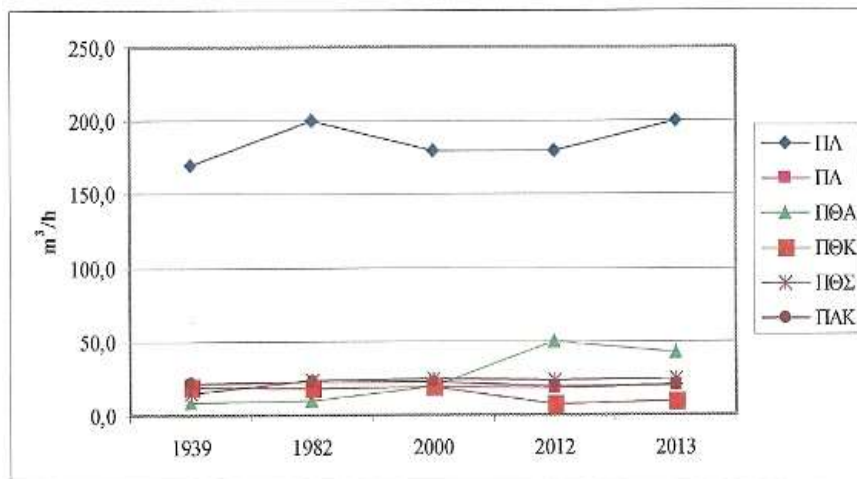
Figure 7. Radium radioactivity content of the thermal springs of Icaria.

Λαμβάνοντας υπόψη και τα στοιχεία παλαιότερων ερευνών (Μακρής Κ. 1925, Πετρέσης 1939, Μακρής Γ 1962, Μακρής κ.ά. 1965, Γκαραγκούνη κ.ά. 1980, Γκιώνη κ.ά. 1982, Γάμμα-4 2000, Περλέρος κ.ά. 2000, Αθανασούλης κ.ά. 2009), η θερμοκρασία παρουσιάζει μικρές μεταβολές (ακόμη και εποχιακές), ενώ η παροχή επίσης μικρές μεταβολές, με εξαίρεση την πηγή Απόλλωνα Θερμών (ΠΘΑ), η οποία παρουσιάζει σημαντική αύξηση μετά το 1982, πιθανόν λόγω της επίχωσης της γειτονικής πηγής Αρτέμιδος, καθώς οι πηγές της περιοχής των Θερμών είναι διάχυτες εντός των αλλουβιακών και παράκτιων αποθέσεων που καλύπτουν το ρήγμα ανόδου των θερμών νερών (Σχ. 8 & Σχ. 9).



Σχήμα 8. Θερμοκρασία νερού ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Figure 8. Water temperature of the thermal springs of Icaria.



Σχήμα 9. Παροχή ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Figure 9. Water discharge of the thermal springs of Icaria.

Σε σχέση με τα στοιχεία του στερεού υπολείμματος του νερού, αυτό είναι γενικά υψηλό (> 7,28 g/lit & > 473 mmol/lit), με αυτά των χημικών στοιχείων ποσοτικής υπερχείας, αυτά που κυριαρχούν είναι τα Na^+ και Cl^- (> 20%), με αυτά των χημικών στοιχείων-ιχνοστοιχείων ποιοτικού χαρακτήρα, αυτά που χαρακτηρίζουν το νερό είναι τα K^+ (0,92-1,12 meq%), Br^- (21,00-60,00 mg/lit), B (2,50-6,40 mg/lit) και I^- (1,30-4,00 mg/lit)), ενώ με αυτά των αερίων, υποδεικνύουν πολύ μικρή παρουσία CO_2 και απουσία H_2S .

5. Συζήτηση

Οι συγκεντρώσεις σε meq/lit των χημικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των ιοντικών σχέσεων Mg/Ca, Na/Cl και Na/K (Πίνακας 4). Από τις τιμές που προέκυψαν κρίνεται ότι η θερμή ιαματική υδροφορία παρουσιάζεται σε μεταμορφωμένα πετρώματα και προέρχεται από μετεωρικό νερό με μεγάλη συμμετοχή θαλασσινού νερού, ενώ η υδροφορία της πηγής Αθάνατο Νερό είναι παρόμοια χωρίς να παρουσιάζει όμως συμμετοχή ή διείσδυση θαλασσινού νερού και η υδροφορία της υδρευτικής γεώτρησης εντοπίζεται σε ασβεστολιθικά πετρώματα, με μικρής έκτασης διείσδυση θαλασσινού νερού.

