

Πρακτικά	του	Συνεδρίου	Μάιος	1992
Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	XXVIII/2	σελ.	605-622
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.		pag.	
			Αθήνα	1993
			Athens	

ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Δ.ΚΟΣΜΑΤΟΥ*, Ε.ΛΑΓΙΟΥ*, Γ.ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ*,
Ι.ΛΥΡΙΤΖΗ**

ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια μελέτης της συμπεριφοράς και της κατανομής της έκλυσης των ισοτόπων του ραδονίου (Rn^{220} και Rn^{222}) μέσα στα γεωθερμικά πεδία Νισύρου και Σουσακίου, όπως και στη Δυτική Κω (περιοχή Βουλκανίων) σε πολύ περιορισμένη, αλλά αντιπροσωπευτική, έκταση.

Τα δύο αυτά αέρια ισότοπα προέρχονται, το ραδόνιο από τη διάσπαση του U^{238} και το θόρο από τη διάσπαση του Th^{232} . Η προέλευσή τους δείχνει ότι είναι σημαντικά και δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις στο παρελθόν, που έχουν χρησιμοποιηθεί για οικονομική ανίχνευση ταμειωτήρων ουρανίου. Σε πολλές επίσης εργασίες έχει γίνει συσχέτιση των δεδομένων από μετρήσεις ραδονίου, με τη γεωλογία διαφόρων περιοχών (Pedersen et al., 1980).

Η μελέτη των ισοτόπων περιλαμβάνει την μέτρηση της έκλυσής τους με τον διαθέσιμο ανιχνευτή ραδονίου R.M. 1003 Pylon Instruments (Instruction Manual, 1982). Οι ενδείξεις του ανιχνευτή εκφράζουν τη συγκέντρωση των εκλυόμενων ισοτόπων σε κτύπους ανά λεπτό (c.p.m.). Οι μετρήσεις γίνονται με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη των ενδιαφερόντων από γεωθερμικής άποψης περιοχών.

Το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή των διατομών των μετρήσεων και στις δύο περιοχές. Στις διατομές αυτές αναγράφονται οι συγκεντρώσεις και των δύο ισοτόπων ώστε να είναι δυνατές οι συγκρίσεις. Από τις διατομές των μετρήσεων ραδονίου είναι δυνατή η αναγνώριση των ανωμαλιών της έκλυσης. Η πιθανή εξήγηση για την ύπαρξη αυτών των ανωμαλιών είναι η ύπαρξη των

* Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη-Ιλίσια, Αθήνα 157 84.

** Κέντρο Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, Ακαδημία Αθηνών, Αναγνωστοπούλου 14-Κολωνάκι, Αθήνα 106 73.

γεωθερμικών ενεργών στοιχείων. Τέλος, από τις διατομές της Νισύρου και του Σουσακίου προκύπτουν διαφορές στην έκλυση των ισοτόπων του ραδονίου που θα μπορούσαν να αποδοθούν στις διαφορετικές λιθολογίες αλλά και στη διαφορετική γεωθερμική δραστηριότητα που επικρατεί στις δύο αυτές περιοχές.

Η κατανομή τόσο του Rn^{220} (θόρον), όσο και του Rn^{222} (ραδόνιο) στις περιοχές ενδιαφέροντος συσχετίζεται με τη γεωλογία και με τις ιδιομορφίες του περιβάλλοντος που επικρατούν σε κάθε ένα από αυτά τα γεωθερμικά πεδία. Η κατανομή των ισοτόπων συνδέθηκε ικανοποιητικά με τη γεωλογική δομή των υπό έρευνα περιοχών. Οι χάρτες κατανομής των ισοτόπων όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις απεικόνισαν διάφορα γεωλογικά γεωθερμικά ενεργά στοιχεία, όπως π.χ. ρήγματα, γεγονός που δείχνει την ευαισθησία της μεθόδου προς τη γεωλογία.

Είναι σαφής η διαπίστωση μίας ενιαίας συμπεριφοράς των ισοτόπων του ραδονίου μέσα σε γνωστά γεωθερμικά πεδία, οπότε οι μέθοδοι αυτού του είδους είναι χρήσιμες εξαιτίας, αφ' ενός μεν της ευαισθησίας τους προς τα γεωθερμικά ενεργά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση περιοχών, αφ' ετέρου δε του ελάχιστου οικονομικού κόστους.

A B S T R A C T

Two groups of radon's isotope (Rn^{220} and Rn^{222}) measurements were carried out, first in the flat part of the Nissyros Caldera, and secondly in the Sousaki geothermal field area. Some representative measurements were also performed in Western Kos, in the Voulkania geothermal area.

