



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Τομέας Μεταλλευτικής Τεχνολογίας**

**Ερευνητική μονάδα Γεωλογίας (Τεκτονική- Στρωματογραφία-  
Γεωλογία Περιβάλλοντος)**

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

---

SCHOOL OF MINERAL RESOURCES ENGINEERING

Division of Mining Technology – Laboratory of Geology

(Tectonics- Stratigraphy- Environmental Geology)

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Μελέτη γεωλογικών και γεωχημικών χαρακτηριστικών θερμομεταλλικών πηγών  
στην δυτική Κρήτη»**

**Κουφάκης Μιλτιάδης**

Εξεταστική Επιτροπή :

---

**Εμμανουήλ Μανούτσογλου**

**Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)**

---

**Νικόλαος Καλλίθρακας-  
Κόντος**

**Καθηγητής Π.Κ**

---

**Νικόλαος Σπανουδάκης**

**Δρ., ΕΔΙΠ Π.Κ.**

---

Χανιά, Μάιος 2018

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

## **Ευχαριστίες**

Φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και κοσμήτορα της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, κύριο Μανούτσογλου Εμμανουήλ, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος, καθώς και για την κατανόηση και την ηθική στήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Καλλίθρακα-Κοντό Νικόλαο, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για την συμμετοχή του και την παρουσία του στην εξεταστική επιτροπή της παρουσίασης μου.

Από καρδιάς, ευχαριστώ τον Σπανουδάκη Νικόλαο, Δρ., ΕΔΙΠ του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συνεχή συμπαράσταση και στήριξη του καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής καθώς και για την αμέριστη προσοχή που έδειξε, από την αρχή ως το τέλος, για την πρόοδο και την εξέλιξη της διπλωματικής μου εργασίας.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το συγγενικό και φιλικό μου περιβάλλον, για την υπομονή και την πίστη που έδειξαν όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου τόσο για την υλική όσο και για την συναισθηματική στήριξη που μου παρείχαν σε κάθε στάδιο της ζωής μου, και κάθε μου επιλογή.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια συστηματική προσέγγιση των ραδονούχων πηγών του Αγίου Αντωνίου, μιας συστοιχίας πηγών που εκφορτίζονται στο παραλιακό μέτωπο μιας περιοχής ανατολικά της Σούγιας, της επαρχίας Σελίνου, στις νότιες παρυφές των Λευκών Ορέων του νομού Χανίων της Κρήτης.

Από προηγούμενες έρευνες οριοθετούνται και παρουσιάζονται οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Από δείγματα υδάτων που συλλέχθηκαν σε τρεις διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας (Σεπτέμβριο του 2016 και 2017 και τον Απρίλιο του 2018) μετά από αναλύσεις κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων, ερμηνεύονται οι μετρούμενες συγκεντρώσεις του ραδονίου και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των παραδοσιακά ιαματικών πηγών. Το σύνολο των φυσικοχημικών και υδροχημικών χαρακτηριστικών τους απεικονίστηκαν με τη χρήση υδροχημικών διαγραμμάτων.

Συμπερασματικά, τα νερά των πηγών του Αγίου Αντωνίου, όπως διαπιστώθηκε, είναι ψυχρά ( $14,3-15,2^{\circ}\text{C}$ ), μπορεί να θεωρηθούν ραδονούχα (συγκέντρωση  $\text{max } 130.000 \text{ Bq/m}^3$ ), εμπίπτουν δε στην κατηγορία των χλωρονατριούχων υδάτων. Σύμφωνα με τα συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS), την έντονη παρουσία χλωρίου και νατρίου και λαμβάνοντας υπ' όψιν το φαινόμενο Venturi, οδηγούμαστε στο σαφές συμπέρασμα της περιοδικής ανάμειξης θαλασσινού νερού στις υπό μελέτη πηγές. Η απουσία διαλυμένων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων στα νερά των πηγών σε συνδυασμό με την αυξημένες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου οδηγούν στην υπόθεση ότι η έκλυση ραδονίου συνδέεται με ρήγματα μεγάλου βάθους, που οριοθετούν τα πετρώματα της Ενότητας του Τρυπαλίου στην περιοχή.

## Abstract

In this thesis, there is a systematic approach to the springs of Agios Antonios, an array of springs which are discharged to the coastal, located front of a region east of Sougia, at the province of Selinos, on the southern tops of the White Mountains of the prefecture of Chania, Crete.

Previous research studies, have delineated and presented the geological conditions of the area. From water samples, collected in three different sampling periods (September 2016 and 2017 and April 2018) and after analyzes of major ions and trace elements, the measured concentrations of radon and the physicochemical characteristics of the traditionally thermal

springs are interpreted. All their physicochemical and hydrochemical characteristics were visualized by using hydrochemical diagrams.

In conclusion, the waters of Agios Antonios springs, are cold (14,3-15,2°C), they can be considered as waterbeds (concentration max 130,000 Bq / m<sup>3</sup>), while, they belong to the category of chlorine-sodium waters. According to the total dissolved solids (TDS), the strong presence of chlorine and sodium, and taking into account the Venturi phenomenon, we come to the clear conclusion of the periodic mixing of sea water in these springs. The absence of dissolved radioactive trace elements in source waters, combined with increased concentrations of radon, lead us to the conclusion that radon existence is associated with large faults, which are delineated by the rocks of the Triple Unit in the area.

**Keywords:** Radon, isotopes, radionuclides, radioactive decay-disintegration series, healing, main ions, trace elements, ionic ratios, karstic springs, saturation.

## Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η συστηματική προσέγγιση των υδάτων των πηγών της περιοχής του Αγίου Αντωνίου, στα Χανιά (Εικόνα 1), λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας των σε ραδόνιο, καθώς και η υδροχημική ανάλυση των υδάτων των πηγών και η ερμηνεία τους με βάση τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Αξίζει να επισημανθεί, το γεγονός ότι στην Κρήτη παρόλο που υπάρχουν ιαματικές πηγές, η πλειονότητα τους δεν έχει αναγνωριστεί επίσημα με μελέτες και διεξαγωγή ερευνών. Στην προσπάθεια αυτή βασίζεται το ενδιαφέρον της εργασίας, δηλαδή, ως προς το ραδόνιο που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των περισσότερων ιαματικών πηγών.

Συλλέχθηκαν τέσσερα δείγματα, τα πρώτα δύο από τις δύο διαφορετικές πηγές ενδιαφέροντος (η πηγή «1» βρίσκεται πολύ κοντά στην θάλασσα, η πηγή «2» βρίσκεται λίγο πιο μακριά, ενώ και οι δύο θεωρούνται παράκτιες) στις 19/09/2016 (AgAntonios1-1, AgAntonios2-1), ενώ το τρίτο

(AgAntonios1-2) στις 18/09/2017 και το τέταρτο (AgAntonios1-3) στις 17/04/2018 μόνο από την μία (πρώτη-πηγή «1») εκ των δύο πηγών.

Μετρήθηκαν και αναλύθηκαν σε ότι αφορά την περιεκτικότητα τους σε ραδόνιο με τη χρήση οργάνου RTM1668-2 της Sharad. Στην συνέχεια, στηριζόμενοι στις εργαστηριακές υποδομές του Πολυτεχνείου Κρήτης, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων (των υδάτων) και με την βοήθεια του λογισμικού AQUACHEM της Waterloo Hydrogeologic, δημιουργήθηκε βάση δεδομένων με τα δείγματα της υπό μελέτη περιοχής, του Αγίου Αντωνίου (Επαρχία Σελίνου). Τα δείγματα μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν ως προς την περιεκτικότητα τους σε κύρια ανιόντα και κατιόντα μέσω διαγραμμάτων Piper, Schoeller, ραβδογράμματα, και ως προς τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους (pH, θερμοκρασία T (°C), συνολικά διαλυμένα στερεά TDS, ηλεκτρική αγωγιμότητα EC, δυναμικό οξειδοαναγωγής Eh κ.τ.λ). Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης κορεσμού SI (δείκτης Langelier), για ορισμένα ορυκτά.

Η εργασία αποτελείται από 4 κεφάλαια: Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στο ραδόνιο, στις ιδιότητες του, στην προέλευση του και στην σημασία της μέτρησης του. Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην γεωλογία της Κρήτης και πιο συγκεκριμένα στο γεωλογικό περίγραμμα της περιοχής του Αγίου Αντωνίου. Αναφέρονται επίσης, γενικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά διάφορων τύπων πηγών και ο τρόπος με τον οποίο διεισδύει το θαλασσίνο νερό στον υδροφόρο που μεταφέρει γλυκό νερό στις πηγές. Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα δείγματα που συλλέχθηκαν από την υπό μελέτη περιοχή και εν συνεχεία λαμβάνει χώρα η εκτίμηση της σύστασης του νερού. Παρουσιάζονται επίσης, τα υδροχημικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων με τη δημιουργία υδροχημικών διαγραμμάτων και αναλύεται η περιεκτικότητα των νερών σε ραδόνιο (καθώς και θορόνιο). Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω διπλωματική εργασία.



**Εικόνα 1:** Με κόκκινο χρώμα προσδιορίζεται η γεωγραφική θέση της υπό μελέτη περιοχής του Αγίου Αντωνίου (στην επαρχία Σελίνου κοντά στην Σούγια Χανίων,  $\chi=456626,5358$ ,  $y=3888604,7756$ ,  $z=0$ ) για τον καλύτερο προσανατολισμό του αναγνώστη [1].

## Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Ραδόνιο .....	9
1.1 Ιστορική σημασία των ιαματικών πηγών.....	9
1.2 Ραδιενεργά προϊόντα στο εμπόριο της δεκαετίας του 1920 και 1930 .....	12
1.3 Γενικές πληροφορίες για την ραδιενέργεια.....	14
1.4 Γενικές πληροφορίες για το ραδόνιο και την ανακάλυψη του.....	17
1.5 Ραδιενεργή αποσύνθεση-ραδιενεργά στοιχεία.....	19
1.6 Ραδιενεργή σειρά – ουρανίου-ραδίου-ραδονίου .....	20
1.7 Που απαντάται το ραδόνιο ως θυγατρικό του ραδίου και ουρανίου.....	22
1.8 Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες κατά την διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων .....	23
1.9 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου .....	24
1.10 Σχηματισμός-διαφυγή και εκροή ραδονίου .....	26
1.11 Ραδόνιο και η εγκατάλειψη του αρχικού του πετρώματος .....	31
1.12 Ραδόνιο στα υπόγεια ύδατα .....	32
1.13 Ραδόνιο-ράδιο-ουράνιο σε υδάτινο περιβάλλον .....	32
1.14 Τι συνεπάγεται η ύπαρξη του ραδονίου στο νερό και τι στον αέρα .....	35
1.15 Μέθοδοι μέτρησης ραδονίου .....	36
1.16 Μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου των υδάτων της περιοχής του Αγίου Αντωνίου, καθώς και θορινίου, με τον ενεργητικό ανιχνευτή RTM1668-2 της Sharad.....	41
1.17 Ιαματικές πηγές στην Ελλάδα.....	45
1.18 Θετικά του Ραδονίου.....	52
1.19 Λίγα λόγια για το Θορόνιο $^{220}\text{Rn}$ .....	57

Κεφάλαιο 2: Γεωλογία-Υδρογεωλογία .....	59
2.1 Γεωλογία Κρήτης.....	59
2.2 Ιστορική αναδρομή .....	63
2.3 Γεωλογικό περίγραμμα της περιοχής του Αγίου Αντωνίου.....	64
2.4 Υδρογεωλογία.....	72
Κεφάλαιο 3: Δείγματα και Χημικές Αναλύσεις.....	81
3.1 Εισαγωγή .....	81
3.2 Δείγματα από την περιοχή μελέτης στον Άγιο Αντώνιο.....	82
3.3 Η σύσταση του θαλασσινού νερού, και η αλατότητα .....	85
3.4 Υδροχημικά διαγράμματα.....	89
3.5 Δείκτης κορεσμού Langelier.....	102
3.6 Μέτρηση ραδονίου (και θορονίου) στις υπό μελέτη πηγές .....	105
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	107
Βιβλιογραφία .....	109
Διεθνής.....	109
Ελληνική .....	115
Ιστότοποι.....	118
Παράρτημα- Συμπληρωματικές Εικόνες. ....	118



## Κεφάλαιο 1: Ραδόνιο

### 1.1 Ιστορική σημασία των ιαματικών πηγών

*Η πρώτη αναφορά για την ιαματική δράση ορισμένων πηγών δίνεται από τον Ηρόδοτο (484- 410 π.χ) ο οποίος περιέγραψε μερικές ιαματικές πηγές και σύστηνε θεραπεία σε ορισμένες εποχές του χρόνου για διάστημα 21 ημερών. Ο Ιπποκράτης (460-375 π.χ), ο οποίος θεωρείται ο ιδρυτής της ιατρικής και ο πατέρας της υδροθεραπείας, έδωσε ιδιαίτερη σημασία στα διαφορετικά φυσικά νερά που υπάρχουν σε έλη και λίμνες που σχηματίζονται από την βροχή και σ' αυτά που αναβλύζουν από πετρώματα, συγκεκριμένα τα μεταλλικά νερά. Ισχυρίστηκε δε ότι τα νερά αυτά περιέχουν σίδηρο, χαλκό, άργυρο, χρυσό, θείο και άλλα μέταλλα. Εκτός από τις γνωστές αναφορές της Αγίας Γραφής, στους Ρωμαϊκούς και Βυζαντινούς χρόνους πολλοί γιατροί μελέτησαν την υδροθεραπεία. Ιερόφιλος, Ερασίστρατος, Ασκληπιάδης, Αγαθηνός, Γαληνός, Ορειβάσιος, Παύλος ο Αιγηνίτης και άλλοι. Όλοι αυτοί οι γιατροί δέχτηκαν την ιαματική δράση ορισμένων φυσικών πηγών. Ο Αγαθηνός στον 1<sup>ο</sup> αιώνα μ.χ έγραψε για τις θεραπευτικές ιδιότητες των ιαματικών πηγών, και ισχυρίστηκε ότι δεν ήταν δυνατόν να ορίσει τον τρόπο με τον οποίο κάθε μία από τις πηγές αναπτύσσει τις ιαματικές της ιδιότητες, επειδή αυτό θα απαιτούσε πολλά χρόνια παρατήρησης και πειραματισμού, αυτό ισχύει μέχρι σήμερα. Ονομαστές ιαματικές πηγές από την Ρωμαϊκή εποχή παρέμειναν μέχρι σήμερα ιστορικά και αρχιτεκτονικά μνημεία σε όλη την Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα. Η ιαματική λουτροθεραπεία βρήκε ευρύτερη εφαρμογή τους τελευταίους δύο αιώνες. Σε πολλές χώρες της Ευρώπης (Γερμανία, Αυστρία, Γαλλία, Ιταλία, Ουγγαρία, Τσεχία και Σλοβακία) κατασκευάστηκαν νέα θεραπευτικά κέντρα, που αντικατέστησαν τα παλαιά Ρωμαϊκά λουτρά. Νερό από τα λουτρά και τις μεταλλικές πηγές με υψηλές συγκεντρώσεις φυσικής ραδιενέργειας συγκεντρωνόταν σε τυποποιημένα μπουκάλια και πουλιόταν στο κοινό σαν δυναμωτικό ή για θεραπευτικούς σκοπούς. Νωρίς από το 1905 ο εξέχον Βρετανός χημικός*

*Frederick Soddy (1877-1956) πρότεινε την εξαγωγή ραδονίου από διάλυμα ραδίου, που θα χρησιμοποιείται για την θεραπεία της φυματίωσης (tuberculosis). Το ραδόνιο βρήκε πολλές ιατρικές εφαρμογές περιλαμβανόμενης και της εισαγωγής του σε διάφορες κοιλότητες του σώματος. Στα ιαματικά λουτρά εκτός από την θεραπεία με το μπάνιο και την κατάποση αναπτύχθηκε και η θεραπεία με εισπνοές σε ειδικό χώρο όπου γινόταν η συγκέντρωση των πλούσιων σε ραδόνιο αερίων (emanatorium ή inhalatorium). Η πρακτική αυτή των εισπνοών εξακολουθεί και μέχρι τις μέρες μας. Πολλά ορυχεία διαμορφώθηκαν για να δέχονται το κοινό προς θεραπεία, σε μερικά από αυτά με ιδιαίτερη προσέλευση όπως το Badgastain στην Αυστρία υπόγειοι θάλαμοι τροποποιήθηκαν με προσθήκη κλινών και υπηρεσιών φροντίδας για τον λόγο αυτό. Η χρήση των λουτρών έχει μεγάλη διαδρομή στην ιστορία του πολιτισμού των λαών της γης. Ένα μεγάλο μέρος, ίσως το μεγαλύτερο, αυτής της ιστορίας είναι συνάρτηση των ιατρικών μεθόδων θεραπείας από ένα μεγάλο πλήθος ασθενειών. Πέρα όμως από αυτό, γύρω από τα ιαματικά λουτρά αναπτύχθηκαν κατά καιρούς τόποι αναψυχής και χαλάρωσης (Εικόνα 1.1), τόποι που γνώρισαν μεγάλη άνθιση και προσέλκυσαν πλήθος σημαντικών επισκεπτών. Ένα μεγάλο λοιπόν κομμάτι του πολιτισμού της ανθρωπότητας αναπτύχθηκε γύρω από ακμάζουσες λουτροπόλεις.*

*Η ιστορία αυτή άρχισε να εκφυλίζεται περίπου στα μέσα του εικοστού αιώνα με γρήγορο ρυθμό και η αιτία για αυτό ήταν η στροφή του ιατρικού κόσμου προς άλλες μορφές θεραπείας (φαρμακευτικά παρασκευάσματα) αλλά και η μεταστροφή στην φιλοσοφία του τρόπου αναψυχής και του τουρισμού. Η κατάσταση αυτή όπως αμυδρά αρχίζει να φαίνεται τα τελευταία χρόνια, εμφανίζει τάση να ανατραπεί. Από την ιατρική πλευρά υπάρχει μια κατηγορία του ιατρικού κόσμου που παρουσιάζει δημοσιεύσεις για την ιαματική θεραπεία, οι οποίες όμως δεν φαίνεται να πείθουν. Από την οικονομική πλευρά γίνεται προσπάθεια, ώστε οι περιοχές με ιαματικά λουτρά να μπουν στην λογική των εναλλακτικών μορφών τουρισμού. Αυτή η σταδιακή επιστροφή των ανθρώπων αλλά και μέρους του ιατρικού κόσμου σ' αυτά, ήταν το έναυσμα της διερεύνησης του θέματος του ραδονίου στις λουτρικές εγκαταστάσεις. Η επιστημονική προσέγγιση ήταν από την άποψη του ραδονίου, των θυγατρικών του και των επιπτώσεων στην υγεία, αφού αποδεδειγμένα μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κίνδυνο γι' αυτήν.*

*Μια άποψη ωστόσο που επικρατεί στον επιστημονικό κόσμο είναι ότι δεν υπάρχει καλό ή κακό αλλά υπάρχει το πόσο. Υπάρχουν δύο γνωστές ρήσεις που ταιριάζουν απόλυτα με την περίπτωση,*

το «ουδέν κακόν αμιγές καλού» και το «παν μέτρον ἄριστον». Κάπου εκεί θα αναζητηθεί η απάντηση στο θέμα της επικινδυνότητας ή μη του ραδονίου στα ιαματικά και όχι μόνο λουτρά (Βογιάννης, 2005).

Στοιχεία της παλαιολιθικής περιόδου ωστόσο που βρέθηκαν κοντά στις πηγές του Gastein στην Αυστρία δείχνουν ότι ήδη από τα προϊστορικά χρόνια είχαν παρατηρηθεί και αξιοποιηθεί οι θετικές επιδράσεις του ραδονίου (Becker, 2004).

Όπως επίσης είναι γνωστό, το ιταλικό νησί Ischia στην ηφαιστειακή περιοχή γύρω από τη Νάπολη, που ανακαλύφθηκε από τους Έλληνες της Εύβοιας περίπου 2.500 χρόνια πριν, ήταν το πρώτο μέρος όπου οι θερμές πηγές ραδονίου χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και συνέχισαν να χρησιμοποιούνται για θεραπευτικούς σκοπούς έως και τις μέρες μας (Becker, 2004).



**Εικόνα 1.1:** Πήλινες μπανιέρες σε αρχαία λουτρά της Ηφαιστείας στη Λήμνο (Ζαχαρόπουλος κ.α., 2001).

Έχουν ωστόσο γίνει ανα καιρούς διάφορες επιστημονικές αναφορές σε ότι αφορά τις ιαματικές και μεταλλικές πηγές στον γεωγραφικό χώρο της Κρήτης όπως η ακόλουθη του Λέκκα το 1938.

*Ἡ Ἑλλάς κατέχει ἀληθῶς προνομιοῦχον θέσιν μεταξύ των χωρῶν, αἵτινες πλουσίως ἐπροικίσθησαν ὑπὸ τῆς φύσεως ἀπὸ ποικίλης συστάσεως μεταλλικά ἱαματικά ὕδατα. Πρῶτον διότι εἰς τὰ ἐδάφη αὐτῆς ἀναβλύζει μέγας ἀριθμὸς μεταλλικῶν πηγῶν καὶ δεύτερον διότι ὅλοι οἱ τύποι*

καί αἱ κατηγορίαι τῶν μεταλλικῶν ὑδάτων ἀπαντῶσι παρ'αὐτῇ. Ὑδατα θειούχα καὶ ὕδροθειούχα, ἀλκαλικά, σιδηροῦχα, ραδιενεργά καὶ πλουσίως ραδιενεργά, χλωριονατριοῦχα, ἀκρατοθερμαί, ἀλιπηγαί καὶ ὀξυπηγαί, δηλαδή παντός εἶδους μεταλλικά ὕδατα, ἀναπηδῶσιν ἐκ τῶν ἐγκάτων τῆς γῆς τῆς Χώρας ταύτης.

.....

Ἡ Νῆσος Κρήτη δέν φημίζεται διὰ τὰς ἱαματικὰς αὐτῆς πηγὰς. Καί συμβαίνει τοῦτο κυρίως διότι δέν ἔχει θερμάς πηγὰς, δέ αἱ εἰς αὐτὴν ἀναβλύζουσαι πλεῖσται ὅσαι ψυχραὶ μεταλλικαὶ τοιαῦται. Ἡ συγκέντρωσις τῶν στοιχείων καὶ δημοσίευσίς δια τοῦ παρόντος τεύχους τῶν αφορώντων τὰς μεταλλικὰς ἐν Κρήτῃ πηγὰς, ἐξ ὧν προκύπτει ὅτι ἐν τῇ μεγαλονήσῳ εὐρίσκονται 101 μεταλλικαὶ πηγαί, ἐκ τῶν ὁποίων 39 ἐν χρήσει θὰ δώσῃ ἀσφαλλῶς ἀφορμὴν εἰς τὴν μετὰ μείζονος προσοχῆς καὶ ζήλου παρακολούθησιν τοῦ ζητήματος καὶ δὴ τὴν χημικὴν πρωτίστως ἐρευναν τῶν ἐν λόγῳ πηγῶν. Βεβαίως αἱ πλεῖσται τῶν μεταλλικῶν πηγῶν τῆς Κρήτης εἶναι σιδηροῦχοι ἀλατοῦχοι πηγαί καὶ ὥς τοιαῦται χρησιμοποιοῦνται. Ὑπάρχουν ὁμως καὶ πηγαί μέ ὕδατα μεταλλικά ἐντελῶς διαφόρου συστάσεως. Καί ἐάν ἐπιτύχωμεν ἐλάχιστας ἐξ αὐτῶν, ἔστω καὶ δύο-τρεῖς, νὰ ἀναδείξωμεν ἐν Κρήτῃ, θὰ ἔχωμεν ἐπιτύχει κάτι πολλοῦ λόγου ἄξιον (Λέκκας, 1938).

Ἐχει περάσει σχεδόν ἓνας αἰώνας ἀπο τότε καὶ δὲν ἔχουν ἀκόμα πραγματοποιηθεῖ μεγάλες προσπάθειες καὶ οἱ κατάλληλες κινήσεις ποὺ περιλαμβάνουν ἀναλύσεις, καὶ μελέτη τῶν πηγῶν τῆς Κρήτης ὡς πρὸς τὰ στοιχεῖα ποὺ θὰ τις χαρακτηρίσουν ἱαματικές. Ἡ μεταπολεμικὴ περίοδος ἐστρεψε τὴν προσοχὴ καὶ τὸ ενδιαφέρον τῶν περιφερειακῶν ἀρχῶν στὴν εξασφάλιση νεροῦ με σκοπὸ τὴν ὕδρευση-ἀρδευση καθὼς καὶ τὴν κάλυψη τῶν αυξανόμενων ἀναγκῶν σαν ἀποτέλεσμα τῆς ἀνόδου τοῦ τουρισμοῦ στο νησί.

## **1.2 Ραδιενεργὰ προϊόντα στο ἐμπόριο τῆς δεκαετίας τοῦ 1920 καὶ 1930**

Σε ἱατρικὲς ἐφαρμογές στο παρελθόν, ἦταν σύνηθες τὸ γεγονός τῆς χορήγησης φαρμάκων με ικανοποιητικὴ περιεκτικότητα σε ράδιο (μητρικὸ τοῦ ραδονίου). Αὐτές οἱ σειρές φαρμάκων, χρησιμοποιοῦνταν γιὰ ἓνα εὐρὺ φάσμα ἀσθενειῶν, ὅπως παραδείγματος χάρι γιὰ τὴν ἀπώλεια μαλλιών, τὴν ἀνικανότητα, τὴν ἀρτηριοσκλήρωση, τὴν ὑψηλὴ ἀρτηριακὴ πίεση, τὸν ρευματισμὸ, τὴν οὐρική ἀρθρίτιδα, τὴν ἰσχιαλγία, τὴν νεφρίτιδα καὶ τὴν ἀναιμία. Αὐτὸ εἶχε σαν ἀποτέλεσμα, τὴν ἐκτὸς ὁρίων καὶ ἀλόγιστη χρῆση προϊόντων με βάση τὸ ράδιο, τῶν παραγῶγων τοῦ καὶ γενικά τῆς ραδιενέργειας, στὴν δεκαετία τοῦ 1920 καὶ 1930. Συμπεριλαμβανόταν σε μία

μεγάλη ποικιλία εμπορικών προϊόντων όπως, μάλλινο ρουχισμό για μωρά, σοκολάτες, σόδα, διεγερτικά φάρμακα ανδρών, ενδύματα, προφυλακτικά, οδοντόκρεμες, υπόθετα, τσιγάρα, προϊόντα καθαρισμού, βερνίκια παπουτσιών, λιπάσματα, φωτεινά χρώματα και καλλυντικά. Όλες λοιπόν αυτές οι εμπορικές εφαρμογές του ραδίου βασιζόταν στην εκπομπή ραδιενέργειας, που θεωρούταν πως ήταν ζωτικής σημασίας και ευεργετική για την ανθρώπινη υγεία.

Η χρήση του ραδίου, των θυγατρικών του και γενικά της ραδιενέργειας σε καλλυντικά σκευάσματα και προϊόντα ομορφιάς, ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Γαλλία λόγω της ενασχόλησης της Marie και Pierre Curie σε επιστημονικό επίπεδο. Ήταν επίσης διαδεδομένη και στην Αγγλία, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για την Αμερική. Μερικά παραδείγματα εταιρειών με καλλυντικά και προϊόντα ομορφιάς που βασίστηκαν στα ραδιενεργά στοιχεία ήταν: Η Radior της οποίας οι πωλήσεις ξεκίνησαν από το Λονδίνο, το 1917, με μία πληθώρα από μάσκες περιποίησης και καλλυντικά (Εικόνα 1.2). Η Tho-Radia, η οποία είχε την έδρα της στο Παρίσι, το 1933, και ιδρύθηκε από τους Alexis Moussali και dr. Alfred Curie. Η Tho-Radia εμπορευόταν ένα σύνολο καλλυντικών, με βάση ραδιενεργά στοιχεία όπως το ράδιο και το θόριο και λόγω του ονόματος του δεύτερου συνιδρυτή, Alfred Curie που παρουσίαζε συνωνυμία με την οικογένεια Curie, ήταν πρώτη σε πωλήσεις (Εικόνα 1.2). Σημαντική επίσης εταιρεία ομορφιάς ήταν η Artes η οποία έλαβε χώρα το 1933 στο Λονδίνο και η οποία επίσης δημιούργησε μία κρέμα ομορφιάς με βάση της το ράδιο (Εικόνα 1.2). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι, το 1920 ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη η χρήση μίας ραδιενεργής λάσπης (ηφαιστειακή λάσπη με υψηλή συγκέντρωση ραδιενεργών στοιχείων) η οποία λεγόταν ότι είχε προέλευση από τα Καρπάθια Όρη και χρησιμοποιούταν σε διάφορες δερματικές θεραπείες όπως αυτή της Kemolite (Εικόνα 1.2) [2].



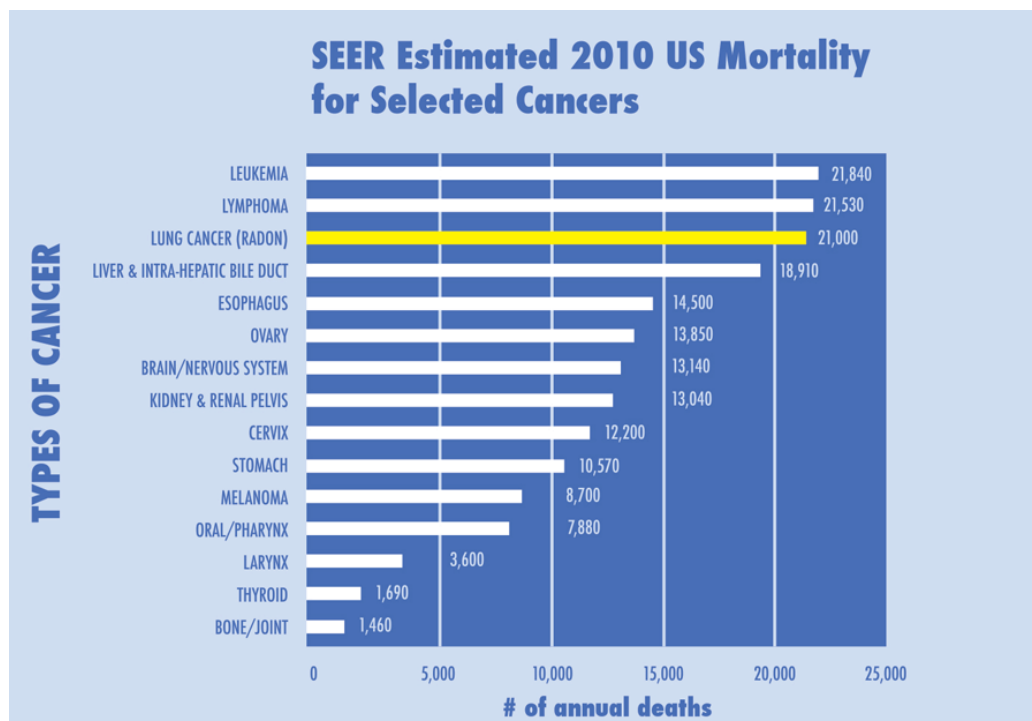
**Εικόνα 1.2:** Ενδεικτική διαφήμιση της εταιρείας ομορφιάς Radior, Tho-Radia, της ραδιούχας κρέμας Artes καθώς και της Λασποθεραπείας Kemolite [2].

### 1.3 Γενικές πληροφορίες για την ραδιενέργεια

Η έκθεση του ανθρώπου στην φυσική ραδιενέργεια που εκπέμπουν τα ραδιενεργά στοιχεία του στερεού φλοιού της γης, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό οφείλεται στην έκθεση στο ισότοπο του ραδονίου  $^{222}\text{Rn}$ . Περίπου η μισή ετήσια δόση από την φυσική ραδιενέργεια που δέχεται ο άνθρωπος οφείλεται στην έκθεση σε  $^{222}\text{Rn}$ , σύμφωνα με τα στοιχεία της United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR, 1993, [11]). Το ραδόνιο

εισέρχεται συχνά στους κλειστούς χώρους και εγκλωβίζεται σ' αυτούς, αποτελώντας έτσι, (αυτό και τα μικρής ημιζωής θυγατρικά του, 218-πολώνιο ( $^{218}\text{Po}$ ), 214-μόλυβδος ( $^{214}\text{Pb}$ ) και 214-βισμούθιο ( $^{214}\text{Bi}$ ) σοβαρό κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου.

Έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί βασική αιτία εμφάνισης καρκίνου στην αναπνευστική οδό, με σημαντικότερη μορφή αυτής του καρκίνου των πνευμόνων. **Στις ΗΠΑ με μέσο όρο συγκέντρωσης ραδονίου στα σπίτια  $40\text{Bq/m}^3$**  εκτιμάται ότι η συνολική επικινδυνότητα κατά την διάρκεια της ζωής είναι περίπου 0,3-0,4%, δηλαδή **προκαλούνται περίπου 70.500 καρκίνοι των πνευμόνων ετησίως σε 235 εκατομμύρια πληθυσμού**, Σχήμα 1.3. Επιπλέον, οι απότομες μεταβολές στην συγκέντρωση του ραδονίου σε μία πηγή έχουν σαν συνέπεια τα ποσοστά της άμεσης έκθεσης που δέχονται οι χρήστες στις λουτρικές εγκαταστάσεις να είναι υψηλά (Βογιάννης, 2005).



**Σχήμα 1.3:** Διάγραμμα με στατιστική ανάλυση της συχνότητας εμφάνισης διαφόρων ειδών καρκίνου στην Αμερική το 2010, με κίτρινο χρώμα τονίζεται ο καρκίνος λόγω έκθεσης σε ραδόνιο [3].

Πιο συγκεκριμένα με τον όρο φυσική ραδιενέργεια εννοούμε την ιοντίζουσα ακτινοβολία από πηγές που προϋπάρχουν στη φύση ή δημιουργούνται με φυσικό τρόπο σε αντίθεση με την

ραδιενέργεια που εκλύεται από ανθρώπινες δραστηριότητες. **Η φυσική ραδιενέργεια κατατάσσεται σε δύο κύριες κατηγορίες:**

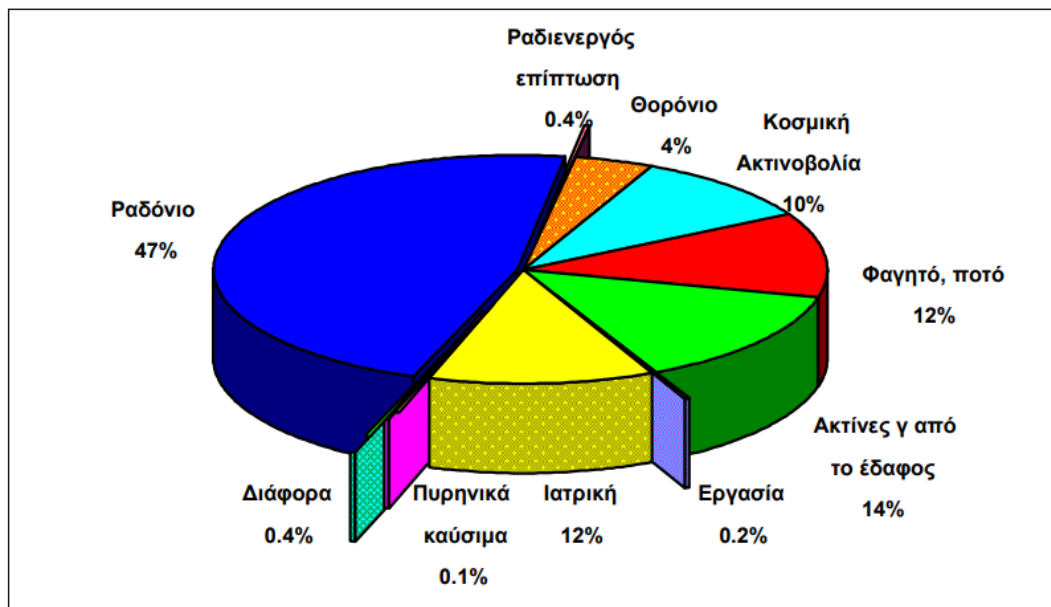
- 1. Την κοσμική ακτινοβολία, που αποτελείται από το σύνολο της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται στη γη από τις διάφορες κοσμικές διεργασίες.**
- 2. Την γήινη ακτινοβολία που αποτελείται από το σύνολο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν ή δημιουργούνται στον φλοιό της γης (Βογιάννης, 2005).**

Ωστόσο συχνά παρατηρούνται ανεβασμένες τιμές ραδιενέργειας όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 1.4:

- Σε δομικά υλικά με υψηλό ποσοστό ραδιενεργών υλικών (π.χ. διάφορα κεραμικά πλακάκια, πάγκοι γρανίτη, τούβλα, τσιμέντο, ελαφρόπετρα, πέτρες από ηφαιστειακή τέφρα, φωσφογύψος κ.α.)
- Σε φαγητό με ραδιενεργά κατάλοιπα (π.χ. λαχανικά, γάλα, κρέας και ψάρια που προέρχονται από τις πληγείσες από τη ραδιενέργεια περιοχές στην Ιαπωνία και τις γειτονικές περιοχές - οτιδήποτε έχει παραχθεί μετά τις 12 Μαρτίου 2011).
- Σε ρολόγια που φωσφορίζουν, κεραμικά σκεύη, πυραυλικοί ιονισμοί κ.α.
- Στις κουζίνες που λειτουργούν με φυσικό αέριο
- Σε νερό από πηγάδια
- Κοντά σε πυρηνικά εργοστάσια και αντιδραστήρες, ιδιαίτερα μετά από κάποιο πυρηνικό ατύχημα (για το οποίο ενδεχομένως να μην ενημερωθεί το κοινό – ή να ενημερωθεί πολύ καθυστερημένα όπως έγινε με το ατύχημα του Τσέρνομπιλ).
- Σε απόβλητα βιομηχανιών, νοσοκομείων (εφαρμογές πυρηνικής ιατρικής) κ.α.
- Σε περιοχές με πολύ ψηλό υψόμετρο (υψηλότερα επίπεδα κοσμικών ακτινοβολιών)
- Σε περιοχές με υψηλότερα ποσοστά ραδονίου, θορίου, ουρανίου κ.α. στο υπέδαφος (στην Ελλάδα: Καμμένα Βούρλα, Ικαρία, Νεράιδα Θεσπρωτίας, Καβάλα, Δοξάτο Δράμας, Μύκονος, κ.α.)
- Σε σπήλαια, ιαματικές πηγές και ορυχεία



- Σε ακτινοδιαγνωστικά εργαστήρια
- Σε εργοστάσια τσιμέντου, αλουμίνας και φωσφορικών λιπασμάτων, σε γεωτρήσεις πετρελαίου και σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση λιγνίτη κ.α.
- Στα αεροπλάνα κατά τη διάρκεια των πτήσεων. (Καλλίνη και Γεωργίου, 2015)



**Σχήμα 1.4:** Στατιστική Ανάλυση Εκπομπών Ραδιενέργειας (Καλλίνη και Γεωργίου, 2015).

#### 1.4 Γενικές πληροφορίες για το ραδόνιο και την ανακάλυψη του

Η ανακάλυψη του ραδονίου έγινε το 1900 από τον Γερμανό φυσικό Friedrich Ernst Dorn. Αποτελεί το τρίτο κατά σειρά ραδιενεργό στοιχείο που βρέθηκε μετά το ράδιο και το πολώνιο. Αρχικά ονομάστηκε «**θυγατρικό ραδίου**» (radium emanation) καθώς προερχόταν από διάφορα υλικά που περιείχαν ράδιο, ενώ, το **1923 δόθηκε το τελικό του όνομα «ραδόνιο»**. Το 1908 οι Ramsay και Gray απομόνωσαν το ραδόνιο και προσδιόρισαν την πυκνότητα του διαπιστώνοντας έτσι ότι είναι το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια, όπως φαίνεται στον περιοδικό πίνακα της σχήμα 1.5 (Τσουκαλά, 2013).

Periodic Table of the Elements																	
1	2															10	
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198
199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216
217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234
235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288
289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306
307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324
325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360
361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378
379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396
397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414
415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432
433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450
451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468
469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486
487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504
505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522
523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558
559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576
577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594
595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612
613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648
649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666
667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684
685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702
703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720
721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738
739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756
757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774
775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792
793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810
811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828
829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846
847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864
865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882
883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900
901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918
919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936
937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954
955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972
973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990
991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008
1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026
1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044
1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062
1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080
1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098
1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116
1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134
1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152
1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170
1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188
1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206
1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224
1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242
1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260
1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278
1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296
1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314
1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332
1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350
1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368
1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386
1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404
1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	

Η ενέργεια που μεταφέρεται από τους θυγατρικούς πυρήνες είναι υπεύθυνη για τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Το πιο σταθερό ισότοπο του είναι το  $^{222}\text{Rn}$  με χρόνο ημίσειας ζωής 3,82 ημέρες, ατομικό αριθμό 86 και ατομικό βάρος 222. Η ηλεκτρονιακή του δομή είναι:  $1s^2 2s^2 2p^6 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$  (Βογιάννης, 2005; Τσκουκαλα, 2013; Otton, 1992; Wilkening, 1990; Nazaroff and Nero, 1988).

**Πίνακας 1.1:** Φυσικές ιδιότητες του ραδονίου (Οικονομόπουλος, 2008).

Πυκνότητα (1atm και 0 °C)	9,73 g L <sup>-1</sup>
Σημείο ζέσεως (1atm)	-62 °C
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα	0,1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Συντελεστής διάχυσης στο νερό	10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Ιξώδες (1atm και 20 °C)	0,229 poise
Διαλυτότητα στο νερό (1atm και 20 °C)	230 cm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
Διαλυτότητα στη γλυκερίνη (1atm και 18 °C)	0,2 cm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
Διαλυτότητα στην αιθυλική αλκοόλη (1atm και 18 °C)	7,4 cm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>

### 1.5 Ραδιενεργή αποσύνθεση-ραδιενεργά στοιχεία

Η ραδιενεργή αποσύνθεση είναι μία φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα άτομο αποσυντίθεται-διασπάται και σχηματίζει ένα άλλο στοιχείο, χάνοντας τα ατομικά του σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια και ηλεκτρόνια ). Όταν ένα ραδιούχο στερεό διασπάται για να σχηματίσει αέριο ραδονίου χάνει δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Αυτά τα δύο νετρόνια και πρωτόνια ονομάζονται «σωματίδια-α», τα οποία θεωρούνται ένα είδος ακτινοβολίας. **Επιπλέον, πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι τα στοιχεία που παράγουν ακτινοβολία ονομάζονται**

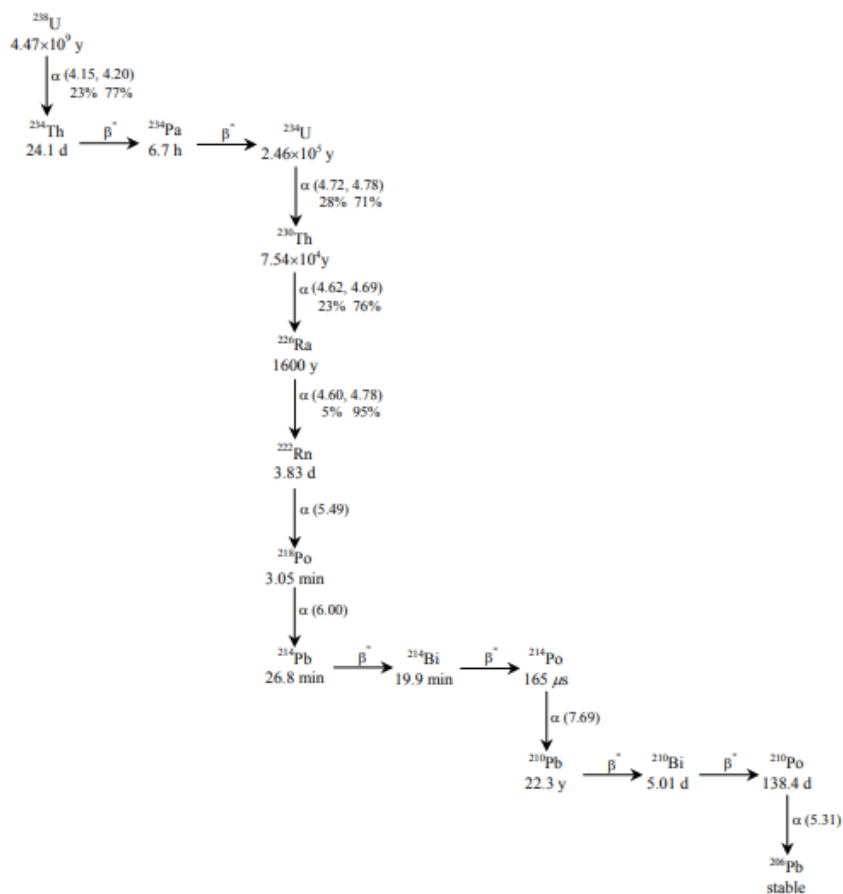
**ραδιενεργά**, με το ίδιο το ραδόνιο να είναι ραδιενεργό, καθώς διασπάται χάνοντας το α-σωματίδιο και σχηματίζει το πολώνιο, το βισμούθιο και τον μόλυβδο. **Επιπρόσθετα, στοιχεία που είναι από τη φύση τους ραδιενεργά είναι τα U, Th, C, K, Rn, Ra.** Το ουράνιο όπως ήδη αναφέρθηκε είναι πρώτο σε μία σειρά αποσύνθεσης που παράγει ράδιο και ραδόνιο.