Πίνακας 4. Τιμές ιοντικών σχέσεων ιαματικών πηγών Ικαρίας.

Table 4. Values of ion relations of the thermal springs of Ikaria.

	Mg/Ca	Na/Cl	Na/K
ΠΛ	1,02	0,73	31,21
ΠΑ	1,01	0,72	34,23
ΠΘΑ	1,06	0,72	33,22
ΠΘΚ	1,10	0,85	39,62
ΠΘΣ	1,12	0,85	35,00
ΠΑΚ	1,90	0,73	37,96
ΠΑΝ	0,40	0,97	15,59
ΓΑΥ-1	0,42	0,66	12,17
ΘΝ	5,24	0,86	47,24

Με βάση τις χημικές αναλύσεις και την επεξεργασία αυτών, αλλά και όλων των υπόλοιπων κριτηρίων, προκύπτει ότι η ταυτοποίηση των ιαματικών πηγών Ικαρίας δίδεται από το χαρακτηρισμό: μετεωρικές και θαλάσσιες - υπέρθερμες - μεταλλικές (αλιπηγές) - υπερτονικές - χλωριονατριούχες - καλιούχες - βρωμιούχες - ιωδιούχες - ραδιενεργές - πηγές Ικαρίας. Η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ τους είναι ο βαθμός ραδιενέργειας (Αγγελίδης 2000).

Από την τελική επεξεργασία των υδρογεωλογικών και υδροχημικών στοιχείων που συγκεντρώθηκαν έγινε δυνατή η διερεύνηση ενός μηχανισμού δημιουργίας των θερμομεταλλικών υδροφόρων (γεωθερμικών ταμειυτήρων) και των πηγών, με τη χρήση και των γεωθερμομέτρων πυριτίου (Fournier & Rowe 1966, από Αγγελίδης 1986) και Na-K-Ca (Fournier & Truesdell 1973, από Αγγελίδης 1986), με όλες τις επιφυλάξεις για την ισχύ τους στα χλωριονατριούχα νερά των γεωθερμικών αναβλύσεων (Νομικού κ.ά. 2002). Το γεωθερμόμετρο πυριτίου χρησιμοποιεί τη συγκέντρωση του SiO₂ στο νερό σε mg/lit (1), ενώ το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca τις συγκεντρώσεις των υπόψη ιόντων σε mg/lit (2), όπου b είναι συντελεστής που λαμβάνεται 1/3 ή 4/3, αν $\log\sqrt{Ca/Na} < 0$ ή $\log\sqrt{Ca/Na} > 0$ αντίστοιχα. Από την εφαρμογή των εν λόγω γεωθερμομέτρων προσδιορίζεται η θερμοκρασία βάθους του γεωθερμικού ρευστού (t).

$$t = \frac{1309}{5,19 - \log C} - 273 \quad (1)$$

$$t = \frac{1647}{(\log(Na/K) + b[\log(\sqrt{Ca/Na}) + 2,06] + 2,47)} - 273 \quad (2)$$

Το βάθος προέλευσης του νερού, δηλαδή το μέγιστο βάθος καθόδου (z) προσδιορίζεται κατά προσέγγιση από την εμπειρική σχέση:

$$t_z = \frac{t_0 + 3(z - z_0)}{100} \quad (3)$$

όπου t_z είναι η θερμοκρασία βάθους του γεωθερμικού ρευστού, t_0 είναι η θερμοκρασία του νερού της πηγής και z_0 το υψόμετρο ανάβλυσης του θερμού νερού.