Radon (Rn^{222}) originates from U^{238} disintegration and thoron (Rn^{220}) from Th^{232} disintegration. These Rn isotopes are significant because of their origin; they have been used in order to inexpensively locate uranium and thorium source-deposits, while their anomalous concentrations have been reported to correlate with active geological elements. The emission of these isotopes was measured in the above geothermal areas by the R.M. 1003 radon detector (Pylon Instruments).

Two profiles, one from the Nissyros Caldera and one from the Sousaki area were made in order to detect anomalous concentrations of Rn isotopes. It was found that significant anomalous Rn concentrations were observed in these regions. However, the amplitude of the anomaly was higher in Nissyros than in the Sousaki geothermal field. The observed difference in the amplitude emission of these isotopes was explained as due to the difference in the lithology and geothermal activity characteristics prevailing in Nissyros Caldera and Sousaki area. The distribution of Radon and Thoron in these areas was also correlated with the geology and the oddities of the geothermal field. It appears that their distribution depends on geothermally active elements, like faults, and this method seems to be sensitive in detecting such geological formations, at a very low marginal cost.

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία είναι μία μελέτη της έκλυσης των ισοτόπων ραδονίου, Rn^{222} και θόρου, Rn^{220} , (που προέρχονται από τη ραδιενεργό διάσπαση του ουρανίου και του θορίου αντίστοιχα) εντός γεωθερμικών πεδίων στον Ελληνικό χώρο. Αυτά τα πεδία είναι το επίπεδο τμήμα της καλδέρας του ηφαιστείου της Νισύρου και η περιοχή Αγ. Δημήτριος-Θειόχωμα στο Σουσακι, ενώ μία απλή αναφορά γίνεται επιπλέον για περιορισμένο αριθμό μετρήσεων ραδονίου στην περιοχή Βουλκάνια στην δυτική Κω.

Μέχρι τώρα, δεν έχει γίνει μελέτη στον Ελληνικό χώρο με αντικείμενο τη συμπεριφορά αυτών των ισοτόπων μέσα στο χώρο ενός γεωθερμικού πεδίου, παρ'όλο που η έκλυσή τους θεωρείται δεδομένη τουλάχιστον για τη Νίσυρο (Πίππος, 1985). Η προσπάθεια επικεντρώνεται στη διαπίστωση συστηματικής έκλυσης ραδονίου που όμως να είναι ικανή για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με τον ιδιόμορφο χαρακτήρα των γεωθερμικών πεδίων, όπως έχει γίνει κατά καιρούς και με άλλα στοιχεία ως επί το πλείστον σε αέρια κατάσταση (π.χ. Nagao & al., 1990).

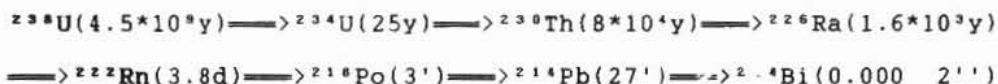
Πιο συγκεκριμένα, με τη διαπίστωση της έκλυσης αυτών των ισοτόπων αποδεικνύεται η ύπαρξη U και Th σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με όλες τις συναφείς επιπτώσεις που συνεπάγονται (Wraith & al., 1980). Τα ισότοπα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για οικονομική ανίχνευση ταμειυτήρων ουρανίου και θορίου (Pedersen & al., 1980). Στα παρακάτω αναφέρεται η μεθοδολογία των μετρήσεων όσο και τα αποτελέσματά τους, που συσχετίστηκαν με τη διάταξη και την κατανομή των "γεωθερμικώς ενεργών" ρηγμάτων και γενικότερα με τις διάφορες γεωλογικές παραμέτρους των εν λόγω γεωθερμικών περιοχών. Ο συσχετισμός και τα συμπεράσματα, που παραθέτουμε, έγιναν με βάση τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων του ραδονίου από τις οποίες και προκύπτει ο τρόπος διάδοσής τους.

2. Τεχνική Μετρήσεων Ραδονίου

2.1. Εισαγωγικές έννοιες

Τα προϊόντα διάσπασης του U^{238} είναι στερεά εκτός της περίπτωσης του Rn^{222} που είναι αέριο με χρόνο ημιζωής 3.8 ημέρες. Το αέριο αυτό είναι βαρύτερο από τα ευγενή αέρια και διαλύεται αρκετά στο νερό. Εκτός από το Rn^{222} , έχουμε και το θόρο, Rn^{220} , που προέρχεται από τη διάσπαση του Th^{232} και είναι επίσης αέριο με χρόνο ημιζωής 55sec. Πιο κάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι σειρές διάσπασης των U^{238} και Th^{232} στις οποίες διακρίνονται το πέμπτο και το έκτο αντίστοιχα θυγατρικό ισότοπο που είναι το ραδόνιο και το θόρο. Οι αριθμοί εντός των παρενθέσεων είναι οι χρόνοι ημιζωής σε έτη (y), ημέρες (d), λεπτά (min) και δευτερόλεπτα (sec).