### **1.6 Ραδιενεργή σειρά – ουρανίου-ραδίου-ραδονίου**

Στην γήινη ακτινοβολία ανήκουν τα μέλη των τριών ραδιενεργών σειρών, του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ), του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) και του ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ). Τα τελευταία χρόνια μέσα απο εργαστηριακές μεθόδους προέκυψε ένας μεγάλος αριθμός νέων ραδιενεργών ισότοπων, τα οποία περιλαμβάνουν, το καίσιο ( $^{137}\text{Cs}$ ), το στρόντιο ( $^{90}\text{Sr}$ ) και το ιώδιο ( $^{131}\text{I}$ ). Ένα από τα μέλη της ραδιενεργούς σειράς του ουρανίου (το ουράνιο είναι πρωτογενές ραδιονουκλίδιο με χρόνο ημιζωής  $4,5 \times 10^9$  χρόνια) είναι και το  $^{222}\text{Rn}$ . Το ραδόνιο παράγεται με την α-διάσπαση του ασταθούς ισότοπου  $^{226}\text{Ra}$  και δίνει ένα σύνολο ισότοπων, τα οποία και αυτά με την σειρά τους είναι θυγατρικά του ραδίου. Και τα δύο ( $^{226}\text{Ra}$  και  $^{222}\text{Rn}$ ) αποτελούν μέλη της σειράς του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) που συναντάται στη Γη με τη μορφή ουρανίτη ( $\text{UO}_2$ ) και ( $\text{U}_2\text{O}_5 \cdot \text{UO}_3$ ) “pitchblende” (ή αλλιώς ουρανινίτη) καθώς και με την μορφή δευτερογενών ορυκτών, τα οποία σχηματίστηκαν σαν αποτέλεσμα της εξαλλοίωσης και ανακατανομής από το υπόγειο νερό (σύμπλοκα οξειδίων του ουρανίου με άλλα στοιχεία όπως Pb, Th, Cu, Ca, P). Η συγκέντρωση του ουρανίου διαφέρει ανάλογα την τοποθεσία. Η μέγιστη συγκέντρωση του παρατηρείται σε κοιτάσματα φυσικού ουρανίου (όπου το  $\text{UO}_2$  είναι περίπου 0,1-0,5% της μάζας του ορυκτού που το φιλοξενεί). Στην Εικόνα 1.6 απεικονίζονται δείγματα ορυκτού ραδίου και ουρανίου. Η σειρά διάσπασης του καθώς και η διάσπαση των θυγατρικών του ολοκληρώνεται με το σχηματισμό σταθερού μόλυβδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Πιο απλά το ουράνιο είναι πρώτο σε μία σειρά αποσύνθεσης που παράγει ράδιο και ραδόνιο. Έτσι λοιπόν το ουράνιο καθίσταται ως το μητρικό στοιχείο, ενώ το ράδιο και το ραδόνιο είναι τα θυγατρικά του, και ακολουθούν με την σειρά τους, όπως αναφέρεται πιο πάνω τα θυγατρικά του ραδονίου που είναι το πολώνιο, το βισμούθιο, και ο μόλυβδος.



**Σχήμα 1.6:** Στην αριστερή εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα ουρανινίτη, δεξιά ορυκτό ράδιο [13], [14].



**Σχήμα 1.7:** Ραδιενεργή σειρά αποσύνθεσης ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ), οι χρόνοι ημιζωής του κάθε ραδιονουκλιδίου και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία (Fleischer, 1997).

## 1.7 Που απαντάται το ραδόνιο ως θυγατρικό του ραδίου και ουρανίου

Η μέση συγκέντρωση  $^{222}\text{Rn}$  στο έδαφος κυμαίνεται μεταξύ 10 και 50  $\text{Bq kg}^{-1}$ . Μπορεί να φθάσει ως και αρκετές εκατοντάδες  $\text{Bq kg}^{-1}$ , με μέση συγκέντρωση σε παγκόσμιο επίπεδο να είναι 40  $\text{Bq kg}^{-1}$  (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (UNSCEAR, 1993, 2008). Εδάφη που είναι δυνατόν, λόγω μεγάλων συγκεντρώσεων του ραδίου, να παράγουν πολύ ραδόνιο είναι τα πυριγενή πετρώματα τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

**α) Όξινα πυριγενή πετρώματα, όπως γρανίτες.**

**β) Βασικά πετρώματα, όπως βασάλτες**

Επίσης παρατηρείται υψηλή παραγωγή ραδονίου και σε **λιγνιτικά κοιτάσματα**, που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου. Εν συνεχεία, η σύσταση του αρχικού υλικού πριν την μεταμόρφωση, επηρεάζει την περιεκτικότητα σε ουράνιο. Για παράδειγμα, οι μεταμορφωμένοι γρανίτες έχουν διαφορετική περιεκτικότητα από τους μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους (μάρμαρα). Υψηλότερες βαθμίδες μεταμορφισμού μπορεί να εμφανισθούν μαζί με απολιθωμένα γεωθερμικά ρευστά που μπορεί να έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο. Το ραδόνιο που περιέχεται στα υπόγεια νερά σε υδροφορείς που αποτελούνται από ολοκρυσταλλικά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα είναι γενικά υψηλότερο από αυτό σε άλλους τύπους υδροφόρων στρωμάτων και γενικότερα τα όξινα πυριγενή πετρώματα όπως οι γρανίτες έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ουρανίου της τάξης των 5ppm, ενώ **πετρώματα όπως οι συηνίτητες, οι πηγματίτες και τα όξινα ηφαιστειακά πετρώματα και οι όξινοι γνεύσιοι περιέχουν επίσης μεγάλες συγκεντρώσεις** (Βογιάννης, 2005; Τσουκαλά, 2013; Νικολόπουλος; Γιαννακόπουλος; Κόττου, 2015).

Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι, **αν το ουράνιο βρίσκεται στο κρυσταλλικό πλέγμα πετρογενετικών ορυκτών (άστριος-μαγνητίτης-απατίτης), η έκλυση του ραδονίου από το πέτρωμα είναι σχετικά χαμηλή**. Εάν από την άλλη, **στα πετρώματα υπάρχουν τα μεταλλικά ορυκτά του ουρανίου (ουρανίτης-ουρανορθίτης-κοφενίτης) τότε η έκλυση του είναι αρκετά μεγαλύτερη** (Οικονομόπουλος, 2008).

Συμπληρωματικά των παραπάνω, *είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσει κανένας για την εμφάνιση του ραδονίου ότι το ουράνιο και το θόριο, τα προϊόντα της διάσπασής των, καθώς και το ισότοπο*

του καλίου  $^{40}\text{K}$  χαρακτηρίζονται ως «λιθόφιλα», άρα βρίσκονται μαζί σε μάγματα πλούσια σε πυρίτιο. Τα μάγματα αυτά σχηματίζουν γρανίτες και συηνίτες. Βρίσκονται σε ηφαιστειακά πετρώματα ή σε πετρώματα που σχηματίζονται από ρηχές μαγματικές εκροές, που συνοδεύονται από γρανίτες και συηνίτες, όπως για παράδειγμα τα ηφαιστειακά (ρυόλιθοι) ή τα φλεβικά (πηγματίτες και απλίτες) (Chiozzi et al., 1998 & 2001). Το ουράνιο και το θόριο κατά την διάρκεια γεωλογικών διεργασιών, όπως η μεταμόρφωση, μπορούν να μεταφερθούν με τα γεωθερμικά ρευστά και να αποτεθούν στα διάκενα άλλων διαπερατών σχηματισμών (Βογιάννης 2008).

### 1.8 Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες κατά την διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων

Το φαινόμενο της ραδιενέργειας (ραδιενεργός διάσπαση) περιγράφηκε ως η τυχαία αλλαγή του μητρικού πυρήνα ενός ατόμου που έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή και σωματιδίων μάζας ή αλλιώς η χαρακτηριστική ιδιότητα των ασταθών πυρήνων να αποβάλλουν μάζα και ενέργεια (Δασενάκης κ.α, 2015).

**Ακτινοβολία α:** Εδώ ο ραδιενεργός πυρήνας με την διάσπαση του εκπέμπει ένα σωματίδιο α (πυρήνα ηλίου  $^4_2\text{He}$ ). Τα σωματίδια α είναι επικίνδυνα κυρίως όταν γίνεται κατάποση τους μέσω του φαγητού ή εισπνοή τους μέσω του αέρα (ραδόνιο). Μπορούν εύκολα να θωρακιστούν ακόμη και με ένα κομμάτι χαρτί (Σχήμα 1.8).

**Ακτινοβολία β:** Οφείλεται σε ένα ηλεκτρόνιο που εκπέμπει ο πυρήνας κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο (εκπομπή σωματιδίου β-) ή εκπομπή ηλεκτρονίου κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο (εκπομπή σωματιδίου β+). Τα σωματίδια β είναι επικίνδυνα κυρίως όταν γίνεται κατάποση τους μέσω του φαγητού ή εισπνοή τους μέσω του αέρα. Μπορούν να θωρακιστούν με κάποιο λεπτό φύλλο μετάλλου (π.χ. αλουμίνιο) (Σχήμα 1.8).

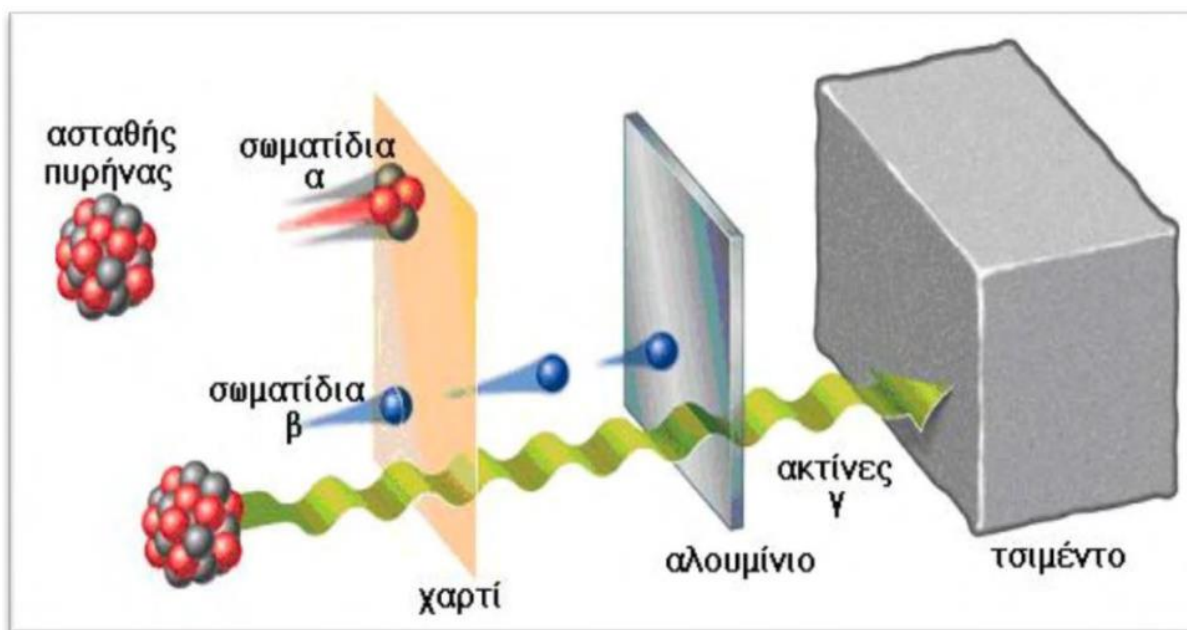
**Ακτινοβολία γ:** Πρόκειται για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που πηγάζει από τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών (περίπου 0,1-10 MeV). Η ακτινοβολία γ, Χ έχει μεγάλη διεισδυτικότητα και μπορεί να ταξιδέψει



αρκετά μέτρα στον αέρα. Θωρακίζεται δύσκολα με συγκεκριμένο πάχος τσιμέντου, μόλυβου, χάλυβα κ.α (Σχήμα 1.8).

**Απορροφούμενη δόση:** Είναι η ενέργεια που εναποθέτει οποιαδήποτε ραδιενεργή ακτινοβολία συμπεριλαμβανομένης της  $\gamma$  και  $X$  σε οποιαδήποτε υλικό. Η μονάδα της απορροφούμενης δόσης ορίζεται στο διεθνές σύστημα το Gray (Gy), ισχύει  $1\text{Gy}=1\text{ Joule/kg}$ .

**Ισοδύναμη ή βιολογική δόση:** Καλείται το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης με το συντελεστή ποιότητας  $Q$ , ο οποίος επιλέγεται ανάλογα την περίπτωση από ένα πίνακα με διάφορα είδη ακτινοβολίας που καθορίζουν την επιλογή του. Μονάδα της ισοδύναμης δόσης στο διεθνές σύστημα είναι το Sievert (Sv), ισχύει ότι η Ισοδύναμη δόση (Sv)=απορροφούμενη δόση (Gy)\* $Q$ . (Κασινάλης, 2008).



**Σχημα 1.8:** Διεισδυτικότητα των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας (Υπ. Εργασίας, Κοιν. Ασφαλίσεων, 2009).

### 1.9 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου

Πρέπει να ορισθούν οι μονάδες μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου ώστε να γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα και γενικότερα η τάξη μεγέθους της συγκέντρωσης του.



Μονάδα μέτρησης της ενεργότητας των ραδιενεργών πυρήνων είναι το Becquerel (Bq). Πήρε το όνομά του από τον Γάλλο επιστήμονα **Henri A. Becquerel** (Εικόνα 1.11), ο οποίος ανακάλυψε το φαινόμενο της ραδιενέργειας **το 1896** Henri Becquerel πιο συγκεκριμένα **ανακάλυψε τυχαία πως κρύσταλλοι φωσφορικών αλάτων ουρανίου μαυρίζουν τις φωτογραφικές πλάκες**. Το φαινόμενο θεωρήθηκε πρωτότυπο καθώς οι πλάκες ήταν πολύ καλά καλυμμένες ώστε να μην έρχονται σε επαφή με φως. Χωρίς την ύπαρξη εξωτερικών αιτιών για να το προκαλέσουν, το φαινόμενο χαρακτηρίστηκε σαν αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας οφειλόμενη στο ουράνιο (Δασενάκης, Καραβόλτσος, Λαδάκης, Παρασκευοπούλου, 2015). **Η σημασία που έχει «1 Bq» είναι ότι λαμβάνει χώρα μία πυρηνική διάσπαση (ή μετασχηματισμός) ανά δευτερόλεπτο.**

Παλαιότερα μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας ήταν τα **Ci (κιουρί)**, και συγκεκριμένα με υποπολλαπλάσια τα  $\mu\text{Ci}$  και  $\text{pCi}$ . Αυτή η μονάδα μέτρησης πήρε το όνομα της **από τη Φυσικό Marie Curie** (Εικόνα 1.9), η οποία ήταν η πρωτοπόρος στην έρευνα πάνω σε ραδιενεργά στοιχεία και στις διασπάσεις τους. Κατά την διαδικασία εξαγωγής ουρανίου από ραδιενεργό μετάλλευμα (πισσουρανίτη), ανακάλυψαν δύο άλλα στοιχεία που ονομάστηκαν Πολώνιο και Ράδιο και χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά τον όρο ραδιενέργεια. Χαρακτηριστικά,  **$1\text{pCi}$  ισούται με τη διάσπαση 0,037 ραδιενεργών ατόμων ανά λεπτό** (Τσουκαλά, 2013; Δασενάκης, Καραβόλτσος, Λαδάκης, Παρασκευοπούλου, 2015).

Επιπλέον, η πρώτη δημοσίευση για το ραδόνιο σε επιτραπέζιο-μεταλλικό νερό, πραγματοποιήθηκε σε δύο εκθέσεις του Mache σχετικά με τις θερμές πηγές του Gastein της Αυστρίας το 1904. Ο **Mache εισήγαγε επίσης την πρώτη μονάδα ενεργότητας ραδονίου** (Mache-Einheit, ME) και χρησιμοποιήθηκε ως επί το πλείστον από την Γερμανική/Αυστριακή λογοτεχνία, ενώ οι αγγλοφωνικές χώρες προτιμούσαν ως μονάδες μέτρησης τα «Curie» που είχαν καθιερωθεί από το 1910 (Becker, 2004).

Η ραδιενέργεια στο νερό μετράται σε  $\text{Bq/L}$  ή  $\text{Bq/m}^3$  ενώ στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν μονάδες Mache που συχνά συμβολίζονταν και ως ME.

$1 \text{ ME} = 3,64 \text{ Eman} = 3,64 \times 10^{-10} \text{ Ci/L} = 13,45 \text{ Bq/L}$  (ή  $1000 \times 13,45 = 13.450 \text{ Bq/m}^3$ ) [5].



Εικόνα 1.9: Αριστερά της εικόνας είναι ο Henri A. Becquerel (1896), ενώ δεξιά είναι η Marie Curie (1898) [6].

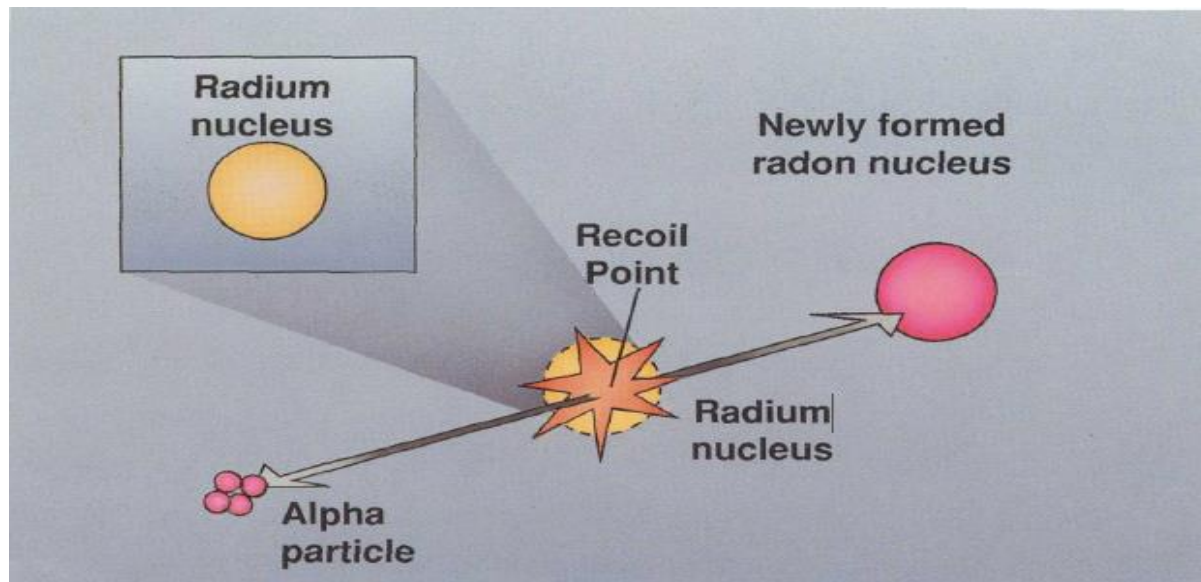
### 1.10 Σχηματισμός-διαφυγή και εκροή ραδονίου

Το ραδόνιο όπως προαναφέρθηκε ανήκει στην ραδιενεργή σειρά του ουρανίου πράγμα το οποίο εξηγεί το λόγο παρουσίας του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) σε κόκκους διαφόρων πετρωμάτων και εδαφών που περιέχουν ουράνιο, καθώς, ενώ το ουράνιο και το ράδιο είναι στερεά και εγκλωβίζονται, το ραδόνιο όντας αέριο, έχει και την δυνατότητα να διαφεύγει.

Η ικανότητα σχηματισμού ραδονίου σε πετρώματα και εδάφη καθορίζεται συχνά από την περιεκτικότητα των κόκκων σε ράδιο, η οποία ταυτίζεται με την «**ειδική ενεργότητα**» (specific activity) του συγκεκριμένου εδάφους. Ωστόσο η περιεκτικότητα του εδάφους δεν είναι ο μόνος καθοριστικός παράγοντας, καθώς ένα μικρό μόνο ποσοστό από το ραδόνιο που παράγεται στους κόκκους διαφεύγει και εισέρχεται στους πόρους του. Το ποσοστό αυτό καλείται **συντελεστής εκροής** (emanation coefficient) ή **ποσοστό εκροής** (emanation fraction). (Nazzaroff et al. 1988).

Κάθε άτομο ραδίου (Ra) διασπά από τον πυρήνα του ένα άλφα σωματίδιο το οποίο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Όπως το α-σωματίδιο διασπάται, το νεοσύστατο άτομο ραδονίου επανέρχεται–ανακρούει με αντίθετη κατεύθυνση, όπως ακριβώς ένα όπλο υψηλής ισχύος που ανακρούει όταν πατηθεί η σκανδάλη. Με την διάσπαση αυτή δηλαδή το άτομο του ραδονίου ανακρούεται κατά την απαίτηση της αρχής διατήρησης της ορμής (η ανάκρουση μετακινεί το άτομο του ραδονίου από την θέση του στο μεταλλικό πλέγμα ή στον ορυκτό κόκκο

με κανονική πυκνότητα σε αποστάσεις 0,02-0,07 $\mu$ m, όταν γίνεται στο νερό η μέση διαδρομή είναι 0,1  $\mu$ m ενώ στον αέρα 63 pm). Η ανάκρουση αυτή είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την απελευθέρωση του ραδονίου από τους κόκκους ορυκτών (Σχήμα 1.10).



**Σχήμα 1.10:** Αναπαράσταση διάσπασης ραδίου, παραγωγής α-σωματιδίου και νεοσύστατου ατόμου ραδονίου, (Otton, 1992)

Η θέση του ραδίου (Ra) στο κοκκώδες ορυκτό, δηλαδή το κατά πόσο βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του κόκκου, και η κατεύθυνση ανάκρουσης του Rn, αν δηλαδή έχει κατεύθυνση προς την επιφάνεια ή προς το εσωτερικό του κόκκου, καθορίζει, αν ένα νεοσύστατο άτομο Rn εισέρθει στον «χώρο» του πορώδους (pore space) μέσα στα διάφορα πετρώματα. Αν ένα άτομο ραδίου (Ra) είναι βαθιά μέσα σε ένα μεγάλο κόκκο τότε ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ανάκρουσης δεν θα απελευθερώσει ραδόνιο (Rn), ενώ το ράδιο (Ra) θα παραμείνει ενσωματωμένο στο ορυκτό. Ακόμα και όταν το άτομο του ραδίου, είναι κοντά στην επιφάνεια του κόκκου, η ανάκρουση θα στείλει το νεοσύστατο άτομο του ραδονίου βαθύτερα στο ορυκτό, εάν η κατεύθυνση της ανάκρουσης είναι προς τον πυρήνα του κόκκου. Ωστόσο συχνά η κατεύθυνση της ανάκρουσης ορισμένων ατόμων ραδονίου «επιτρέπει» (στο ραδόνιο) να εγκαταλείψει το ορυκτό και να εισέρθει στον χώρο του πορώδους ανάμεσα στους κόκκους των ορυκτών. **Για τα περισσότερα εδάφη μόνο το 10-50 % του Rn που παράγεται στους κόκκους των ορυκτών καταφέρει να περάσει στο πορώδες. Με βάση την κινητική ενέργεια και το υλικό του κόκκου, ο παραπάνω πυρήνας έχει τρεις δυνατότητες:**

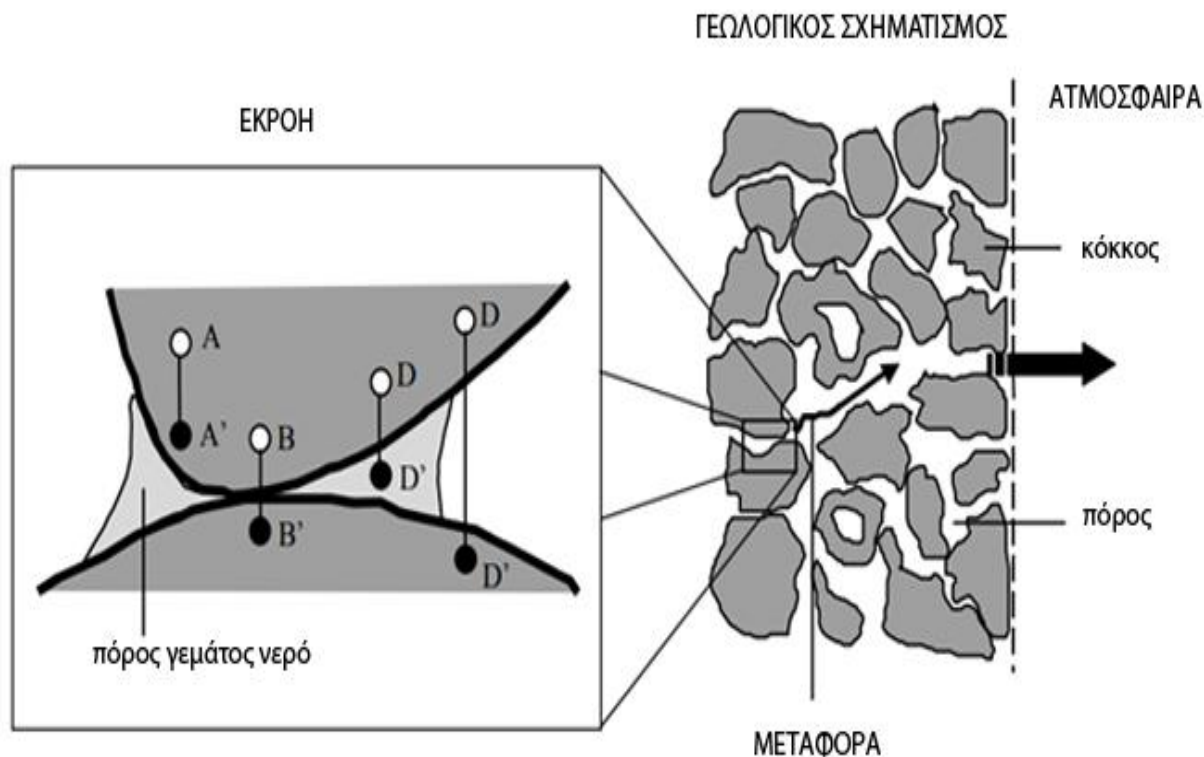
*α) Να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε και να περάσει στο ρευστό του εδαφικού πορώδους (pore space) τελειώνοντας τη διαδρομή του σε αυτό.*

*β) Να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε και να περάσει σε συνορεύοντα-γειτονικό κόκκο τελειώνοντας την διαδρομή του σε αυτόν, μη περνώντας από πορώδη χώρο και*

*γ) Να τελειώσει τη διαδρομή του μέσα στον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε.*

*Τονίζεται ωστόσο ότι η κινητική ενέργεια που αποκτά ο ανακρουόμενος πυρήνας ραδονίου είναι αρκετά μικρή, ώστε να είναι δυνατό να τελειώσει τη διαδρομή του σε κάποιον κόκκο ή σε κάποιο εδαφικό πόρο, έχοντας όμως περάσει εν τω μεταξύ ανάμεσα από δύο ή περισσότερους συνορεύοντες ή μη κόκκους.*

*Σύμφωνα με το σχήμα 1.11, μόνο κατά την περίπτωση C, το σχηματιζόμενο ραδόνιο τερματίζει την κίνηση του εντός ενός πόρου και εν συνεχεία διαχέεται προς το περιβάλλον. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, όπου το ραδόνιο βρίσκεται εντός ενός κόκκου, λόγω της πολύ μικρής ικανότητας του να διαχέεται εντός της ύλης (διαχεόμενο εντός της ύλης μπορεί και διανύει αποστάσεις 0,02μm-0,07μm), είναι πολύ δύσκολο να καταφέρει να μετακινηθεί προς ένα γειτονικό πόρο και απο εκεί προς το περιβάλλον. Έτσι τα ποσοστά εκροής, που αντιστοιχούν στις διαδικασίες A, B, C θεωρούνται αμελητέα ως προς το σύνολο της εκροής του ραδονίου. Η συγκέντρωση του ραδονίου εντός ενός πορώδους υλικού αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Τόσο το θορόνιο ( $^{220}\text{Rn}$ ) όσο και το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) διανύουν ανακρουόμενα πολύ μικρότερες αποστάσεις εντός του ύδατος (προσεγγιστικά περίπου 72 mm και 80 mm αντίστοιχα) σε σχέση με εκείνες που διανύουν στον αέρα (65 μm και 76μm αντίστοιχα). (Ziegler an Biersack, 1985; Πατήρης, 2009).*



**Σχήμα 1.11:** Σχηματισμός, εκροή και διαφυγή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς- Έξοδος ραδονίου από το έδαφος. (Πιθανές περιπτώσεις τερματισμού της ανάκρουσης του θυγατρικού πυρήνα μετά την μεταστοιχείωση του ραδίου. A: Ο σχηματισμός του ραδονίου γίνεται σε απαγορευτικό για την απελευθέρωση του βάρους, εντός του κόκκου του υλικού, B και D: η κινητική του ενέργεια επαρκεί ώστε να μεταφερθεί σε γειτονικό κόκκο όπου και εγκλωβίζεται, C: το ραδόνιο σταματά στον γειτονικό πόρο (που περιέχει συνήθως νερό) από όπου εύκολα διαχέεται προς το περιβάλλον) (Knutson, 1988).

Το ραδόνιο εκρέει και διαφεύγει από τα διάφορα εδάφη με διαφορετικούς ρυθμούς. Η διαφυγή του ραδονίου καθορίζεται από την ικανότητα μετακίνησης (migration) ραδονίου. (Nazaroff et al. 1988).

Έτσι λοιπόν η έξοδος του ραδονίου από τους γεωλογικούς σχηματισμούς ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις:

- **Εκροή** (emanation) ραδονίου από τους κόκκους, καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο το ραδόνιο που παράγεται από την α-διάσπαση του εγκλωβισμένου σε αυτούς ραδίου ( $^{226}\text{Ra}$ ), διαφεύγει από εκεί και εισέρχεται στους πόρους.

- **Διαφυγή** ραδονίου που παρουσιάζεται εντός των πόρων του ενεργού πορώδους, και διαφεύγει τελικά προς την επιφάνεια της Γης ενώ πριν διασπαστεί στα θυγατρικά του καταφέρει και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα.

Οι μηχανισμοί- τρόποι διαφυγής του ραδονίου είναι:

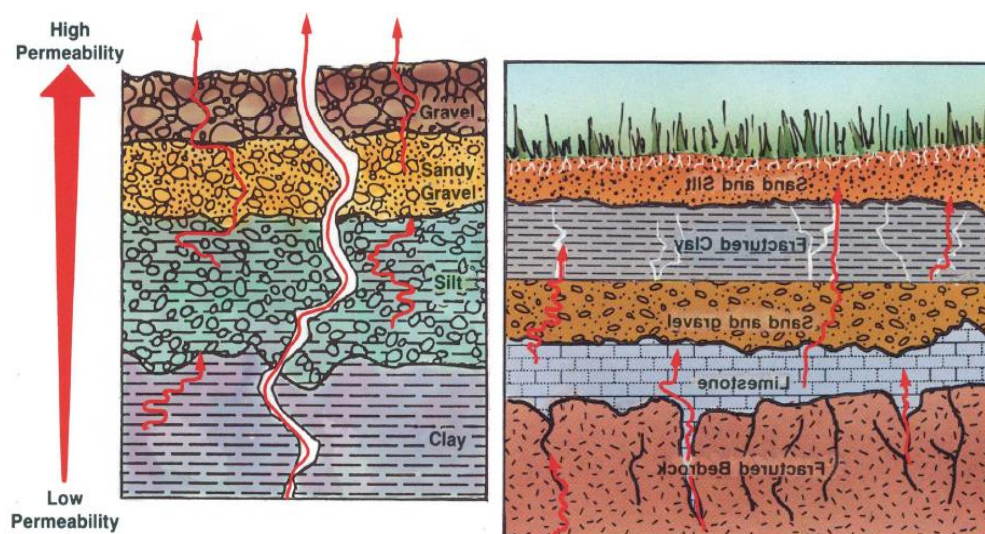
- **Διάχυση** (*diffusion flow*), η κίνηση του ραδονίου λόγω διάχυσης οφείλεται στις διαφορές συγκέντρωσης που έχει το ραδόνιο μέσα στο ρευστό. Ο μηχανισμός αυτός που ακολουθεί τον νόμο του Fick, εφαρμόζεται στην περίπτωση της διακίνησης του  $^{222}\text{Rn}$  μέσα στους πόρους του εδάφους και ερμηνεύει την είσοδο του ( $^{222}\text{Rn}$ ) σε ένα στατικό μοντέλο αέρα (Duenas et al., 1999; Βογιάννης, 2005).
- **Ροή Αέριας Μάζας- Μεταβολές πίεσης** (*advective flow*), εξαρτάται από τις διαφορές πιέσεων στο εσωτερικό του εδάφους με αποτέλεσμα το ραδόνιο που εμπεριέχεται στις μάζες αυτές να κινείται προς περιοχές με χαμηλή πίεση. Έτσι λοιπόν η έξοδος του  $^{222}\text{Rn}$  από το έδαφος ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις, με την απορροή και την εκροή. (Κασινάλης, 2008; Δ. Τσουκαλά, 2013; Βογιάννης, 2005; J. K. Otton, 1992).

Γενικά, πρέπει να επισημανθεί ότι ο ρυθμός διαφυγής του ραδονίου μπορεί να μεταβληθεί και από τις κλιματολογικές συνθήκες (βαρομετρική πίεση, το ύψος βροχόπτωσης, η θερμοκρασία και ο άνεμος, με τις δύο πρώτες πιο σημαντικές (Schery et al. 1984)).

Με άλλα λόγια, η μεταφορά του ραδονίου μέσα στο έδαφος οφείλεται είτε στο φαινόμενο της διάχυσης είτε στην κίνηση των αερίων που υπάρχουν στα διάκενα του εδάφους, που είναι το  $\text{CO}_2$  (πολλές φορές και το  $\text{CH}_4$ ), είτε σε συνδυασμό αυτών των φαινομένων. Η κίνηση των αερίων μπορεί να οδηγηθεί από τον άνεμο, τις αλλαγές στην πίεση και την διεισδύουσα βροχή ή το λειωμένο χιόνι. Μια άλλη αιτία μπορεί να είναι οι διαφορές θερμοκρασίας στο έδαφος. **Η διάχυση του ραδονίου διαμέσου του εδάφους σχετίζεται με την διαπερατότητά του, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την κοκκομετρία, το βαθμό συμπίεσης και το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό.** Επειδή το ραδόνιο έχει περιορισμένο χρόνο ζωής, το μεγαλύτερο μέρος του διασπάται αφού διανύσει μια ικανή απόσταση με την διάχυση. Για παράδειγμα το 90% του ραδονίου που «παράγεται» από μια πηγή ραδίου βαθιά στο έδαφος και μεταφέρεται με διάχυση, θα έχει διασπασθεί **μετά από απόσταση 5 cm στο νερό, περίπου 2 m σε αμμώδες έδαφος με κανονική υγρασία και σε 5 m στον αέρα.** Στο Σχήμα 1.12 δείχνεται μια τυπική απελευθέρωση



του ραδονίου από το υπέδαφος, προς την επιφάνεια (Xuan Thang et al., 1995; Sun and Sem Kow, 1998; Τσουκαλά, 2013; Βογιάννης, 2005).



**Σχήμα 1.12:** Μεταφορά ραδονίου στο έδαφος και διαπερατότητα-ασυνέχειες (Otton, 1992)

### 1.11 Ραδόνιο και η εγκατάλειψη του αρχικού του πετρώματος

Επειδή το ραδόνιο ( $Rn$ ) είναι αέριο έχει πολύ υψηλότερη κινητικότητα από το ουράνιο και το ράδιο ( $U-Ra$ ) τα οποία είναι στερεά και σταθερά σε πετρώματα και εδάφη. Το ραδόνιο μπορεί πιο εύκολα να αφήνει τα πετρώματα και τα εδάφη, διαφεύγοντας μέσα από ρήγματα και ανοίγματα στα πετρώματα και μεταξύ του πορώδους του εδάφους. Έτσι παρατηρείται σχετική ευκολία στην κίνηση του ραδονίου στο χώρο, μέσω ρηγμάτων και του πορώδους με αποτέλεσμα το ραδόνιο κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες να μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις πριν αποσυντεθεί. Το είδος και η ταχύτητα κίνησης του ραδονίου μέσω του εδάφους ελέγχεται από την ποσότητα του νερού στο πορώδες (pore space), δηλαδή την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, το πορώδες, και την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει νερό και αέρια (διαπερατότητα). Το ραδόνιο κινείται πιο εύκολα μέσω διαπερατών εδαφών όπως είναι η άμμος και το χαλίκι παρά σε αδιαπέρατα όπως είναι η άργιλος. Τα ρήγματα σε οποιοδήποτε έδαφος βοηθούν το ραδόνιο να κινείται πιο γρήγορα. **Το ραδόνιο στο νερό κινείται πιο αργά από ότι στον αέρα ενώ η απόσταση που διανύει το ραδόνιο πριν τη διάσπαση του μεγαλύτερου μέρους του είναι περίπου τριάντα εκατοστά σε κορεσμένα από νερό εδάφη και πετρώματα**

**αλλά περίπου στα δύο μέτρα σε ξηρά εδάφη.** Επειδή το νερό κινείται αργά από τους πόρους του εδάφους των πετρωμάτων και των ρηγμάτων από ότι ένα αέριο, το ραδόνιο συμπερασματικά μπορεί να ταξιδέψει μικρότερες αποστάσεις σε υγρές συνθήκες από ότι σε ξηρά εδάφη (πριν διασπαστεί). Για τους λόγους αυτούς σε ξηρές περιοχές και ιδιαίτερα σε διαπερατά εδάφη, λόφους, πλαγιές, φαράγγια μπορεί να υπάρχουν υψηλά επίπεδα ραδονίου. Ακόμα και αν το περιεχόμενο του ραδονίου στον αέρα ή στο έδαφος είναι στο φυσιολογικό εύρος η διαπερατότητα αυτών των περιοχών επιτρέπει την μετακίνηση του αερίου ραδονίου σε μεγάλες αποστάσεις (Βογιάννης, 2005).

### **1.12 Ραδόνιο στα υπόγεια ύδατα**

Όσο πλησιέστερα βρίσκεται ένα πέτρωμα στον υδροφόρο ορίζοντα τόσο περισσότερο νερό περιέχουν οι πόροι του, επομένως η συγκέντρωση του ραδονίου στον χώρο των πόρων αυξάνεται καθώς αυτό «εγκλωβίζεται» μειώνοντας του (το νερό) την ταχύτητα με την οποία αυτό «ταξιδεύει» στον χώρο. Στο επίπεδο κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα όλοι οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό, οπότε όλο το ραδόνιο που εκπέμπεται από το πέτρωμα διαλύεται στο νερό. Ωστόσο το ραδόνιο παραμένει εν διαλύσει και ακολουθεί την πορεία του νερού μόνον στις περιπτώσεις όπου η κίνηση του νερού είναι γρήγορη και υπάρχει διαφυγή σημαντικών ποσοτήτων (Segovia et al., 1999; Zalewski et al., 2001; Βογιάννης, 2005).

**Το ραδόνιο έχει έντονη παρουσία σε περιπτώσεις που το υπόγειο νερό κινείται κοντά σε ρήγματα ή σε περιοχές με ηφαιστειακή δραστηριότητα ή ακόμα και μέσα από καρστικές κοιλότητες, όπου το ραδόνιο μπορεί να είναι εγκλωβισμένο** (Mommnin and Seidel, 1992; Monnin and Seidel, 1997; Segovia et al., 1997; Βογιάννης, 2005).

### **1.13 Ραδόνιο-ράδιο-ουράνιο σε υδάτινο περιβάλλον**

Είναι πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι, το ουράνιο, το ράδιο, το ραδόνιο μεταφέρονται μέσω του νερού με διαφορετικούς μηχανισμούς. Πιο συγκεκριμένα το ουράνιο και το ράδιο όπως αναφέρθηκε είναι στερεά που διαλύονται στο νερό, ενώ το ραδόνιο είναι αέριο.

Δεδομένου ότι το ραδόνιο είναι λοιπόν α-ευγενές αέριο και δεν αντιδρά με τα στερεά, περίπου το 100% του ραδονίου που απελευθερώνεται στα υπόγεια ύδατα παραμένει ως διαλυμένη φάση. **Η διαλυτότητα του  $^{222}\text{Rn}$  στο νερό είναι μικρή** ( $0,01 \text{ mol kg}^{-1} \text{ bar}^{-1}$  στους 293 K) (Lerman, 1979), ελαττώνεται επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να



περιμένει κανείς μικρές ποσότητες  $^{222}\text{Rn}$  στο νερό (Al-Azmi et. al., 2004). Είναι όμως σχετικά μεγάλη αν αυτή συγκριθεί με την διαλυτότητα άλλων ραδιονουκλιδίων και αερίων (Στους  $10^\circ\text{C}$  είναι 61 φορές μεγαλύτερη από αυτή του οξυγόνου) (Fonollosa et al., 2016, Jobbagy V et al., 2017). Η διαλυτότητα εκφράζεται συνήθως με τον συντελεστή διαλυτότητας (L) του αερίου  $^{222}\text{Rn}$  στον καθαρό διαλύτη (νερό) (Clever, 1979, Schubert et al., 2007). Ο συντελεστής διαλυτότητας του  $^{222}\text{Rn}$  είναι περίπου  $0.23 \cdot 10^{0.25}$  στους 293 K. Σχετικά με τους οργανικούς διαλύτες και το πετρέλαιο, όπως στην αιθανόλη για παράδειγμα ο συντελεστής είναι περίπου ίσος με 6. **Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η αλυσίδα του άνθρακα τόσο μεγαλύτερη διαλυτότητα παρουσιάζει το ραδόνιο.**

Επίσης, επειδή η μερική πίεση του ραδονίου στον αέρα είναι πολύ μικρή, αυτό εύκολα μεταφέρεται, όταν το νερό που το περιέχει βρεθεί ελεύθερο στον αέρα (για τον λόγο αυτό η περιεκτικότητα σε ραδόνιο των επιφανειακών νερών είναι μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή των υπογείων).

Το ζήτημα όμως είναι αρκετά πολύπλοκο όταν πρόκειται για ραδόνιο στα υπόγεια νερά. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι συνθήκες που επικρατούν κατά την διάλυση και την μεταφορά του από τις υδάτινες μάζες, καθώς επίσης πρέπει να εξετασθεί η ύπαρξη μητρικών πυρήνων μέσα στη μάζα του νερού, από τους οποίους μπορεί να δημιουργηθεί και να διαφύγει  $^{222}\text{Rn}$ .

Κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης και της αύξησης των σταγόνων της βροχής ένα εξαιρετικά μικρό ποσό  $^{222}\text{Rn}$  από τον αέρα περικλείεται σ' αυτήν, έτσι στο νερό της βροχής περιέχονται περίπου  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Συνεπώς, στα επιφανειακά νερά συνήθως περικλείεται ένα ποσό μικρότερο των  $2.000 \text{ Bq/m}^3$ . Τα υπόγεια νερά τα οποία έρχονται σε επαφή με πετρώματα και εδάφη με κανονικά ποσοστά ουρανίου και ραδίου, περιέχουν ένα σημαντικό ποσό διαλυμένου  $^{222}\text{Rn}$  που μπορεί να ποικίλει (Wilkening, 1990; Karahan et al., 2000; Schwartz, 2003). Στις περιπτώσεις εκείνες όπου το υπόγειο νερό συναντά ή διαπερνά πετρώματα με υψηλές τιμές περιεκτικότητας σε ουράνιο ή ράδιο, αναμένονται υψηλότερες συγκεντρώσεις  $^{222}\text{Rn}$  σε αυτό. Έτσι, μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου πατατηρούνται σε νερά που έρχονται σε επαφή με το μητρικό του (ράδιο-ουράνιο), καθώς τα μεταλλεύματα ουρανίου είναι εύκολα αποσαθρώσιμα. (Βογιάννης, 2005).