Από τη χρήση των σχέσεων (1), (2) και (3) προκύπτουν οι θερμοκρασίες βάθους και το βάθος καθόδου των νερών (Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Τιμές θερμοκρασίας βάθους και βάθους καθόδου θερμών νερών Ικαρίας

Table 5. Depth temperature and depth of the thermal waters of Icaria

Πηγές	SiO ₂		Na-K-Ca		Συνδυασμένες	
	t (oC)	t _z (m)	t (oC)	t _z (m)	t (oC)	t _z (m)
ΠΛ	70	400	60	150	65	300
ΠΑ	80	1.000	60	400	70	700
ΠΘΑ	75	900	60	400	70	650
ΠΑΚ	70	800	60	400	65	600
ΠΘΣ	75	800	60	400	70	600
ΠΑΚ	60	800	50	700	55	750

Από τα παραπάνω προκύπτει ο μηχανισμός των πηγών, σύμφωνα με τον οποίο το μετεωρικό νερό κατέρχεται μέσω των ασυνεχειών του υποβάθρου σε βάθος 300-700 m, όπου θερμαίνεται από την αποβολή θερμότητας της γρανιτικής διείσδυσης.

Στη συνέχεια το θερμό νερό φαίνεται να κυκλοφορεί και να συγκεντρώνεται στην περιοχή των πηγών εντός των ασυνεχειών του υποβάθρου και, λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, αλλά και διαφοράς πυκνότητας, αρχίζει ανοδική πορεία, μέσω του παράκτιου ρήγματος (ανοικτό και ενεργό, όπως προκύπτει και από την ισχυρή παρουσία ραδονίου), ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης (Α-Δ στην περιοχή Αγ. Κυριακής), ή διασταύρωσης αυτού με άλλα, διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ στην περιοχή Αγ. Κυριακής), σχηματίζοντας νέο ταμιευτήρα, σε μικρότερο βάθος, εντός των φυλλιτών και μαρμάρων, σε βάθος 30-100 m. Η διέλευση μέσω των μαρμάρων εξηγεί και την σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε Ca.

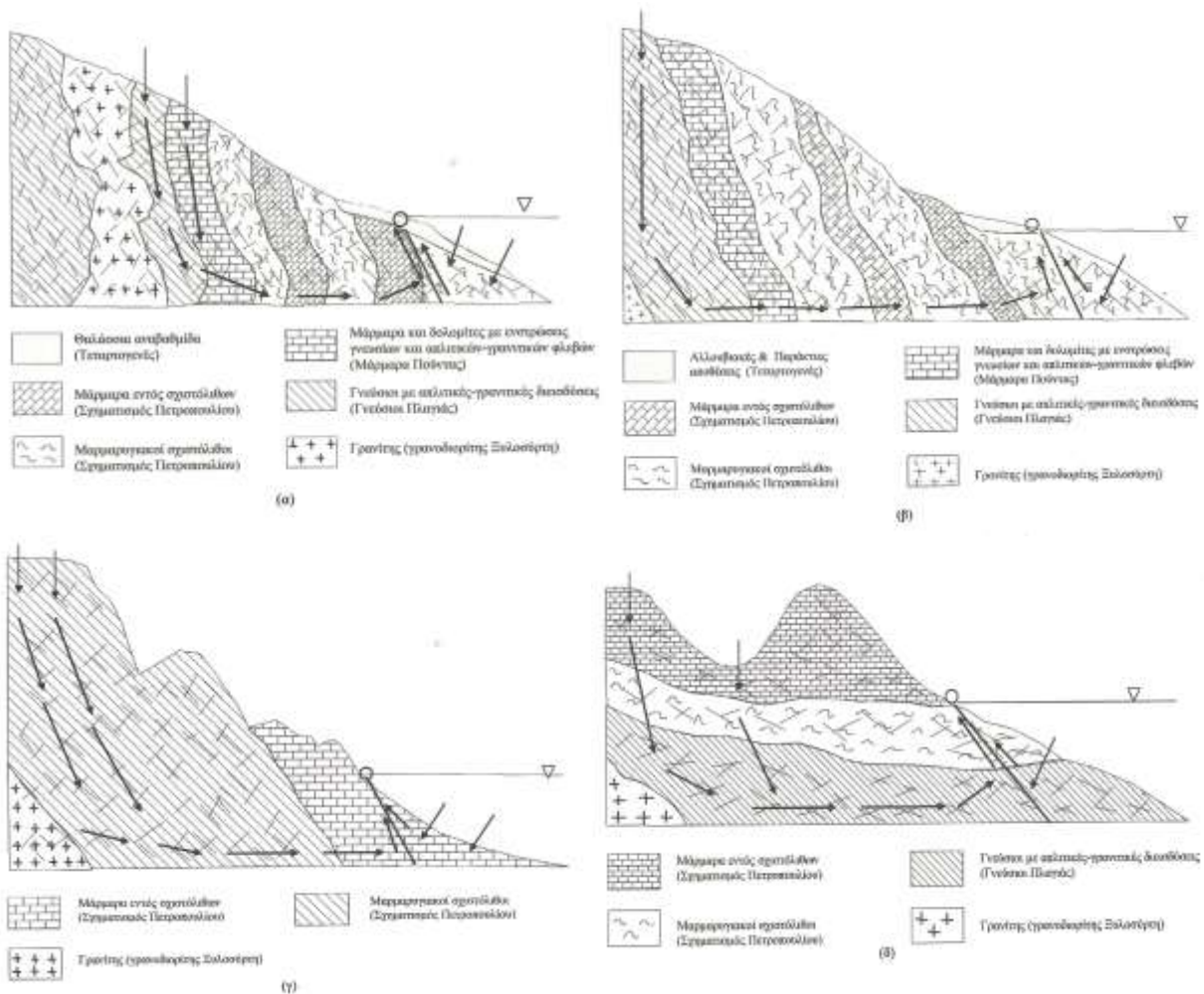
Η κύρια διεύθυνση ροής του νερού είναι από ΒΔ προς ΝΑ, αλλά και αντίστροφα από τη θάλασσα, αφού η συμμετοχή του θαλασσινού νερού στη θερμή υδροφορία φαίνεται ότι είναι μεγάλη και καθοριστική (Σχ. 10).