Αξίζει να τονιστεί ότι το ραδόνιο αντιδρά με το φθόριο ( $F_2$ ), σχηματίζοντας μια στερεή ένωση που ονομάζεται ραδονιοδιφθορίδιο ή διφθοριούχο ραδόνιο, η οποία διασπάται όταν επιχειρηθεί εξαέρωση των υδάτων.

Η **κινητικότητα του ραδονίου** στα φυσικά νερά ωστόσο, εξαρτάται κυρίως από φυσικές παρά από χημικές διαδικασίες. Σαν αδρανές αέριο δεν ιονίζεται στα διαλύματα ούτε καθιζάνει με την μορφή ιζημάτων. Εμφανίζει ελάχιστη προσρόφηση σε οργανική ύλη ειδικά σε άνθρακα αλλά αυτό δεν μπορεί να τεκμηριώσει μεγάλους βαθμούς προσρόφησης σε άλλες επιφάνειες (Βογιάννης, 2005).

Η **κινητικότητα του ραδίου** στα φυσικά νερά, καθορίζεται από αρκετές φυσικές διεργασίες κυρίως από συγκαθίζηση, προσρόφηση και ιόντοανταλλαγή. Το στερεό **RaSO<sub>4</sub>** είναι δυσδιάλυτο, το οποίο σπανίως εμφανίζεται, αφού τα φυσικά νερά δεν εμφανίζουν συνήθως τις κατάλληλες συνθήκες. Το ράδιο προσροφάται ισχυρά από επιφάνειες ορυκτών που περιέχουν χαλαζία, καολινίτη και άλλα αργιλώδη ορυκτά. Επίσης, προσροφάται και από οξυ-υδροξείδια του σιδήρου (Pane, 1995; Segovia et al, 1997, Gomez Escobar et al., 1999, Weihai Zhuo et al., 2001). Η γεωχημική του συμπεριφορά εξαρτάται από την αφθονία άλλων δισθενών κατιόντων στο νερό (ενώ η συγκέντρωση του ραδίου είναι της τάξης του  $10^{14}$  μικρότερη σε σχέση με τις συγκεντρώσεις των Ca, Sr και Ba). Ωστόσο, στα υπόγεια ύδατα όπου οι συγκεντρώσεις Ca ή Sr είναι πολύ χαμηλότερες, το ράδιο μπορεί να απομακρυνθεί σχετικά εύκολα από το διάλυμα. Σε ένα pH=10, το ράδιο μπορεί να σχηματίσει ουδέτερο ιόν ή ανιόν (Langmuir and Riese 1985). Εάν οι συγκεντρώσεις Ba ή Sr είναι αρκετά μεγάλες που υπερβαίνουν τη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων (όπως BaSO<sub>4</sub> ή BaCO<sub>3</sub> ή SrSO<sub>4</sub>), τότε το Ra μπορεί να καθιζάνει με BaSO<sub>4</sub> (βαρύτη) ή BaCO<sub>3</sub> (ανθρακικό βάριο) ή SrCO<sub>3</sub> (σελεσίτης) καθώς και θειικό άλας το οποίο είναι αδιάλυτο.

Ιδιαίτερη σημασία ωστόσο παρουσιάζει η **κινητικότητα του ουράνιου**, το οποίο μέσα σε ορυκτά βρίσκεται σε οξειδωμένη μορφή +4 ( $U^{+4}$ ) και είναι αρκετά δυσκίνητο. Αν όμως στο νερό υπάρχει αρκετό διαλυμένο οξυγόνο τότε το ουράνιο οξειδώνεται σε +6 ( $U^{+6}$ ) (υπό μορφή  $UO_2^{+2}$ ) με αποτέλεσμα να είναι πιο ευκίνητο και να μεταφέρεται εύκολα στο νερό. Στο νερό, το  $UO_2^{+2}$  συχνά δημιουργεί σύμπλοκα (complexes) με διάφορα συνηθισμένα ιόντα όπως για παράδειγμα τα  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $F^-$ ,  $PO_4^{3-}$  και  $SO_4^{2-}$  καθώς και χουμικά. Το ουράνιο με την οξειδωμένη μορφή +6 ( $U^{+6}$ ) σχηματίζει σύμπλοκα με οξείδια σιδήρου, για pH >5, ενώ την ίδια στιγμή σε αναγωγικό

περιβάλλον, κυριαρχεί το ουράνιο υπό την μορφή  $+4$  ( $U^{+4}$ ) το οποίο απορροφάται ή επικάθεται με μεταλλικά οξείδια.

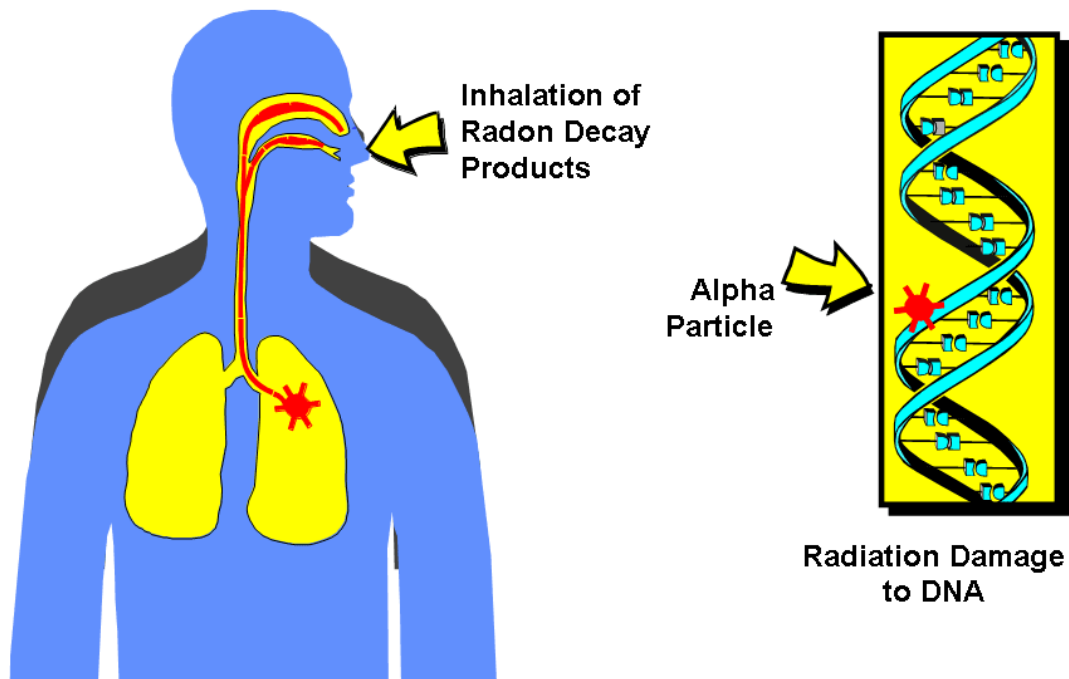
Επιπλέον, στα διαγράμματα Eh-PH καθώς και στα διαγράμματα διαλυτότητας (Garrels and Christ, 1964) φαίνεται ότι το ουράνιο σε οξειδωμένη μορφή  $+4$  ( $U^{+4}$ ) είναι ελάχιστα διαλυτό, σε αντίθεση με το ουράνιο  $+6$  ( $U^{+6}$ ) όπως το ιόν ουρανυλίου που σε υψηλό pH, είναι πιο διαλυτό (Hem, 1985).

#### **1.14 Τι συνεπάγεται η ύπαρξη του ραδονίου στο νερό και τι στον αέρα**

Το ραδόνιο μέσα στο νερό ως επί το πλείστον έχει ευεγερτική δράση. Για παράδειγμα, η ακτινοβολία του μπορεί να σκοτώσει μικροοργανισμούς που προκαλούν δερματικές παθήσεις. Στον αέρα όμως σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλείται έκθεση των ιστών της αναπνευστικής οδού με αρνητικά για την υγεία αποτελέσματα. Στις περιπτώσεις όπου τα επίπεδα της συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό παραμένουν υψηλά, είναι αναγκαία η επέμβαση στην διαδικασία μεταφοράς ή αποθήκευσης του νερού. Στόχος είναι να εκτονωθούν μεγάλες ποσότητες ραδονίου από το νερό πριν αυτό τροφοδοτήσει τις εγκαταστάσεις. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το ραδόνιο υπάρχει μέσα σε κλειστά συστήματα άρδευσης- ύδρευσης και όταν αυτά δεν εξαερώνονται και δεν αποφεύγεται η διάσπαση του στον χρόνο έχει σαν αποτέλεσμα το ραδόνιο να εκλύεται και να εισπνέεται από τους ανθρώπους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13 (Βογιάννης, 2005).

**Η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (EPA) έχει προτείνει ένα Μέγιστο Επίπεδο Προσμείξεων (MCL) ραδονίου σε πόσιμο νερό 11 Bq/L .**

Η επιστημονική επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν δέχεται τιμές ραδονίου σε νερό, πάνω από τη συγκέντρωση του **50 Bq/L** (Poffijn and Cauwels, 1997). Αυτό γιατί, το αέριο ραδόνιο που εκλύεται από το νερό μπορεί να προκαλέσει περισσότερους θανάτους από καρκίνο από όλους τους άλλους μολυντές πόσιμου νερού (Lamarre 1990).



**Σχήμα 1.13:** Διάσπαση ραδονίου κατά την εισπνοή του, στους πνεύμονες.

### 1.15 Μέθοδοι μέτρησης ραδονίου

Οι μετρήσεις του ραδονίου είναι σχετικά απλές (δεν εμφανίζουν πολυπλοκότητα) και φτηνές καθώς επίσης οι περισσότερες τεχνικές έχουν κοινή εφαρμογή στα εργαστήρια, ενώ οι συσκευές είναι άμεσα διαθέσιμες στην αγορά με χαμηλά όρια ανίχνευσης, προσιτή τιμή και απλή λειτουργία. Επίσης η προετοιμασία του δείγματος για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ραδονίου στο νερό είναι πολύ απλή και γρήγορη, και δεν απαιτεί εκτεταμένους χημικούς χειρισμούς. Όλα αυτά δίνουν το πλεονέκτημα μιας πολύ πιο γρήγορης και εύκολης τεχνικής μέτρησης του ραδονίου συγκριτικά με άλλες ραδιοαναλυτικές τεχνικές που περιλαμβάνουν ραδιοχημικούς χειρισμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις το αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί και σε μια ώρα (Todorovic et al., 2012; Lucchetti et al., 2016). Το νερό που προβλέπεται ως πόσιμο θα πρέπει να αναλύεται για την περιεκτικότητά του σε ραδόνιο σύμφωνα με το «EURATOM Drinking Water Directive που αναφέρεται και ως E-DWD (EURATOM, 2013). Στους Πίνακες 1.2 και 1.3 αναφέρονται οι επιτρεπτές τιμές συγκέντρωσης του ραδονίου στο νερό καθώς επίσης και συγκεντρώσεις ραδονίου σε διάφορους τύπους υδάτων.

**Πίνακας 1.2:** Επιτρεπτή συγκέντρωση ραδονίου σε πόσιμο νερό.

Directive/recommendation	Activity concentration (Bq L <sup>-1</sup> )	Reference
EURATOM DWD (E-DWD)	100–1000 <sup>a</sup>	EURATOM, 2013
24 EU Member States <sup>b</sup>	100	MS National law
Ireland, Portugal, Spain	500	MS National law
Finland	1000	MS National law
WHO guidance level	100	WHO, 2008
US-EPA maximum contaminant level	~11.1	US-EPA, 1999
US-EPA alternative higher maximum contaminant level	148	

<sup>a</sup> >1000 Bq L<sup>-1</sup> remedial action without further consideration is justified in all EU countries.

<sup>b</sup> Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Romania, Slovakia, Slovenia, Sweden, United Kingdom.

**Πίνακας 1.3:** Παραδείγματα συγκεντρώσεων ραδονίου σε διαφορετικούς τύπους νερών (Jobbagy et al., 2017).

Water type	<sup>222</sup> Rn activity concentration (Bq L <sup>-1</sup> )	Country, region	Geology	References
Drinking water	<3	Serbia/Novi Sad		Todorovic et al., 2012
	0.3–24	Cyprus and Greece (Attica-Crete)	Not detailed	Nikolopoulos and Louizi, 2008
	1.46–644	Austria	granite bedrock	Wallner and Steininger, 2007
	<1.3–1800	Germany		Beyermann et al., 2010
Surface water	1.9–112.77	Portugal	tap	Lopes et al., 2005
	0.19–71.1	UK	tap	Henshaw et al., 1993
	<1	Slovenia		ISO 13164-3, 2013
	5.4			Kobal et al., 1990
Groundwater	1–1000	Spain, La Garrotxa region		ISO 13164-3, 2013
	0.2–26		volcanic	Moreno et al., 2014
	3043	Poland, the Sudety Mountains	Volcanic (e.g. crystalline rocks)	Przylibski et al., 2014
	3800	Finland	Soil (no detail)	Salonen, 1988
	1220	Germany, east Bavaria	granite, gneiss	Trautmannsheimer et al., 2002
	17–3856	Portugal, Nisa	Granites, sediments	Pereira et al., 2015
	5.8–36.6	UK, Northern Ireland	Sherwood Sandstone Aquifer	Gibbons and Kalin, 1997
Spring and non-bottled mineral waters	1.4–105	Spain, South Catalonia,	vulcanic (granite) and sedimentary rocks	Fonollosa et al., 2016
	2.11–120	Hungary, Balaton Highland, South Transdanubia and The South Great Plain	(e.g. limestone, sandstone) Sedimentary rocks	Somlai et al., 2007
	Mineral water 0.91–1463	Serbia	various	Todorovic et al., 2012
	1595	Bulgaria, Momin prohod		Pressyanov et al., 2007
	1.4–43.7	Lithuania	crystalline and sediment rocks	Ladygiene et al., 1999
	1.5–181	Italy, Padua, Euganean Thermal District	volcanic rocks	Cantaluppi et al., 2014
Well water	1029	Spain, Galicia	granitic and slate rocks	Llerena et al., 2013
	10–300	Norway		ISO 13164-3, 2013
	32000		Not detailed	Strand et al., 1998
	4–63560	Sweden, Stockholm County	various, crystalline bedrock	Skeppström and Olofsson, 2006
	47–1600	Belgium, Visé		Bourgoignie et al., 1982
	77000	Finland,	mainly granitic bedrock	Salonen, 1988

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης του ραδονίου στο νερό. Η **πρώτη** μέθοδος βασίζεται στην φασματομετρία ακτίνων-γ. Η **δεύτερη** μέθοδος βασίζεται στην εκροή των αερίων του δείγματος (emanometry) και η **τρίτη** βασίζεται στην μέτρηση υγρών σπινθηρισμών (LSC). Αυτές οι μέθοδοι καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα απλών-φτηνών έως πιο σύνθετων-ακριβών τεχνικών. Για τον λόγο αυτό η ανάλυση του νερού ως προς το ραδόνιο λαμβάνει χώρα στα περισσότερα εργαστήρια εν αντιθέσει άλλων αναλύσεων διαφόρων νουκλιδίων. Για να είναι

λοιπόν αξιόπιστα τα αποτελέσματα θα πρέπει να ακολουθείται μία εκ των τριών μεθόδων. Υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις από την E-DWD όσον αφορά το όριο ανίχνευσης, την συχνότητα δειγματοληψίας (ανάλογα από την παροχή του πόσιμου νερού). Η επιλεγμένη τεχνική μέτρησης ραδονίου πρέπει να είναι ικανή ώστε να μετράει την ενεργότητα της συγκέντρωσης του ραδονίου με όριο ανίχνευσης να κυμαίνεται στο 10% (στα 100Bq/L να μετρώνται τα 10 Bq/L τουλάχιστον). Το E-DWD αναφέρει ότι οι δειγματοληψίες θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από την ημερομηνία και την (τοπογραφική) θέση από όπου συλλέχθηκαν. Η ευκολότερη μέθοδος είναι με την χρήση φασματομετρίας ακτίνων-γ χωρίς αλλαγή φάσης (όταν συμπεριλαμβάνεται αλλαγή φάσης το ραδόνιο μεταφέρεται από την υγρή φάση-νερό στον αέρα). Η απορρόφηση του ραδονίου γίνεται με ενεργό άνθρακα όπου έπειτα επιτρέπεται η μέτρηση του (ραδονίου) με φασματομετρία ακτίνων-γ. Λόγω ότι ο χρόνος ζωής του ραδονίου είναι μικρός σχετικά (3,8232 ημέρες) η μέτρηση των δειγμάτων πρέπει να πραγματοποιείται ή επί τόπου ή πολύ σύντομα στα εργαστήρια. Ακόμα, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στις συνθήκες μεταφοράς των δειγμάτων από το ύπαιθρο στο εργαστήριο (Jobbagy et al., 2017).

- **Φασματομετρία ακτίνων-γ**

Στην φασματομετρία ακτίνων-γ η μέτρηση της ενεργότητας της συγκέντρωσης του ραδονίου βασίζεται στην μέτρηση των θυγατρικών στοιχείων  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Pb}$ . Καθώς τα θυγατρικά του ραδονίου είναι βραχύβια επέρχεται ισορροπία εντός τριών ωρών. Ωστόσο αν υπάρχει  $^{226}\text{Ra}$  στο δείγμα σημαίνει την παραγωγή ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) και καθίστανται αναγκαία μια δεύτερη μέτρηση μετά την ισορροπία μεταξύ του  $^{226}\text{Ra}$  και του  $^{222}\text{Rn}$ . Δεδομένου ότι ο χρόνος ημίσειας ζωής του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) είναι περίπου 4 ημέρες πρέπει να περιμένουμε ένα σημαντικό χρονικό διάστημα (κατά προτίμηση 10 ημίσειους χρόνους ζωής) για να εφαρμοστεί αυτή η διόρθωση. Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού στερεάς κατάστασης ή οι υψηλής καθαρότητας ανιχνευτές (υπερκαθαρού) γερμανίου (HPGe) είναι οι πιο συχνοί στην χρήση φασματομετρίας. Ωστόσο, λόγω της κακής σχετικά ανάλυσης οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, χρησιμοποιούνται κυρίως για απλό έλεγχο-ανίχνευση, ενώ οι ανιχνευτές HPGe είναι καλύτεροι και για ποιοτική και για ποσοτική ανάλυση. Πρέπει να τονιστεί ότι η πυκνότητα του δείγματος και η ομοιογένεια του επηρεάζονται από την θερμοκρασία του νερού, τα αιωρούμενα υλικά και τις φυσαλίδες του αέρα, και όλα αυτά επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μέτρησης ραδονίου επηρεάζονται από την προέλευση των

δομικών υλικών του εκάστοτε χώρου όπως για παράδειγμα τον χώρο του εργαστηρίου καθώς και τον αέρα (στον εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου). Για να ξεπεραστεί αυτό επιβάλλεται ο αερισμός του εργαστηρίου με καθαρό αέρα (Jobbagy et al., 2017).

- **Μέθοδος της απελευθέρωσης των αερίων του δείγματος – εκροή (emanometry)**

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξαέρωση δειγμάτων ακολουθούμενη από την ανίχνευση άλφα σωματιδίων (παράγονται κατά την διάσπαση του ραδίου και την παραγωγή του νεοσυστατου ατόμου ραδονίου), μέσα από διάφορα συστήματα ανίχνευσης. Όταν ένα δείγμα νερού εξαερώνεται το ραδόνιο μεταφέρεται από την υγρή φάση είτε με την ροή κάποιου αδρανούς αερίου είτε με κυκλοφορία αέρα ή κενού αέρος. Αρκετές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για τον προσδιορισμό της ενεργότητας του ραδονίου, βρικσκόμενο σε αέρια φάση, συμπεριλαμβανομένων των κελιών σπινθηρισμού όπως το κελί του Lucas (Lucas cell), τον ανιχνευτή πυριτίου (ημιαγωγού), και του θαλάμου ιονισμού. Η μέθοδος αυτή είναι ευαίσθητη σε ότι αφορά την θερμοκρασία (του νερού) καθώς οι μεταβολές της επηρεάζουν την εκτόνωση αερίων που περιέχονται στο νερό κατά την μεταφορά του. Η εξαέρωση σε (εργαστηριακό επίπεδο) του νερού πραγματοποιείται με την εισαγωγή αερίου χωρίς ραδόνιο ή την εισαγωγή αδρανούς αερίου σε κλειστό σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο το δείγμα «καθαρίζεται» από το ραδόνιο και με την βοήθεια μιας αντλίας μεταφέρεται στο κελί όπου γίνεται η μέτρηση, ή στον ανιχνευτή. Άλλη τεχνική εξαέρωσης του δείγματος είναι η έγχυση μικρής ποσότητας δείγματος με μία σύριγγα απευθείας σε ένα μερικώς κενό από αέρα κελί σπινθηρισμού. Λόγω του κενού, το ραδόνιο απελευθερώνεται από το δείγμα του νερού και η πίεση παίρνει την τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης (με την απελευθέρωση του ραδονίου ή του αδρανούς αερίου). Τρεις ώρες μετά την έγχυση, το κελί σπινθηρισμού είναι έτοιμο για την ανάλυση (Jobbagy et al., 2017).

- **Μέτρηση Υγρών Σπινθηρισμών (LSC)**

Η αρχή αυτής της μεθόδου βασίζεται στην εκχύλιση του ραδονίου από το νερό (δείγμα) στο αμιγές μίγμα σπινθηρισμών. Σε αρχικό στάδιο, ένας απαραίτητος όγκος μίγματος σπινθηρισμών μεταφέρεται και τοποθετείται σε φιαλίδιο (LSC). Το δείγμα εισάγεται αργά στο φιαλίδιο με μια αεροστεγή σύριγγα. Το φιαλίδιο που είναι και αυτό κλειστό αεροστεγώς ανακινείται καλά και στην συνέχεια αποθηκεύεται για τρεις ώρες σε ένα σκοτεινό δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία, έπειτα το δείγμα μπορεί να μετρηθεί. Το ραδόνιο και τα παράγωγα του μετρώνται επιλέγοντας το alpha b beta ή μόνο την λειτουργία του άλφα φασματομέτρου (LS). Προκειμένου να έχουμε

σωστά και αξιόπιστα αποτελέσματα απαιτείται όγκος δείγματος μεταξύ 500 και 900 mL και η χρήση φιαλιδίων σπινθηρισμού των 20 ml. Στην συγκεκριμένη μέθοδο η ρύθμιση αποκλίσεων έχει μεγάλη σημασία καθώς εύκολα μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Οι απεικονίσεις (φωτογραφίες) και η χημειοφωταύγεια μπορούν να εμφανιστούν αλλά το τελευταίο κυρίως στην περίπτωση μονοφασικών μιγμάτων. Η φωταύγεια των εικόνων μπορεί να αποφευχθεί αν πριν να ξεκινήσουν οι μετρήσεις, αποθηκευτεί το δείγμα για λίγες ώρες σε σκοτεινό μέρος. Μια άλλη πηγή σφάλματος είναι η βαθμονόμηση. Συνήθως για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ράδιο ( $^{226}\text{Ra}$ ) ως πρότυπο διάλυμα ή διάλυμα αναφοράς με το επιλεγμένο μίγμα υγρού σπινθηρισμού. Ωστόσο, αν ένα παλιό διάλυμα ( $^{226}\text{Ra}$ ) ραδίου (>5 ετών) χρησιμοποιείται ως διάλυμα βαθμονόμησης τότε ο μόλυβδος ( $^{210}\text{Pb}$ ) και τα μητρικά του εξισώνονται με το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) πράγμα που οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα (Salonen, 2010).

Στον Πίνακα 1.4 φαίνονται τα κύρια συστήματα ανίχνευσης ραδονίου στο νερό μαζί με μια περίληψη των κύριων χαρακτηριστικών τους. Τα δεδομένα αυτά βασίζονται στα στοιχεία της βιβλιογραφίας και στο πρότυπο ISO 13164 (ISO 13164-3, 2013; ISO 13164-4, 2015). Ένας από τους σημαντικότερους δείκτες απόδοσης μιας μεθόδου είναι το όριο ανίχνευσης και όλα τα συστήματα ανίχνευσης που αναφέρονται εδώ συμμορφώνονται με την απαίτηση του ορίου ανίχνευσης της EDWD (Jobbagy et al., 2017).

**Πίνακας 1.4:** Κύρια χαρακτηριστικά συστημάτων ανίχνευσης ραδονίου στο νερό (Jobbagy et al., 2017).

Detection system	Counting efficiency	Achievable lowest detection limit (Bq L <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Typical measurement uncertainty ( $k = 1$ )	Typical sample volume (L)	Sample treatment	Turnaround time (hour)	In-situ measurement possible
Gamma-ray spectrometry	1.5% <sup>c</sup>	10	5–15%	0.1–2	No	4–13	No
Ionization chamber		0.3	5–12%	0.05–0.2	Degassing	≤1	Yes
LSC	280–300% <sup>b</sup>	0.05–1	≈ 10%	0.01–2	Depends on cocktail	3–8	Yes
Scintillation/ Lucas cells	15–90%	0.3–1	<10%	0.05–1	Degassing	1–3	Yes
Silicon detector		0.04–0.4	5–12%	0.1–0.4	Degassing	≤1	Yes
				1–2	Permeation	Few hours	Yes

<sup>a</sup> E-DWD detection limit: 10% of the parametric value of 100 Bq/l, 10 Bq L<sup>-1</sup>.

<sup>b</sup> Including  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ .

<sup>c</sup> Absolute efficiency simulation for a 1 L sample at 609 keV peak.



### **1.16 Μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου των υδάτων της περιοχής του Αγίου Αντωνίου, καθώς και θορινίου, με τον ενεργητικό ανίχνευτή RTM1668-2 της Sharad**

Η δειγματοληψία ραδονίου (καθώς και του θορινίου) τόσο στον αέρα όσο και στο νερό (που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην παρούσα διπλωματική εργασία) πραγματοποιείται σχετικά εύκολα με το όργανο RTM1668-2 της Sharad (εικόνα 1.14) με μια ενσωματωμένη αντλία. Η οθόνη του οργάνου αρχίζει την λειτουργία της με το πάτημα ενός κουμπιού. Ένας σειριακός εκτυπωτής μπορεί να συνδεθεί στη διεπαφή του RTM1688-2 για να παρουσιάσει τις μετρούμενες ενδείξεις του χώρου απευθείας. Επιπλέον η συσκευή μπορεί να συνδεθεί με ένα μόντεμ για απομακρυσμένη μετάδοση δεδομένων. Το λογισμικό Radon Vision, το οποίο συμπεριλαμβάνεται με την αγορά του οργάνου επιτυγχάνει την απομακρυσμένη σύνδεση το ίδιο καλά με την επί τόπου. Επιπροσθέτως, ο θάλαμος μέτρησης δεν παρουσιάζει ευαισθησία σε ότι αφορά την υγρασία και τις μεταβολές της, έτσι ο σωλήνας ξήρανσης που απαιτείται συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις, δεν χρειάζεται. Το RTM1668-2 δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην ποιότητα των μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, κάθε καταγραφή δεδομένων περιέχει ένα πλήρες φάσμα ακτινοβολίας που εξασφαλίζει την λειτουργία του οργάνου χωρίς σφάλματα. Μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί οποιοσδήποτε αριθμός σειρών μέτρησης με την έναρξη και διακοπή της συλλογής δεδομένων. Τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στο όργανο μπορούν να διαβαστούν από τον υπολογιστή οποιαδήποτε στιγμή ακόμα και κατά την διάρκεια της μέτρησης. Πρέπει να επισημανθεί ότι όγκος του θαλάμου είναι μικρός σχετικά (130ml). Για τον λόγο αυτό η ανίχνευση γίνεται με λήψη μικρού όγκου δειγμάτων. Τέλος η λειτουργία του οργάνου μπορεί να πραγματοποιείται είτε με τροφοδότηση από κάποιο μετασχηματιστή ρεύματος είτε με τροφοδότηση από κάποια εσωτερική μπαταρία. Οι μονάδες που παρουσιάζονται οι μετρήσεις του οργάνου είναι  $Bq/m^3$  [7].



**Εικόνα 1.14:** Το όργανο RTM1668-2 της Sharad με το οποίο έγινε η μέτρηση του ραδονίου και του θορονίου [7].

Ο RTM1688-2 είναι ενεργητικός ανιχνευτής και ανήκει στην κατηγορία οργάνων με μέθοδο συνεχούς καταγραφής καθώς δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη του να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο, τη διακύμανση της συγκέντρωσης του  $^{222}\text{Rn}$  στον αέρα που διέρχεται από το εσωτερικό του. Για την εξέταση υδάτινων δειγμάτων η μετρητική διάταξη του οργάνου περιλαμβάνει αντλία για την εξαγωγή του ραδονίου μέσω της διαταραχής του νερού και την οδήγηση του ρεύματος αέρα στο μετρητή. Το δείγμα αναρροφάται από ενσωματωμένη στη συσκευή αντλία (0.25 l/min) και η μέτρηση γίνεται σε θάλαμο με ανιχνευτή ημιαγωγού. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η περιεκτικότητα σε  $\text{Bq/m}^3$  ενώ ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση και καταγραφή στη μνήμη της συσκευής των ενδείξεων από τα επίσης ενσωματωμένα στη συσκευή αισθητήρια θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Μέσω του λογισμικού υπάρχει επιλογή μεταξύ μονάδων SI ( $\text{Bq/m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , mbar) και US (pCi/L,  $^{\circ}\text{F}$ , inHg).

Η μέτρηση ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) γίνεται μέσω της μέτρησης των βραχύβιων θυγατρικών του, τα οποία παράγονται από τις διασπάσεις του ραδονίου μέσα στο μετρητικό θάλαμο της συσκευής. Αμέσως μετά από κάθε διάσπαση οι υπολειπόμενοι πυρήνες  $^{218}\text{Po}$ , φορτίζονται θετικά για μικρό χρονικό διάστημα διότι κάποια ηλεκτρόνια «σκιάζονται» από τα εκπεμπόμενα σωματίδια  $\alpha$  - ακτινοβολίας. Τα θετικά αυτά ιόντα οδηγούνται από τις ηλεκτρικές δυνάμεις πάνω στην επιφάνεια ενός ανιχνευτή

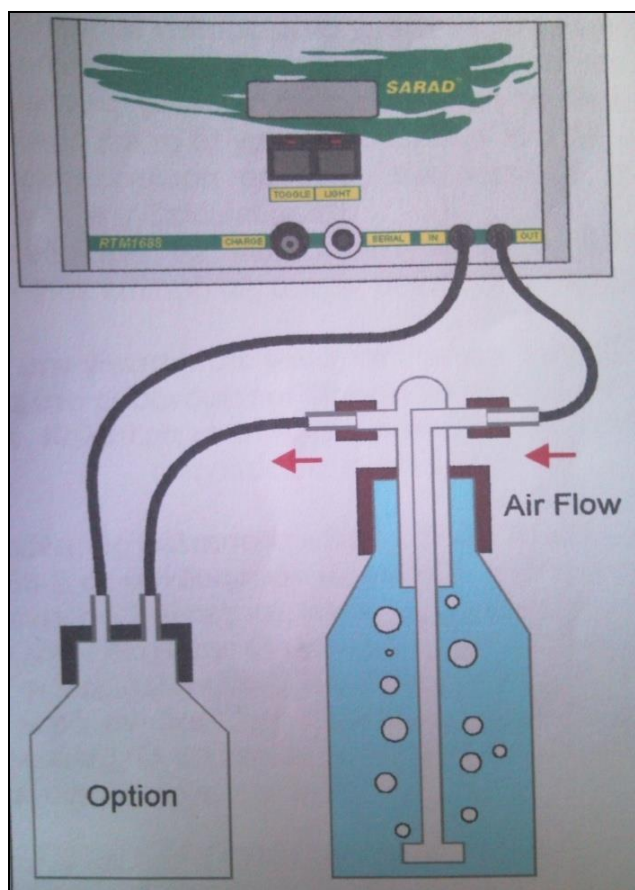
ημιαγωγού. Ο αριθμός των ιόντων  $^{218}\text{Po}$  που συλλέγονται πάνω στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι ανάλογα της συγκέντρωσης ραδονίου στο θάλαμο μέτρησης.

Το  $^{218}\text{Po}$  έχει χρόνο ημιζωής μόνο 3,05 min και περίπου 50% όλων των σωματιδίων που εκπέμπονται από όλες τις διασπάσεις καταγράφονται από τον ανιχνευτή. Η ισορροπία μεταξύ διασπάσεων ραδονίου και δραστηριότητας  $^{218}\text{Po}$  στον ανιχνευτή επέρχεται μετά από περίπου 5 χρόνους υποδιπλασιασμού, δηλαδή μετά από 15 min περίπου. Αυτός είναι και ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος απόκρισης για τη μέτρηση ραδονίου.

Η αλυσίδα διάσπασης συνεχίζει με τις  $\beta$  – εκπομπές  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  και ακολουθεί η  $\alpha$  – εκπομπή  $^{214}\text{Po}$ . Αυτό σημαίνει ότι κάθε διάσπαση  $^{218}\text{Po}$  ακολουθείται από μια ακόμα ανιχνεύσιμη, από τον ανιχνευτή –  $\alpha$ , διάσπαση  $^{214}\text{Po}$ , για τη μέτρηση του οποίου όμως πρέπει να περάσουν περίπου 3 ώρες λόγω του χρόνου υποδιπλασιασμού των προηγούμενων νουκλιδίων. Όταν το RTM-1688-2 ρυθμίζεται στη λειτουργία Slow, τότε μετράει τις διασπάσεις  $^{218}\text{Po}$  και  $^{214}\text{Po}$ , ενώ στη λειτουργία Fast μετράει μόνο  $^{218}\text{Po}$ . Η λειτουργία Fast επιλέγεται για ταχεία απόκριση σε γρήγορες μεταβολές της συγκέντρωσης, ενώ η αρχή λειτουργία Slow δίνει διπλάσια τουλάχιστον ευαισθησία και καλύτερη ακρίβεια της μέτρησης.

Για την περίπτωση του θορονίου ( $^{220}\text{Rn}$ ), μετράται ο απ'ευθείας θυγατρικός πυρήνας του  $^{216}\text{Po}$  και μέσω αυτού υπολογίζεται η συγκέντρωση θορονίου. Το  $^{216}\text{Po}$  έχει χρόνο υποδιπλασιασμού μικρότερο του 1 sec και έτσι η ισορροπία μεταξύ της συγκέντρωσης του αερίου και της δραστηριότητας στον ανιχνευτή επέρχεται άμεσα.

Για την οδήγηση του ρεύματος αέρα στο θάλαμο ιονισμού και την έξοδο του από το υδάτινο δείγμα χρησιμοποιείται η μετρητική διάταξη η οποία φαίνεται στην παρακάτω σχήμα 1.18.



**Σχήμα 1.15:** Σχέδιο μετρητικής διάταξης RTM1688-2 (Ι.Χ Κυρκιμτζή, 2013).

Η μετρητική διάταξη περιλαμβάνει το μετρητή RTM-1688-2 με την ενσωματωμένη αντλία. Ο μετρητής από την υποδοχή out συνδέεται διαμέσου ενός σωλήνα PVC με μια ειδική φιάλη όγκου 500ml (πλυντρίδα / Bubbler), η οποία με τη σειρά της επικοινωνεί (επίσης διαμέσου σωλήνα PVC) με μια φιάλη ασφαλείας 250ml, η οποία τελικά συνδέεται με τη συσκευή από υποδοχή in.

Η αντλία διοχετεύει ρεύματα αέρα στη φιάλη (Bubbler) στην οποία βρίσκεται το υγρό προκαλώντας εξαγωγή του ραδονίου μέσω ανάδευσης. Στη συνέχεια η ροή αυτή του αέρα, αφού περάσει από τη φιάλη ασφαλείας για την υγροποίηση τυχόν υδρατμών οδηγείται στο RTM1688-2.

*Τεχνικά Χαρακτηριστικά:*

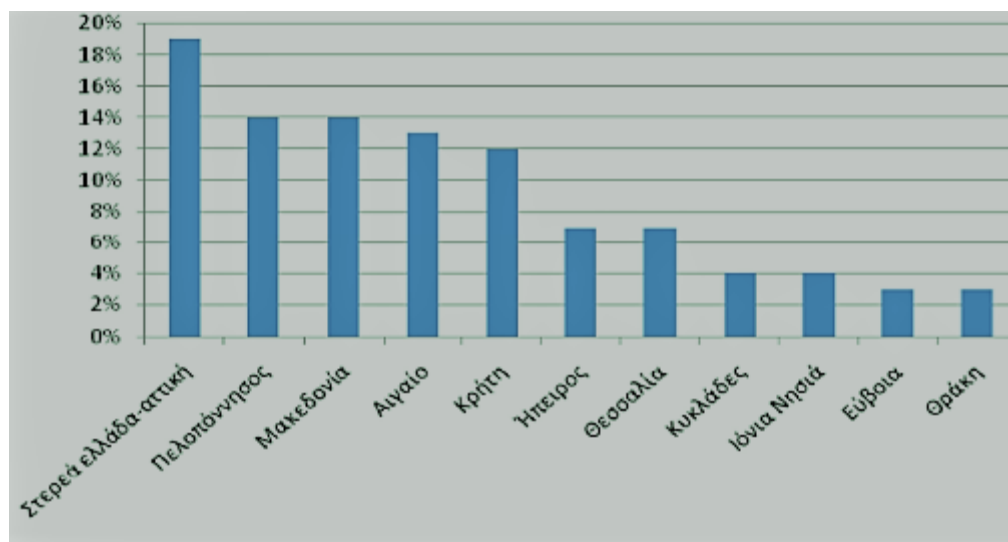
- Βάρος: 3,5 kg.
- Διαστάσεις : 232 mm (μήκος), 182 mm (πλάτος), 135 mm (ύψος).
- Ηλεκτρική παροχή: 18V/1A.
- Ανεξαρτησία λειτουργίας: >14 μέρες (ανά διαστήματα), >7 (συνεχής).

- *Ικανότητα αποθήκευσης δεδομένων: 511 αρχεία μετρήσεων.*
- *Εύρος μέτρησης ραδονίου – θορίου: 1 Bq/m<sup>3</sup>-10 MBq/m<sup>3</sup>.*
- *Ευσαιθησία: 3/7 μετρήσεις/λεπτό: 1000Bq/m<sup>3</sup> (Fast/Slow-Mode).*
- *200 Bq/m<sup>3</sup> με 10% στατιστικό σφάλμα, (1σ) σε διάστημα δειγματοληψίας 1h..*
- *10 Bq/m<sup>3</sup> με ένα 25% στατιστικό σφάλμα, (1σ) σε διάστημα δειγματοληψίας 4h.*
- *Συνθήκες λειτουργίας: Θερμοκρασία: -20°C-40°C.*
- *Υγρασία: 0-100%.*
- *Πίεση: 800mbar-1200mbar.*
- *Παροχή αντλίας: 0,3L/min ( I.X Κυρκιμτζή, 2013).*

### **1.17 Ιαματικές πηγές στην Ελλάδα**

Η ύπαρξη και η γεωγραφική κατανομή των ιαματικών πηγών συνδέονται με την έντονη τεκτονική δραστηριότητα του ελληνικού χώρου, που συχνά έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της γεωθερμικής βαθμίδας, καθώς και τη δημιουργία κατάλληλων διόδων διακίνησης των υπόγειων νερών από μεγάλα βάθη στην επιφάνεια (Σπαθή, 2000).

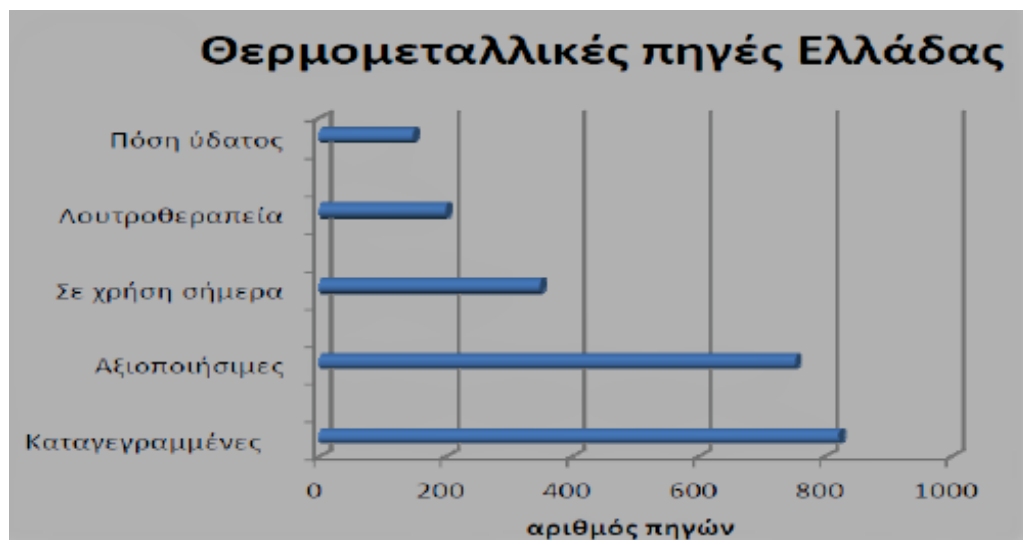
Τα λουτρά και τα ιαματικά νερά, βρίσκονται σε διάφορες περιοχές τη χώρας, γύρω από την παράκτια περιοχή, στο εσωτερικό αλλά και στα νησιά του Αιγαίου. Οι περισσότερες πηγές βρίσκονται στα νησιά (229), ακολουθεί η Στερεά Ελλάδα (156), η Μακεδονία (115), η Πελοπόννησος (114), η Θεσσαλία (57), η Ήπειρος (56) και η Θράκη (25), όπως φαίνεται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 1.16 (Γεωργιάδης, 2005).



**Σχήμα 1.16:** Ραβδόγραμμα κατανομής των ιαματικών πηγών, ανά περιφέρεια ή νομό.

Σύμφωνα με στοιχεία του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), οι καταγεγραμμένες πηγές θερμομεταλλικών νερών στην Ελλάδα ανέρχονται συνολικά σε 822, από τις οποίες οι 752 (91,5%) είναι αξιοποιήσιμες.

Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται περίπου 348 (42%) θερμομεταλλικές πηγές. Από αυτές οι 200 (57,5%) χρησιμοποιούνται για λουτροθεραπεία και οι 148 (42,5%) για πόση ύδατος, ενώ οι 20 χρησιμοποιούνται και για λουτροθεραπεία και για πόση ύδατος (ραβδόγραμμα σχήματος 1.17) (Σπαθή, 2000).



**Σχήμα 1.17:** Διάγραμμα σχετικά με την αξιοποίηση των ιαματικών πηγών στην Ελλάδα (Καραμολέγκου, 2012).

**Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί το γεγονός ότι, τα περισσότερα ιαματικά νερά είναι και ραδονούχα.** Η συγκέντρωση του ραδονίου μπορεί να ποικίλει, και κατά συνέπεια μερικά νερά να έχουν ιδιαίτερα δραστικό και ιαματικό χαρακτήρα έναντι κάποιων άλλων.

Στον Πίνακα 1.5 αναγράφονται ενδεικτικές τιμές ραδονίου σε διάφορα νερά στην Ελλάδα, ενώ στον Πίνακα 1.6 κατανέμονται διάφορες ραδιενεργές πηγές της Ελλάδας σύμφωνα με την ραδιενέργεια που έχει μετρηθεί σε παλαιότερες μονάδες Mache, σε ασθενείς, μέτριες και ισχυρές πηγές. Οι πηγές στον Άγιο Αντώνιο, οι οποίες και δεν συμπεριλαμβάνονται στις πηγές που αναφέρονται (στον Πίνακα 1.6), όπως θα δειχθεί στην συνέχεια έχουν αρκετά μεγάλη συγκέντρωση ραδονίου ικανή για την κατάταξη τους σε ραδιενεργές-ραδονούχες πηγές.

**Πίνακας 1.5:** Ενδεικτικές τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου σε νερά, στην Ελλάδα (Κυρκιμτζή, 2013).

Περιοχή	Συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Τιμή	Αναφορά	Παρατηρήσεις
Εφταλού – Λέσβος	230000	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Ιαματική πηγή
Πολυχνίτος- Λέσβος	160000	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al;	Ιαματική πηγή

			2004	
Ζωοδόχος Πηγή – Λέσβος	142500	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Πηγή (πόσιμο)
Καλλονή – Λέσβος	27900	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Θερμή πηγή
Λισβόρι	27000	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Ιαματική πηγή
Θερμή	29000	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Ιαματική πηγή
Άντισσα	15800	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Πηγή (πόσιμο)
Παναγιά Κρυφτή	14700	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Θερμή πηγή
Άργεννος	22100	AM <sup>1</sup>	Vogiannis et al; 2004	Θερμή πηγή
Λουτρά Γέρας	10000 – 16000	R <sup>4</sup>	Vogiannis et al; 2004	Θερμή πηγή
Σουρωτή – Θεσσαλονίκη	43461 ± 1046	AM <sup>1</sup>	Κασινάλης, 2008	Πηγή (πόσιμο)
Νέα Απολλωνία	101000	MT <sup>2</sup>	Savidou et al., 2001	Ιδιωτική βρύση
Νικομιδινό	13000	MT <sup>2</sup>	Savidou et al., 2001	Ιδιωτική βρύση
Λαγκαδίκια	8000	MT <sup>2</sup>	Savidou et al., 2001	Ιδιωτική βρύση
Σχολάρι	18000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Βασιλούδι	8000	MT <sup>2</sup>	Savidou et al., 2001	Ιδιωτική βρύση
Καβαλάρι	9000	Max <sup>4</sup>	Savvidou et al.,	Δημοτική



			2001	βρύση
Λαγινά	6000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Περιβολάκι	7000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Μεγάλη Βόλβη	12000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Λουτρά Βόλβης	10000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Ρέντινα	7000	Max <sup>4</sup>	Savidou et al., 2001	Δημοτική βρύση
Λουτράκι – Αττική	94000±64000	AM <sup>1</sup>	Nikolopoulos et al., 2010	Ιαματική πηγή
Λουτράκι – Αττική	192000±164000	AM <sup>1</sup>	Nikolopoulos et al., 2010	Πηγή
Αττική και Κρήτη	5400	AM <sup>1</sup>	Nikolopoulos et al., 2008	Πόσιμο νερό
Καμένα Βούρλα	90000 – 850000	R <sup>3</sup>	Kritidis et al., 1986	Θερμά λουτρά
Λουτρά Λαγκαδά	12000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Λουτρά Απολλωνίας	15000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Λαγκαδίκια	9300	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Στίβος	112000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Περιστερόνας	161000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Γερακαρού	19300	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό

			2002	
Απολλωνία	19000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Νέα Μάδυντος	14500	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Μόδι	10200	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Βαμβακιά	8000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Λουτρά Βόλβης	8000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Βαγιοχώρι	40000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Νυμφόπετρα	62000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Προφήτης	16000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Ευαγγελισμός	14300	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Ανάληψη	13000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Δρακοντιό	112000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Κολχικό	14000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Άγιος Βασίλειος	16000	MT <sup>2</sup>	Zouridakis et al., 2002	Πόσιμο νερό
Κορινθιακός (Αίγιο)	1000 – 10000	R <sup>3</sup>	Pizzino et al., 2004	Υπόγειο Νερό
Λουτρά Αιδηψός	500±80 - 1270±120	R <sup>3</sup>	Geranios et al.,	Ιαματικά νερά

			2004	από δεξαμενή νερού
Λουτρά Αιδηψός	40±30 - 680±90	R <sup>3</sup>	Geranios et al., 2004	Θερμή πηγή
Λουτρά Καϊάφα	3800±230	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Ιαματική πηγή
Καϊάφας Κλειδί	6300±420	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Πηγή
Λουτρά Κυλλήνης	1500±140	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Ιαματική πηγή
Βρομονέρι	13000±650	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Πηγή
Κουνουπέλι	4100±300	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Πηγή
Λουτρά Ηραίας	7900±480	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Ιαματική πηγή
Πηγή Πουρνάρι	15000±650	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Πηγή
Λουτρά Ξυλοκέρας	4000±390	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Ιαματική πηγή
Χειμαδιό	13000±640	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Γεώτρηση
Λουτρά Σελιανίτικων	2800±280	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Ιαματική πηγή
Απιδεώνας	4300±280	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Γεώτρηση
Πηγή Βρανάς	5600±450	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Πηγή
Καθολική Εκκλησία	5100±440	MT <sup>2</sup>	Στρατικόπουλος, 2007	Γεώτρηση

**Πίνακας 1.6:** Ραδονούχες πηγές στην Ελλάδα με συγκέντρωση ραδονίου σε παλαιότερες μονάδες Mache (Καστανιάς, 2003), με κίτρινο χρώμα τονίζονται οι ασθενείς πηγές (έπειτα απο μετατροπή σε bq/m<sup>3</sup>), με πράσινο οι μέτριες και με κόκκινο οι ισχυρές.

Ονομασία ιαματικής πηγής	Τοποθεσία	Ραδιενεργός συγκέντρωση (Mache)	bq/m <sup>3</sup>
<b>Ασθενείς</b>			197715
Ευθαλούς	Λέσβος	14,7	151985
Ε.Ο.Τ.	Λουτράκι	11,3	96840
Πόσιμου Ύδατος	Σουρωτή	7,2	95495
Πόσιμου Ύδατος	Νιγρίτα	7,1	87425
Αθάνατο νερό	Ικαρία	6,5	87425
Σπηλαιού	Ικαρία	6,5	80700
Πολυχνίτου	Λέσβος	6	71285
Τραϊανουπόλεως	Φέρρες	5,3	57835
Βυζαντινού Λουτήρος	Ν.Απολλωνίας	4,3	55145
Κακκάβου	Κύθνος	4,1	1116350
<b>Μέτριες</b>			780100
Παμφύλη	Ικαρία	83	699400
Θέρμες Σύλλα	Αιδηψός	58	403500
Αγ. Κυριακής	Ικαρία	50-54	416950
Αγ. Κυριακής Β'	Ικαρία	28-32	336250
Δήμου	Λουτράκι	31	10141300
Αγ. Αναργύρων	Κύθνος	25	7007450
<b>Ισχυρές</b>			4967085
Αρτέμιδος	Ικαρία	754	4681945
Απόλλωνος	Ικαρία	521	3776760
Μουσταφά Λίτζα (Ασκληπιός)	Ικαρία	369,3	2918650
Μεταζά	Κ. Βούρλα	348,1	
Παπαστράτου	Κ. Βούρλα	280,8	
Κράτσα	Ικαρία	217	

### 1.18 Θετικά του Ραδονίου

Το ραδόνιο εισέρχεται στον οργανισμό μέσω της αναπνευστικής οδού, την ίδια στιγμή η είσοδος του ραδονίου στον οργανισμό σπάνια συνδέεται με βλάβες στους πνεύμονες, λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής (ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η ποσότητα του ραδονίου στο μισό) και των χαρακτηριστικών του ως αδρανές αέριο. Ως εκ τούτου μόνο ένα

πολύ μικρό μέρος της ποσότητας του ραδονίου που εισέρχεται στους πνεύμονες προλαβαίνει να διασπαστεί πριν απομακρυνθεί από τον οργανισμό μέσω της εκπνοής. Ωστόσο, τα τέσσερα θυγατρικά του ραδονίου ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Po}$ ) έχουν συνδεθεί με την αύξηση του κινδύνου για ανάπτυξη καρκίνου του πνεύμονα σε άτομα που εκτίθενται σε αυτά. Επιπρόσθετα, η έκθεση των παιδιών στο ραδόνιο έχει συσχετισθεί με την επίπτωση τη λευχαιμίας, ενώ ο κίνδυνος για την υγεία κυμαίνεται στο 0.4%. **Ο κίνδυνος συσχετίζεται με την χρονική διάρκεια της έκθεσης και με το επίπεδο συγκέντρωσης του ραδονίου στο οποίο εκτίθενται τα άτομα.** Η δράση των θυγατρικών οφείλεται στην ικανότητα τους να προσκολλώνται σε αιωρούμενα σωματίδια τα οποία με την εισπνοή εισέρχονται στους πνεύμονες και επικάθονται στο πνευμονικό επιθήλιο. Στη συνέχεια τα θυγατρικά διασπώνται μέσα στους πνεύμονες και εκπέμπουν κυρίως άλφα σωματίδια τα οποία μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στις ευαίσθητες κυψελίδες αυξάνοντας την πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ραδιενεργές λέγονται οι πηγές των οποίων το νερό περιέχει ραδιενεργά στοιχεία. Ένα στοιχείο ονομάζεται ραδιενεργό όταν, με σταθερούς ρυθμούς στο χρόνο, χάνει σωματίδια (πρωτόνια-νετρόνιο κ.τ.λ) και εκλύει ενέργεια, μεταπίπτοντας σε ένα άλλο στοιχείο. **Για παράδειγμα ένα κιλό ράδιο (Ra) σε 1.600 χρόνια έχει μείνει το μισό, ενώ το άλλο μισό έχει γίνει μόλυβδος (Pb).** Τα κύρια φυσικά ραδιενεργά στοιχεία όπως έχει αναφερθεί, είναι το κάλιο, το ουράνιο, το θόριο, το ράδιο και το ραδόνιο. Όλα είναι στερεά, εκτός από το τελευταίο που είναι αέριο, και όλα είναι σχετικά ευδιάλυτα στο νερό. **Μια θεραπευτική πηγή οφείλει τη δράση της στη μεταστοιχείωση του ραδίου, και κυρίως στο ραδόνιο, ενώ σε δεύτερη φάση στα ραδιενεργά στοιχεία, τα οποία «εμπλουτίζουν» το νερό μέσα από τα πετρώματα που περνάει μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια.** Τα μεταλλικά νερά της Ελλάδας όλα σχεδόν είναι συγχρόνως και ραδιενεργά. Αποτελεί σπάνια εξαίρεση μεταλλική πηγή να μην παρουσιάζει ασθενή ραδιενέργεια. Όταν το επίπεδο της ραδιενέργειας εξακριβωθεί (με μετρήσεις σε Bq/L), η ιαματική πηγή χαρακτηρίζεται επίσημα ραδιενεργή, και άρα εντάσσεται αυτόματα στις ραδιενεργές ιαματικές πηγές, που έχουν θεραπευτικό αποτέλεσμα λόγω της σύστασης αυτής (Μ. Καρόγιαννη, 2013 [πηγή](#)). Το ραδόνιο εισέρχεται στο σώμα είτε από την αναπνευστική οδό είτε από το δέρμα. **Από το δέρμα εισέρχεται μικρή ποσότητα ραδονίου και παραμένει αυτό 1-2 ώρες μετά το λουτρό.** Το ραδόνιο που εισέρχεται στον οργανισμό από την αναπνευστική οδό κατά την διάρκεια του λουτρού, διαχέεται εντός 15' στο αίμα και από εκεί στους ιστούς. Το ραδόνιο εισπνεόμενο ή

προσροφόμενο από το δέρμα φθάνει λόγω της διαλυτότητάς του στα λιποειδή των νεύρων επιδρώντας ιδιαίτερα ευεργετικά στις νευρίτιδες και νευραλγίες.

Σύμφωνα με τον **Dr.Αθανάσιο Α.Σαρακιώτη** (Ιατρός –Ρευματολόγος, Διδάκτωρ Ιατρικής Πανεπιστημίου Μονάχου, Ιατρός Ρευματολογικής Κλινικής Ασκληπιδείου Βούλας), ο οποίος με συγγράματά του έθεσε τη θεραπευτική δράση του χημικού παράγοντα του μεταλλικού νερού, μια εμπειρική γνώση από αρχαιότατους χρόνους, σε σύγχρονη επιστημονική βάση: **“Η ραδιενέργεια που έχουν οι ελληνικές ιαματικές πηγές δεν είναι επικίνδυνη, καθώς οφείλεται αποκλειστικά στο ραδόνιο, και όχι σε άλατα ραδίου”**.

Ο φυσικοθεραπευτής **Φραντζέσκος Φραντζής**, συγγραφέας του βιβλίου ‘Οι Ιαματικές Θερμομεταλλικές Ραδιούχες Πηγές Ικαρίας’, επίσης, συμπληρώνει ότι ο τρόπος χρήσης των υδάτων μειώνει αισθητά το ποσόν της ραδιενέργειας. Από το δέρμα (μέσω των εξωτερικών λούσεων δηλαδή) μπορεί να εισέλθει μόνο μικρή ποσότητα ραδονίου, η οποία και παραμένει μόλις για μία-δύο ώρες μετά το λουτρό. Αυτό μάλιστα συμβαίνει κυρίως σε υπέρθερμα λουτρά, όπως αυτά της Ικαρίας για παράδειγμα, και λιγότερο σε ψυχρά μεταλλικά, όπως αυτά στο Λουτράκι Κορινθίας.

Ο **δρ. Ζήσης Αγγελίδης**, υδρογεωλόγος, συμφωνεί ότι το ραδόνιο των ιαματικών πηγών απορροφάται ελάχιστα από τον ανθρώπινο οργανισμό, και δεν διαπιστώνει κίνδυνο από τα λουτρά σε ραδιενεργές πηγές.

Ο **κος Γιώργος Βουγιουκλάκης**, Γεωλόγος του **ΙΓΜΕ**, ο οποίος κλήθηκε να απαντήσει στο αν οι ραδιενεργές πηγές είναι επικίνδυνες για το λουδόμενο, ανέφερε τα εξής: ‘Ο κίνδυνος από τη χρήση νερού βεβαρημένου σε ραδιενεργά στοιχεία μπορεί να είναι σοβαρός. Όμως η συντριπτική πλειοψηφία των θερμοπηγών της χώρας μας, και το σύνολο όσων λειτουργούν επίσημα, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε τέτοια στοιχεία και δεν υπάρχει κίνδυνος για την υγεία των χρηστών. Είναι ορθό βέβαια να γίνονται περιοδικά ανλύσεις του νερού και να παρακολουθείται η σύστασή του, ώστε να μην υπάρχει καμιά ανησυχία (Μ. Καρόγιαννη, 2013).

Σχετικά ωστόσο με τους κινδύνους λόγω ραδιενέργειας στην καθημερινή μας ζωή:

**Οι ραδιενεργές ιονίζουσες ακτινοβολίες, όπως αυτές που συναντούμε στις ελληνικές Ιαματικές Πηγές, υπήρχαν πάντοτε κατά την εξέλιξη του ανθρωπίνου είδους. Αντίθετα, οι μη ιονίζουσες ακτινοβολίες (από το ηλεκτρικό δίκτυο, τις κεραίες κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα τηλέφωνα, WiFi κλπ) είναι επί το πλείστον τεχνητές και έχουν εισαχθεί πολύ πρόσφατα στο περιβάλλον, ενώ σύμφωνα με μερίδα επιστημόνων πολύ χαμηλά επίπεδα έκθεσης σε μη ιονίζουσες**

ακτινοβολίες μπορούν μακροπρόθεσμα να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, μέσω πολλών βιολογικών μηχανισμών που δεν έχουν σχέση με τον ιονισμό. Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από την κάθε μορφή ραδιενέργειας εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το είδος της ραδιενέργειας, την ενεργό δόση ραδιενέργειας, τον ρυθμό της ενεργού δόσης, τον χρόνο έκθεσης, από το αν η έκθεση είναι εξωτερική ή εσωτερική, αλλά και από τον χρόνο εξασθένησης του κάθε ραδιενεργού στοιχείου. **Η ραδιενέργεια λόγω του ραδονίου, ενεργοποιεί την παραγωγή ελευθέρων ριζών στα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος και μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην δομή των χρωμοσωμάτων και της κυτταρικής μεμβράνης (μηχανισμοί που σχετίζονται με την ανάπτυξη καρκίνου). Ωστόσο, ο άνθρωπος ήταν πάντοτε εκτεθειμένος σε ραδιενέργεια από το φυσικό περιβάλλον και ραδιενεργές εξασθενήσεις γίνονται συνέχεια στο ανθρώπινο σώμα, γεγονός που σημαίνει ότι έχει αναπτύξει κάποιους μηχανισμούς προσαρμογής σε αυτή.** Όπως αναφέρει και η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (UNSCEAR) **«Η βλάβη από τη ραδιενέργεια συνήθως θα επισκευαστεί από αυτές τις κανονικές διαδικασίες επισκευής κυττάρων».** Μερίδα επιστημόνων υποστηρίζει ότι η βλάβη στα κύτταρα που προκαλεί η ιονίζουσα ακτινοβολία, όταν είναι ελεγχόμενη, μπορεί να ενισχύσει τον οργανισμό, όπως ακριβώς γίνεται με την παραγωγή ελευθέρων ριζών ή και τη περιορισμένη φλεγμονή κατά τη διάρκεια της φυσικής άσκησης.

Εκεί που συγκλίνουν οι επιστημονικές απόψεις για την **ραδιενέργεια και το ραδόνιο**, είναι η θεωρία **«Radiation Hormesis»**, δηλαδή **λίγη ραδιενέργεια κάνει καλό**. Μερίδα επιστημόνων, επικαλούμενη την θεωρία Hormesis υποστηρίζει ότι η ραδιενέργεια μπορεί να έχει και ενισχυτική για τον ανθρώπινο οργανισμό επίδραση. Σύμφωνα με την Hormesis (από την ελληνική λέξη ορμή), οι αρνητικές επιπτώσεις από τοξικές ουσίες και ραδιενέργεια δεν είναι γραμμικώς ανάλογες με την ποσότητα της έκθεσης. **Συγκεκριμένες δόσεις είναι ωφέλιμες για τον οργανισμό αφού προκαλούν την διέγερση όλων των συστημάτων του οργανισμού για την επιδιόρθωση των προσωρινών βλαβών.** Συγκεκριμένα η περιοδική έκθεση σε μικρές ή μεσαίες δόσεις ραδιενέργειας (Radiation Hormesis):

- Προκαλεί ελεγχόμενες βλάβες στο DNA** οι οποίες διεγείρουν το ανοσοποιητικό σύστημα και τους μηχανισμούς επιδιόρθωσης του γενετικού υλικού.

•**Αναζωογονεί τα κύτταρα**, ενεργοποιεί σημαντικά ένζυμα βοηθώντας στην ρύθμιση του στρες και καταστέλλει τον καρκίνο, την υπέρταση και το διαβήτη.

•Αποτελεί **άσκηση για το ανοσοποιητικό σύστημα**. «Είναι σαν να κάνουμε push ups» αναφέρει χαρακτηριστικά ο καθηγητής πυρηνικής μηχανικής του πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης Gilbert Brown.

•Βελτιώνει σημαντικά τα ποσοστά επιβίωσης πειραματόζωων από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Αντίστοιχα, **οι κάτοικοι φυσικά ραδιενεργών περιοχών παρουσιάζουν τις μισές χρωμοσωματικές ανωμαλίες από τους υπόλοιπους όταν δεχτούν υψηλή δόση ακτινοβολίας**.

•Είναι **απαραίτητη για την φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού**, όπως οι βιταμίνες και τα μέταλλα, σύμφωνα με τον ερευνητή Δρ. Luckey. Ο ίδιος θεωρεί ότι ο σύγχρονος άνθρωπος με τη λιγοστή του επαφή με τον ήλιο και τη φύση υποφέρει από «έλλειψη ραδιενέργειας».

•Ήταν πολύ διαδεδομένη στις αρχές του 20ου αιώνα στην ιατρική κοινότητα. Ο Αμερικανικός Ιατρικός Σύλλογος είχε προωθήσει τη χρήση ραδιενεργού ράδιου σε διάφορες θεραπείες. Το νερό με ράδιο πουλιόταν σαν ελιξίριο υγείας.

•Χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση διαφόρων συμπτωμάτων με την τοποθέτηση ραδιενεργών πετρωμάτων σε διάφορα σημεία του σώματος σε εναλλακτικές ιατρικές μεθόδους.

•Εφαρμόζεται σε ολόκληρο το σώμα σαν εναλλακτική **θεραπεία για τον καρκίνο**. Έχει μάλιστα ενισχυτική επίδραση στον οργανισμό, σε αντίθεση με την υψηλότερη έντασης ιονίζουσα ακτινοβολία που χρησιμοποιείται τοπικά στις συνηθισμένες ακτινοθεραπείες και έχει πολλές παρενέργειες.

•Χρησιμοποιείται για τη **θεραπεία αρθρίτιδας, άσθματος, και πληθώρας άλλων ασθενειών**, σε δεκάδες ιαματικά λουτρά ραδιενεργού ραδονίου (radon spas) σε όλο τον κόσμο (στην Ελλάδα: στα Καμένα Βούρλα, την Ικαρία κ.α.) (Βογιάννης, 2005; [6], [7], [8], [9], [10]).

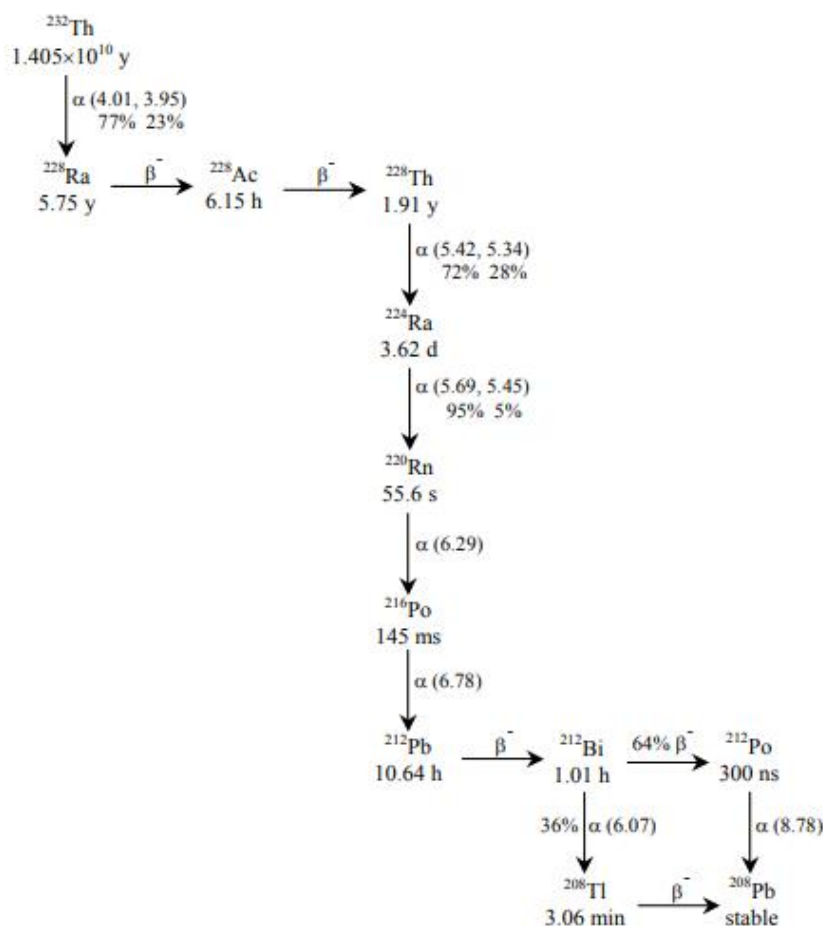
Κλείνοντας είναι καλό να επισημανθούν τα λόγια Ιπποκράτη τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. «**Η φύση είναι ο ιατρός των ασθενειών μας**». Εδώ μπορεί να κατανοήσει κανείς την βαρύτητα της έρευνας, μελέτης και αναγνώρισης ιαματικών πηγών ιδιαίτερα στην Κρήτη όπου δεν υπάρχουν πολυάριθμες αναφορές, σε μια εποχή που συνάδει με την απομάκρυνση του ανθρώπου από το φυσικό του περιβάλλον και τις «βοήθειες» που αυτό του παρέχει.



### 1.19 Λίγα λόγια για το Θορόνιο $^{220}\text{Rn}$

Το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στρέφεται, πέραν από τη παρουσία του ραδονίου και στην παρουσία του θορονίου. Αυτό γιατί, τα δείγματα που συλλέχθηκαν αναλύθηκαν σε ότι αφορά την περιεκτικότητα του νερού και σε θορόνιο. Το θορόνιο ( $^{220}\text{Rn}$ ) ανακαλύφθηκε από τον R.B. Owens στο πανεπιστήμιο McGill, σε συνεργασία με τον Ernest Rutherford (Ramachandran T.V., 2010). Όπως ήδη έχει αναφερθεί, έχει χρόνο ημιζωής 55,6 δευτερόλεπτα, είναι ένα από τα ραδιενεργά ισότοπα του (ευγενούς αερίου) ραδονίου (Rn) όπως είναι και το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) και το ακτινόνιο ( $^{219}\text{Rn}$ ). Το θορόνιο λοιπόν είναι και αυτό μέρος μιας ραδιενεργής σειράς αποσύνθεσης, όπως το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) που ξεκινάει από το «μητρικό» του ουράνιο ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$ ), έτσι και το θορόνιο ( $^{220}\text{Rn}$ ) προέρχεται από την σειρά αποσύνθεσης-διάσπασης του θορίου ( $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn}$ ) όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.18. Η ύπαρξη θορονίου ( $^{220}\text{Rn}$ ) στο νερό υποδεικνύει ότι η πηγή του, δηλαδή το ράδιο ( $^{224}\text{Ra}$ ) είναι πολύ κοντά, καθώς ο χρόνος ημίσειας ζωής του δεν του επιτρέπει να απομακρυνθεί πριν να διασπαστεί. Επίσης, η παρουσία και η εκροή θορονίου στο νερό καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτό εμφανίζεται ως θυγατρικό του  $^{224}\text{Ra}$  δεν έχει διασαφηνιστεί, ωστόσο υπάρχουν δύο υποθέσεις πάνω σε αυτό το σημείο. Η πρώτη υπόθεση έχει να κάνει με την χαμηλή διαλυτότητα των μητρικών του θορονίου σε υπόγεια ύδατα, με συγκέντρωση οξυγόνου μεγαλύτερη από 0.5mg/L (oxic water). Εδώ, το θόριο ( $^{232}\text{Th}$ ) και τα θυγατρικά του ραδιονουκλίδια, θα παραμείνουν σχεδόν στις ίδιες θέσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα (με τα μητρικά τους). Στην περίπτωση αυτή, η συγκέντρωση του θορονίου στο υπόγειο νερό εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο είναι κατανεμημένα τα «προγονικά» του στοιχεία στα πετρώματα του υδροφόρου ορίζοντα (πρωτογενής εκροή ή “primary emanation”) (Huxol S., 2009). Η δεύτερη υπόθεση αφορά την αυξημένη κινητικότητα των ισοτόπων του ραδίου, των μητρικών δηλαδή του ραδονίου  $^{222}\text{Rn}$  και θορονίου  $^{220}\text{Rn}$ , σε «ανοξικά» υπόγεια ύδατα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Εάν το νερό μιας πηγής, όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μικρότερη από 0.5mg/L (anoxic water), έρθει σε επαφή με οξυγόνο, το Ra τείνει να συσσωματωθεί με οξείδιο ή υδροξείδιο Mg ή Fe, και στην συνέχεια συγκαταβυθίζεται και συσσωρεύεται ως επιφανειακή επικάλυψη. Έπειτα με την διάσπαση του  $^{224}\text{Ra}$  εμφανίζεται το θορόνιο στο νερό (δευτερογενής εκροή ή “secondary emanation”) (Huxol S., 2009). Μετά από πολυάριθμες έρευνες και μετρήσεις θορονίου, διαπιστώθηκε ότι η μέτρηση της συγκέντρωσης του είναι εφικτή, όμως μόνο σε ανοξικά υπόγεια ύδατα. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι,

περίπου το 10% του θορονίου που εμφανίζεται, προέρχεται από άμμο, πηλό και άργιλο που παράγεται από την διάβρωση του γρανίτη. Δεδομένου λοιπόν, ότι το θορόνιο και τα θυγατρικά του νουκλίδια δεν διαλύονται εύκολα σε νερό με μέσο pH, και δεν έχουν μεγάλους χρόνους ημιζωής (είναι βραχύβια), η χημική έκλυση και η καθίζηση του θορονίου καθώς και των θυγατρικών του νουκλιδίων είναι μικρότερης σημασίας από αυτή του ραδονίου (Ε. Οικονομόπουλος, 2008).



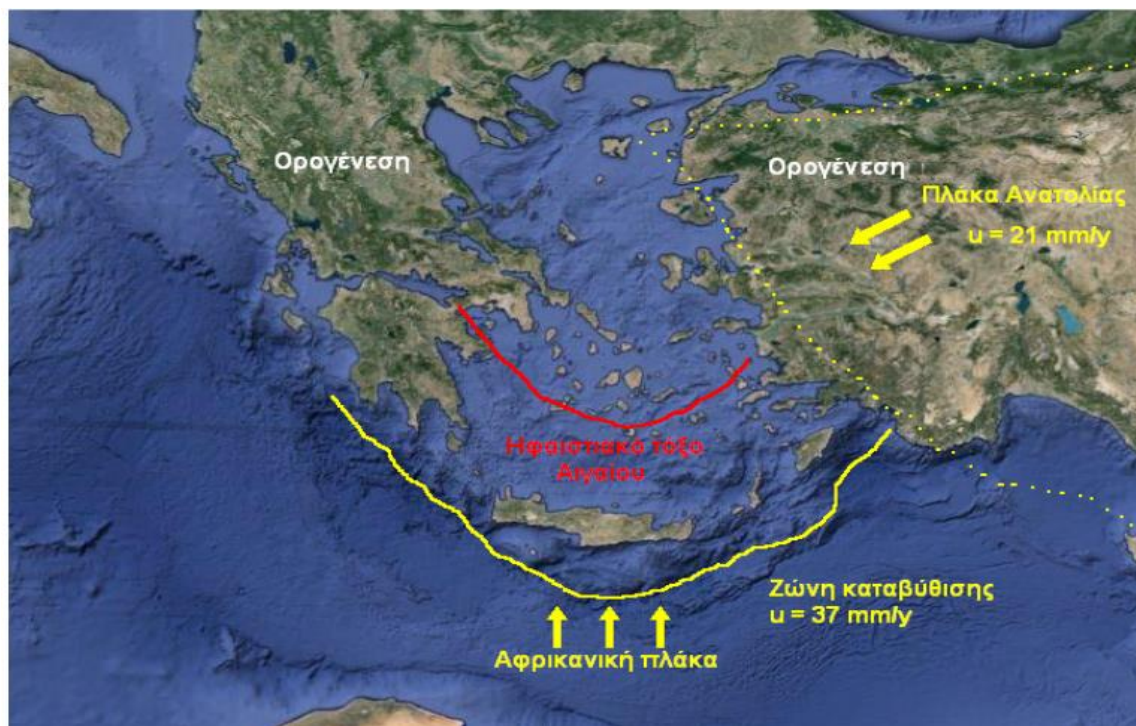
**Σχήμα 1.18:** Σειρά αποσύνθεσης του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ), οι χρόνοι ημιζωής κάθε ραδιονουκλιδίου και οι εκπεμπόμενη ραδιενέργεια (Fleischer, 1997).

## **Κεφάλαιο 2: Γεωλογία-Υδρογεωλογία**

### **2.1 Γεωλογία Κρήτης**

Οι παράγοντες που έχουν συντελέσει στη διαμόρφωση του έντονου ανάγλυφου του γεωγραφικού χώρου της Κρήτης, είναι η δράση του νερού και του αέρα, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ένταση των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με τη γεωλογία και την τεκτονική της περιοχής.

Πρέπει ωστόσο να τονιστεί, ότι μετά τη λήξη της Αλπικής ορογένεσης και τη δημιουργία των Ελληνίδων ζωνών, κατά το Μέσο Μειόκαινο ξεκινά στον ελλαδικό χώρο μια νεοτεκτονική δράση. Η σημερινή μορφή του χερσαίου και θαλάσσιου ελληνικού χώρου διαμορφώθηκε από τη νεοτεκτονική αυτή δράση. Οι τεκτονικές διεργασίες που έλαβαν χώρα σχετίζονται με τη δημιουργία του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου. Το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο δημιουργείται λόγω της σύγκρουσης της Ευρασιατικής πλάκας και της Αφρικανικής πλάκας (εικόνα 2.1). Ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης των δύο πλακών είναι να υποστεί ο ελλαδικός χώρος διάφορες τεκτονικές φάσεις συμπίεσης και εφελκυσμού με συνέπεια τη διάρρηξη του σε ένα πολλαπλό σύστημα ρηγμάτων. Συνέπεια των διαρρήξεων είναι η πολλαπλή εισβολή της θάλασσας και η απόθεση Νεογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων. Επίσης απόθεση χερσαίων ιζημάτων έλαβε χώρα στις περιοχές απόσυρσης της θάλασσας, σε όλες τις περιοχές των Ελληνίδων.



**Εικόνα 2.1:** Σύγκλιση της Αφρικανικής πλάκας με τις δευτερεύουσες πλάκες του Αιγαίου και της Ανατολίας της Ευρασιατικής πλάκας.

Συνεπώς συναντώνται διάφορες φάσεις Νεογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων που δηλώνουν διαφορετικά περιβάλλοντα απόθεσης, όπως θαλάσσια (κροκαλοπαγή-λατυποπαγή-ψαμμίτες-μάργες), λιμναία-λιμνοθαλάσσια (οργανικά ιζήματα, όπου υπήρχαν έλη), ποτάμια και χερσαία ιζήματα (κροκαλοπαγή-ψαμμίτες). Τα κύρια θαλάσσια ιζήματα Νεογενούς-Τεταρτογενούς είναι κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, ψαμμίτες και μάργες. Ανάλογα είναι και τα λιμναία ιζήματα, με τη διαφορά ότι σε αυτά παρατηρούνται και οργανικά ιζήματα, όπου υπήρχαν έλη, ενώ και στα δύο είδη ιζημάτων τα πιο συνήθη είναι τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμίτες.

Η Κρήτη βρίσκεται στο εξωτερικό τόξο, πάνω στην ζώνη καταβύθισης της αφρικανικής πλάκας. Αποτελείται από ένα εξαιρετικά ορεινό τοπίο λόγω της νέας και γρήγορης ανύψωσης που ενισχύεται από τις θαλάσσιες αποθέσεις του Νεογενούς και του Ανώτερου Πλειόκενου που έχουν υψωθεί ως και αρκετές εκατοντάδες μέτρα πάνω από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας. Στον γεωγραφικό χώρο της Κρήτης παρατηρείται μεγάλος αριθμός ρηγμάτων ως αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας.

Η Κρήτη στο έυρος της συγκροτείται από την κατώτερη τεκτονική ενότητα που περιλαμβάνει την μεταμορφωμένη ομάδα των πλακώδων ασβεστολίθων (αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων με ηλικία από το Άνω Πέρμιο έως Ολιγόκαινο). Με τεκτονική επαφή ακολουθεί ένα σύστημα (αλλόχθονο) επωθημένο πάνω στο ήδη υπάρχον (αυτόχθονο ή παραυτόχθονο), υπό την μορφή αλληπάλλληλων τεκτονικών καλυμμάτων αλπικών ενοτήτων, και με λεπιοειδή διάταξη.

Επιπλέον, οι **Εξωτερικές Ελληνίδες** οι οποίες είναι το δυτικό- νοτιότερο τμήμα της Ελληνικής Ορογενετικής ζώνης (Hellenic Orogenic Belt), εκτείνονται από την Βορειοδυτική Ελλάδα προς την Πελοπόννησο, την Κρήτη, Κάσο, Κάρπαθο και Ρόδο. Οι Εξωτερικές Ελληνίδες αποτελούνται κυρίως από τεκτονικά καλύμματα διαφορετικής παλαιογεωγραφικής προέλευσης και λιθολογίας, που επωθήθηκαν στο μεν βόρειο τμήμα τους προς τα δυτικά, πάνω στις ιζηματολογικές ακολουθίες της Ζώνης Παξών, νοτιότερα δε πάνω στα μεταμορφωμένα πετρώματα την Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, κατά την διάρκεια της συμπίεστικής τεκτονικής του Ολιγοκαίνου/Κάτω Μειοκαίνου.

Στο παλαιογεωγραφικό χώρο των εξωτερικών ζωνών των Εξωτερικών Ελληνίδων και ειδικότερα στις ζώνες Παξών και Ιονίου, πάνω από την εβαποριτική ακολουθία ακολούθησε μεγάλου πάχους ανθρακική ιζηματογένεση με παρεμβολές κερατολίθων και μικρού πάχους κλαστικών σχηματισμών, μέχρι την έναρξη της απόθεσης του φλύσχη κατά το Τριτογενές. Τα πετρώματα των δύο αυτών ισοπικών ζωνών εμφανίζονται σε μια ορεογραφική - χωρική διάταξη από τα βόρεια σύνορα της χώρας μέχρι την Κεντρική Πελοπόννησο. Νοτιότερα εμφανίζονται αντ' αυτών τα μεταμορφωμένα πετρώματα των Εξωτερικών Ελληνίδων (σχήμα 2.2).

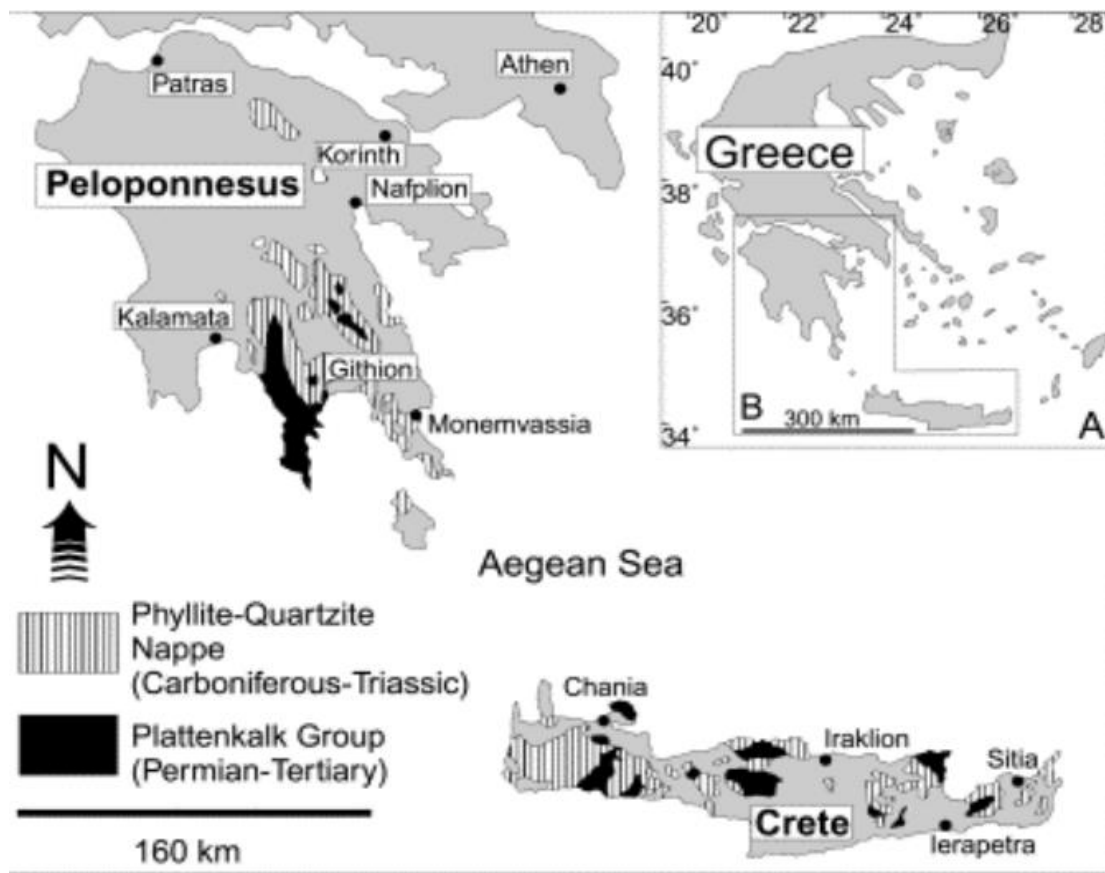
Ειδικότερα στην Νότιο Πελοπόννησο και Κρήτη παρατηρείται η ακόλουθη σειρά από την κορυφή προς την βάση της τεκτονικής επαλληλίας (σχήμα 2.2 και 2.3).

- ❖ Κάλυμμα της Τρίπολης, κυρίως ρηχά ανθρακικά του Τριαδικού ως Τριτογενούς
- ❖ Το Φυλλιτικό Κάλυμμα μια σύνθετη ενότητα που περιλαμβάνει και την **Ενότητα Τρυπαλίου**,
- ❖ Ομάδα Πλακωδών Ασβεστολίθων, παραυτόχθονη ομάδα, δύο κλαστικές ακολουθίες στην βάση και την οροφή που περικλείουν ανθρακικά με κερατολίθους, Πέρμιο έως Ολιγόκαινο

Η παραπάνω εν συντομία ανάλυση της γεωλογίας της Κρήτης απεικονίζεται στον χάρτη του σχήματος 2.2 και σχήματος 2.3.



**Σχήμα 2.2:** Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. Με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις απεικονίζονται οι λεκάνες Νεογενούς και του Τεταρτογενούς περιόδου (Μπορνόβας κ.α., 1983).



**Σχήμα 2.3:** Οι εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων (Plattenkalk Group) και του Φυλλιτικού Καλύμματος (Phyllite Nappe) στην Πελοπόννησο και Κρήτη (Dornsiepen et al., 2001).

Οι παραπάνω ενότητες καλύπτονται με καλύμματα των **Εσωτερικών ενοτήτων**, που είναι τα εξής: Οφιολιθικό σύμπλεγμα (melange), υπολείμματα από τον Ιουρασικό ωκεάνιο φλοιό, ιζήματα βαθιάς θάλασσας, πετρώματα υψηλής μεταμόρφωσης του Πελαγονικού καλύμματος, κυρίως πυριτικά κλαστικά και ανθρακικά ρηχής θάλασσας του Περμίου ως Μεσοζωϊκού, μερικώς μεταμορφωμένο κάλυμμα Πίνδου-Εθιάς, κυρίως ιζήματα βαθιάς θάλασσας του Τριαδικού ως Τριτογενούς.

## 2.2 Ιστορική αναδρομή

Από το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα έχουν περιγραφεί στην Κρήτη πετρώματα διαφόρου λιθολογίας, παλαιογεωγραφικής προέλευσης και βαθμών μεταμόρφωσης. Ο Paulin (1869) περιέγραψε τους "ημι-μεταμορφωμένους ταλκικούς σχιστολίθους", ο Cayeux (1902) την "μεταμορφωμένη σειρά της Δυτικής Κρήτης", ο Wurm (1950) το "μεταμορφωσιγενές της Κρήτης" οι Papastamatiou και

Reichel (1956) τους "Φυλλίτες". Στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Ε.Υ "Χανιά" και "Καστέλι" (1960) σημειώνονται "κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι", οι Aubouin και Dercourt (1965) μιλούν για φάσεις Κακόπετρου και Σκλαβοπούλας, οι Creutzburg και Papastamatiou (1966) για "μεταμορφωμένους σχιστολίθους, ο Seidel (1968), Creutzburg & Seidel (1975), Sanneman & Seidel (1976), Wachendorf et al., (1980) μιλούν για «σειρά Φυλλιτών-Χαλαζιτών» οι Bonneau (1973), Kuss & Thorbecke (1974) για "Φυλλίτες της Τρίπολης", ο Thorbecke (1974) για "σχηματισμό Φυλλιτών", οι Wachendorf et al., (1974), οι Kopp & Ott (1977) για "σειρά Φυλλιτών", οι Sanneman & Seidel (1976), οι Kopp & Ott (1977) για "στρώματα Ραβδούχων", οι Bauman et al., (1978) για "Φυλλιτική σειρά", ο Φυτρολάκης (1980) για "αργίλοσχιστολιθική σειρά ενότητας Τρίπολης", "ενότητα φυλλιτών-χαλαζιτών", "Φυλλίτες ενότητας Τρυπαλίου", οι Krahel et al., (1981) για "ομάδα φυλλιτών-χαλαζιτών", οι Seidel et al., (1982) για "ενότητα Φυλλιτών- Χαλαζιτών", και οι Dorsiepen & Manutsoglu (1988) για «Φυλλιτικό Κάλυμμα».