Με βάση τον προτεινόμενο μηχανισμό δημιουργίας των θερμομεταλλικών υδροφόρων (γεωθερμικών ταμιευτήρων) και των πηγών, αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν ως θερμικής εστίας (παρουσία γρανιτικής διείσδυσης) και παράκτιες, σε ρήγμα ή διασταύρωση ρηγμάτων και μόνο στις περιοχές Λευκάδας και Θερμών σε διασταύρωση ρηγμάτων διαμέσου τεταρτογενών ιζημάτων, με τη μορφή διάσπαρτων πηγών, (Δημόπουλος 1988, Dimopoulos, 1989).

Ειδικότερα στην περιοχή Θερμού Λευκάδας εντοπίζονται πολυάριθμες μικρότερες ή μεγαλύτερες διάσπαρτες πηγές, που αποτελούν ουσιαστικά μια ενιαία πηγή ενώ στην περιοχή Θερμών εντοπίζονται πολυάριθμες αρκετά μεγάλες διάσπαρτες πηγές.

Η ραδιενέργεια των νερών οφείλεται στη γρανιτική διείσδυση και ιδίως στις γρανιτικές φλέβες (απλιτικές και πηγματιτικές αποφύσεις), που διεισδύουν στους γνεύσιους, περιέχουν ορυκτά του ουρανίου (π.χ. μοναζίτη, ωτουνίτη ή ασβεστοουρανίτη). Το ουράνιο μεταστοιχείωνεται σε ράδιο και αυτό με τη σειρά του σε ραδόνιο. Τα νερά καθώς έρχονται σε επαφή, κατά την υπόγειά τους διαδρομή, με τα ορυκτά αυτά, διαλύουν και μεταφέρουν τα προϊόντα μεταστοιχειώσεως, δηλαδή ράδιο και κυρίως ραδόνιο, ως πιο διαλυτό στο νερό. Η έκλυση ραδονίου γίνεται κατά κανόνα από ενεργά ρήγματα μεγάλου βάθους, γεγονός που αποδεικνύει ότι τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά και συνεπώς ανοικτά, οπότε η

κίνηση των θερμών νερών γίνεται μέσα από αυτά. Η διαφορά συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα νερά των πηγών μπορεί να ερμηνευτεί από τη σχετική θέση τους, ως προς τα ρήγματα ανόδου του θερμού νερού και τις αποφύσεις του γρανοδιορίτη.