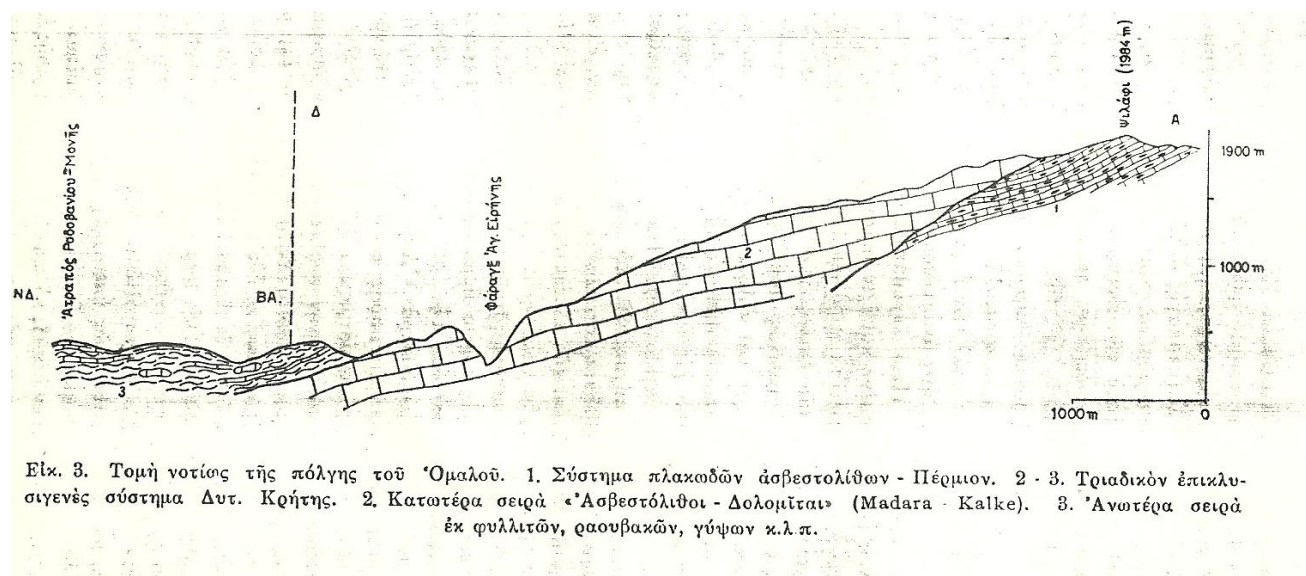
Με τις διαφορετικές αυτές ονοματολογίες, οι παραπάνω συγγραφείς περιέγραψαν ένα σύνολο μεταμορφωμένων πετρωμάτων ή ένα τμήμα του συνόλου αυτού, που παρεμβάλλεται μεταξύ του καλύμματος της Τρίπολης και της «ενότητας Κρήτης-Μάνης» (Plattenkalk) **ή της ενότητας Τρυπαλίου**. Είναι επόμενο τα πολλά ονόματα να έχουν προκαλέσει μια σύγχυση όσον αφορά το περιεχόμενο του όρου "φυλλίτες-χαλαζίτες" και την σύνδεσή τους με τη ανθρακική τεκτονική μεταμορφωμένη ενότητα Τρυπαλίου. Μια σύγχυση που γίνεται μεγαλύτερη όταν στο μεταμορφωμένο και πολυφασικά τεκτονισμένο αυτό σύνολο πετρωμάτων, στο οποίο δεν υπάρχουν αρκετά στρωματογραφικά δεδομένα **προσπαθήσει κανείς να χωροθετήσει ένα τμήμα του μεταμορφωμένου αυτού συστήματος χωρίς ουσιαστική συνδρομή από απολιθώματα στηριζόμενος μόνο σε λιθοστρωματογραφικά κρητήρια**.

### **2.3 Γεωλογικό περίγραμμα της περιοχής του Αγίου Αντωνίου**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην Κρήτη και κυρίως στην **κεντροδυτική Κρήτη** (όπως την περιοχή του Αγίου Αντωνίου την οποία μελετάμε), η ενότητα του **Τρυπαλίου**. Η ενότητα αυτή, βρίσκεται πάντοτε επωθημένη πάνω σε σχηματισμούς της Ενότητας των Plattenkalk. Πρόκειται για την Ενότητα που ο N. CREUTSBURG είχε ονομάσει, παλιότερα (1928), «Madarakalke» και αργότερα (1975), μαζί με τον E. SEIDEL, τη μετονόμασαν σε Ενότητα Τρυπάλι.



Οι Τάταρης & Χριστοδούλου (1965) περιγράφοντας την ανώτερη από τις δύο σειρές που υπέρκεινται των πλακωδών ασβεστόλιθων στα Λευκά όρη, αναφέρουν την παρουσία, μέσα σε σκοτεινότεφρους λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, μεγάλου αριθμού ελασματοβραγχίων του Ανώτερου Τριαδικού που ανήκουν στα γένη *Ostrea*, *Myophoria* και πιθανώς *Halobia* του Ανώτερου Τριαδικού. Οι ερευνητές αυτοί δίνουν και την πρώτη τομή νοτίως της πόλης του Ομαλού (Σχήμα 2.4).

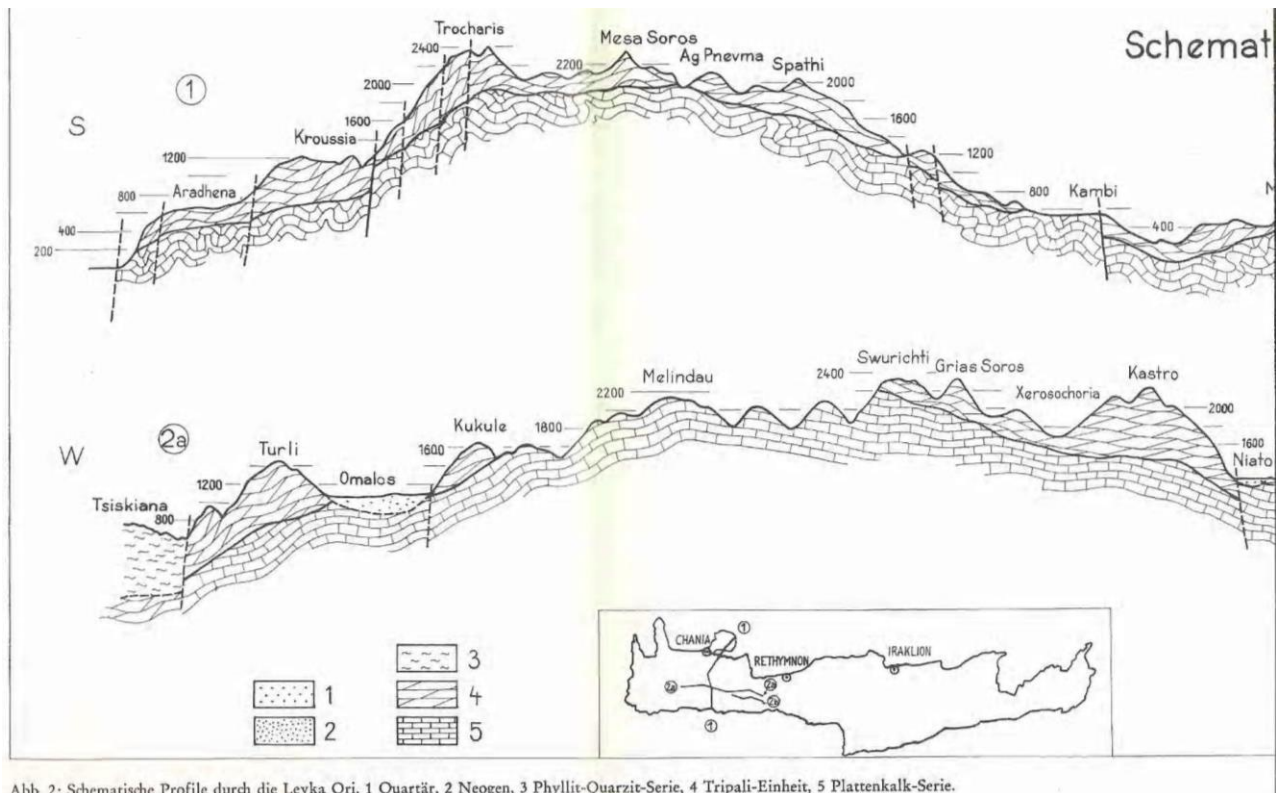


**Σχήμα 2.4:** Στην τομή αυτή τα μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας Madara kalke, στην συνέχεια ενότητα του Τρυπαλίου, τοποθετούνται ως υποκείμενα της ανώτερης σειράς των φυλλιτών, ραουβακών κτλ.

Οι Creutzburg & Seidel (1975), θεωρώντας πολύ πιθανή την άποψη που διατύπωσε ο Creutzburg το 1958 εισάγουν για το "σύμπλεγμα" των μεταμορφωμένων πετρωμάτων τον όρο "Σειρά Φυλλιτών - Χαλαζιτών" και δέχονται ότι το "σύμπλεγμα" αυτό αντιστοιχεί στο "terrains metamorphique" του Cayeux (1902), δηλαδή στο σχηματισμό "γύψων και ραουβακών και στη σειρά "φυλλιτών - χαλαζιτών - αργιλικών σχιστολίθων" του Wurm (1950). Στη σειρά των "Φυλλιτών - Χαλαζιτών" των Creutzburg & Seidel, κυριαρχούν φυλλίτες διάφορης σύστασης, χαλαζίτες μικρού ή μεγάλου πάχους, κροκαλοπαγή, μαύροι πλακώδεις δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, γύψοι, ραουβάκες, και μεταβασάλτες.

Οι ερευνητές αυτοί εισάγουν και ορίζουν την έννοια «**Ενότητα του Τρυπαλίου**» με την οποία χαρακτηρίζουν κυρίως τα ανθρακικής σύστασης πετρώματα (δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστολίθους, σπανιότερα καθαρούς ασβεστολίθους, ανθρακικής σύστασης λατυποπαγή έως ραουβάκες, σκουρόχρωμους κυψελώδεις δολομίτες, καθώς επίσης και λευκά ζαχαρώδους υφής μάρμαρα). Το σύνολο των ανωτέρω πετρωμάτων, έχει διάφορους βαθμούς ανακρυστάλλωσης. Η λιθολογική εξέλιξη της ενότητας (ανθρακικά κυρίως πετρώματα αλλά και γύψοι) υποστηριζόμενη από απολιθώματα (άλγη, κοράλια, γαστερόποδα), οδήγησε τους ερευνητές να δεχθούν την δημιουργία των πετρωμάτων αυτών σε ένα αποθετικό πεδίο ρηχών υδάτων. Η λιθοφασική αυτή εξέλιξη πιστοποιήθηκε από παρατηρήσεις πεδίου σε διάφορες περιοχές της Δυτικής Κρήτης (δυτικά της Χώρας Σφακίων βρέθηκαν γύψοι σε ραουβάκες και λεπτοπλακώδεις δολομιτικούς ασβεστολίθους). Στην ενότητα αυτή, συμπεριέλαβαν μια θέση γύψων του φύλλου χάρτη Αλικιανός (1969), βορειοανατολικά της Κανδάνου, καθώς επίσης και τις εμφανίσεις γύψου και ραουβακών δυτικά των Λευκών Ορέων που περιέγραψε ο Wurm (1950) από το Στόμιο έως την Σούγια.

Όσον αφορά την σχέση μετάβασης των ανθρακικών σχηματισμών της ενότητας του Τρυπαλίου με τους μετακλαστικούς σχηματισμούς της «Φυλλιτικής-Χαλαζιακής Σειράς», οι ερευνητές εκπλήσσουν με το τελικό τους συμπέρασμα. Ενώ στον Καλλικράτη, νοτίως των Λευκογίων, ανατολικά της Χωστή, και βόρειο-ανατολικά της Κανδάνου σημειώνουν ότι έχει κανείς την άποψη ότι **υπάρχει κανονική μετάβαση της ενότητας του Τρυπαλίου στην «Φυλλιτική-Χαλαζιακή Σειρά»** που όπως φαίνεται επιβεβαιώνεται και από πολλές άλλες θέσεις στην Νότια-Κεντρική Κρήτη (π.χ. νότια της Μονής-Αρκαδίου). Αμφισβητούν την ηλικία Ραΐτιου-Λιάσιου που βρέθηκε για τα πετρώματα αυτά και επιτείνουν το γεγονός, ότι η επαφή με τους υποκείμενους Πλακώδεις Ασβεστολίθους είναι καθαρά τεκτονική. Για τους λόγους αυτούς **τοποθετούν την ενότητα αυτήν στην υποκείμενη της «Φυλλιτικής-Χαλαζιακής Σειράς» θεωρώντας την σαν ανεξάρτητη τεκτονική ενότητα**. Αυτό φαίνεται άλλωστε και στην θεματική τομή 2α του σχήματος 2.5.



**Σχήμα 2.5:** Στην τομή αυτή τα μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας του Τρυπαλίου τοποθετούνται δυτικά του Ομαλού με ρήγμα τεκτονικώς υποκείμενα της Φυλλιτικής Χαλαζιτικής Σειράς.

**Συμπερασματικά, σύμφωνα με την εργασία αυτή:**

**1<sup>ον</sup>** Εισάγεται μια νέα τεκτονική ενότητα στο ήδη πολύπλοκο σύστημα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων των Εξωτερικών Ελληνίδων.

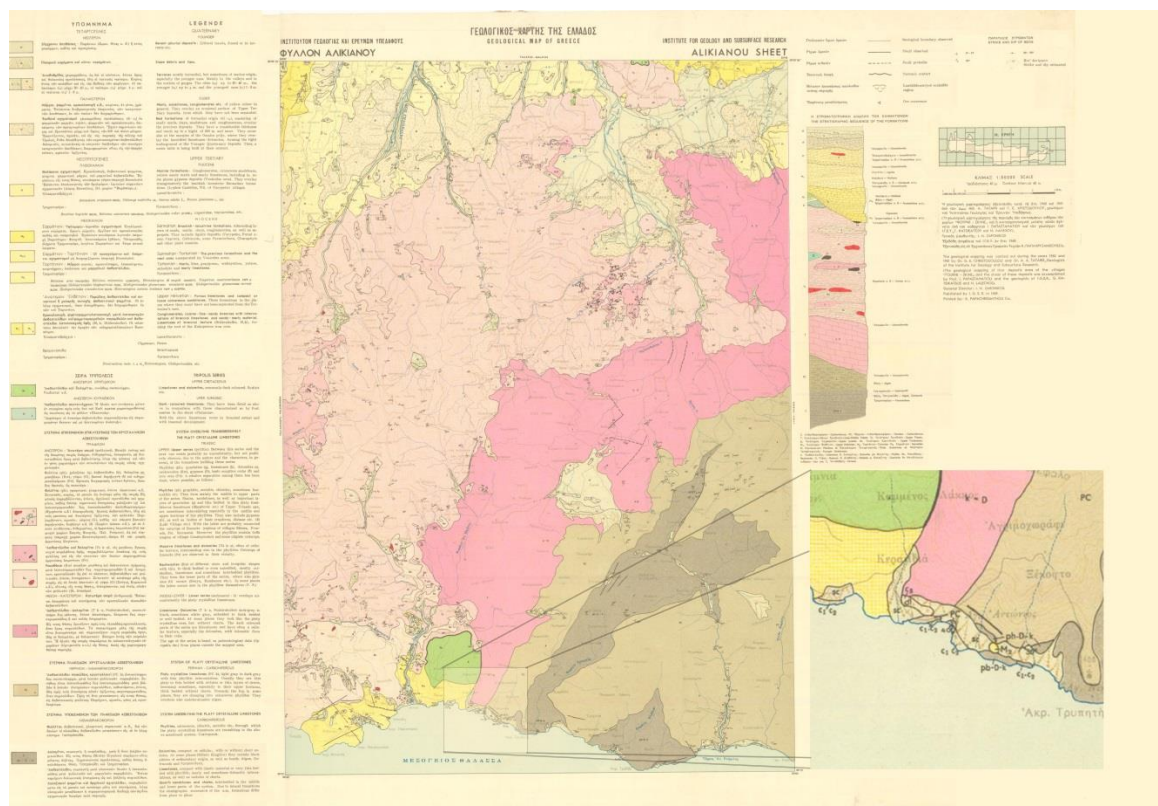
**2<sup>ον</sup>** Λιθοφασικά ίδιους σχηματισμούς (γύψους, ραουβάκες) τους εντάσσει και στην «Φυλλιτική-Χαλαζιακή Σειρά» και στην «Ενότητα Τρυπαλίου».

**3<sup>ον</sup>** Περιγράφεται λεπτομερέστερα η «Φυλλιτική-Χαλαζιακή Σειρά», και αναδεικνύεται ο σημαντικός ρόλος της ύπαρξης των μεταφαιστειακών πετρωμάτων, για την διαλεύκανση των συνθηκών μεταμόρφωσης.

Είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι οι σχηματισμοί της Ενότητας Τρύπαλι παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους Τριαδικούς-Λιάσιους σχηματισμούς της Ομάδας των Πλακωδών

Ασβεστολίθων, δηλαδή με τους τριαδικούς δολομίτες καθώς επίσης και με τους ομόλογους Ασβεστόλιθους του Παντοκράτορα της Ιόνιας ζώνης (KARAKITSIOS & BONNEAU, 1984).

Τα υποκείμενα (μετά)ανθρακικά διαχωρίστηκαν στον χάρτη του ΙΓΜΕ (σχήμα 2.6) σαν ασβεστόλιθοι και δολομίτες (Ts K-D) παρεμβαλλόμενοι στους φυλλίτες, ραουβάκες (RW) και ασβεστόλιθοι και δολομίτες της κατώτερης ανθρακικής σειράς (Madarakalke). Δεν ακολουθήσαμε αυτή την διαφοροποίηση διότι θεωρούμε ότι οι ανωτέρω **τρεις λιθολογικές ενότητες αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα**. Το σύστημα αυτό εξελίχθηκε στρωματογραφικά πάνω από τον ορίζοντα των μαύρων γραφιτικών σχιστολίθων. Στρωματογραφικά πάνω από αυτούς ακολουθούν οι γύψοι, τα μεταβατικά στρώματα των ασβεστοσχιστολίθων και στην συνέχεια οι δολομίτες. Το πέρασμα από την κλαστική στην ανθρακική ιζηματογένεση δεν ήταν ομοιόμορφο και κατά θέσεις αντί των μεταβατικών ασβεστοσχιστολίθων εμφανίζονται ραουβάκες.



**Σχήμα 2.6:** Γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ για την κεντρο-δυτική Κρήτη και την ευρύτερη περιοχή του Αγίου Αντωνίου (Τάταρης και Χριστοδούλου, 1965).

Η ανάστροφη στρωματογραφική διάταξη διατηρήθηκε στην πλειονότητά της, παρά την έντονη καταπόνηση που δέχθηκαν οι σχηματισμοί. **Υπάρχουν εκατοντάδες ρήγματα**, τα οποία όμως

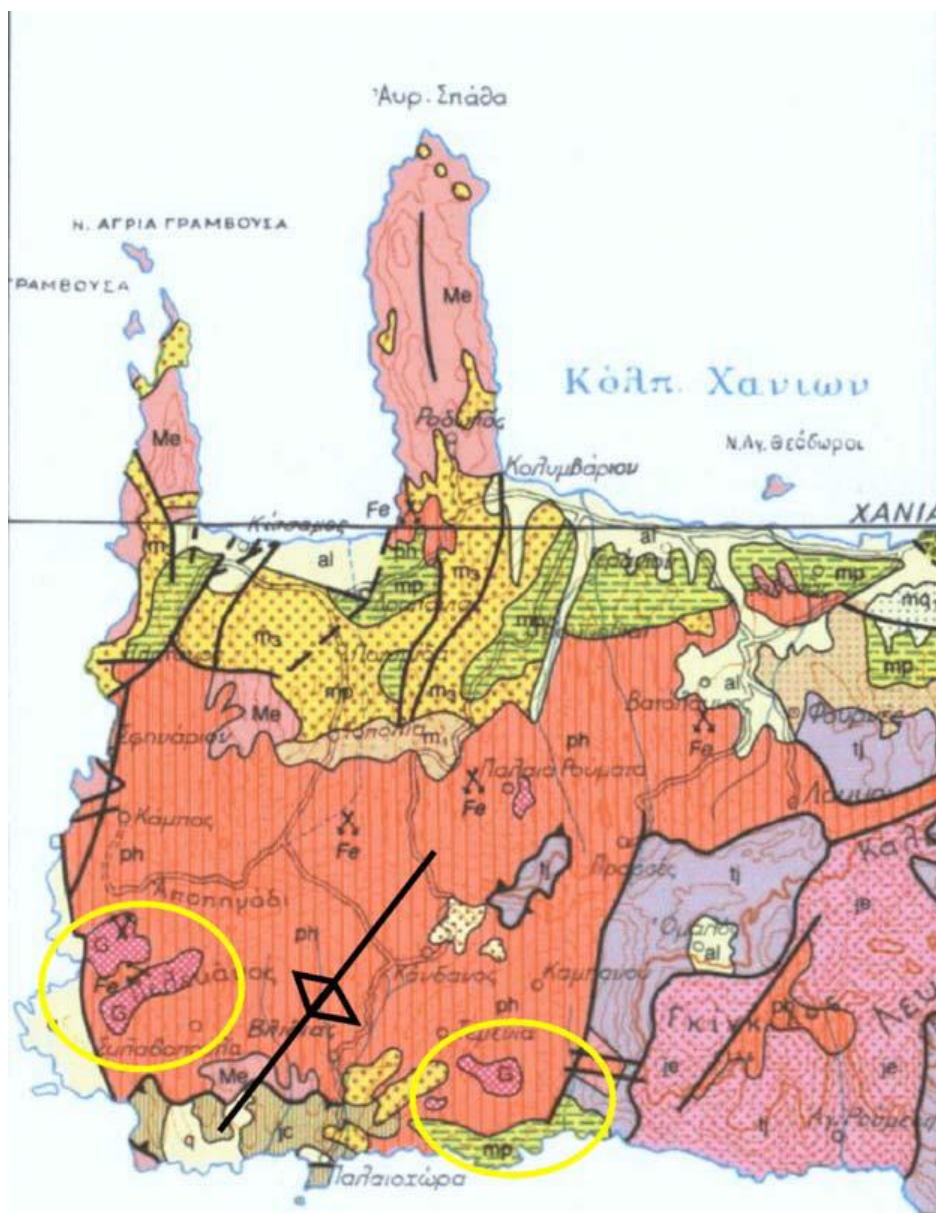
επηρεάζουν ελάχιστα την στρωματογραφική διάταξη. Πρόκειται για εμφανή ρήγματα **κυρίως εντός των φυλλιτών-χαλαζιτών** που οι μεταπτώσεις τους είναι της τάξης των μερικών μέτρων. Ελλείπει στρωματογραφικών προσδιορισμών, δεν αποκλείουμε πιθανά πολλαπλά άλματα μεγάλης τάξης μεγέθους όπως αυτά υπάρχουν (π.χ στην περιοχή του Πρασέ). Στο πεδίο όμως δεν παρατηρούνται μεγάλου πάχους ζώνες κατάκλασης που θα αποτελούσαν επιπρόσθετο οδηγό για την ύπαρξη μεγάλων ρηματογόνων δομών. **Η πλαστική τεκτονική έχει καθορίσει την δομή της περιοχής.**

**Η ευρύτερη περιοχή μελέτης** αποτελεί τμήμα μιας μεγαλοδομής που καθόρισε και την μορφοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής. Εμφανής πυρήνας αυτής αποτελεί η κορυφή Γλίγκιλος, στο βόρειο τμήμα του φαραγγιού της Σαμαριάς, που δομείται από τα παλαιότερα σε ηλικία πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων. Εκατέρωθεν της κορυφής αυτής αλλάζουν οι διευθύνσεις κλίσης των υπερκειμένων στρωμάτων και των πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, αλλά και των πετρωμάτων της επωθημένης Ενότητας του Τρυπαλίου και της Φυλλιτικής Χαλαζιτικής Σειράς. Η μεγαλοδομή αυτή υποβυθίζεται προς τα ΒΑ. Λόγω της υποβύθισης αυτής, που επηρέασε την τεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής, στη νοτιοδυτική περιοχή μελέτης επανεμφανίζονται παραπλήσιοι λιθολογικοί σχηματισμοί σε διαφορετικό όμως υψόμετρο.

Οι μετά-ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται εκατέρωθεν, στην περιοχή μελέτης δομούν το υποκείμενο της όλης περιοχής, σχηματίζοντας ένα συγκλινόριο που αποτελείται από πτυχές διαφόρου μεγέθους. Όπως έχει ήδη αποδειχθεί (Manutsoglu et al., 2001) στο νοτιότερο τμήμα του Φαραγγιού της Σαμαριάς εμφανίζεται με τεκτονική επαφή **πάνω από τα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων ένα υπολειμματικό «τεκτονικό ράκος» του Τρυπαλίου το πάχος του οποίου δεν ξεπερνά τα 50 μέτρα.** Ως εκ τούτου δεχόμαστε ότι την τεκτονικά κατώτερη θέση την δομούν σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή μελέτης τα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, όπως δείχνεται και στις γεωλογικές τομές.

Στον νεώτερο, γενικευμένο χάρτη της Ελλάδας κλίμακας 1:500.000 στην περιοχή οι σχηματισμοί των (μετα)ανθρακικών που μελετούνται εμφανίζονται με τον ίδιο συμβολισμό (Σχήμα 2.7).



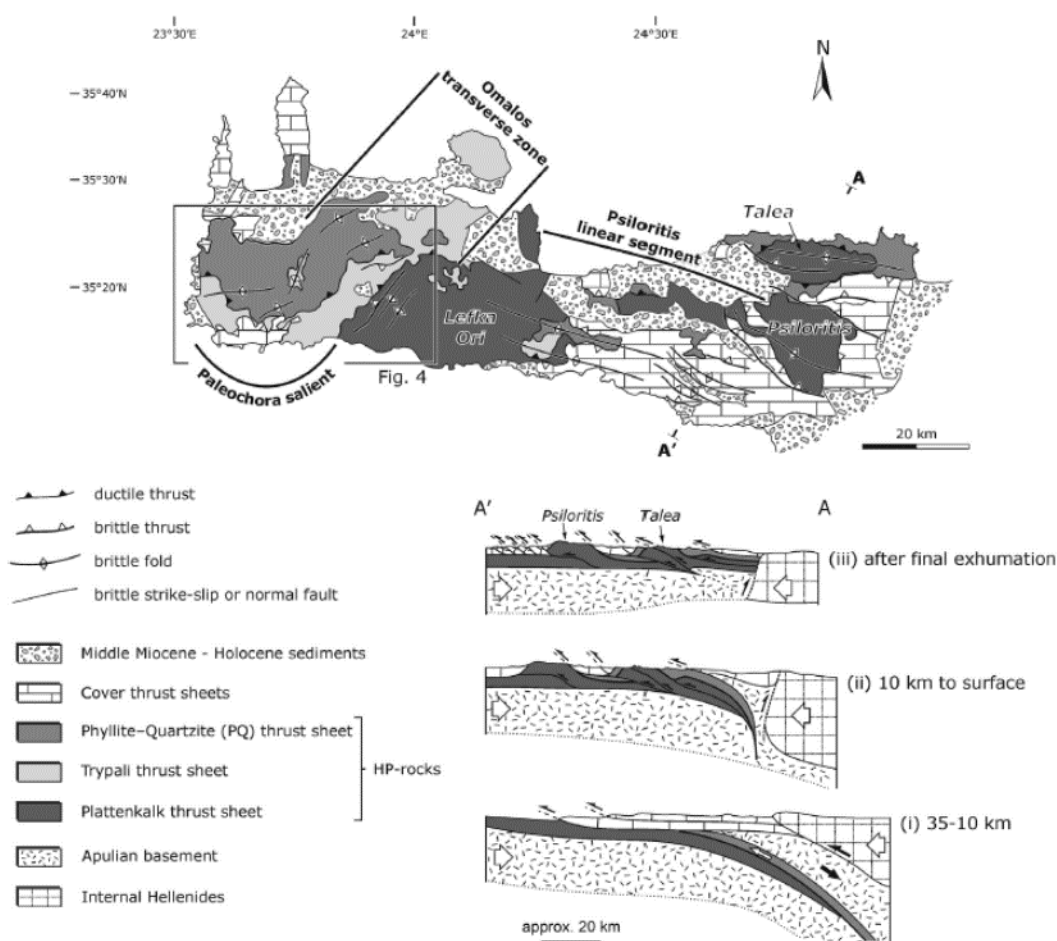


**Σχήμα 2.7:** Απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη της Ελλάδας του ΙΓΜΕ κλίμακας 1:500.000 (Μπορνόβας κ.α., 1983) με τις θέσεις εμφάνισης των γύψων εντός του Φυλλιτικού Καλύμματος, τις κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων καθώς επίσης και τα όρια της Νεογενούς λεκάνης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χωρική κατανομή των γύψων εντός του Φυλλιτικού Καλύμματος. Κατανέμονται εκατέρωθεν μιας διεύθυνσης ΒΒΑ/ΝΝΔ, ίδιας με αυτή της υποβυθιζόμενης μεγαλοδομής της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, που επιτρέπει δυτικότερα την εμφάνιση παλαιότερων σχηματισμών εντός του Φαραγγιού της Σαμαριάς. Κατά μήκος της διεύθυνσης αυτής εντός της περιοχής εξάπλωσης του Φυλλιτικού καλύμματος στα τοπογραφικά

ανώτερα τμήματα εμφανίζονται τα χαλαζιτικά τμήματα (μεγάλες μάζες χαλαζιτών) του Φυλλιτικού Καλύμματος (που αποτελούν στρωματογραφικά τα παλαιότερα τμήματα) ενώ στα τοπογραφικά κατώτερα τμήματα εμφανίζονται τα στρωματογραφικά νεώτερα τμήματα (μαύροι/γραφιτικοί σχιστόλιθοι – χαλαζίτες που εμπεριέχουν υπολείμματα γύψου, γύψοι, ραουβάκες, τα μεταβατικά στρώματα των ασβεστοσχιστολίθων και τα (μετα)ανθρακικά του Τρυπαλίου).

Την άποψη αυτή εξέλιξαν οι Chatzaras et al., 2013 οι οποίοι θεωρούν ότι η Ενότητα του Τρυπαλίου στην περιοχή σχετίζεται με διαδικασίες πλαστικής παραμόρφωσης που εκτείνονται σε μεγάλα βάθη στον στερεό φλοιό της περιοχής (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.8:** Γεωλογικός χάρτης της δυτικής και κεντρικής Κρήτης που παρουσιάζει τα δύο προεξέχοντα τμήματα των καλυμμάτων των Εξωτερικών Ελληνίδων στην περιοχή, με

προεξέχουσα την εγκάρσια καλυμματική ζώνη του Ομαλού Παλαιόχωρας όπου και υπερτερούν οι εμφανίσεις της Ενότητας του Τρυπαλίου (Chatzaras et al., 2013).

## 2.4 Υδρογεωλογία

### ➤ Όρια υδροφορέων

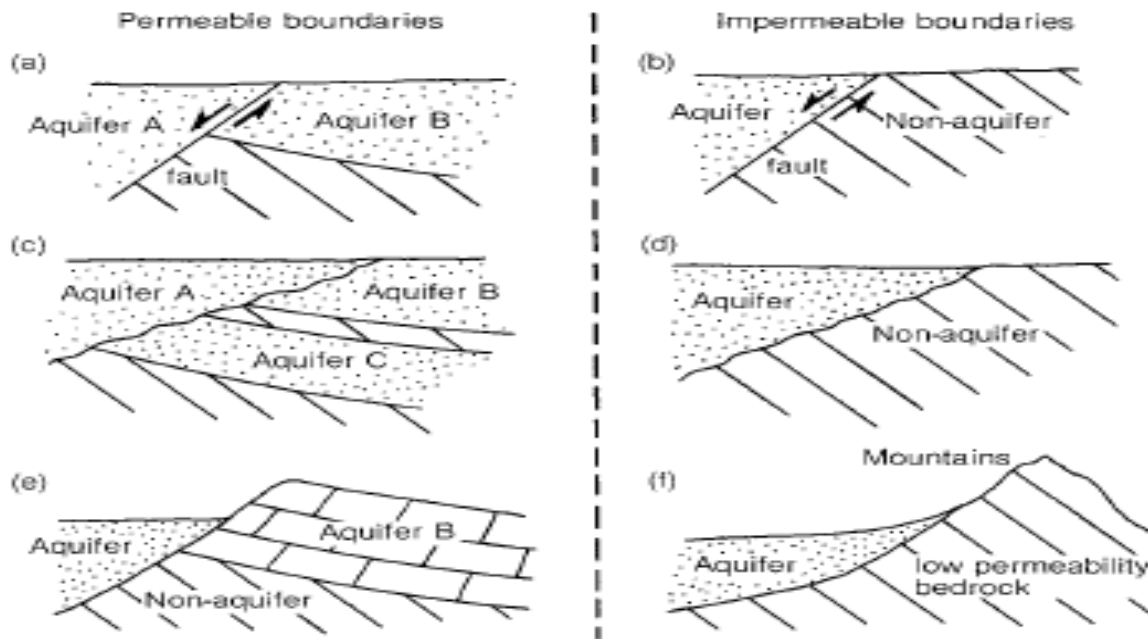
*Τα πετρώματα που περιέχουν υπόγεια νερά και επιτρέπουν στο νερό να ρέει μέσα σε αυτά σε σημαντικές ποσότητες, ονομάζονται υδροφορείς. Ο ρυθμός ροής ποικίλει από τόπο σε τόπο. Το υπόγειο νερό ρέει διαμέσου ενός υδροφόρου ορίζοντα προς τα φυσικά σημεία εκκένωσης, εκτός και αν απομακρυνθεί με άντληση μέσω γεωτρήσεων. Ως φυσικά σημεία εκκένωσης θεωρούνται οι πηγές, διαρροή σε ρέματα και ποτάμια, και εκκενώσεις απευθείας στη θάλασσα.*

*Η ιδιότητα του υδροφόρου ορίζοντα που επιτρέπει στα νερά να ρέουν μέσα του, ονομάζεται διαπερατότητα, η οποία ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από γεωλογικούς παράγοντες. Στην περίπτωση του υπόγειου νερού η περατότητα ονομάζεται πιο σωστά υδραυλική αγωγιμότητα.*

*Υπάρχουν πολλά είδη των ορίων των υδροφορέων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μερικά παραδείγματα με διαφορετικά όρια υδροφορέων. Το όριο ενός ρήγματος μεταξύ δύο υδροφορέων (a) μπορεί να είναι διαπερατό και να επιτρέπει τη ροή σε αυτό, εφόσον έχει συμβεί θραύση πετρώματος που θα οδηγήσει σε τοπική αύξηση της διαπερατότητας. Εναλλακτικά, το σύνορο μπορεί να είναι αδιαπέρατο λόγω της δημιουργίας μυλονίτη που αποτίθεται κατά μήκος του ρήγματος. Ένα αδιαπέρατο σύνορο μπορεί να ανιχνευθεί από τις διαφορές στη χημεία των υπόγειων ρευστών ή από την ανάλυση των δοκιμών άντλησης. Το όριο ενός ρήγματος εικονίζεται στο (b) και είναι ουσιαστικά αδιαπέρατο, καθώς χωρίζει τον υδροφορέα από ένα αδιαπέρατο σχηματισμό. Στο παράδειγμα (c), ο υδροφόρος A βρίσκεται ασύμφωνα πάνω από μια αλληλουχία που περιλαμβάνει δύο ξεχωριστούς υδροφορείς, τον B και τον C. Οι καταστάσεις είναι παρόμοιες με το παράδειγμα (a), εκτός του ότι η ποιότητα των υπόγειων ρευστών μπορεί να είναι διαφορετική στους τρεις υδροφορείς. Στο παράδειγμα (d), οι συνθήκες των υπόγειων ρευστών στον υδροφορέα είναι παρόμοιες με εκείνες του (b). Στο παράδειγμα (e), ένας μη υδροφορέας σε μη συνεκτικά υλικά, όπως μια αναβαθμίδα ενός ποταμού, επικαλύπτει εν μέρει έναν υδροφορέα, στον 36 οποίο έχουν αποτεθεί ιζήματα (όπως είναι ο ασβεστόλιθος ή ψαμμίτη) που σχηματίζει ένα γκρεμό. Η ροή των υπογείων ρευστών μπορεί να είναι δυνατή μεταξύ του υδροφόρου B στον A, λόγω των*



τοπογραφικών διαφορών. Στο παράδειγμα (f), ένας υδροφορέας υπέρκειται ενός σχηματισμού με χαμηλή διαπερατότητα. Η ροή των υπόγειων ρευστών δεν λαμβάνει χώρα πέρα από το όριο, αλλά ο υδροφορέας επαναφόρτισης θα ενισχυθεί σημαντικά από την επιφανειακή απορροή από την ημιορεινή περιοχή (Μπουτσάκης, 2016).



Σχήμα 2.9: Διαφορετικοί τύποι υδρογεωλογικών ορίων (Βουδούρης, 2015).

### ➤ Ορισμός Πηγής- Γενικά Περί Πηγών.

Οι πηγές και οι αναβλύσεις των υδάτων, συνδέονται στενά με τον κύκλο του νερού στη φύση, την υδρολογική ισορροπία και το υδρολογικό ισοζύγιο του υπόγειου νερού. Αποτελούν επίσης μία σημαντική ένδειξη για το είδος της υδροφορίας μιας περιοχής. Κατά το ιστορικό παρελθόν η παρουσία τους ήταν σημαντική για τη δημιουργία οικισμών ή την ανάπτυξη στρατιωτικών δυνάμεων. Το 1980 δόθηκε από τον Todd ο εξής ορισμός για τις πηγές: **«πηγή είναι μία συγκεντρωμένη ροή υπόγειου νερού, που εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως υδάτινη μάζα που ρέει ελεύθερα»**. Η πηγή δημιουργείται από τη «διαρροή» του νερού, δηλαδή την αργή κίνηση υπόγειου νερού προς την επιφάνεια του εδάφους. Οι διαρροές νερού μπορούν να σχηματίζουν τοπικά μικρά τέλματα ή ροές ή να εξατμίζονται, ανάλογα με την παροχή του νερού, την τοπογραφία και το κλίμα κάθε περίπτωσης. Ως ανάβλυση εννοούμε κάθε εμφάνιση υπόγειου νερού στην επιφάνεια του εδάφους ή στον πυθμένα κάποιας μάζας νερού (ποταμού, λίμνης, θάλασσας) (Todd, 1980).

Υδρογεωλογικά οι πηγές και γενικά οι αναβλύσεις νερού, είναι στην πραγματικότητα η «υπερχείλιση» υδροφόρων στρωμάτων. Με τον τρόπο αυτό εκφορτίζουν τα υδροφόρα στρώματα. Αυτά τροφοδοτούνται με την κατείσδυση ή τη διήθηση κατακρημνισμάτων, με αποτέλεσμα σταδιακά να ανεβαίνει η στάθμη τους. Οι πηγές, εμφανίζονται εκεί που η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια είναι ο γεωμετρικός τόπος της τομής της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με το έδαφος. Για αυτό εμφανίζονται συνήθως σε χαμηλότερα σημεία.

Οι πηγές αποτελούν σημαντική ένδειξη της υδροφορίας μιας περιοχής, ενώ μάλιστα μεγάλος αριθμός μικρών πηγών στις παρυφές κοιλάδων ή στα κράσπεδα λόφων είναι ένδειξη ρηχού υδροφόρου ορίζοντα με μικρή περατότητα. Αντίθετα μεγάλες πηγές στον πυθμένα κοιλάδων, στο βασικό γεωμορφολογικό επίπεδο, είναι ένδειξη ύπαρξης μεγάλου υδροφόρου με σημαντική περατότητα.

Πηγή λοιπόν καλείται μια θέση στην επιφάνεια της γης, όπου τα υπόγεια ύδατα εκφορτίζουν από τον υδροφόρο ορίζοντα, δημιουργώντας μια ορατή ροή. **Πιο απλά, πηγή είναι η επιφανειακή εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα από φυσικά αίτια.** Αυτή η εκφόρτιση προκαλείται από τη διαφορά ύψους του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο ορίζοντα και του ύψους της επιφάνειας της γης όπου πραγματοποιείται η εκκένωση. **Τα ανοίγματα μέσω των οποίων τα υπόγεια ύδατα εξέρχονται στην επιφάνεια ονομάζονται οπές-στόμια της πηγής.** Οι πηγές που προέρχονται από συνεκτικά πετρώματα, έχουν συνήθως μια καλά καθορισμένη οπή-στόμιο, σε αντίθεση με τις πηγές σε μη συνεκτικά ιζήματα, αν και οι τελευταίες μπορεί επίσης να έχουν σαφή ορατό στόμιο. Μερικές φορές, το στόμιο μπορεί να είναι στο κάτω μέρος μιας βαθιάς πηγής και να μην είναι εύκολα

#### ➤ **Σημασία καρστικών πηγών.**

Οι πηγές ταξινομούνται ως προς τον τύπο τους σε πέντε βασικές κατηγορίες: Εκφόρτισης, επαφής, υπερχείλισης, παράκτιες και υποθαλάσσιες. Από τους τύπους αυτούς, υπερτερούν οι πηγές υπερχείλισης οι οποίες ανήκουν κυρίως σε ενδοχώριους καρστικούς υδροφορείς. Η διαπίστωση αυτή έχει ιδιαίτερη αξία, γιατί όλες αυτές οι πηγές τροφοδοτούνται από καρστικούς υδροφορείς που μπορεί να επιδέχονται αναρρύθμιση και πρέπει να μελετηθούν, ώστε να

αξιοποιηθούν στην κατεύθυνση της πλήρους εκμετάλλευσης της υπόγειας αποθηκευτικής ικανότητας των ταμιευτήρων αυτών. Πολύ μεγάλος επίσης είναι και ο αριθμός των παράκτιων καρστικών πηγών στη νότια Ελλάδα (Πελοπόννησος, Ανατολική και Δυτική Στερεά Ελλάδα, Εύβοια και Κρήτη) οι περισσότερες από τις οποίες είναι υψηλών παροχών και υφάλμυρες, όπως και οι πηγές που μελετάμε στον Άγιο Αντώνιο (Ομπετσανοφ κ.α., 2004).

### ➤ **Είδη Πηγών.**

Οι πηγές χωρίζονται ανάλογα με την ροή τους σε πέντε κύριους τύπους:

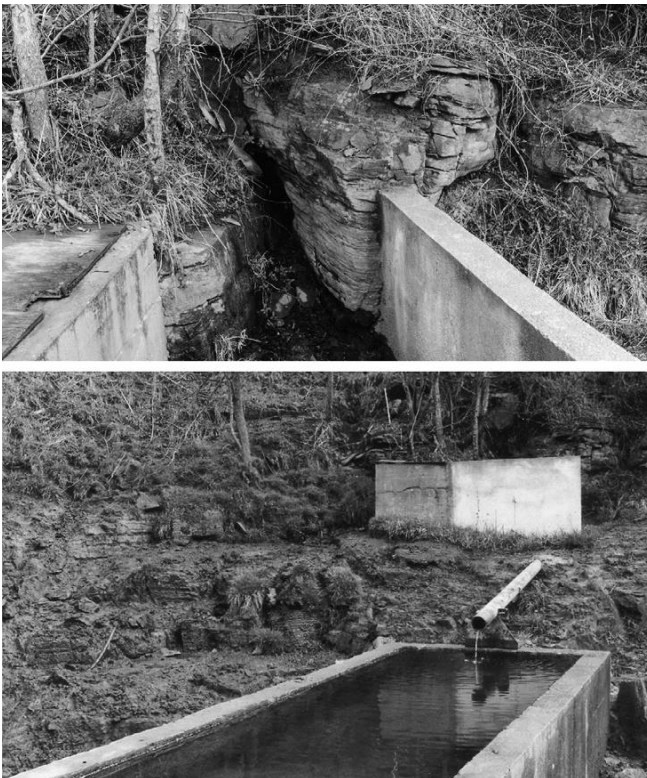
- Ο πρώτος τύπος είναι οι πηγές βαρύτητας (κατιούσες ή επαφής). Αυτές σχηματίζονται από την έλξη της βαρύτητας. Το νερό εδώ διαπερνάει το έδαφος μέχρι να φτάσει σε ένα αδιαπέρατο στρώμα. Επειδή λοιπόν δεν έχει την δυνατότητα να φύγει-εκτονωθεί από πουθενά, αρχίζει να ρέει, μέχρι να φτάσει σε κάποιο άνοιγμα (οπή-στόμιο) όπου το νερό βγαίνει με την μορφή πηγής. Σχηματίζονται σε σημεία όπου συναντώνται η τοπογραφική επιφάνεια με την πιεζομετρική επιφάνεια και όπου έρχεται σε επαφή το υπερκείμενο υδροπερατό στρώμα με το υποκείμενο αδιαπέρατο (αναδύονται κάτω από ελεύθερες συνθήκες εκεί όπου η πιεζομετρική επιφάνεια διασταυρώνεται με την τοπογραφική επιφάνεια). Αυτού του τύπου πηγές συνήθως συναντώνται κατά μήκος λόφων και γκρεμών.
- Δεύτερος τύπος είναι οι αρτεσιανές πηγές, οι οποίες δημιουργούνται λόγω της πίεσης του νερού σε υδροπερατούς υδροφόρους ορίζοντες, που έχει σαν αποτέλεσμα το νερό να εκτονώνεται στην επιφάνεια. Γίνεται λοιπόν «απελευθέρωση» του νερού, υπό πίεση λόγω "περιορισμένων" συνθηκών στον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Οποιοσδήποτε ρωγμές ή ασυνέχειες στη γη θα αφήσουν εύκολα το νερό να «διαφύγει-να εκτονωθεί».
- Ο τρίτος τύπος πηγής, είναι μία πηγή που δημιουργείται από υπόγεια ύδατα που ξεχειλίζουν στην επιφάνεια. Οι πηγές αυτές επιτρέπουν στο νερό να διαφεύγει αργά και να διαρρεύσει μέσα από χαλαρά ή μη συνεκτικά εδάφη και πετρώματα.
- Ο τέταρτος τύπος πηγής, είναι οι πηγές με σωληνοειδή μορφή. Αυτές οι πηγές εμφανίζονται σε υπόγεια συστήματα σπηλαίων, τα οποία μοιάζουν με υπόγεια τούνελ. Αυτοί οι σωλήνες ή οι διάδυλοι αποτελούνται συνήθως από ασβεστόλιθο, ενώ καθώς το νερό μεταφέρεται μέσω αυτού, προκαλεί σημαντική διάλυση του (ασβεστόλιθου). Τέτοιες πηγές είναι χαρακτηριστικό των καρστικών εδαφών (τέτοιου τύπου είναι η πηγή

του Αγίου Αντωνίου και για τον λόγο αυτό αναλύθηκε και το φαινόμενο του Venturi). Οι σωληνοειδείς πηγές είναι από τις μεγαλύτερες πηγές στη Γη ενώ συχνά οι «σωλήνες» τους είναι τόσο μικροί που διακρίνονται με δυσκολία.

- Ο πέμπτος τύπος είναι οι πηγές ρωγμών. Οι πηγές ρωγμών εμφανίζονται κατά μήκος μεγάλων ρωγμών στο έδαφος. Τέτοιου τύπου πηγές χρησιμοποιούνται συχνά ως πηγή πόσιμου νερού. Οι πηγές αυτού του τύπου αναφέρονται στην συνολική εκροή του νερού από ασυνέχειες του εδάφους (ρήγματα, ρηγματώσεις κτλ).

\*Η εμφάνιση των υπόγειων νερών (η μεταβολή τους) σε επιφανειακά νερά πολλές φορές γίνεται κάτω από την στάθμη του επιφανειακού νερού και δεν είναι αμέσως αντιληπτό (ορατό) (Kresic and Stevanovic, 2010).

Στην εικόνα 2.10 παρατίθεται μία συνηθισμένη μορφή μικρής σχετικά πηγής, που χρησιμοποιείται για την ύδρευση και άρδευση, και η οποία εμφανίζεται από ένα δημιουργηθέν ρήγμα ασβεστολίθου.



**Εικόνα 2.10:** Μία σχετικά μικρή πηγή που εμφανίζεται από ένα μεγάλο ρήγμα ασβεστολίθου και χρησιμοποιείται για άρδευση και ύδρευση (Kresic and Stevanovic, 2010).

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε από τον Meinzer (1927), το νερό σπάνια διαφεύγει-εκρέει από ένα μόνο άνοιγμα συνήθως αυτό συμβαίνει από περισσότερα του ενός ανοίγματα, τα οποία μπορεί να είναι κοντά ή να βρίσκονται διάσπαρτα σε μεγάλες αποστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Εικόνα 2.11 στην οποία υπάρχουν δύο σχετικά μικρά ανοίγματα, το ένα κοντά στο άλλο. Επίσης, η πηγή που θεωρείται ενιαία πηγή σε μια τοποθεσία, σε μία άλλη τοποθεσία μπορεί να θεωρηθεί ως ομάδα πηγών, κάθε μια εκ των οποίων έχει ένα μεμονωμένο όνομα. Με αυτόν τον τρόπο, ορισμένες πηγές ορίζονται στον ενικό και μερικές στον πληθυντικό. Η βασική ιδέα είναι ότι, αν το νερό «βγει» από ένα μόνο άνοιγμα ή από πολλά ανοίγματα κοντινά (μεταξύ τους), σχηματίζει μια "πηγή", ενώ εάν εμφανιστεί από έναν αριθμό ανοιγμάτων τα οποία είναι πιο απομακρυσμένα, τότε έχουμε "πηγές". Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ του όρου «πηγής» και «πηγών» (Kresic and Stevanovic, 2010).



**Εικόνα 2.11:** Μικρή πηγή ("gushet") που εκλύεται από το έδαφος στην όχθη ενός ποταμού. Το μεγαλύτερο από τα δύο στόμια έχει περίπου διάμετρο 5 cm (Kresic and Stevanovic, 2010).

### ➤ Ταξινόμηση Πηγών

Έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις πηγών, με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά τα πιο κοινά εκ των οποίων είναι:

1. Ο ρυθμός απορροής και ομοιομορφίας.
2. Ο χαρακτήρας του υδραυλικού φορτίου που δημιουργεί την εκφόρτιση (πηγές κατιούσες ή βαρύτητας και αύξουσες ή αρτεσιανές πηγές).
3. Η γεωλογική και γεωμορφολογική δομή που ελέγχει την εκκένωση.
4. Η ποιότητα του νερού και η θερμοκρασία.

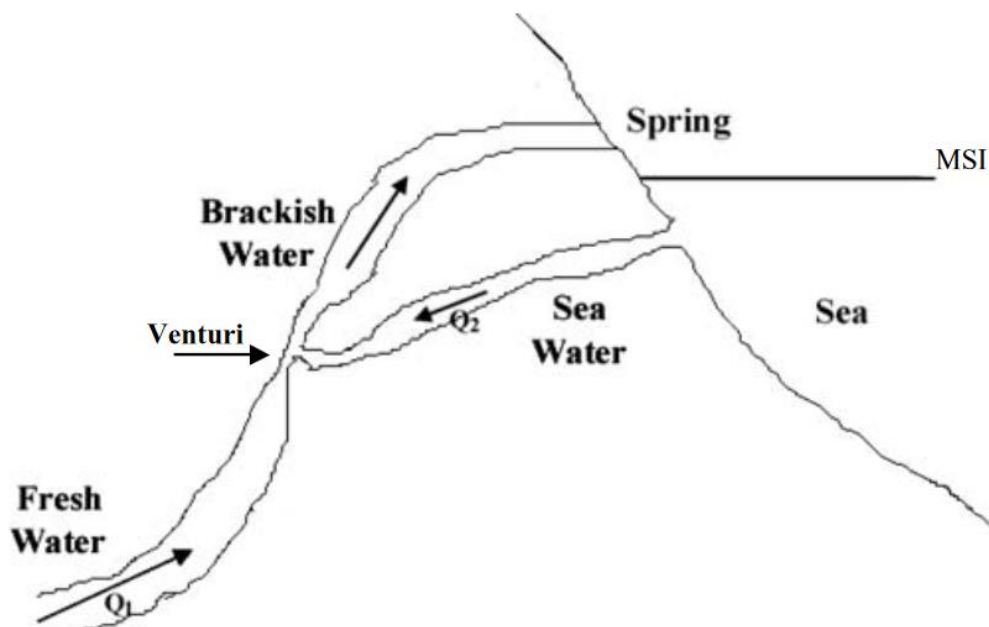
### ➤ Γεωμορφολογία και πηγές.

Η γεωμορφολογία του εδάφους (τύπος πετρωμάτων και τεκτονικά χαρακτηριστικά, όπως ρήγματα κτλ) παίζει τον πιο βασικό ρόλο στην εμφάνιση των πηγών. Όταν οι συνθήκες που σχετίζονται με την τοποθεσία τους είναι πολύπλοκες, οι πηγές ανήκουν σε διαφορετικούς τύπους, με βάση ορισμένες ταξινομήσεις. Μπορεί να εμφανίζονται δίπλα η μία στην άλλη, προκαλώντας σύγχυση. Για παράδειγμα, ένα πλευρικό αδιαπέρατο πέτρωμα που βρίσκεται δίπλα από ένα θραυσμένο (με ρωγματώσεις- ασυνέχειες) πέτρωμα. Εδώ το μη συνεκτικό πέτρωμα μπορεί να «αφήσει» τα υπόγεια ύδατα από μεγαλύτερο βάθος να ανέβουν στην επιφάνεια μέσω των υπερκείμενων προσχωσιγενών ιζημάτων στην επιφάνεια. Το νερό σε αυτή την περίπτωση μπορεί να έχει αυξημένη θερμοκρασία λόγω της κλίσης της γεωθερμικής βαθμίδας. Αυτές οι πηγές καλούνται θερμές πηγές. Ταυτόχρονα, υπόγεια ύδατα κανονικής θερμοκρασίας μπορούν να εκδηλωθούν ως υπόθερμες πηγές που βρίσκονται πολύ κοντά όμως στις θερμές, αυτό συμβαίνει λόγω της επαφής των νερών με λιγότερα διαπερατά προσχωσιγενή πετρώματα (που ενδεχομένως υπάρχουν «δίπλα» από ρωγματωμένα ), όπως αργίλους που έχουν σαν αποτέλεσμα να μην φτάσουν σε μεγάλο βάθος, και να ζεσταθούν λόγω της γεωθερμικής βαθμίδας. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχει μια τρίτη πηγή, με τη θερμοκρασία να ποικίλλει ανάλογα με το πρότυπο βροχόπτωσης, τις εποχιακές επιδράσεις και τον μηχανισμό ανάμειξης των υδάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες (Kresic and Stevanovic, 2010).

### ➤ Φαινόμενο “Venturi” στις υπό μελέτη καρστικές πηγές, του Αγίου Αντωνίου.

Ο όρος «**καρστική πηγή**» η οποία αποτελεί και το είδος των πηγών του Αγίου Αντωνίου, υποδηλώνει την εμφάνιση της ροής υπογείων καρστικών υδροφορέων στην επιφάνεια του

**εδάφους.** Τέτοιου τύπου πηγές αποτελούνται από ένα σύστημα πολυάριθμων «σωλήνων», διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Όταν οι πηγές αυτές, είναι παράκτιες δηλαδή είναι κοντά (δίπλα) σε θάλασσα, όπως και στην περίπτωση των πηγών του Αγίου Αντωνίου, είναι δυνατή η διείσδυση θαλασσινού νερού στους σωλήνες που μεταφέρουν γλυκό νερό (από τον ταμειυτήρα στις πηγές). Αυτό συμβαίνει, όταν οι σωλήνες που μεταφέρουν το γλυκό νερό από τον ταμειυτήρα στην πηγή, συναντηθούν ή καλύτερα τέμνονται από άλλους που μεταφέρουν αλμυρό (θαλασσινό) νερό, με την προϋπόθεση ότι η υπάρχουσα πίεση του νερού στην περίπτωση των πρώτων είναι μικρότερη από την πίεση του νερού στους σωλήνες που μεταφέρουν θαλασσινό νερό. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12 ο ταμειυτήρας που τροφοδοτεί τις πηγές του Αγίου Αντωνίου (από τις βροχοπτώσεις είτε από το λιώσιμο των πάγων στα γύρω βουνά) καθώς μεταφέρει το νερό μέσω ενός σωλήνα, στις πηγές, συναντά άλλο σωλήνα που μεταφέρει αλμυρό νερό από την θάλασσα, που βρίσκεται σε σχετικά μικρή απόσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα λόγω του φαινομένου Venturi και λόγω της διαφοράς των πιέσεων του νερού μεταξύ των δύο σωλήνων (γλυκού νερού-θάλασσα), ο πρώτος σωλήνας καθώς μεταφέρει το νερό στις πηγές να «τραβάει» νερό από την θάλασσα. Η διαφορά των πιέσεων πιθανά οφείλεται στην «στένωση» της διατομής του πρώτου (σωλήνα) στο σημείο τομής του με τον δεύτερο (αλμυρό νερό) (Maramathas et al., 2005).



**Σχήμα 2.12:** Φαινόμενο Venturi σε παράκτιες πηγές (Maramathas et al., 2005).

#### ➤ Μοντέλο “Modkarst” και φαινόμενο Venturi

Στα πλαίσια του φαινομένου Venturi δημιουργήθηκε το μοντέλο “Modkarst”. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ένας αριθμός δεξαμενών που επικοινωνούν μεταξύ τους με σωλήνες. Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι, η προσομοίωση και η προσέγγιση του συστήματος κυκλοφορίας των υπόγειων υδάτων μίας καρστικής πηγής. Ένας σωλήνας από αυτούς μεταφέρει το θαλασσινό νερό, ενώ ο άλλοι το αποτελούν προσομοίωση του καρστικού συστήματος (σωλήνων) που μεταφέρει το (γλυκό) νερό από τον ταμιευτήρα στην καρστική πηγή. Κάθε μία από τις δεξαμενές εκφορτίζεται μέσω των σωλήνων στην πηγή. Κατά συνέπεια, την πλήρωση της πηγής αποτελεί το άθροισμα όλων των εκφορτίσεων. Η συγκέντρωση χλωρίου (Cl) στην πηγή καθορίζεται και εξαρτάται από την μίξη του θαλασσινού (αλμυρού) νερού και του γλυκού νερού που καταφθάνουν στην καρστική πηγή. Δεδομένα βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται ως πληροφορίες εισόδου στο μοντέλο Modkarst. Την ίδια στιγμή πληροφορίες εξόδου του μοντέλου αποτελούν η υδρογραφία και η συγκέντρωση χλωρίου (στην πηγή) συναρτήσει του χρόνου. Μακροσκοπικές εξισώσεις ισοζυγίου μάζας και εξισώσεις διατήρησης της μηχανικής ενέργειας ελέγχουν τους όγκους που δίνει η κάθε δεξαμενή στην καρστική πηγή. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται όλες οι εξισώσεις, οι παράμετροι και οι μεταβλητές που λαμβάνουν χώρα στο μοντέλο Modkarst.



Όλες οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι αποτελεσματικές και με μεγάλη φυσική και γεωμετρική ακρίβεια (Maramathas et al., 2005).

**Πίνακας 2.1:** Εδώ παρουσιάζονται οι εξισώσεις, οι μεταβλητές και οι παράμετροι, βάσει των οποίων περιγράφεται το φαινόμενο Venturi σε καρστικές πηγές με το μοντέλο Modkarst (Maramathas et al., 2005).

Equations	Variables
$sS_1 \frac{dH}{dt} + Q_1 - \gamma \dot{P}S_1 = 0$	$Q_1$ Karst system discharge ( $L^3/T$ )
$sS_1 H \frac{dH}{dt} + \frac{Q_1^2}{2gS_2^2} - H\gamma \dot{P}S_1 + L \left[ \frac{Q_1}{sS_1} \right]^2 Q_1 = 0$	$Q_2$ Seawater discharge ( $L^3/T$ )
$\frac{Q_2^2}{2gS_3^2} + \frac{P_3}{\rho_0 g} - H_\theta = 0$	$H$ Water level over discharge point (L)
$P_3 - \rho_w g (H_\theta + h + \frac{\pi}{\pi} H) + L_\alpha Q_1^2 = 0$	$P_3$ Pressure at the intersection between the seawater tube and the freshwater one ( $M/LT^2$ )
<b>Calibration parameters</b>	
	$s$ Coefficient of storage
	$S_1$ Recharge area ( $L^2$ )
	$\gamma$ Infiltration coefficient
	$S_2$ Outflow-tube cross section of the karst-system reservoir ( $L^2$ )
	$L$ Energy loss coefficient ( $L^{-1}T^{-2}$ )
<b>Model input information</b>	$S_3$ Outflow-tube cross section of the seawater reservoir ( $L^2$ )
Rainfall rate $\dot{P}$	$H_\theta$ Depth of the intersection between the seawater tube and the freshwater one (L)
	$\pi$ Specific yield
	$L_\alpha$ Pressure loss coefficient of the sea-tube outlet region ( $ML^{-7}$ )
<b>Model output information</b>	<b>Measured parameters</b>
Spring discharge: $Q = Q_1 + Q_2$	$g$ Gravity ( $L/T^2$ )
	$\rho_0$ Seawater density ( $M/L^3$ )
	$\rho_w$ Freshwater density ( $M/L^3$ )
	$h$ Spring elevation (L)
$ppm\ Cl^- = \frac{\rho_0 C_0 Q_2 + \rho_w C_w Q_1}{\rho_0 Q_2 + \rho_w Q_1}$	$C_w$ Chloride concentration of the freshwater (ppm)
	$C_0$ Chloride concentration of the seawater (ppm)

## Κεφάλαιο 3: Δείγματα και Χημικές Αναλύσεις

### 3.1 Εισαγωγή

#### Θερμοκρασία των υδάτων των υπό μελέτη πηγών

Σύμφωνα με τον Turner οι πηγές με θερμοκρασία **μικρότερη των 20** θεωρούνται **ψυχρές ή ακρατοπηγές**, με θερμοκρασία **20-25** θεωρούνται **ελαφρώς θερμές** πηγές, με θερμοκρασία **25-32** θεωρούνται **θερμές** πηγές και τέλος με θερμοκρασία **μεγαλύτερη των 32** θεωρούνται **πολύ θερμές** πηγές.

## **Μεταλλικότητα των υδάτων των πηγών**

Ως **μεταλλική πηγή** χαρακτηρίζεται η πηγή που περιέχει σύνολο διαλυμένων στερεών πάνω από **1000 mg/kg**.

Η **ταξινόμηση** των μεταλλικών πηγών γίνεται με βάση τα **επικρατούντα ανιόντα ή κατιόντα**. Έτσι οι πηγές αυτές παίρνουν το όνομά τους από εκείνα τα ιόντα που η συμμετοχή τους στο σύνολο των ανιόντων ή κατιόντων ξεπερνά το 20% (συγκέντρωση σε meq/l).

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά των δεδομένων που συλλέχθηκαν στο πεδίο, όπως οι φυσικοχημικές παράμετροι (θερμοκρασία, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, ολικώς διαλυμένα στερεά) και οι χημικές αναλύσεις των νερών τόσο σε κύρια ιόντα όσο και σε ιχνοστοιχεία. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων. Εδώ, τα υδροχημικά διαγράμματα δίνουν πληροφορίες σχετικά με τον τύπο των νερών και τις μεταβολές της σύστασης τους, ως προς τα κύρια ανιόντα και κατιόντα. Τέλος παρατίθενται παράμετροι που υπολογίστηκαν με την χρήση του λογισμικού AQUACHEM της Waterloo Hydrogeologic όπως η σκληρότητα, τα ολικά διαλυμένα στερεά-TDS, η αλκαλικότητα, και γίνεται προσπάθεια για την εκτίμηση της σύστασης των πηγών. Εν συνεχεία, υπολογίζεται ο δείκτης κορεσμού για διάφορα ορυκτά (ανυδρίτη, βαρύτη, γύψο, αραγωνίτη, ασβεσίτη, δολομίτη, γκαιτίτη, αιματίτη, σιδερίτη, χαλκιδόνιο, χαλαζία). Το βασικότερο και σημαντικότερο ωστόσο όλων, είναι η ανάλυση και η εκτίμηση των υδάτων της υπό μελέτη περιοχής ως προς την συγκέντρωσή τους σε ραδόνιο.

### **3.2 Δείγματα από την περιοχή μελέτης στον Άγιο Αντώνιο**

Συλλέχθηκαν τέσσερα δείγματα νερού κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2016 (19/09/2016), του Σεπτεμβρίου του 2017 (18/09/2017) και του Απριλίου του 2018 (17/04/2018). Τα δύο δείγματα συλλέχθηκαν την ίδια ημέρα (19/9/2016) από δύο διαφορετικές πηγές μέσα στην υπό μελέτη περιοχή του Αγίου Αντωνίου. Το τρίτο δείγμα συλλέχθηκε (από την μία μόνο πηγή της περιοχής-πηγή 1) στις 18/09/2017, και το τέταρτο δείγμα συλλέχθηκε κι αυτό από την ίδια πηγή στις 17/04/2018. **Στα πρώτα δύο δείγματα δεν μετρήθηκε η συγκέντρωση του Na (νατρίου) και τα TDS (συνολικά διαλυμένα στερεά), καθώς υπήρξε έντονη ανάμιξη**

**θαλασσινού νερού με τα νερά των πηγών, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να ξεπερνάνε τα όρια ανιχνευσιμότητας του οργάνου.**

Η θερμοκρασία (T), η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C), και το pH των δειγμάτων του νερού και τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) μετρήθηκαν επί τόπου, με φορητά όργανα. Τα δείγματα φιλτραρίστηκαν με φίλτρα πορώδους 0.45μm, αποθηκεύτηκαν σε μπουκάλια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) και συντηρήθηκαν με οξύνιση (HNO<sub>3</sub> 2%). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά παρατίθενται στον πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Επί τόπου μετρήσεις στο πεδίο.

Δείγμα	Ημ/νία	Temperature	pH	Αγωγιμότητα	TDS
		°C		μS/cm	mg/L
AgAntonios1-1	19/09/2016	15,2	7,45	11.327	Δ.Μ
AgAntonios1-2	18/09/2017	14,3	7,6	7.520	3.750
AgAntonios2-1	19/09/2016	14,3	7,4	7.591	Δ.Μ
AgAntonios1-3	17/04/2018	14,5	7,9	7.860	4.230

Η ανάλυση των κύριων κατιόντων (K, Mg, Ca, Cl, Na, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>) και των ιχνοστοιχείων (Li, V, Mn κτλ) πραγματοποιήθηκε με φασματο

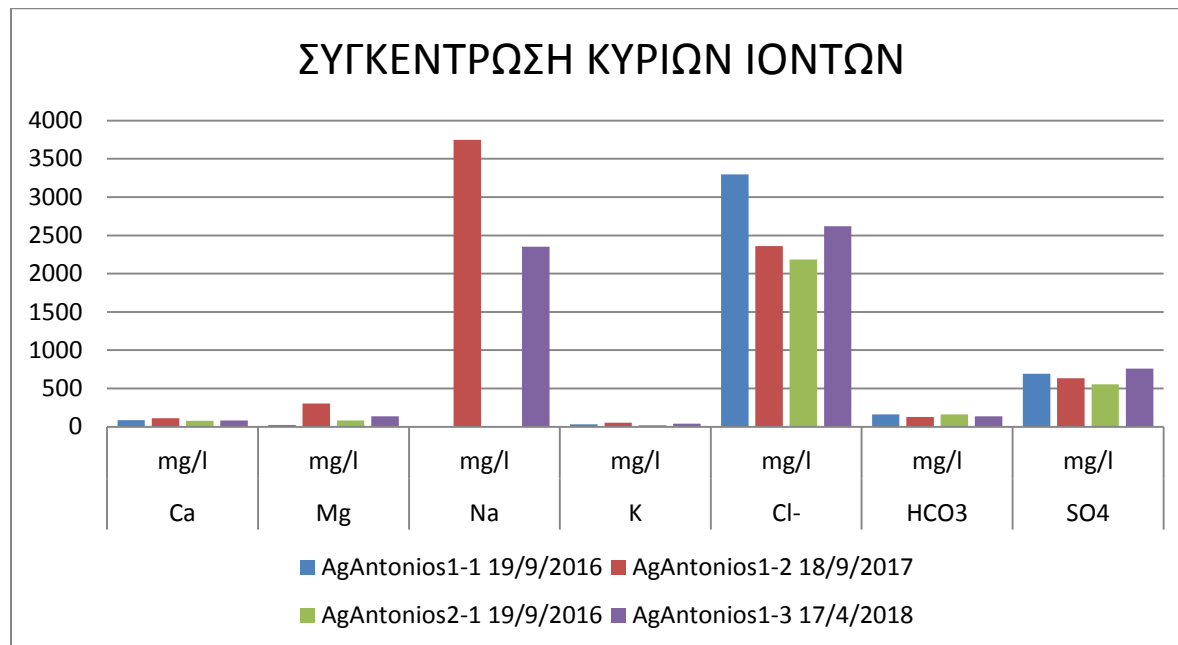
σκοπία ατομικών μαζών επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS 7500cx, Agilent Technologies), ενώ των ανιόντων με φασματοφωτομετρία (Hach DR2800).

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρατίθενται στον πίνακα 3.2 και πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.2:** Συγκεντρώσεις κύριων ιόντων Ca, Na, Cl, Mg, K, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> (ΔΜ: Δεν Μετρήθηκε).

Δείγμα	Ημ/νία	Ca	Mg	Na	K	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
AgAntonios1-1	19/9/2016	84,80	25	ΔΜ	34	3294,42	163,5	690,8
AgAntonios1-2	18/9/2017	111,70	303,60	3748	53,74	2360	128,5	633
AgAntonios2-1	19/9/2016	79,67	83,61	ΔΜ	22,78	2184,26	163,5	552,8
AgAntonios1-3	17/4/2018	82,40	136,544	2353	40,19	2618	137,4	760

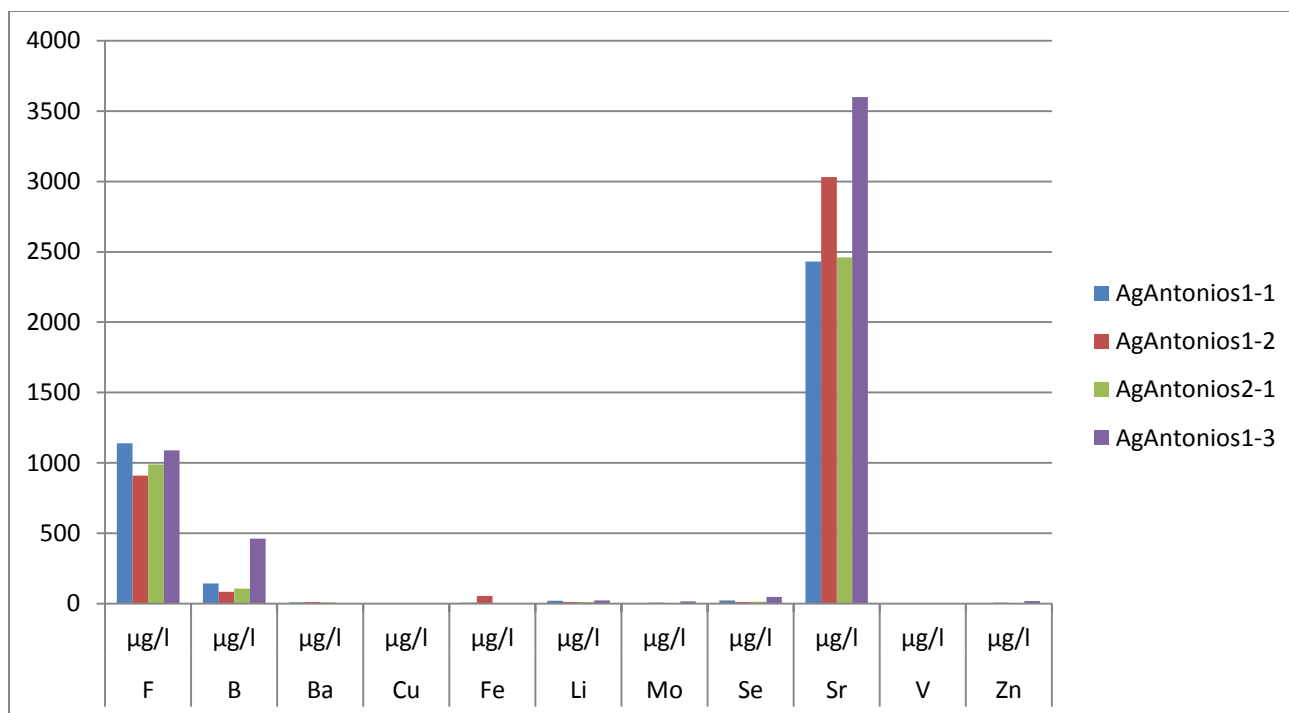
Με μία πρώτη εικόνα, σύμφωνα με το ραβδόγραμμα του σχήματος 3.1 το νερό είναι χλωρονατριούχο.



**Σχήμα 3.1:** Ραβδόγραμμα που δείχνει την συγκέντρωση των κύριων ιόντων (Ca, Na, Cl, Mg, K, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>) σε mg/L για κάθε δείγμα.

**Πίνακας 3.3:** Συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων F, B, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, Sr, V, Zn (ΔΜ: Δεν Μετρήθηκε).

ΔΕΙΓΜΑ	F	B	Ba	Cu	Fe	Li	Mo	Se	Sr	V	Zn
	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
AgAntonios1-1	1140	143,8	9,19	2,24	8,77	21,76	1,63	23,41	2430	2,76	<0,62
AgAntonios1-2	910	86,16	12,18	<0,116	54,58	13,16	7,77	12,66	3030	<0,19	7,77
AgAntonios2-1	990	106,9	10,05	1,99	6,04	13,23	2,82	15,75	2460	2,06	<0,62
AgAntonios1-3	1090	461,4	13,0	ΔΜ	Δ.Μ	24,12	16,88	47,97	3600	ΔΜ	18,53



**Σχήμα 3.2:** Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων ιχνοστοιχείων (F, B, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, Sr, V, Zn) σε μg/L για κάθε δείγμα.

Σύμφωνα με ραβδόγραμμα του σχήματος 3.2, τα νερά του Αγίου Αντωνίου έχουν υψηλότερη συγκέντρωση σε Στρόντιο (Sr) συγκριτικά με τα υπόλοιπα ιχνοστοιχεία F, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, B, V, Zn.

### 3.3 Η σύσταση του θαλασσινού νερού, και η αλατότητα.

Στις παρούσες πηγές στην περιοχή του Αγίου Αντωνίου, έχει παρατηρηθεί υψηλή περιεκτικότητα των υδάτων ιδιαίτερα σε Na και Cl γεγονός που συνδέεται με την διείσδυση-ανάμιξη θαλασσινού νερού σε αυτές, λόγω του φαινομένου Venturi και της θέσης των πηγών (πιθανή είσοδος θαλάσσης, καθώς ειδικά η πρώτη πηγή-πηγή «1» βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση από τη θάλασσα).

Το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα καλά αναμεμειγμένο διάλυμα αλάτων, αερίων, συμπλόκων, χημικών ενώσεων κ.λπ. Αυτό συμβαίνει καθώς, το θαλασσινό νερό δεν έχει την ίδια ακριβώς σύσταση σε όλη του τη μάζα, με άλλα λόγια δεν είναι ισότροπο. Οι θαλασσινές μάζες, δηλαδή μεγάλοι όγκοι θαλασσινού νερού, έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένων συστατικών. Στο θαλασσινό νερό μπορούν να βρεθούν σε μικρές, μεγάλες, ή μόλις

ανιχνεύσιμες ποσότητες όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Τα διαλυμένα συστατικά του θαλασσινού νερού χωρίζονται σε κύρια, όταν η περιεκτικότητά τους είναι πάνω από 20 mg/Kg (0,02 g/Kg), σε δευτερεύοντα, όταν η περιεκτικότητά τους είναι μεταξύ 1 mg/Kg και 20 mg/Kg και σε ιχνοστοιχεία, όταν η περιεκτικότητά τους είναι κάτω από 1 mg/Kg (τα τελευταία μπορεί να μην είναι στοιχεία με τη χημική έννοια, αλλά ιόντα, σύμπλοκα, οργανικές ενώσεις κ,λπ). Τα διαλυμένα συστατικά (όπως για παράδειγμα το νάτριο) του θαλασσινού νερού είναι αυτά που του προσδίδουν την αλμυρή γεύση και το καθιστούν ακατάλληλο για ύδρευση και άρδευση, και διαβρωτικό για τις περισσότερες μεταλλικές επιφάνειες (Δασενάκης κ.α, 2015).

Ενδεικτικά η σύσταση του θαλασσινού νερού σε ότι αφορά τα κύρια συστατικά, τα δευτερεύοντα συστατικά καθώς και τα ιχνοστοιχεία φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακας 3.4, Πίνακας 3.5, Πίνακας 3.6, Πίνακας 3.7)

**Πίνακας 3.4:** Συγκέντρωση κυρίων συστατικών στο θαλασσινό νερό (αλατότητας 35%) (Δασενάκης κ.α, 2015).

Συστατικό	Συγκέντρωση (g/Kg)	%
Cl <sup>-</sup>	19,2	55,0
Na <sup>+</sup>	10,6	30,6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,7	7,7
Mg <sup>+2</sup>	1,3	3,7
Ca <sup>+2</sup>	0,4	1,2
K <sup>+</sup>	0,38	1,1

**Πίνακας 3.5:** Συγκέντρωση δευτερευόντων συστατικών στο θαλασσινό νερό (αλατότητας 35 ‰) (Δασενάκης κ.α, 2015).

Θρεπτικά	Συγκέντρωση (mg/Kg)
Si	3,0
N	0,5
P	0,07
Fe	0,002
<b>Αέρια</b>	
N <sub>2</sub>	14
O <sub>2</sub>	6
<b>Λοιπά</b>	
Br <sup>-</sup>	65.0
C	28.0
Sr	8.0
B	4.6

**Πίνακας 3.6:** Συγκέντρωση ιχνοστοιχείων στο θαλασσινό νερό (αλατότητας 35‰) (Δασενάκης /κ.α, 2015).

Συστατικό	Συγκέντρωση (μg/Kg)
Li	185
Rb	120
I	60
Zn	10
Al	2
Mn	2
Pb	0.03
Hg	0.03
Au	0.005

**Πίνακας 3.7:** Γενική-Μέση σύσταση θαλασσινού νερού κατά Hem (Hem, 1985).

Constituent	Concentration (mg/L)	Principal form(s) in which constituent occurs
As	.003	$\text{HAsO}_4^{2-}$ , $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$
Cu	.003	$\text{Cu}^{2+}$
Fe	.003	
U	.003	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$
Mn	.002	$\text{Mn}^{2+}$
V	.002	$\text{VO}_2(\text{OH})_2^-$
Al	.001	
Ti	.001	
Sn	.0008	
Co	.0004	$\text{Co}^{2+}$
Cs	.0003	$\text{Cs}^+$
Sb	.0003	
Ag	.0003	$\text{AgCl}_2^-$
Hg	.0002	$\text{HgCl}_2(\text{aq})$
Cd	.00011	$\text{Cd}^{2+}$
W	.0001	$\text{WO}_4^{2-}$
Se	.00009	$\text{SeO}_4^{2-}$
Ge	.00007	$\text{Ge}(\text{OH})_4(\text{aq})$
Cr	.00005	
Ga	.00003	
Pb	.00003	$\text{Pb}^{2+}$ , $\text{PbCl}_2$ , $\text{PbCl}^+$
Bi	.00002	
Au	.00001	$\text{AuCl}_4^-$
Nb	.00001	
Ce	.000001	
Sc	<.000004	
La	.000003	$\text{La}(\text{OH})_3(\text{aq})$
Y	.000003	$\text{Y}(\text{OH})_3(\text{aq})$
Be	.0000006	
Th	<.0000005	
Pa	$2 \times 10^{-9}$	
Ra	$1 \times 10^{-10}$	$\text{Ra}^{2+}$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει, η **Αρχή του Marcet**. Μεταξύ 1819 και 1822 ο Alexander Marcet πραγματοποίησε μερικούς από τους πρώτους προσδιορισμούς της συγκέντρωσης των κυριότερων αλάτων του θαλασσινού νερού, από έξι διαφορετικές περιοχές. **Αποτέλεσμα της μελέτης** των μετρήσεων αυτών, ήταν ότι, **ανεξαρτήτως της περιοχής που**



**πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία, η σχετική αναλογία των κυριοτέρων διαλυτών συστατικών στο θαλασσίνο νερό είναι σταθερή.** Με άλλα λόγια το θαλασσίνο νερό είτε προερχόμενο από τον Ατλαντικό Ωκεανό (ο οποίος έχει μέση αλατότητα), είτε από τη Μεσόγειο θάλασσα (όπου η αλατότητα είναι υψηλή), η αναλογία Na/Cl, Na/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> κ.λ.π είναι σχεδόν σταθερή. Η διαπίστωση αυτή έγινε αργότερα γνωστή και ως Αρχή του Marcet.

Συγκρίνοντας τις τιμές των κύριων στοιχείων των υπό μελέτη πηγών (Πίνακα 3.2), με τις μέσες συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων στο θαλασσίνο νερό (Πίνακας 3.4) **είναι φανερή**, με τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις σε νάτριο και χλώριο στις πηγές-συγκρίσιμες με το νάτριο και χλώριο της θαλάσσης, **η ανάμιξη του θαλασσινού νερού με το νερό των πηγών.**

### **3.4 Υδροχημικά διαγράμματα**

Για την δημιουργία των υδροχημικών διαγραμμάτων καθώς και για την υδροχημική εκτίμηση των υδάτων του Αγίου Αντωνίου θα ληφθούν υπ' όψιν η δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στις 19/09/2017 (AgAntonios1-2) και η δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στις 17/04/2018 (AgAntonios1-3), καθώς στις άλλες λόγω τεχνικών προβλημάτων δεν μετρήθηκε το νάτριο (Na). Στους ακόλουθους πίνακες είναι υπογραμμισμένες οι δύο αυτές δειγματοληψίες με κίτρινο χρώμα.

Κατά τη δειγματοληψία στην **πρώτη πηγή**, η οποία έγινε στις **19/09/2016** (AgAntonios1-1) το νερό είχε θερμοκρασία (T) ίση με 15,2°C, pH ίσο με 7,45 (Πίνακα 3.1), Eh ίσο με 240mV (Πίνακα 3.8), ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με 11,327uS/cm, Συνολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS) ίσα με 240mg/L ενώ η περιεκτικότητα του νερού σε κύρια ιόντα φαίνεται στο διάγραμμα Schoeller (σχήμα 3.4 και 3.5) και τον πίνακα 3.2.

Κατά τη δειγματοληψία στην **δεύτερη πηγή**, η οποία έγινε στις **19/09/2016** (AgAntonios2-1) το νερό είχε θερμοκρασία (T) ίση με 14,3 °C, pH ίσο με 7,4 (Πίνακα 3.1), Eh ίσο με 244mV (Πίνακα 3.8), Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ίση με 7591uS/cm, Συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) ίσα με 244mg/L ενώ η περιεκτικότητα του νερού σε κύρια ιόντα φαίνεται στο διάγραμμα Schoeller (σχήμα 3.4 και 3.5) και τον πίνακα 3.2.

Κατά τη δειγματοληψία στην **πρώτη πηγή**, η οποία έγινε στις **18/09/2017** (AgAntonios1-2) το νερό είχε θερμοκρασία (T) ίση με 14,3 °C, pH ίσο με 7,6 (Πίνακα 3.1), Eh ίσο με 287mV (Πίνακα 3.8), Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ίση με 7520uS/cm, Συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS)

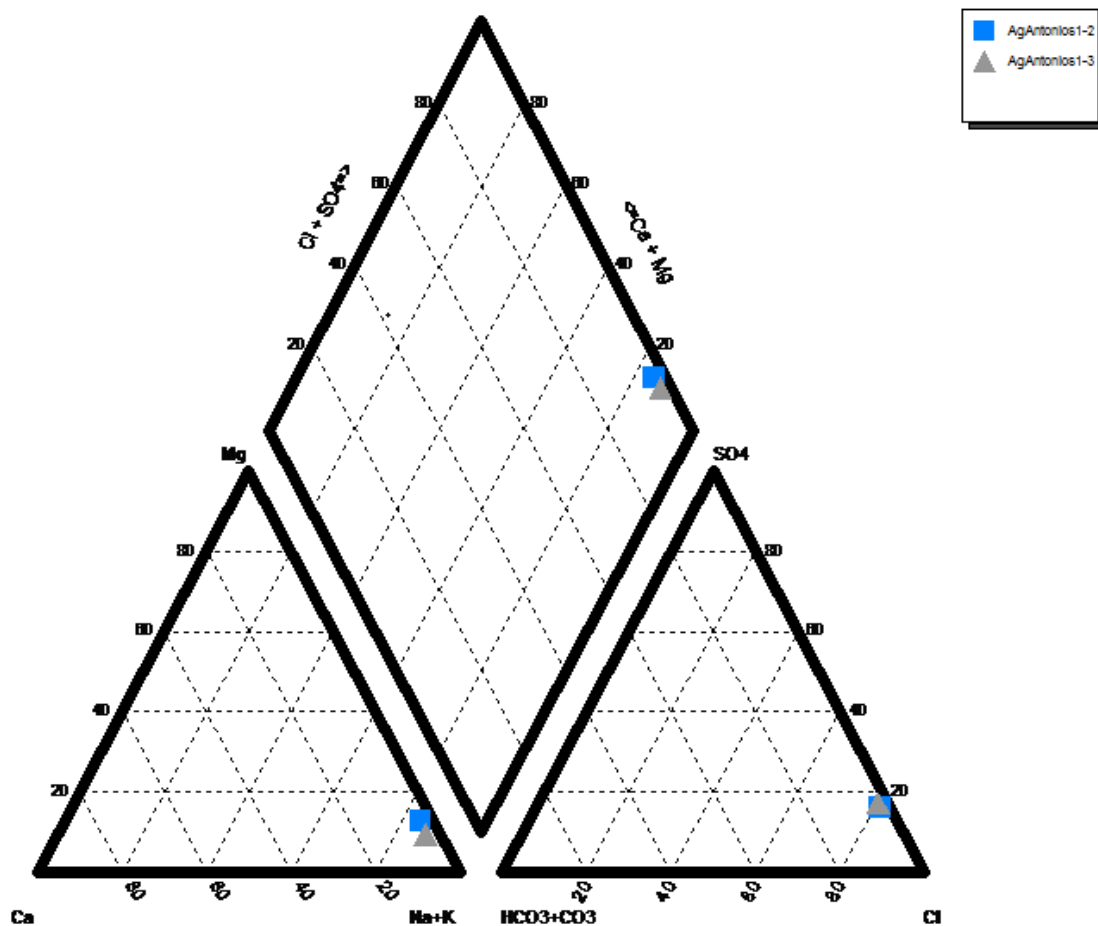
ίσα με 3750mg/L ενώ η περιεκτικότητα του νερού σε κύρια ιόντα φαίνεται στο διάγραμμα Schoeller (σχήμα 3.4 και 3.5) και τον πίνακα 3.2. Επίσης σε αυτό το δείγμα μετρήθηκε η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC) ίσο με 1.25 (Πίνακα 3.8).

Κατά τη δειγματοληψία στην **πρώτη πηγή**, η οποία έγινε στις **17/04/2018** (AgAntonios1-3) το νερό είχε θερμοκρασία (T) ίση με 14,5 °C, pH ίσο με 7,9 (Πίνακα 3.1), Eh ίσο με 172,7mV (Πίνακα 3.8), Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ίση με 7860uS/cm, Συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) ίσα με 4230mg/L ενώ η περιεκτικότητα του νερού σε κύρια ιόντα φαίνεται στο διάγραμμα Schoeller (σχήμα 3.4 και 3.5) και τον πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.8:** Μετρήσεις Eh, TOC, για κάθε δείγμα (ΔΜ=Δεν Μετρήθηκε)

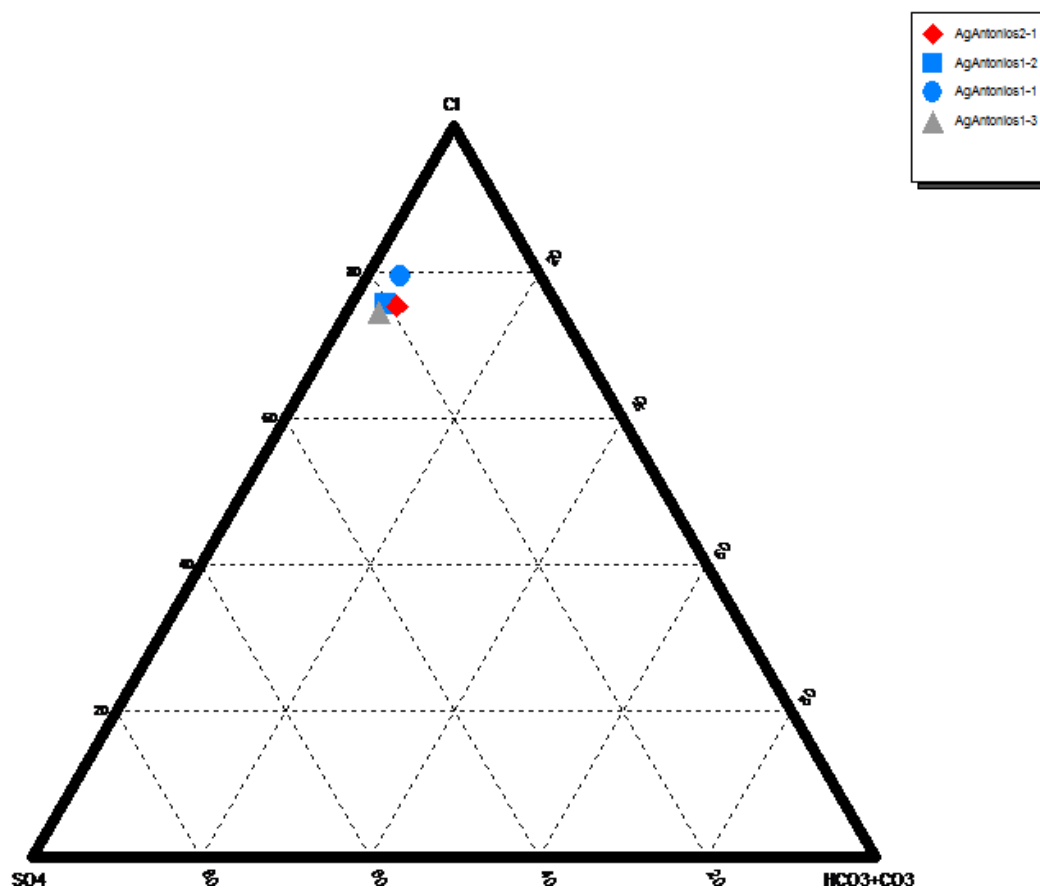
Δείγμα	Eh	TOC
	mV	mg/l
<b>AgAntonios1-1</b>	240	ΔΜ
<b>AgAntonios1-2</b>	287	1,25
<b>AgAntonios2-1</b>	244	ΔΜ
<b>AgAntonios1-3</b>	172,7	ΔΜ

Καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις νατρίου (Na) στα δύο πρώτα δείγματα, αυτά, δεν δύναται να χαρακτηριστούν ως προς τα κατιόντα και ως προς το σύνολο. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ότι, ως προς τα κατιόντα τα δείγματα **AgAntonios1-2** και **AgAntonios1-3** χαρακτηρίζονται ως **νατριούχα (Na)**, ως προς τα ανιόντα **χλωριούχα (Cl)** και στο σύνολο **χλωρονατριούχα (NaCl)**.