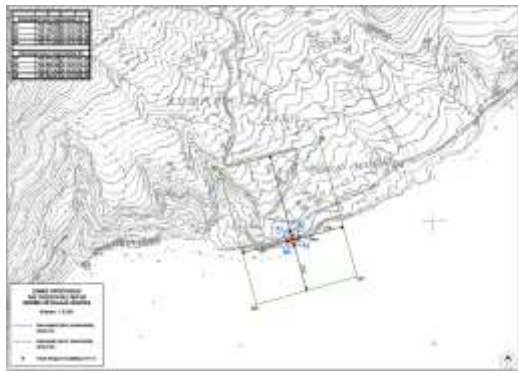
Σχήμα 10. Μηχανισμός πηγών Λευκάδας (α), Ασκληπιού (β), Θερμών (γ) και Αγ. Κυριακής.

Figure 10. Mechanism of the Lefkada (α), Asklipios (β), Therma (γ) and Ag. Kyriaki (δ) springs.

Για την προστασία των πηγών, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδροχημικά δεδομένα, σε συνάρτηση με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων, αλλά και τις πηγές ρύπανσης (καλλιέργειες, λύματα, κλπ.) και τις διαμορφωμένες χρήσεις γης (δομημένο περιβάλλον, αγροτικές χρήσεις, κλπ.), έγινε ο καθορισμός των ζωνών προστασίας των πηγών.

Καθορίστηκαν οι ζώνες προστασίας της ποσότητας, που περιλαμβάνουν την ζώνη Α (εσωτερική ζώνη προστασίας) και την ζώνη Β (εξωτερική ζώνη προστασίας), καθώς και οι ζώνες προστασίας της ποιότητας, που περιλαμβάνουν την ζώνη Ι (ζώνη υδροληψίας), την ζώνη ΙΙ (κοντινή ζώνη προστασίας) και την ζώνη ΙΙΙ (μακρινή ζώνη προστασίας).

Στόχος του καθορισμού των ζωνών αυτών είναι η προστασία των πηγών από ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία χρήσης των ιαματικών πηγών, χωρίς όμως τον άσκοπο αποκλεισμό μεγάλων εκτάσεων από αναπτυξιακές χρήσεις του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (Σχ.11).



(α)



(β)



(γ)



(δ)



Σχήμα 11. Ζώνες προστασίας πηγών Λευκάδας (α), Ασκληπιού (β), Θερμών (γ) και Αγ. Κυριακής (δ).
 Figure 11. Protection zones of Lefkada (α), Asklipios (β), Therma (γ) and Ag. Kyriaki (δ) springs.