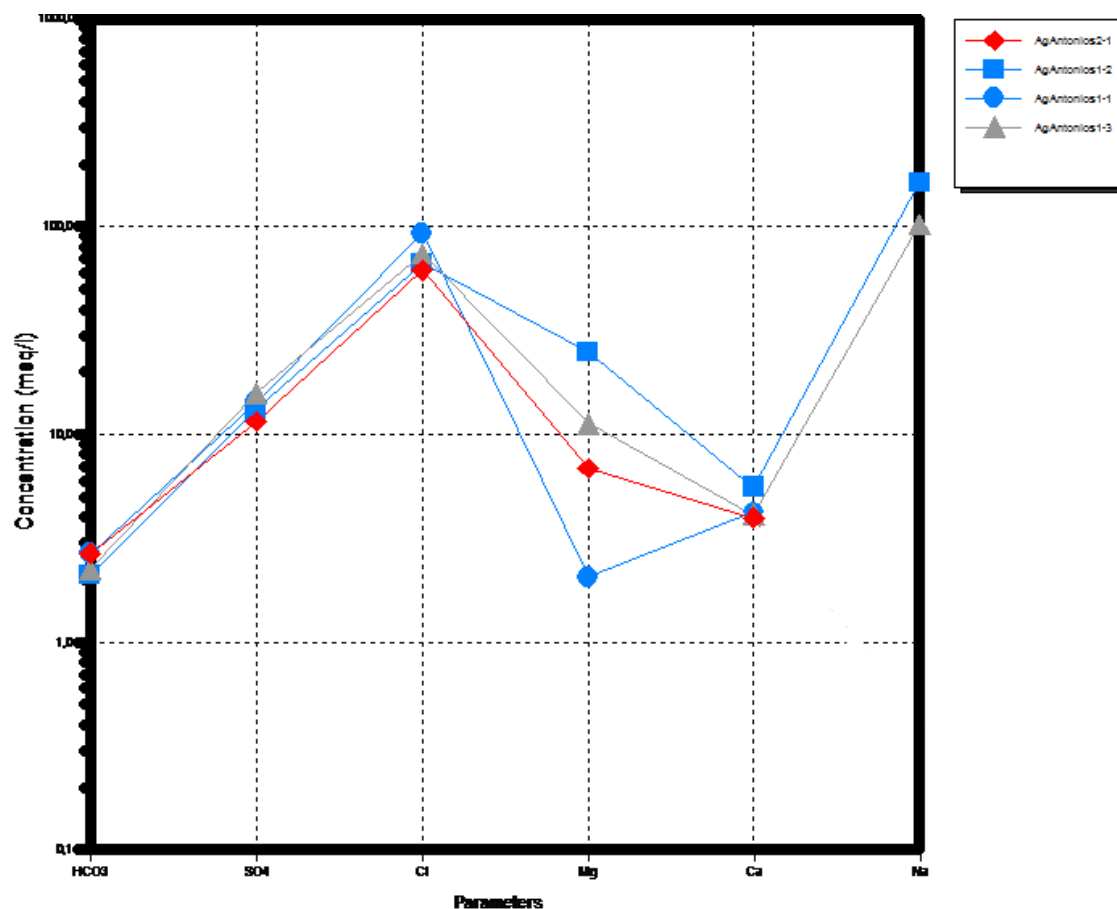


**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα Piper, παρίσταται η σύσταση του νερού του τρίτου και του τέταρτου δείγματος.

Η εκτίμηση των συγκεντρώσεων των κύριων ιόντων του νερού σε σχέση και με τα τέσσερα δείγματα, με βάση το διάγραμμα στο σχήμα 3.3, δεν δύναται να πραγματοποιηθεί ως προς τα κατιόντα και ως προς το σύνολο, μπορεί μόνο να περιοριστεί ο προσδιορισμός τους σε ότι αφορά τα ανιόντα, καθώς οι τιμές του Na στα πρώτα δύο δείγματα δεν μετρήθηκαν. Το συμπέρασμα από το διάγραμμα του σχήματος είναι ότι τα δείγματα είναι χλωριούχα.



**Σχήμα 3.4:** Τριγωνικό διάγραμμα ανιόντων με βάση το οποίο μπορεί να γίνει ο χαρακτηρισμός του νερού λαμβάνοντας υπόψη και τα τέσσερα δείγματα μαζί, συμπεριλαμβανομένων τα δύο που δεν μετρήθηκε το νάτριο (Na).



**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα Schoeller (σε meq/L), παρίστανται οι συστάσεις του νερού των δειγμάτων από την περιοχή μελέτης ως προς τα Ca, Na, Cl, Mg, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>.

Στο διάγραμμα του Schoeller (Σχήμα 3.4, Σχήμα 3.5) βλέπουμε ότι:

Τα **HCO<sub>3</sub>**, **SO<sub>4</sub>**, **Cl**, έχουν παρόμοιες τιμές και στις τρεις δειγματοληψίες: Δ1) HCO<sub>3</sub>=2,68meq/L (163,5mg/L), Δ2) HCO<sub>3</sub>=2,11meq/L (128,5mg/L), Δ3) HCO<sub>3</sub>=2,68meq/L (163,5mg/L), Δ4) HCO<sub>3</sub>=2,25meq/L (137,44mg/L), Δ1) SO<sub>4</sub>=14,39meq/L (690,8mg/L), Δ2) SO<sub>4</sub>=13,19meq/L (633mg/L), Δ3) SO<sub>4</sub>=11,52meq/L (552,8mg/L), Δ4) SO<sub>4</sub>=15,83meq/L (760mg/L), Δ1) Cl=92,92meq/L (3294,42mg/L), Δ2) Cl=66,57meq/L (2360mg/L), Δ3) Cl=61,61meq/L (2184,26mg/L), Δ4) Cl=73,84meq/L (2618mg/L).

Το **Mg** παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σε κάθε μια δειγματοληψία: Δ1) Mg<2,06meq/L (<25mg/L), Δ2) Mg=24,98meq/L (303,6mg/L), Δ3) Mg=6,88meq/L (83,61mg/L), Δ4) Mg=11,24meq/L (136,544mg/L).

Το **Ca** παρουσιάζει μικρή διαφορά και στις τρεις περιπτώσεις Δ1)  $\text{Ca}=4,23\text{meq/L}$  ( $84,82\text{mg/L}$ ), Δ2)  $\text{Ca}=5,57\text{meq/L}$  ( $111,7\text{mg/L}$ ), Δ3)  $\text{Ca}=3,98\text{meq/L}$  ( $79,67\text{mg/L}$ ), Δ4)  $\text{Ca}=4,11\text{meq/L}$  ( $82,4011\text{mg/L}$ ).

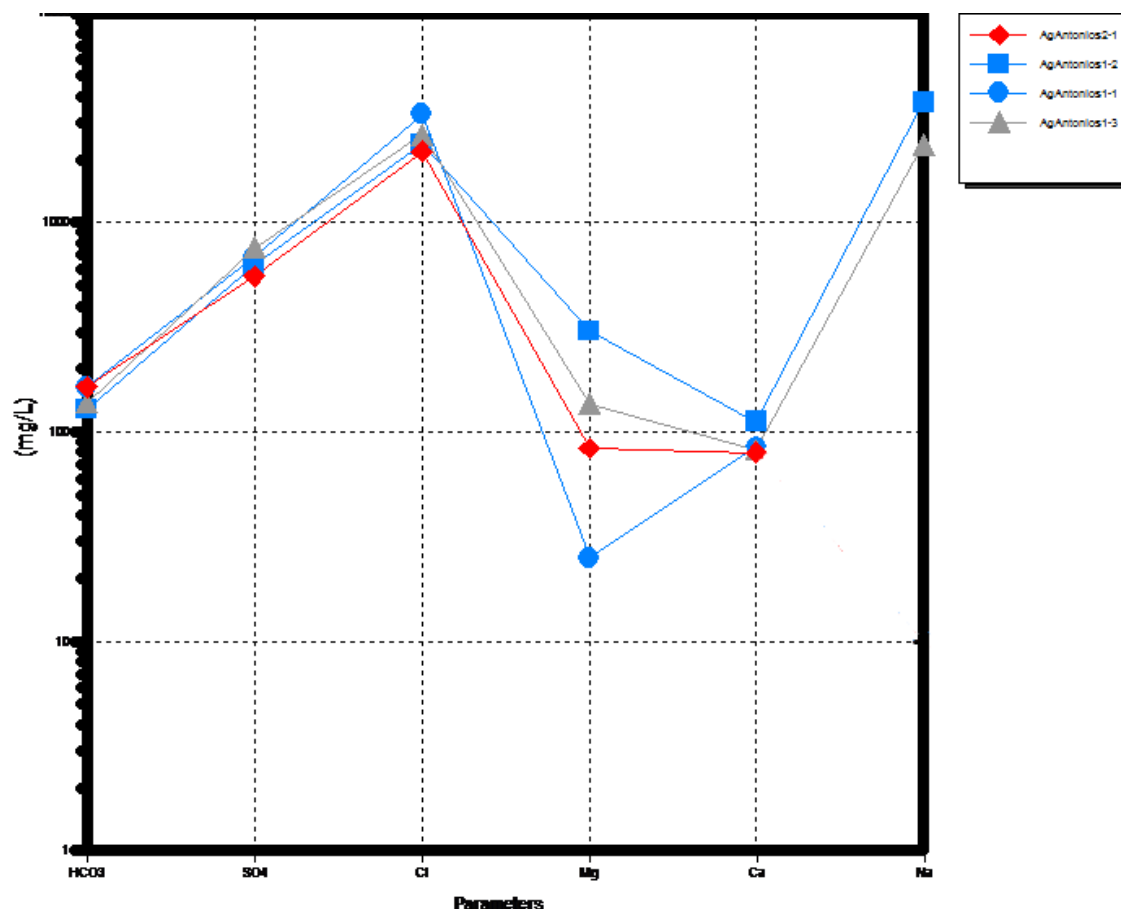
Το **Na** δεν μετρήθηκε στα πρώτα δύο δείγματα.

\*Δ1): AgAntonios1-1.

\*Δ2): AgAntonios2-1.

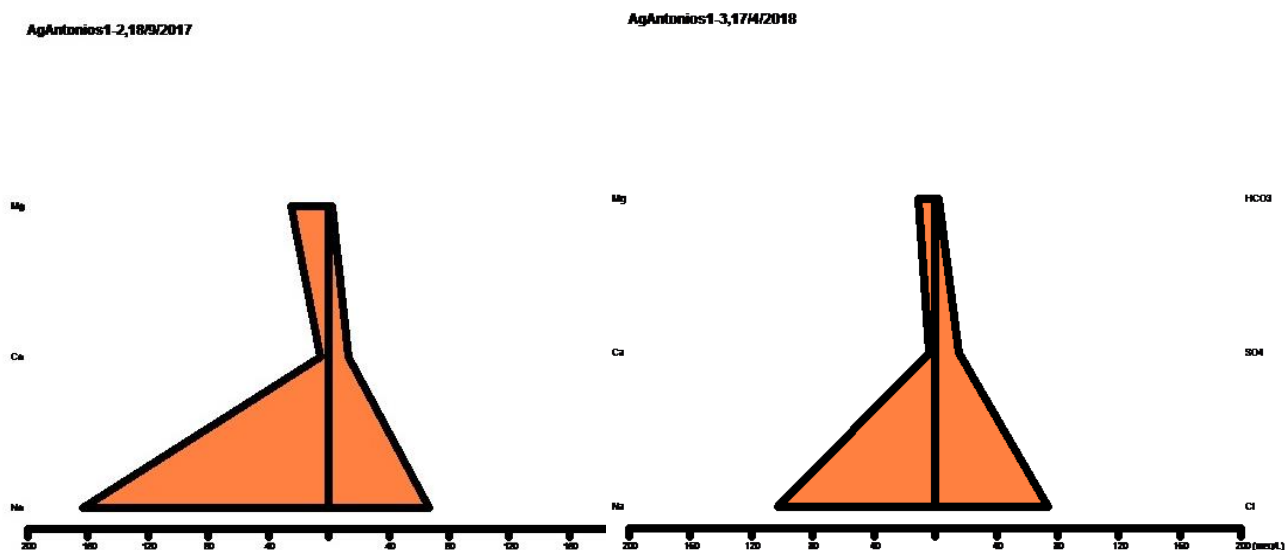
\*Δ3): AgAntonios1-2.

\*Δ4): AgAntonios1-3.

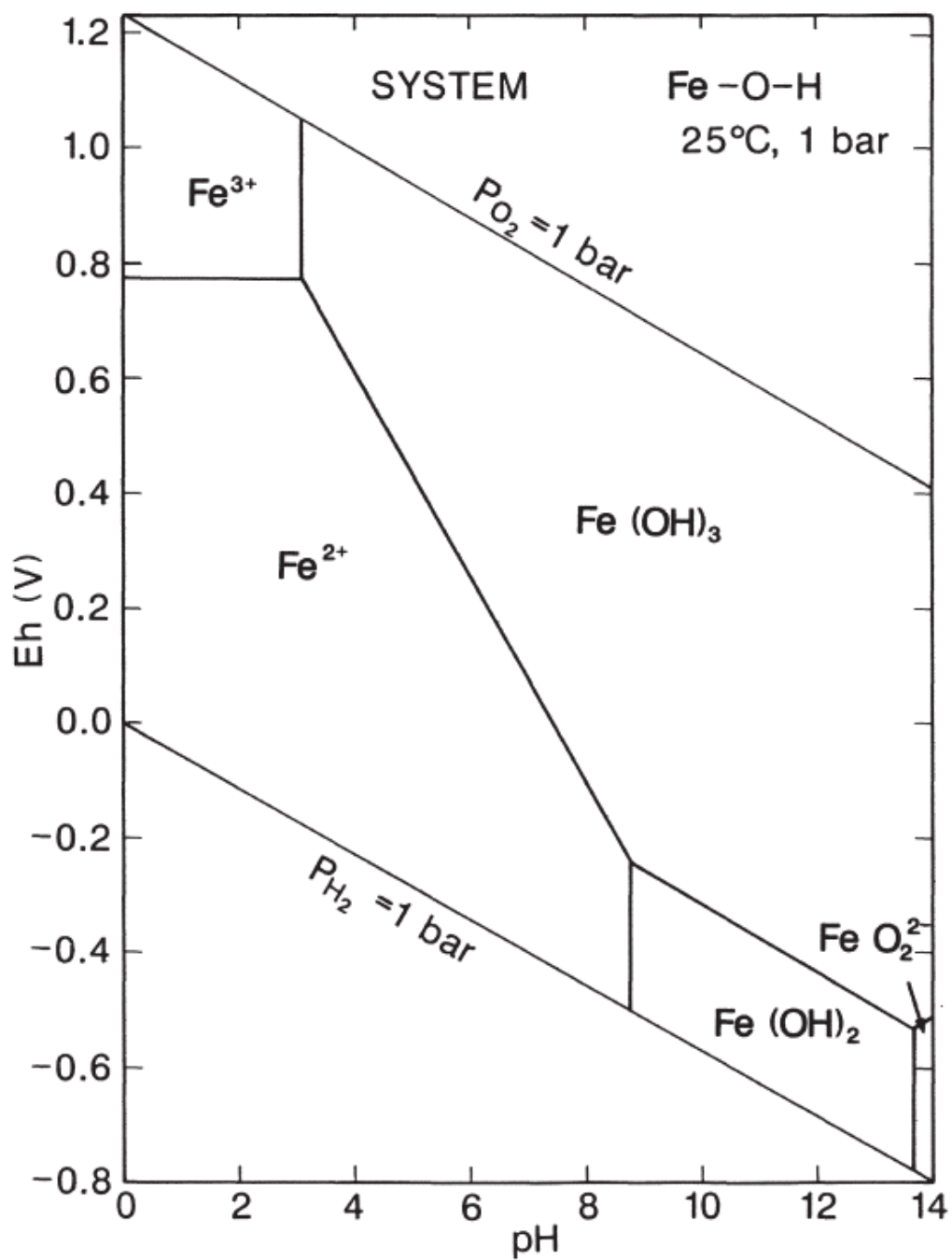


**Σχήμα 3.5:** Διάγραμμα Schoeller (σε mg/L), παρίστανται οι συστάσεις του νερού των δειγμάτων από την περιοχή μελέτης ως προς Ca, Na, Cl, Mg, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>.

Το μοτίβο του τρίτου και τέταρτου δείγματος αντίστοιχα, που φαίνεται στο διάγραμμα Stiff (σχήμα 3.6) αντιστοιχεί σε χλωρονατριούχο νερό.

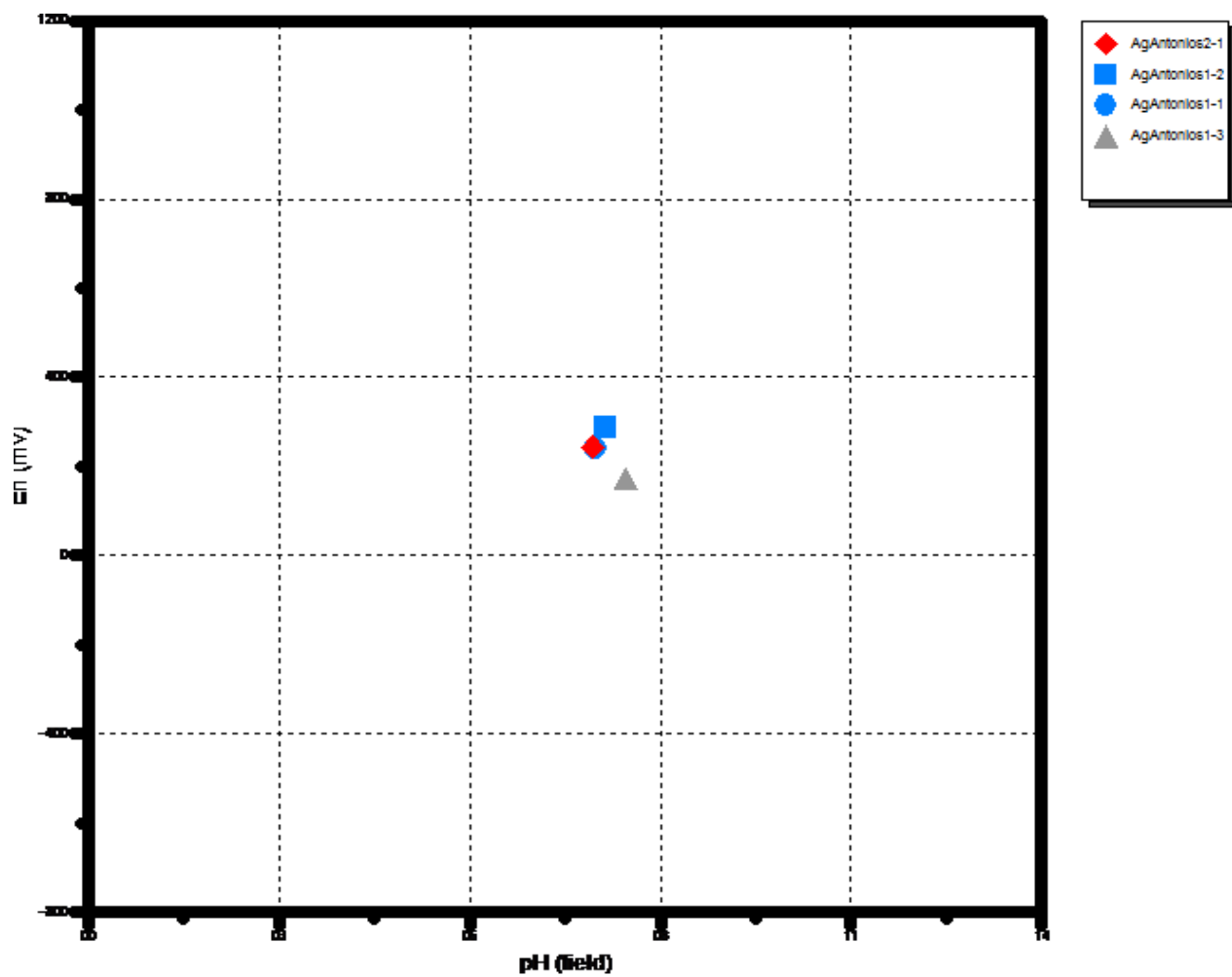


**Σχήμα 3.6:** Διάγραμμα Stiff, παρίστανται οι συστάσεις του νερού των δειγμάτων AgAntonios1-2 (αριστερά) και AgAntonios1-3 (δεξιά), από την πρώτη πηγή.

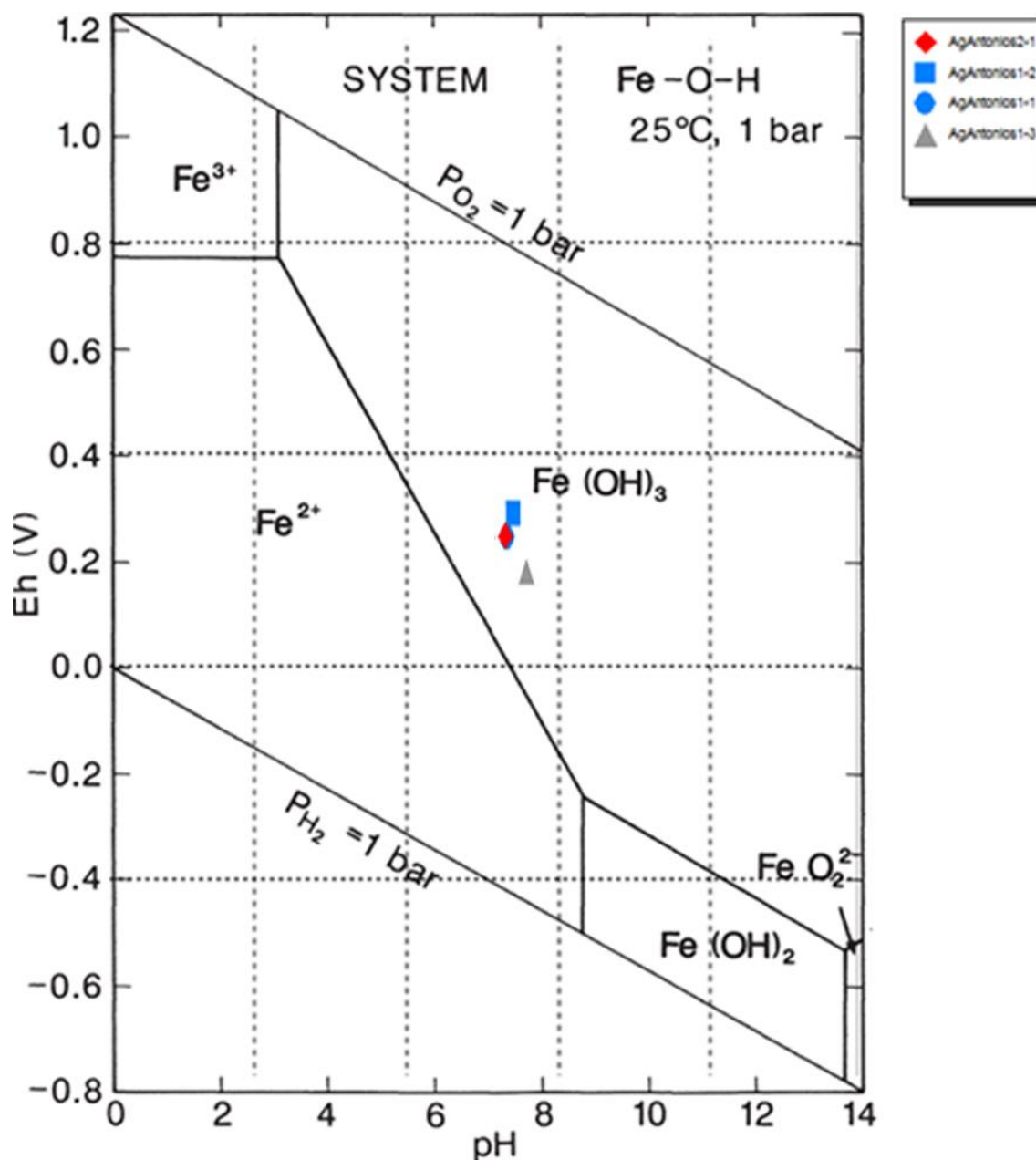


**Σχήμα 3.7:** Πρότυπο διάγραμμα Eh-pH που δείχνει τις περιοχές του συστήματος Fe-O-H θεωρώντας το Fe(OH) ως σταθερή φάση Fe(III).`



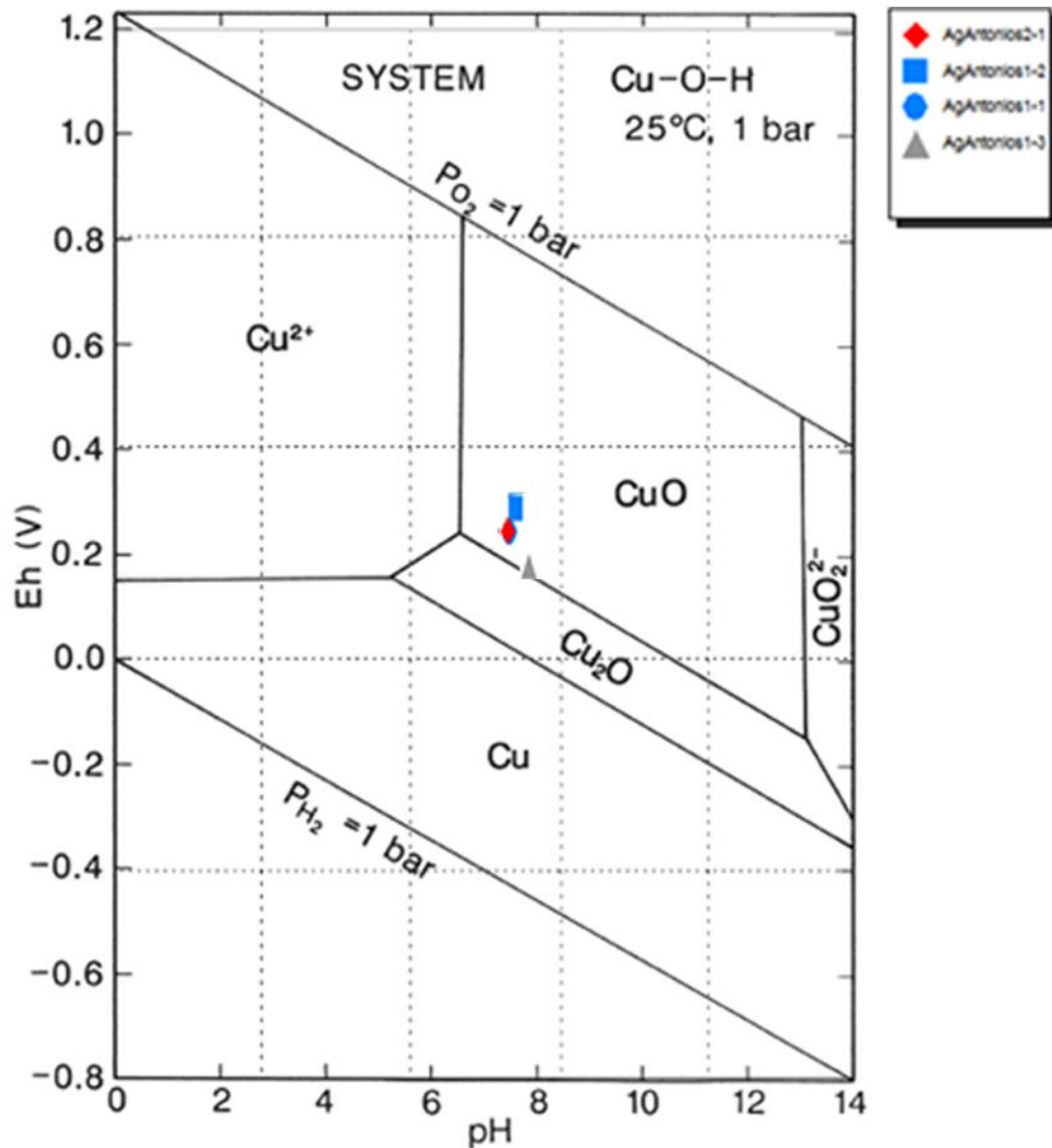


Σχήμα 3.8: Διάγραμμα pH-Eh από τις μετρούμενες τιμές στο πεδίο.



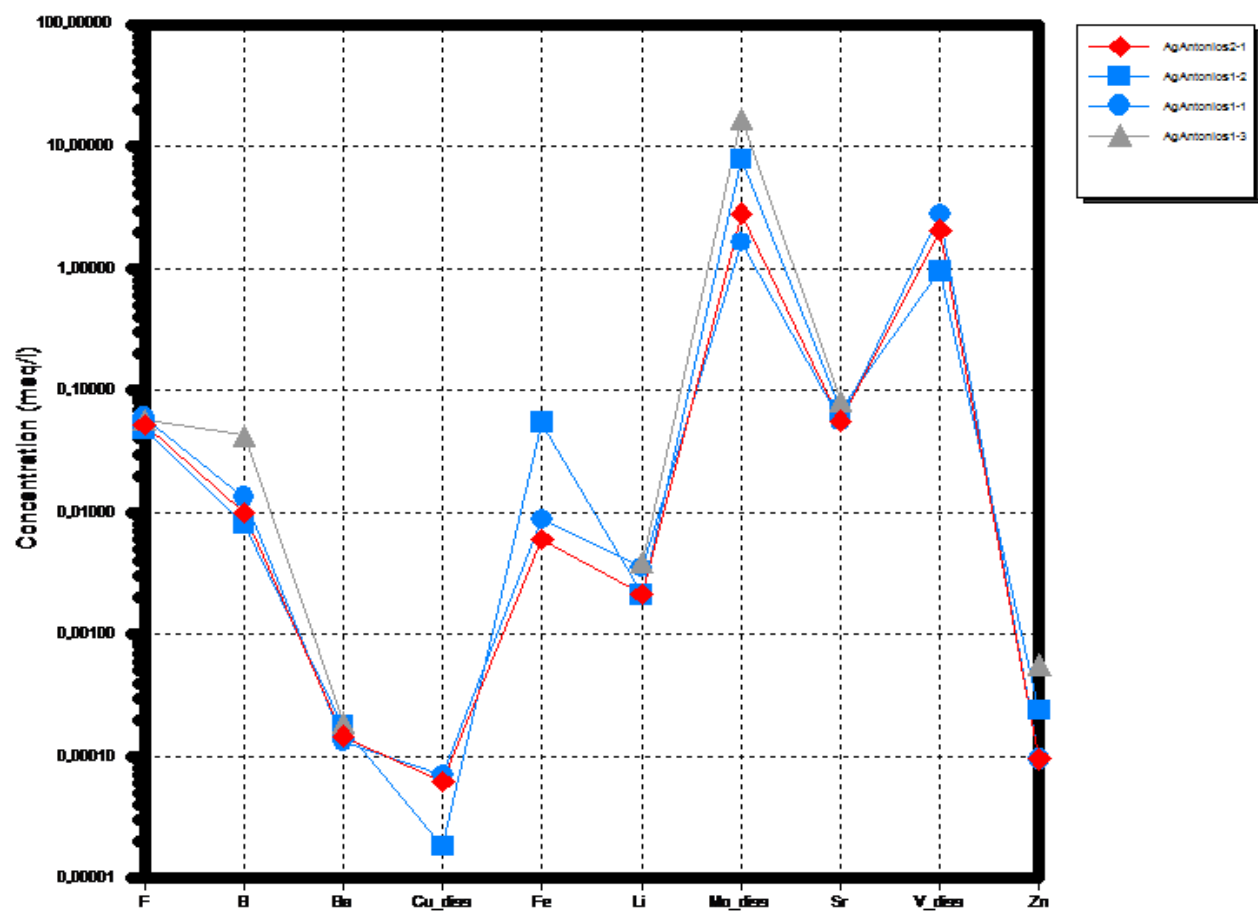
**Σχήμα 3.9:** Διάγραμμα pH-Eh από τις μετρούμενες τιμές στο πεδίο σε σχέση με το πρότυπο διάγραμμα που καθορίζει σε τι περιοχή-μορφή βρίσκεται ο σίδηρος που υπάρχει στο νερό των δειγμάτων.

Όσον αφορά τις οξειδοαναγωγικές ιδιότητες των δειγμάτων. Από το διάγραμμα του σχήματος 3.9 φαίνεται ότι ο σίδηρος που περιέχεται στο νερό του Αγίου Αντωνίου είναι τρισθενής ( $Fe(OH)_3$ ).

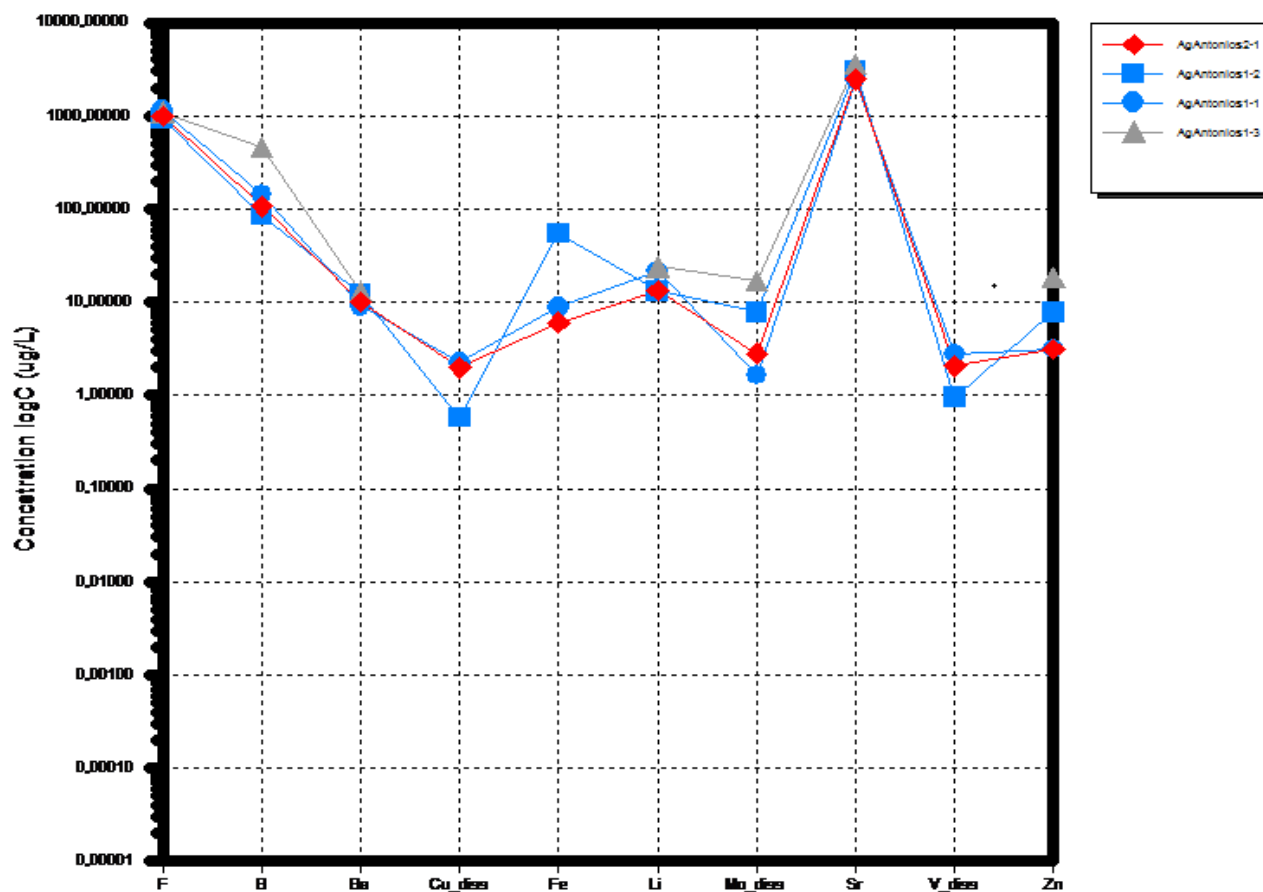


**Σχήμα 3.10:** Διάγραμμα pH-Eh από τις μετρούμενες τιμές στο πεδίο σε σχέση με το πρότυπο διάγραμμα που καθορίζει σε τι περιοχή-μορφή βρίσκεται ο χαλκός που υπάρχει στο νερό, στο σύστημα Cu-O-H, θεωρώντας την ενεργότητα του διαλυμένου χαλκού  $\text{Cu} = 10^{-6}$ .

Όσον αφορά τις οξειδοαναγωγικές ιδιότητες των δειγμάτων, από το διάγραμμα του σχήματος 3.10 φαίνεται ότι ο χαλκός (Cu) που περιέχεται στο νερό του Αγίου Αντωνίου είναι οξειδωμένης μορφής CuO.



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα Schoeller περιεκτικότητας σε F, B, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, Sr, V, Zn σε meq/L.



**Σχήμα 3.12:** Διάγραμμα Schoeller περιεκτικότητας σε F, B, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, Sr, V, Zn σε mg/L.

Και στα δύο διαγράμματα των σχημάτων 3.11 και 3.12 παρατηρούμε ότι τα **F, B, Ba** έχουν παρόμοιες συγκεντρώσεις και στα τέσσερα δείγματα: Δ1) F=0,06meq/L (1,14mg/L), B=0,01meq/L (0,1438mg/L), Ba=0,000134meq/L (0,00919mg/L), Δ2) F=0,05meq/L (0,91mg/L), B=0,01meq/L (0,08616mg/L), Ba=0,000177meq/L (0,01218mg/L), Δ3) F=0,05meq/L (0,99mg/L), B=0,01meq/L (0,1069mg/L), Ba=0,00146meq/L (0,1005mg/L), Δ4) F=0,06meq/L (1,09mg/L), B=0,04meq/L (0,461403mg/L), Ba=1,3384\*10<sup>-7</sup>meq/L (0,00919mg/L).

Το **Cu** στην τρίτη δειγματοληψία παρουσιάζει μείωση ενώ στις υπόλοιπες είναι πολύ κοντά: Δ1) Cu=3,52501\*10<sup>-1</sup>meq/L (2,24ug/L), Δ2) Cu=3,6509\*10<sup>-6</sup>meq/L (<0,116ug/L), Δ3) Cu=0,13159\*10<sup>-1</sup>meq/L (1,99ug/L), Δ4) Cu=ΔM.

Το **Fe** στις πρώτες δύο είναι πολύ κοντά ενώ στην τρίτη αυξάνεται: Δ1) Fe=0,00047meq/L (0,00877mg/L), Δ2) Fe=0,00293meq/L (0,05458mg/L), Δ3) Fe=0,00032meq/L (0,00604mg/L), Δ4) Fe=ΔΜ.

Το **Li** και στις τρεις περιπτώσεις έχει συγκεντρώσεις πολύ κοντινές Δ1) Li=0,003135meq/L (0,02176mg/L), Δ2) Li=0,001896meq/L (0,01316mg/L), Δ3) Li=0,001906meq/L (0,01323mg/L), Δ4) Li=0,003475724meq/L (0,024125mg/L).

Το **Mo** και στις τρεις δειγματοληψίες παρουσιάζει πολύ κοντινές τιμές με μια μικρή όμως αύξηση στην τρίτη και τέταρτη: Δ1) Mo=3,39796\*10<sup>-5</sup>meq/L (1,63ug/L), Δ2) Mo=0,00016meq/L (7,77ug/L), Δ3) Mo=5,87867\*10<sup>-5</sup>meq/L (2,82ug/L), Δ4) Mo=0,000351969meq/L (16,8856ug/L).

Τα **Se** και **Sr** παρουσιάζουν επίσης πολύ κοντινές τιμές και στις τέσσερις περιπτώσεις: Δ1) Se=0,00118meq/L (23,41ug/L), Sr=0,06meq/L (2,43mg/L), Δ2) Se=0,0008meq/L (12,66ug/L), Sr=0,07meq/L (3,035mg/L), Δ3) Se=0,001meq/L (15,75ug/L), Sr=0,06meq/L (2,465mg/L), Δ4) Se=0,003644956meq/L (47,9743ug/L), Sr=0,08meq/L (3,60487841mg/L).

Το **V** είναι περίπου ίσο και στην πρώτη και στην δεύτερη δειγματοληψία όμως στην τρίτη παρουσιάζει μια μικρή ελάττωση: Δ1) V=0,00022meq/L (2,76ug/L), Δ2) V=1,48404\*10<sup>-5</sup>meq/L (<0,189ug/L), Δ3) V=0,00016meq/L (2,06ug/L), Δ4) V=ΔΜ.

Το **Zn** παρουσιάζει μόνο στο δεύτερο δείγμα μείωση: Δ1) Zn=0,9119\*10<sup>-5</sup>meq/L (<0.625 ug/L), Δ2) Zn=0,0002376 meq/L (7,77 ug/L), Δ3) Zn=ΔΜ, Δ4) Zn=0,000567088meq/L (18,5381ug/L).

\*ΔΜ: Δεν Μετρήθηκε.

\*Δ1): AgAntonios1-1.

\*Δ2): AgAntonios2-1.

\*Δ3): AgAntonios1-2.

\*Δ4): AgAntonios1-3.

### 3.5 Δείκτης κορεσμού Langelier.

Ο δείκτης κορεσμού SI (Saturation index) ή δείκτης κορεσμού Langelier, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των υδάτων όσον αφορά την διαλυτότητα των ορυκτών σε

αυτά, καθώς επίσης για την πρόβλεψη της τάσης του νερού για διάβρωση και σχηματισμό επικαθίσεων. Είναι ένας ποσοτικός δείκτης που επινοήθηκε στις αρχές του περασμένου αιώνα από τον Langelier και εκφράζει την θερμοδυναμική σταθερότητα του νερού ενώ υπολογίζεται από τον τύπο:  $SI = \log(IAP/K_{sp})$ , όπου IAP είναι το ιοντικό γινόμενο των ενεργοτήτων και  $K_{sp}$  είναι το γινόμενο της διαλυτότητας. Επίσης ο δείκτης κορεσμού Langelier έχει γενική μορφή:  $SI = pH - pH_s$  όπου pH είναι το μετρούμενο pH του νερού, και  $pH_s$  είναι η θεωρητική τιμή pH κορεσμού.

- $SI > 0 \rightarrow$  υπερκορεσμός, εν δυνάμει δημιουργία επικαθίσεων.
- $SI = 0 \rightarrow$  κορεσμός, υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στο διάλυμα και το ορυκτό.
- $SI < 0 \rightarrow$  ακόρεστο, υπάρχουν συνθήκες διαλυτοποίησης του ορυκτού.

Εξετάστηκαν οι δείκτες κορεσμού για τα εξής 10 ορυκτά : Ανυδρίτη, βαρύτη, γύψο, αραγωνίτη, ασβεστίτη, δολομίτη, γκαϊτίτη, αιματίτη, σιδερίτη, χαλκηδόνιο και τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα 3.10.

**Πίνακας 3.10:** Τιμές του SI για διάφορα ορυκτά στα δείγματα που συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης του Αγίου Αντωνίου.