Βιβλιογραφία

- Αγγελίδης, Ζ., Μήτρακας, Μ., Αθανασούλης, Κ. (2013). Πίνακας ταυτοποίησης ιαματικών φυσικών πόρων. ΕΟΤ, Αθήνα.
- Αγγελίδης, Ζ. (2000). Θερμολιστικό μοντέλο Ανατολικού Αιγαίου. Σ.Δ.Κ.Ι.Π.Ε., Θεσσαλονίκη.
- Αγγελίδης, Ζ. (1986). Εισαγωγή στα θερμομεταλλικά νερά. Σ.Δ.Κ.Ι.Π.Ε., Θεσσαλονίκη.
- Αγγελόπουλος, Χ. (2013). Γεωλογική-Υδρογεωλογική μελέτη των πηγών Λευκάδος, Ασκληπιού, Απόλλωνα-Σπηλαίου-Κράτσα Θερμών και Αγ. Κυριακής Δήμου Ικαρίας για την αναγνώριση τους ως ιαματικές. Δήμος Ικαρίας - Σ.Δ.Κ.Ι.Π.Ε., Θεσσαλονίκη.
- Αθανασούλης, Κ., Βακαλόπουλος, Π., Ξενάκης, Μ., Περισιάνης, Δ., Τακτικός Σ. (2009). Περιοδική παρακολούθηση Ιαματικών Πηγών Ελλάδας. Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.
- Βορεάδης, Γ. (1965). Τα μεταλλικά ύδατα της Ελλάδος από γεωλογική σκοπιά. Αθήνα.
- Γάμμα-4 ΕΠΕ (2000). Μελέτη των υδρογεωλογικών συνθηκών των ιαματικών πηγών Θερμών νήσου Ικαρίας - Πρόταση όρων προστασίας τους από την πολεοδόμηση. ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα.
- Γκαραγκούνη-Δημητρούλια Ο.Ε., Μαραβέας-Μουράλογλου & Συνεργάτες Ε.Ε., Πετρογιάννης-Therblinks (1980). Μελέτη αξιοποίησες θερμομεταλλικών πηγών Νήσου Ικαρίας του Νομού Σάμου. Υπουργείο Συντονισμού, Αθήνα.
- Γκιώνη, Γ., Ορφανός, Γ., Σφέτσος, Κ. (1982). Απογραφή θερμομεταλλικών πηγών Ελλάδας, Αιγαίο Πέλαγος. Υδρολογικές και Υδρογεωλογικές Έρευνες, 39, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Δημόπουλος, Γ. (1988). Υδρογεωλογικά και υδροχημικά χαρακτηριστικά των θερμομεταλλικών νερών Ελλάδος. Πρακτ. 2^ο Συνεδρίου για τα θερμομεταλλικά νερά, Θεσσαλονίκη.
- Dimopoulos G. (1989). Hydrogeological and chemical characteristics of geothermal fluids in Greece. FAO-Rural Country Review, 2, CNRE (UN).
- Ι.Γ.Μ.Ε. (2005). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος. Κλίμακα 1:50.000, Φύλλο Ικαρία, από Φωτιάδη, Α., Αθήνα.
- Κτενάς, Κ. (1969). Γεωλογία της νήσου Ικαρίας. ΠΕΥ, Γεωλογικά Γεωφυσικά μελέται, 13(2): 57-86, Αθήνα.
- Λέκκας Ν. (1938). Οι 750 ιαματικές πηγές της Ελλάδος. Αθήνα.
- Μακρής, Γ., Μακρή Α., Στράτης Β., Οικονόμου Μ., Παναγιωτίδης Ι., Αγαθοκλή Γ. (1965). Νεώτεροι έρευναι των θερμομεταλλικών ραδιενεργών πηγών της Νήσου Ικαρίας. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Μακρής, Κ. (1928). Ιαματικά Ύδατα Ικαρίας. Αθήνα.
- Νομικού, Π., Δημόπουλος Γ. & Οξένκιουν-Πετροπούλου Μ. (2002). Η ισχύς των γεωθερμομέτρων στα χλωριούχα και χλωριονατριούχα νερά των γεωθερμικών αναβλύσεων του Ελλαδικού χώρου, Πρακτ. 1^ο Παν/νίου Συνεδρίου θερμικής ανάλυσης, Θεσσαλονίκη.
- Νομικού Π.& Δημόπουλος Γ. (2002). Μελέτη δημιουργίας και ανάπτυξης του γεωθερμικού πεδίου Ν. Κύθνου του Αιγαίου Πελάγους. Πρακτ. 6^ο Παν/νίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη.
- Παπανικολάου, Δ. (1978). Συμβολή εις την γεωλογίαν της νήσου Ικαρίας (Αιγαίον Πέλαγος). Annales Géologique des Pays Helléniques, 29 (1): 1-28.
- Περίερος, Β., Δρακοπούλου, Ε., Βαλαδάκη-Πλέσσα, Α., Αρβανίτης, Α., Αλατζάκη, Α. (2001). Διερεύνηση των γεωλογικών - υδρογεωλογικών συνθηκών στον Αγ. Κήρυκο νήσου Ικαρίας. Προτάσεις για βιώσιμη οικιστική ανάπτυξη - Προστασία του δομημένου περιβάλλοντος και των θερμομεταλλικών ιαματικών πηγών. Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρείας, XXXIV (5): 1903-1911.
- Περτέσης Μ. (1939). Περί των ραδιενεργών θερμοπηγών της νήσου Ικαρίας. Πρακτικά Ακαδ. Αθηνών, 14, Αθήνα.