Δείγμα	SI Ανυδρίτη	SI Βαρύτη	SI Γύψο	SI Αραγωνίτη	SI Ασβεστίτη	SI Δολομίτη	SI Γκαϊτίτη	SI Αιματίτη	SI Σιδερίτη	SI Χαλκηδόνιο	SI Χαλαζία
AgAntonios1-1	-1,33	-0,15	-1,08	-0,48	-0,33	-0,97	6,42	14,8	-2,32	-0,7	-0,24
AgAntonios1-2	-1,56	-0,31	-1,31	-0,45	-0,3	0,06	7,64	17,24	-2,37	-0,54	-0,08
AgAntonios2-1	-1,41	-0,14	-1,16	-0,53	-0,38	-0,53	6,21	14,37	-2,47	-0,66	-0,19
AgAntonios1-3	-1,50	-0,11	-1,25	-0,21	-0,061	0,31	-	-	-	-0,42	0,05

Από τον παραπάνω πίνακα 3.10 με τους υπολογισμένους δείκτες κορεσμού διαπιστώνουμε ότι:

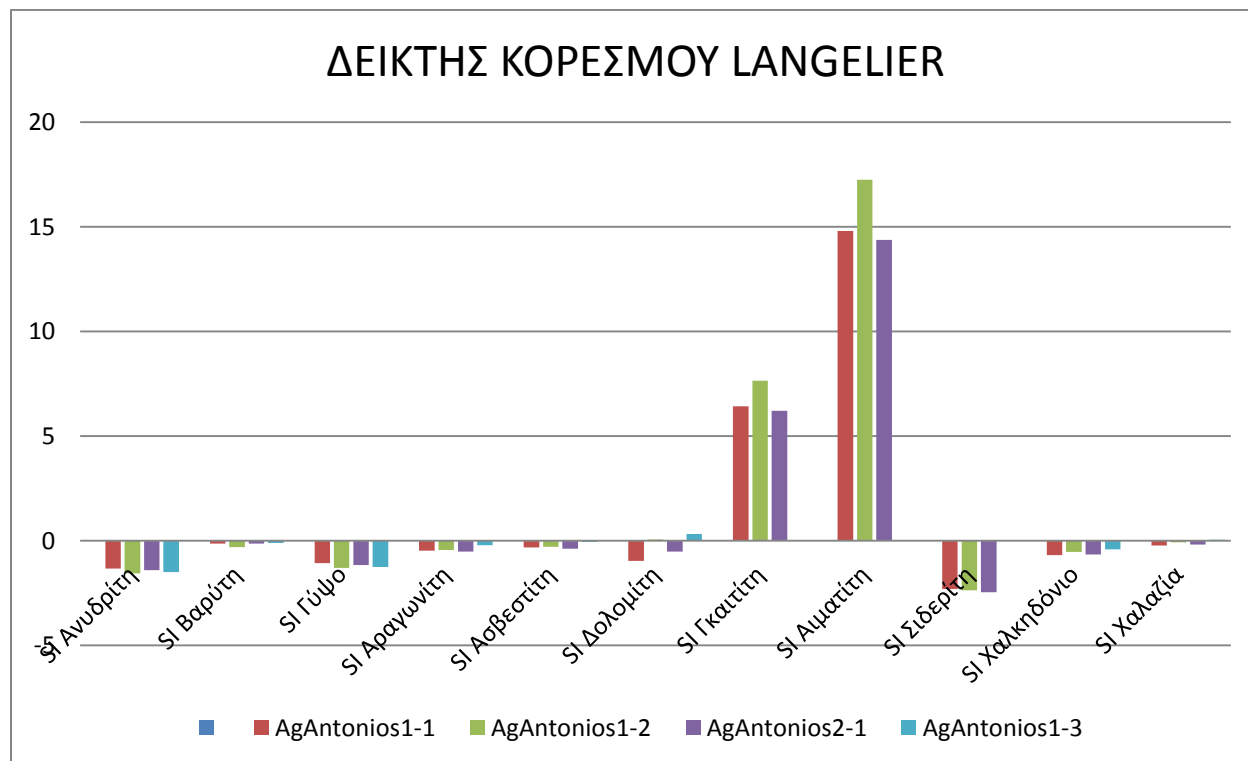
Σχετικά με τον **ανυδρίτη**, τον **βαρύτη** και τον **γύψο** οι τιμές του δείκτη κορεσμού είναι αρνητικές ( $SI < 0 \rightarrow$  ακόρεστο) συνεπώς **τα δείγματα είναι ακόρεστα**. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι ο δείκτης κορεσμού του βαρύτη και στα τέσσερα δείγματα, έχει τιμές οριακά αρνητικές αλλά προσεγγίζει αρκετά το μηδέν.

Οι τιμές που παρουσιάζει ο δείκτης κορεσμού για τον **αραγωνίτη**, **ασβεστίτη** και **δολομίτη** είναι και εδώ αρνητικές ( $SI < 0 \rightarrow$  ακόρεστο). Αυτό σημαίνει ότι **τα δείγματα είναι ακόρεστα και περιέχουν διαλυμένο αραγωνίτη, ασβεστίτη και δολομίτη**. Καθώς οι τιμές του δείκτη

κορεσμού όμως τείνουν στο μηδέν, οριακά θεωρούνται κορεσμένα τα δείγματα για τα παραπάνω ορυκτά. Εξαίρεση αποτελεί το τρίτο και το τέταρτο δείγμα όπου ο δείκτης κορεσμού του δολομίτη είναι οριακά μεγαλύτερος του μηδενός ( $SI > 0 \rightarrow$  υπέρκορο). Έτσι λοιπόν το τρίτο, και τέταρτο δείγμα θεωρούνται οριακά υπέρκορο σε δολομίτη.

Στην συνέχεια βλέπουμε ότι οι τιμές του δείκτη κορεσμού του γκαιτίτη και του αιματίτη είναι θετικές ( $SI > 0 \rightarrow$  υπέρκορο), ενώ του σιδερίτη είναι αρνητικές ( $SI < 0 \rightarrow$  ακόρεστο). Αυτό σημαίνει ότι τα δείγματα είναι υπέρκορα σε ότι αφορά τον γκαιτίτη και τον αιματίτη, ενώ είναι ακόρεστα σε σιδερίτη. Τα δύο πρώτα λοιπόν, υπάρχει πιθανότητα να καθιζάνουν στο νερό αυτό όμως εξαρτάται από τον παράγοντα της κινητικής τους. Αν δηλαδή έχουν αυξημένη κινητικότητα, δεν θα δημιουργήσουν συσσωμάτωμα και δεν θα επικαθίσουν. Ο σιδερίτης παραμένει εν διαλύσει.

Τέλος, ο χαλκηδόνιος και ο χαλαζίας παρουσιάζουν δείκτες κορεσμού με αρνητικές τιμές ( $SI < 0 \rightarrow$  ακόρεστο) που πλησιάζουν το μηδέν. Συμπερασματικά παραμένουν εν διαλύσει στο νερό όμως οριακά τα δείγματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν κορεσμένα σε χαλκηδόνιο και χαλαζία.





**Σχήμα 3.13:** Διάγραμμα που δείχνει τον κορεσμό των δειγμάτων σε ανυδρίτη, βαρύτη, γύψο, αραγωνίτη, ασβεστίτη, δολομίτη, γκαιτίτη, αιματίτη, σιδερίτη, χαλκιδόνιο, χαλαζία.

- Οι τιμές που τείνουν στο μηδέν δείχνουν ότι το δείγμα είναι κορεσμένο στα ορυκτά αυτά (βαρύτης, χαλαζίας).
- Οι τιμές που είναι αρνητικές δείχνουν ότι το δείγμα είναι ακόρεστο στα ορυκτά αυτά (ανυδρίτης, γύψος, αραγωνίτης, ασβεστίτης, δολομίτης-εκτός όμως από τον δολομίτη στο δεύτερο και τέταρτο δείγμα που παρουσιάζει οριακά θετική τιμή, σιδερίτης, χαλκιδόνιος).
- Οι τιμές που είναι θετικές δείχνουν ότι το δείγμα είναι υπέρκορο στα ορυκτά αυτά (δεύτερο και τέταρτο δείγμα-δολομίτη, γκαιτίτη, αιματίτη).

### 3.6 Μέτρηση ραδονίου (και θορονίου) στις υπό μελέτη πηγές

**Πίνακας 3.11:** Μετρούμενες τιμές ραδονίου (και θορονίου) στις πηγές ενδιαφέροντος υπό συγκεκριμένες συνθήκες (ΔΜ: Δεν Μετρήθηκε).

Δείγμα	Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Rn (Ραδόνιο)	Th (θορόνιο)	Rn (Ραδόνιο)	Th (θορόνιο)
		Bq/m <sup>3</sup>	Bq/m <sup>3</sup>	Bq/L	Bq/L
AgAntonios1_1	19/09/2016	27.911±2%	ΔΜ	27,911 ±2%	ΔΜ
AgAntonios2_1	19/09/2016	45.676±2%	199±40%	45,676±2%	0,199±40%
AgAntonios1_2	18/09/2017	138.132	1048±50%	138,13	1,048±50%
AgAntonios1_3	17/04/2018	96.560	223	96,56	0,223

Συμπερασματικά, από τις μετρούμενες τιμές του ραδονίου (Πίνακας 3.11):

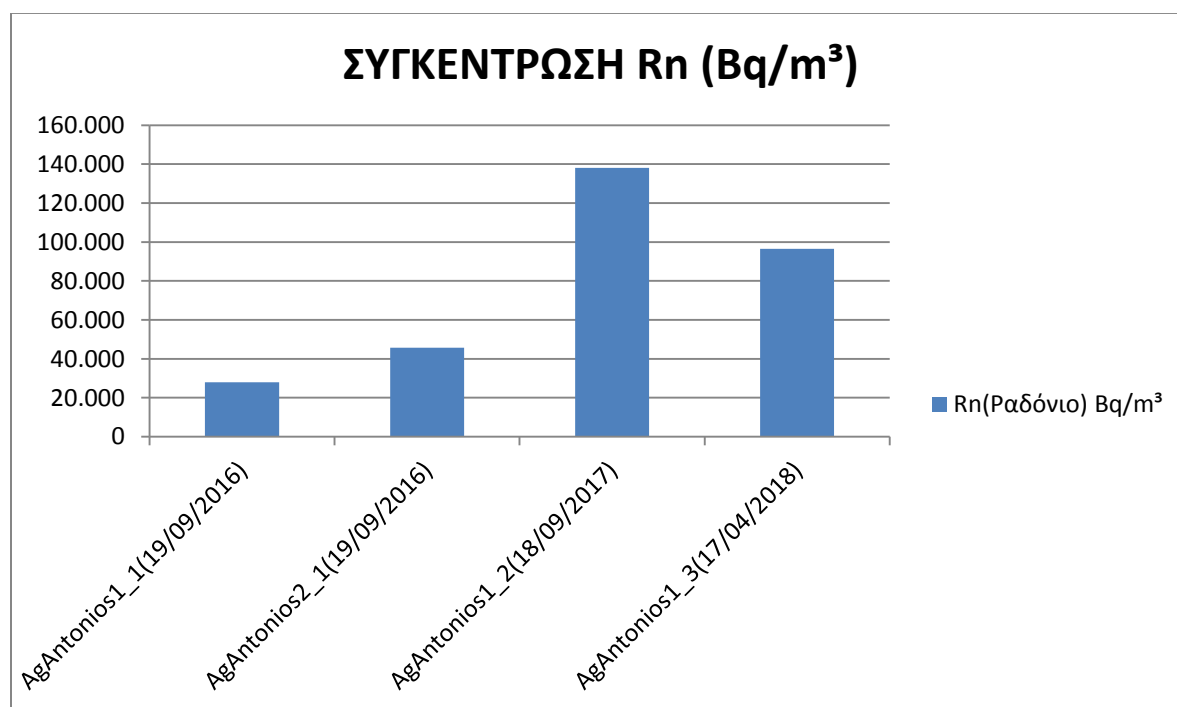
Στο **πρώτο** δείγμα (AgAntonios1\_1), η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου είναι 27.911±2 Bq/m<sup>3</sup> η οποία είναι σημαντική συγκέντρωση. Αυτό υποδηλώνει ότι η πρώτη πηγή μελέτης κατά την περίοδο δειγματοληψίας (24/9/2016) θεωρείται ραδιενεργή-ραδονούχα πηγή.

Στο **δεύτερο** δείγμα (AgAntonios2\_1), η τιμή του ραδονίου είναι 45.676±2 Bq/m<sup>3</sup>. Αυτό υποδηλώνει ότι και η δεύτερη πηγή μελέτης κατά την συγκεκριμένη περίοδο δειγματοληψίας

(24/9/2016) περιέχει επίσης σημαντική συγκέντρωση ραδονίου με αποτέλεσμα και η αυτή να κατατάσσεται στις ραδιενεργές-ραδονούχες πηγές.

Στο **τρίτο** δείγμα (AgAntonios1\_2), η τιμή του ραδονίου είναι 138.132 Bq/m<sup>3</sup>. Έτσι, η πρώτη πηγή μελέτης κατά την επόμενη περίοδο δειγματοληψίας (18/9/2017) ανήκει στην κατηγορία των ραδιενεργών-ραδονούχων πηγών, με συγκέντρωση ραδονίου ιδιαίτερα υψηλή συγκριτικά με τις υπόλοιπες δειγματοληψίες.

Στο **τέταρτο** δείγμα (AgAntonios1\_3), η τιμή του ραδονίου είναι 94.560 Bq/m<sup>3</sup>. Έτσι, η πρώτη πηγή μελέτης κατά την περίοδο δειγματοληψίας (17/4/2018) ανήκει στις ραδιενεργές-ραδονούχες πηγές, με συγκέντρωση ραδονίου ιδιαίτερα υψηλή συγκριτικά με τις υπόλοιπες δειγματοληψίες.



**Σχήμα 3.14:** Ραβδόγραμμα περιεκτικότητας ραδονίου (-ραδιενέργειας) των τεσσάρων δειγμάτων (AgAntonios1\_1, AgAntonios2\_1, AgAntonios1\_2, AgAntonios1\_3).

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.14 συμπεραίνουμε ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στα νερά του Αγίου Αντωνίου δεν είναι σταθερή στον χρόνο, αντιθέτως παρουσιάζει κάποιες μεταβολές που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παροχή των πηγών και στην θερμοκρασία.

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα.

Αρχικά σε ότι αφορά τη σύσταση των πηγών ως προς τα κύρια ιόντα Ca, Na, Cl, Mg, K, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, δημιουργήθηκαν υδροχημικά διαγράμματα και **χαρακτηρίστηκε το νερό ως χλωρονατρίουχο**. Αυτό συμβαίνει λόγω της διείσδυσης και ανάμιξης του θαλασσινού νερού στις υπό μελέτη πηγές. Συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις (Na-Cl) που μας έδωσαν οι αναλύσεις των πηγών, στηριζόμενοι στην Αρχή του Marcet, με την συγκέντρωση των κύριων ιόντων (Na-Cl) της θάλασσας, δεδομένου ότι τα συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) έχουν πολύ υψηλές τιμές, και βασιζόμενοι στο φαινόμενο Venturi και την «παράκτια» θέση των πηγών (ιδίως της πρώτης πηγής) καταλήγουμε στο σαφές **συμπέρασμα της διείσδυσης και ανάμιξης του θαλασσινού νερού** στις καρστικές πηγές του Αγίου Αντωνίου.

Τα δείγματα αναλύθηκαν και ως προς την περιεκτικότητα τους σε ιχνοστοιχεία όπως F, B, Ba, Cu, Fe, Li, Mo, Se, Sr, V, Zn ενώ αποδόθηκαν τα σχετικά υδροχημικά διαγράμματα που δείχνουν τις συγκεντρώσεις τους στα νερά της περιοχής.

Τα νερά των πηγών, σε ότι αφορά την θερμοκρασία τους χαρακτηρίζονται «**ψυχρά**», με μετρούμενη θερμοκρασία (14,3°C -15,2°C), μικρότερη από 20°C. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι πηγές του Αγίου Αντωνίου να θεωρούνται πιθανές ψυχρές ιαματικές πηγές.

Το ενδιαφέρον όμως επικεντρώθηκε ιδίως στα αποτελέσματα των μετρήσεων της περιεκτικότητας των νερών ως προς το ραδόνιο (και θορόνιο), τα οποία έδειξαν ότι **οι πηγές του Αγίου Αντωνίου είναι πλούσιες σε αυτό (ραδόνιο)**, γεγονός που σημαίνει ότι «εν δυνάμει» μπορούν να χαρακτηριστούν και ως ιαματικά. Στην περίπτωση λοιπόν των πηγών του Αγίου Αντωνίου, δεν περιλαμβάνονται πιθανοί κίνδυνοι λόγω της έκθεσης σε ραδόνιο, παρά **μόνο θετικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία**, ως αποτέλεσμα των «μη» υπερβολικών του συγκεντρώσεων στο νερό. Η ύπαρξη ρηγμάτων πλησίον των πηγών από όπου συλλέχθηκαν τα δείγματα και η αυξημένη συγκέντρωση του αερίου (ραδονίου) στο νερό των δειγμάτων, χωρίς την ύπαρξη (συγκέντρωσης) διαλυμένων ραδιενεργών στοιχείων στις υδροχημικές αναλύσεις, μας οδηγεί στο εξής συμπέρασμα: **Η παρουσία του ραδονίου στις πηγές οφείλεται σε βαθύτερα πετρώματα, που ενδεχομένως περιέχουν ουράνιο ή ράδιο και τα οποία με την αποσύνθεση τους δίνουν το αέριο ραδόνιο, που στην συνέχεια καταφέρει και διαφεύγει**

**μέσω των ρηγμάτων, και εμφανίζεται στα ύδατα των πηγών του Αγίου Αντωνίου.** Το ραδόνιο όπως αναφέρθηκε και στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ως αέριο έχει αυξημένη κινητικότητα. Σε υδάτινο όμως περιβάλλον, η κινητικότητα και η ταχύτητα διάδοσης του ραδονίου στον χώρο μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Για τον λόγο αυτό το ραδόνιο θα μπορούσαμε να πούμε ότι «παγιδεύεται» στο νερό των πηγών ή **καλύτερα μειώνεται η ταχύτητα** (λόγω του νερού) **με την οποία αυτό διαφεύγει από τη Γη στον αέρα.** Έτσι είναι επόμενα τα σχετικά υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης του ραδονίου στα νερά των πηγών, χωρίς την παρουσία διαλυμένων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων και γενικότερα μητρικών του (ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) και ραδίου ( $^{226}\text{Ra}$ )) στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε θορόνιο, δεν μπορεί να μας οδηγήσει σε κάποια διαπίστωση, καθώς οι μετρήσεις θορονίου όπως ήδη αναφέρθηκε στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, είναι έγκυρες μόνο σε υδάτινα περιβάλλοντα όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μικρότερη από 0,5mg/L. Την ίδια στιγμή ο μικρός χρόνος ημίσειας ζωής, τόσο του ιδίου όσο και των θυγατρικών του, καθώς επίσης και η δυσδιαλυτότητα τους σε μέτριο pH, καθιστά την μέτρηση του θορονίου σχετικά ασήμαντη για περαιτέρω αναλύσεις (στην συγκεκριμένη περίπτωση και διπλωματική εργασία).

Όσον αφορά τις διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του ραδονίου στις πηγές του Αγίου Αντωνίου από δειγματοληψία σε δειγματοληψία, πρέπει να επισημανθεί ότι μεταβάλλεται εποχιακά και επηρεάζεται από την παροχή του νερού και την θερμοκρασία. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν, ότι οι σχέσεις που υπάρχουν τόσο μεταξύ συγκέντρωσης (ραδονίου) και παροχής όσο και μεταξύ συγκέντρωσης (ραδονίου) και θερμοκρασίας, είναι αντιστρόφως ανάλογες.

Τέλος υπολογίστηκε ο δείκτης κορεσμού των δειγμάτων της περιοχής του Αγίου Αντωνίου για κάποια ορυκτά (ανυδρίτη, βαρύτη, γύψο, αραγωνίτη, ασβεστίτη, δολομίτη, γκαιτίτη, αιματίτη, σιδερίτη, χαλκιδόνιο, χαλαζία). Έτσι συνοπτικά διαπιστώθηκε ότι, τα νερά του Αγίου Αντωνίου είναι **κορεσμένα** σε βαρύτη και χαλαζία, **ακόρεστα** σε ανυδρίτη, γύψο, αραγωνίτη, ασβεστίτη, δολομίτη, σιδερίτη, χαλκιδόνιο και **υπέρκορα** σε δολομίτη, γκαιτίτη, αιματίτη.

## Βιβλιογραφία

### Διεθνής

1. Aubouin J. & Dercourt J., (1965): Un element externe de la zone du Pinde: La serie d'Ethia (Crete, Grece). Bull. Soc. Geol. France, (7), 753-757, Paris
2. Al-Azmi D., Snopek B., Sayed A.M., Domanski T. (2004): A simple bubbling system for measuring radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) gas concentrations in water samples based on the high solubility of radon in olive oil; Journal of Environmental Radioactivity; Vol.71, No2, pp. 175-186.
3. Bonneau M. (1984): Correlation of the Hellenic Nappes in the south east Aegean and their tectonic reconstruction, Geological Society, London, Special Publications, Vol.17, pp. 517-527.
4. Becker K. (2004): One century of radon therapy, Vice-President, Radiation Science & Health, Boothstr 27, D-12207 Berlin, Germany, Int. J. Low Radiation, Vol. 1, No. 3, pp. 334-357.
5. Cayeux L. (1902): Sur la composition et l'âge des terrains métamorphiques de la Crète. - C. R. Acad. Sc. Paris, 134: 1117-1119; Paris.
6. Creutzburg & Papastamatiou, (1966): Νέα συμβολή εις την Γεωλογία της νήσου Κρήτης.- Ι.Γ.Ε.Υ. Γεωλογικά και Γεωφυσικά Μελέται, τ. XI, No 2, σ.173-185, Αθήνα.
7. Creutzburg N. & Seidel, E. (1975): *Zum Stand der Geologie des Praneogens auf Kreta* - N. Jb. Geol. Palaont. Abh., 149 (3), pp. 363—383, Stuttgart
8. Clever (1979): Handbook of Psychometric Charts: Humidity diagrams for engineers. Edited by David Shallcross. Professional and academic press book. Department of Chemical Engineering. University of Melbourne. Australia.
9. Chiozzi et al. (1998 & 2001): Ground radiometric survey of U, Th and K on the Lipari Island. Article in Journal of Applied Geophysics. Italy.
10. Dornsiepen U.F., Manutsoglu E., Mertmann D. (2001): Permian–Triassic palaeogeography of the external Hellenides, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 172, pp. 32-338.
11. Foster, O. D. (1920): Overcoming high resistance in marketing. *Advertising & Selling*. June 26, pp.29-30.

12. Fleischer L.R (1997): Radon, Overview of properties, Origin and Trasnport, in S.A Durrani and R. Ilic (editors 1997), Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, World Scientific Publishing Co.
13. Fassoulas C. (2001): The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active Europe an margin: the Heraklion basin, Crete, Greece, Journal of Geodynamics, Volume 31, pp. 49-70.
14. Fonollosa E. et al (2016): Radon in spring waters in the south of Catalonia. Aticle for Jurnal Environmental Radioactive. Spain.
15. Garrels R M & Christ C L. (1965): Solutions, minerals, and equilibria. Western University. Evanston. IL and US Geological Survey, Washington. DCI. New York.
16. Gomez Escobar V., Vera Tome F., Lozano J.C., (1999): Procedures for the determination of  $^{222}\text{Rn}$  exhalation and effective  $^{226}\text{Ra}$  activity in soil samples, Applied Radiation & Isotopes, Vol.50; pp. 1039-1047.
17. Geranios, A., Nikolopoulos, D., Louizi, A., Karatzi, A., (2004): Multiple radon survey in spa of Loutra Edipsou (Greece), Radiation Protection Dosimetry, vol. 122, pp. 251 - 258
18. Hem J. D. (1985): Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Third Edition. U.S Geological. Survey. Water Supply. pp 22-54. United States.
19. Hounslow W. A. (1995): Water Quality data; Analysis and Interpretation, Lewis Publishers, Oklahoma.
20. Huxol S. (1), Höhn E. (1), Surbeck H. (2), and Kipfer R. (1) (2009): Thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) in spring water, (1) Eawag, Swiss Federal Institute of Water Science and Technology, CH-8600 Dübendorf, Switzerland, (2) Nucfilm Ltd, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-2459-1, 2009 General Assembly.
21. Jacobi W. (1972): Activity and potential alpha energy of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  daughters in different air atmospheres; Health Physics; Vol. 22, pp. 441.
22. Jobbagy V. Altzitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M. (2017): A brief overview on radon measurements in drinking water. Journal of Environmental Radioactivity. European Commission.

23. Krahel et al., (1982): Neue Daten zur Biostratigraphie und zur Lagerung der Phyllit-Gruppe und der Trypali-Gruppe auf der Insel Kreta (Griechenland). - Geol. Rdsch., 72: 1147-1166; Stuttgart.
24. Karakitsios V., (1987): Sur la signification de la "série de Trypali" dans la région de Sellia en Crète occidentale (Grèce) - C. R. Acad. Sc., Paris, t. 304, serie II, n. 3, p. 123-128
25. Knuston E.O. (1988): Modeling indoor concentrations of radon's decay products in Radon and its decay products in indoor air, Eds Nazaroff W. W and Nero A. V., John Wiley & Sons, pp. 161-202.
26. Kathren R. L. (1998): NORM Sources and Their Origins, Appl. Radiat. United States Transuranium and Uranium Registries, Washington State University, Richland Isot. Vol. 49. No. 3, pp. 149-168, 1998.
27. Karahan G., Ozturk N., Bayulken A. (2000): Natural radioactivity in various surface waters in Istanbul Turkey, Water Research, Vol.34, pp.4367-4370.
28. Karahan G., Bayulken A. (2000): Assessment of gamma dose rates around Istanbul; Journal of Environmental Radioactivity, Vol.47, pp. 213-221.
29. Koepke, P., J. Reuder, and H. Schwander (2002): Solar UV radiation and its variability due to the atmospheric components, Recent Res. Dev. Photochem. Photobiol., Vol.6, pp. 11 – 34.
30. Kresic N., Stevanovic Z. (2010): Groundwater hydrology of springs. Engineering theory, management, and sustainability. Amsterdam, Butterworth-Heinemann. 573 pages. ISBN 978-1-85617-502-9.
31. Lerman A. (1979): Geochemical Processes. Water and Sediment Environments. New York. University of Michigan. Earth Sciences-Geochemistry.
32. Langmuir D., Riese AC. (1985): *The thermodynamics properties of radium. Jurnal Article*. Vol. 49. Issue 7. pp. 1593-1601
33. Lamarre, B. L., (1990): Radon in water aeration system operational performance. In: EPA International Radon Symposium. Atlanta, GA: U.S. EPA.
34. Lucchetti et al., (2016): A brief overview on radon measurements in drinking water. Article for Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 173. pp. 18-24. Europe.

35. Meinzer O.E. (1927): Large Springs in the United States. US Geological Survey Water-Supply Paper 557, Government Printing Office, pp. 94, Washington.
36. Monnin M.M., Seidel J.L. (1992): Radon in soil-air and in groundwater related to major geophysical events: a survey, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A314: 316-330.
37. Monnin M.M., Seidel J.L. (1997): Physical models related to radon emission in connection with dynamic manifestations in the upper terrestrial crust: A review, Radiation Measurements, Vol.28, No.1-6, pp. 703-712.
38. Maramathas A., Pergialiotis P., Gialamas I. (2005): Contribution to the identification of the sea intrusion mechanism of brackish karst springs. National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, Director of Geology-Hydrology, Ministry of Agriculture, Chemical Engineer, National Center for Marine Research. Article (PDF Available) in Hydrogeology Journal. Vol.14(5).pp. 657-662. Greece.
39. Nazaroff W. W. Nero A. V. (1998): Radon and its Decay Products in Indoor Air, Environmental Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., USA; 1988; ISBN 0-471-62810-7.
40. Nazaroff W. W., Moed B.A., Sextro R.G. (1988) a: Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry, in: Radon and its decay products in indoor air, eds. Nazaroff W. W. and Nero A. V., John Wiley & Sons, Vol.55. pp. 57-112.
41. Nazaroff, W. W., Doyle, S. M., Nero, A. V., Sextro, R. G. (1988) b: Radon entry via portable water, in: Radon and its decay products in indoor air, eds. Nazaroff W. W. and Nero A. V., John Wiley & Sons, pp. 131-157.
42. Otton J. k. (1992): The geology of radon. U.S. Department of the interior/ U.S. Geological survey. General Interest Publications of the U.S. Geological Survey. pp. 28.
43. Paulin (1869): Description physique de l'île de Crete. Actes. Soc. Linn. Bordeaux, T.23, pp. 1-157, 321-444, Bordeaux.
44. Papastamatiou & Reichel (1956): Sur l'âge des Phyllades de l'île de Crète. - Eclogae geol. Helv., 49: 147-149; Basel.
45. Pane et al. (1995): Fluctuations of groundwater radon and chemical species in basaltic aquifers. Applied Radiation measurements. Vol. 28. pp. 741-744.
46. Pane M-B, (1995): Le radon: traceur des circulations fluids dans les aquifers karstiques; Sciences de la Terre et des Planètes; 320 20Avril., No. 8, pp. 713-719.



47. Poffijn, A., Cauwels P., (1997): The challenge of radon assessment. European Conference on Protection against Radon at Home and at Work. Praha: Czech Republic.
48. Pizzino, L., Quattrocchi, F., Cinti, D., Galli, G., (2004): Fluid geochemistry along the Eliki and Aigion seismogenic segments (Gulf of Corinth, Greece), 2004, Geosciences, vol. 336, pp. 367 -374.
49. Rentetzi, M. (2007): Trafficking Materials and Gendered Experimental Practices. New York: Columbia University Press.
50. Ramachandran T.V. (2010): Environmental Thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ): A Review Vo.8, Issue 3, pp. 129-147, India.
51. Sanneman, W., Seidel, E. (1976): Die Trias-Scichten von Rawducha/NW Kreta. Ihre Stellung im kretischen Deckenba.- N. Jb. Geol. Palaont. Mh. 221-228. Stuttgart.
52. Seidel, E. (1978): Zur Petrologie der Phyllit-Quarzit-Serie Kretas - Habilitationsschrift Univ. Braunschweig, 145 S., Braunschweig.
53. Schery S.D., Gaedert D.H and Wikenning M.H (1984): Factors affecting exhalation of radon from a gravely sandy loam J Geophys Res 79:7299, 1984.
54. Segovia N., et al, (1995): Short and long term radon in soil monitoring for geophysical purposes; Radiation Measurements; Voi.25, No.1-4, pp. 547-552.
55. Seidel, E., Kreuzer, H. & Harre, W. (1982): A Late Oligocene/Early Miocene high pressure belt in the External Hellenides.- Geol. Jb., 23: 165-206
56. Segovia N., et al. (1997a): Fluctuations of groundwater radon and chemical species in basaltic aquifers.; Radiation Measurements; Voi.28, No.1-6, pp. 741-744.
57. Segovia N., et al. (1997b): Radon in soil variations related to volcanic activity; Radiation Measurements; Vol.28, No.1-6, pp. 745-750.
58. Sun H. and Semkow T. M. (1998): Mobilization of thorium, radium and radon radionuclides in ground water by successive alpha-recoils. Paper. Journal of Hydrology. Pages 126-136.
59. Segovia N., et al. (1999): Groundwater flow system in the valley of Toluca, Mexico: an assay of natural radionuclide specific activities; Applied Radiation & Isotopes; Vol. 50, pp. 589-598.

60. Segovia N., Annienta M.A., Valdes C., Mena M., Seidel J.L., Monnin M., Pena P., Lopez M.B.E., Reyes A.V. (2003): Volcanic monitoring for radon and chemical species in the soil and in spring water samples; *Radiation Measurements*; Vol. 36, No 1-6, pp. 379-383.
61. Schwartz M.C. (2003): Significant groundwater input to a coastal plain estuary: assessment from excess radon, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol.56, pp.31-42
62. Seidel, M., Pack, A., Sharp, Z.D., Seidel, E., (2005): The Kakopetros and Ravdoucha iron-oxide deposits, western Crete, Greece: fluid transport and mineralization within a detachment zone - *Econ. Geol.*, 100, 165–174..
63. Schubert et al. (2007): Radon as a naturally occurring tracer for the assessment of residual NAPL contamination of aquifers. *Article for Environment Pollution*. pp.920-927.
64. Salonen L. (2010): Calibration of the direct LSC method for radon in drinking water: Interference from (210)Pb and its progenies accumulated in (226)Ra standard solution. 68(1):131-8. USA.
65. Todd. D. K., Wiley (1980): *Groundwater Hydrology* (2<sup>nd</sup> edn). Geological Journal. Vol.17. pp. 345-350. ISBN 0 471 08641 X. New York.
66. Todorovic A, de Lange F. P. (2012): Repetition suppression and expectation suppression are dissociable in time in early auditory evoked fields. *J. Neurosci.* 32 13389–13395 10.1523/JNEUROSCI.2227-12.2012.
67. UNSCEAR (1993): Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2. United Nations, New York, 1993.
68. U.S. EPA, (2003): EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003.
69. UNSCEAR (2008): Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations sales publications E.08.IX.6. Vo.I. United Nations, New York.
70. Wilkening M. (1990): *Radon in the environment*; Elsevier Science, Amsterdam; 1 st edition
71. 1990; ISBN 0-444-88163-8.
72. Xuan Thang N., Tien Dung L.I, Van Vuong L. (1995): Radon transport equation in earth's crust; *Radiation Measurements*; Vol.25, No.1-4, pp. 661-663.

73. Wurm, A.(1950): Zur Kenntnis des Metamorphikums der Insel Kreta-N. Jb. Geol. Palaont. Mh., 1950, 206—239, Stuttgart.
74. Weihai Zhuo, Takao Iida, Xiaotong Yang. (2001): Occurrence of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and U in Groundwater in Fujian Province, China; Journal of Environmental Radioactivity; Vol.53; pp. 111-120.
75. Ziegler J.F. Biersack J.P. (1985): The Stopping and Range of Ions in solids, New York: Pergamon Press.

## Ελληνική

1. Αγγελίδης Σ. (2008): Βιώσιμη Ανάπτυξη Συστήματος Θερμαλισμού - Τουρισμού Υγείας & Ευεξίας Ιαματικών Λουτρών Ελλάδος, Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι Λάρισας, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Τμήμα Διοίκησης επιχειρήσεων, 114 σελ., Λάρισα.
2. Αργυράκη Α. (2014): Γεωχημικές διεργασίες στην επιφάνεια της γης, Διπλωματική εργασία, Εθνικόν Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών, Σχολή Θετικών επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, 51 σελ., Αθήνα.
3. Βογιάννης Γ. (2005): Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά, Μυτιλήνη, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αγαίου, Τομέας περιβαλλοντικής μηχανικής και επιστήμης, 215 σελ., Μυτιλήνη.
4. Βατουγίου Ε. (2015): Έλεγχος ιζηματοποίησης σε νερά στην περιοχή της Ιεράπετρας, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
5. Βουδούρης Κ. (2015): Εκμετάλλευση & Διαχείριση Υπόγειου Νερού. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 35-67, Χανιά.
6. Γεωργιάδης Ν. (2005): Ο κλάδος των ιαματικών λουτρών και των spa στην Ελλάδα, Investment research & analysis Journal, 4 σελ., Θεσσαλονίκη.
7. Γκόλφη Μ. (2017): Ιαματικές πηγές στην Ελλάδα-Γεωγραφική κατανομή και θεραπευτικές ιδιότητες, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 82 σελ., Τμήμα Ιατρικής, Πάτρα.
8. Δασενάκης Ε., Καραβόλτος Σ., Λαδάκης Ε., Παρασκευοπούλου Β. (2015): Χημική Ωκεανογραφία, Ελληνικό Ακαδημαϊκό Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Ενότητα 2, Ρύπανση

- Υδάτων, Τμήμα Χημείας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 34 σελ., Αθήνα.
9. Ζαχαρόπουλος Κ., Μπαρμπίκας Η., Χριστοδουλόπουλος Γ., Σχοινάς Χ. (2001): Τα Λουτρά της Ελλάδας, σελ. 173, Περιηγητικός Οδηγός.
  10. Καστανιάς Ι. (2003): Γεωθερμία – Ιαματικές Πηγές: Η περίπτωση της Ικαρίας, Πτυχιακή εργασία, 116 σελ., Κοζάνη.
  11. Κασινάλης Χ. (2008): In Situ Μετρήσεις Ραδονίου στο Νερό, Αξιολόγηση της μεθόδου και εφαρμογής της στις μετρήσεις ραδονίου σε πηγή μεταλλικού νερού, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 57 σελ., Θεσσαλονίκη.
  12. Καραμολέγκου Μ. (2011): Ο Ιαματικός Τουρισμός και η Ανάπτυξή του στην περίπτωση της Σαντορίνης, Πτυχιακή εργασία, ΑΤΕΙ Ηρακλείου Κρήτης, Τμήμα Τουριστικών Επιχειρήσεων, 79 σελ., Ηράκλειο.
  13. Κυρκιμτζή Ισμήνη, Χαρά (2013): Καθορισμός γεωλογικών παραμέτρων εμφάνισης γεωθερμικών ρευστών, εντός σχηματισμών της Λεκάνης Μεσσαράς, Διατριβή ειδίκευσης, Μεταπτυχιακό Εργασία, Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 185σελ., Χανιά.
  14. Κορόγιαννη, Μ. (2014), «Μορφές Υδροθεραπείας», 5-01-2014, [s://iamatika.gr/2014 /01 /05/μορφές-ιαματικής-υδροθεραπείας](http://iamatika.gr/2014/01/05/μορφές-ιαματικής-υδροθεραπείας)
  15. Καλλίνη Ε. και Γεωργίου Α. (2015): Συγκριτική μελέτη θυγατρικών Ραδονίου στον αέρα με την μέθοδο της α και γ-Φασματοσκοπίας, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 120 σελ., Θεσσαλονίκη.
  16. Καμίτση Δ. (2017): Συγκρίσεις των πιθανών γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας της Μεσσαράς με αντίστοιχα της Δυτικής Ελλάδας, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 108 σελ., Χανιά.
  17. Λέκκας Ν. (1938): Αι επτακόσiai πενήντα μεταλλικαί πηγαί της Ελλάδος, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
  18. Μανούτσογλου Ε. (2008): Αδημοσίευτες Σημειώσεις Σεμιναρίου Γεωλογίας της Κρήτης, της Ερευνητικής Μονάδας Γεωλογίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, 55 σελ., Χανιά.

19. Μπουτσάκης Κ. (2016): Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών σε υδροφορείς της Μεσσαράς, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 136 σελ., Χανιά.
20. Νικολόπουλος Δ., Γιαννακόπουλος Π., Κόττου Σ. (2015): Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος-Κίνδυνοι και προστασία, Τμήμα μηχανικών ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων Τ.Ε., ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα ιατρικής, Εθνικό και καποδιστριακό πανεπιστήμιο Αθηνών, 184 σελ., Πειραιάς.
21. Ομπετσανοφ Ι., Κουμαντάκης Ι., Σταματάκη Σ. (2004): Καρστικές πηγές στην Ελλάδα- αποτύπωση και αξιολόγηση με την χρήση του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (G.I.S), εργασία «Τεχνικά χρονικά», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο- Ινστιτούτο Γεωλογικών, Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών, 22 σελ. Αθήνα.
22. Οικονομόπουλος Ε. (2008): Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών έκλυσης του χημικού στοιχείου  $^{222}\text{Rn}$  και η πιθανή συσχέτιση της με τη σεισμικότητα της περιοχής Μεγάρων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Διατμηματικό πρόγραμμα σπουδών στις περιβαλλοντικές επιστήμες, Σχολή Θετικών Επιστημών, Χημικός, 178 σελ. Πάτρα.
23. Πατήρης Δ. (2009): Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, 292 σελ. Ιωάννινα.
24. Σπαθή (2000): Ο ιαματικός τουρισμός και η ανάπτυξη του τουρισμού υγείας στην Ελλάδα, εκδόσεις 29, 127 σελ. Αθήνα.
25. Τάταρης Α. και Χριστοδούλου Γ.Ε (1969): Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος 1:50000, Φύλλο Χάρτη «Αλικιανός» - Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήνα (Υ.Γ.Ε.Υ).
26. Τσουκαλά Δ. (2013): Μετρήσεις ραδονίου και αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων στην Κρήτη, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 86 σελ., Χανιά.
27. Υπ. Εργασίας Κοιν. Ασφαλίσεων (2009): Η ακτινοβολία στην ζωή μας, Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας, 90 σελ., Λευκωσία.
28. Φυτρολάκης Ν. (1980): Η γεωλογική δομή της Κρήτης. Διατριβή επί υφηγεσία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 54 σελ., Αθήνα.

## Ιστότοποι

- [1]: <https://www.google.com/maps/place/Saint+Anthony>
- [2]: <http://cosmeticsandskin.com/aba/glowing-complexion.php>
- [3]: <https://www.homespecfl.com/radon-testing/>
- [4]: [http://www.schizas.com/site3/index.php?option=com\\_content&view=article&id](http://www.schizas.com/site3/index.php?option=com_content&view=article&id)
- [5]: <https://en.wikipedia.org/wiki/Curie>
- [6]: <http://ektalks.blogspot.gr/2014/02/the-curie-family-remarkable-story-part-1.html>
- [7]: <https://www.sarad.de>
- [8]: <https://www.iamatika.gr>
- [9]: <https://www.home-biology.gr/ilektromagnitikes-aktinovolies/ionizouses-aktinovolies>
- [10]: <http://www.healthyliving.gr>
- [11]: <http://omega.physics.uoi.gr>
- [12]: <http://www.unscear.org/unscear/en/media.html>
- [13]: <https://www.google.gr/search?q=pitchblende&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir>
- [15]: <https://www.google.gr/search?biw=1374&bih=820&tbm=isch&sa=1&eikona>

## Παράρτημα- Συμπληρωματικές Εικόνες.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

ΕΙΚΟΝΑ

**Εικόνα 1:** Πανοραμικές φωτογραφίες της ευρύτερης περιοχής του Αγίου Αντωνίου.

Θέση:

$\chi=456626,5358$ ,

$y=3888604,7756$ ,  $z=0$ .



**Εικόνα 2:** Φωτογραφία όπου φαίνεται η καρστικοποιημένη ενότητα του τρυπαλίου με σπηλαιώσεις κτλ.

Θέση:

$\chi=456626,5358$ ,

$y=3888604,7756$ ,  $z=0$ .



**Εικόνα 3:** Φωτογραφία πλησίον της περιοχής του Αγίου Αντωνίου όπου φαίνεται ότι στο παρελθόν λόγω έντονου τεκτονισμού η στάθμη της θάλασσας είχε ανέβει αρκετά.

Θέση:





$\chi=456626,5358,$   
 $y=3888604,7756, z=0.$

**Εικόνα 4:** Εμφάνιση της δεύτερης πηγής, στην περιοχή του Αγίου Αντωνίου (αναβλύζει κάτω από τον βράχο που φαίνεται στην φωτογραφία).

Θέση:

$\chi=456626,5358,$   
 $y=3888604,7756, z=0.$



**Εικόνα 5:** Φωτογραφίες όπου φαίνεται η εμφάνιση της πρώτης πηγής πλησίον της θάλασσας, στην περιοχή του Αγίου Αντωνίου.

Θέση:

$\chi=456626,5358,$   
 $y=3888604,7756, z=0.$







**Εικόνα 6:** Σημείο στον Άγιο Αντώνιο, όπου οι περίοικοι είτε κάθονταν στο τεχνητό παγκάκι που φαίνεται στην φωτογραφία με τα πόδια τους στο νερό, είτε έκαναν μπάνιο, καθώς είχαν παρατηρήσει τον ιαματικό ρόλο των εν λόγω πηγών ως προς τις ρευματικές παθήσεις.

Θέση:

$x=456626,5358,$

$y=3888604,7756, z=0.$



**Εικόνα 7:** Μαύροι  
χαρακτηριστικοί  
ανακρυσταλωμένοι δολομίτες  
της Ενότητας του Τρυπαλίου  
κατά μήκος του παραλιακού  
μετώπου που εκρέωουν οι  
πηγές.

Θέση:

$\chi=456626,5358$ ,  
 $y=3888604,7756$ ,  $z=0$ .



**Σχήμα 8:** Γεωλογικός χάρτης  
κλίμακας 1:50.000 φύλλο  
Αλικιανός, ΙΓΕΥ 1960. Στο  
κάτω σχήμα σε μεγέθυνση η  
περιοχή που εμφανίζονται οι  
πηγές, κατά μήκος της  
παραλίας της εκκλησίας του  
Αγίου Αντωνίου.