Η σειρά διάσπασης του U^{238} είναι η εξής:



→ ^{210}Pb (22y) → ^{206}Pb (σταθερό).

Η σειρά διάσπασης του Th^{232} είναι η εξής:

^{232}Th (10¹⁰y) → ^{228}Ra (7y) → ^{228}Ac (6h) → ^{228}Th (2y) →
 ^{228}Ra (4d) → ^{220}Rn (55'') → ^{216}Po (0.2'') → ^{212}Pb (60')
→ ^{212}Bi (11h) → ^{212}Po (0.3*10⁻⁶'') → ^{208}Tl (3.1')
→ ^{206}Pb (σταθερό).

Το ραδόνιο διαδίδεται με δύο τρόπους στο υπέδαφος: ο ένας είναι η διάχυση μέσω πορώδους μέσου, και ο άλλος, η μεταφορά εν διαλύσει στο νερό του υπεδάφους. Η μεταφορά του, όμως, εξαρτάται από το χρόνο ημιζωής του και μετά από περίπου 5 ημιζωές (20 ημέρες), τα περισσότερα από τα άτομα του ραδονίου σε ένα δεδομένο δείγμα, θα έχουν μεταστοιχειωθεί σε Po^{218} .

Επειδή το ραδόνιο είναι αέριο, μπορεί εύκολα να διαχωριστεί από τους υγρούς και στερεούς πομπούς α ακτινοβολίας διότι δεν υφίσταται σ' αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα της ανάμειξης με άλλα στοιχεία, όπως συμβαίνει με τους υγρούς ή στερεούς πομπούς ακτινοβολίας α. Παρ' όλο που το ραδόνιο μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα πολύ εύκολα, είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθούν ανωμαλίες στη συγκέντρωση ραδονίου π.χ. στα κατάντη ενός ποταμού ακόμα και σε απόσταση ενός μιλίου από την πηγή. Η παρατηρούμενη αυτή ανωμαλία οφείλεται στην ικανότητα μεταφοράς, που έχει συνιστώσες την ικανότητα του ισοτόπου και την ορμή του νερού του ποταμού (Instruction Manual, 1982).

Οι μεταβολές στην απορρόφηση είναι τυπικές και είναι ευαίσθητες σε παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική πίεση. Γενικά όμως, αυτές οι μεταβολές είναι τέτοιες ώστε να μην απαιτούν το κόστος για την εξασφάλιση συμπερασμάτων αποκλειστικά από εξειδικευμένα όργανα. Δηλαδή οι μεταβολές αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα ακόμα και αν καταγραφούν από απλά και το σημαντικότερο, φθηνά όργανα καταγραφής (Pedersen & al., 1980). Επίσης καθώς οι τιμές του βασικού επιπέδου (background) δεν είναι συνάρτηση του χρόνου, είναι δυνατό να αναγνωριστούν ανωμαλίες από ένα οποιοδήποτε δεδομένο σύνολο μετρήσεων (EDA-Instruction Manual).

Γενικά, η μεταφορά του ραδονίου και επομένως και η συγκέντρωσή του σε κάποιο σημείο μακριά από την πηγή του εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες (Tanner, 1964a):

(i) Ρυθμός διάσπασης του ισοτόπου

(ii) Σταθερά διάχυσης του ισοτόπου στο πορώδες μέσο

(iii) Το πορώδες του εδάφους: πετρώματα με μεγάλη διαπερατότητα προφανώς, μπορούν να επιτρέψουν πολύ εύκολα τη μεταφορά του ραδονίου και έτσι, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός βαθύτερων στόχων με μεταλλεύματα. Βέβαια, μεγάλη διαπερατότητα/πορώδες συναντάται και σε περιπτώσεις ρηγμάτων οπότε υπάρχουν προδιαγραφές για οικονομική ανίχνευση ταμειυτήρων ουρανίου (Pedersen et al., 1980).

(iv) ταχύτητα και σύσταση του ρευστού που προέρχει το μέσο, το

οποίο, αν αποτελείται από περισσότερες από μία φάσεις (υγρές, στερεές ή αέριες) τότε θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η κατανομή του ραδονίου στις φάσεις αυτές. Η κατανομή του ραδονίου εξαρτάται από την θερμοκρασία.

2.2. Μετρήσεις Ραδονίου

Οι μετρήσεις έγιναν, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα στις δύο περιοχές, με σκοπό την κατασκευή χαρτών κατανομής των εκλυόμενων ισοτόπων. Ο σκοπός ήταν να καλυφθεί το μεγαλύτερο τμήμα της καλδέρας της Νισύρου αλλά και της πιο ενδιαφέρουσας περιοχής Αγ. Δημήτριος-Θειόχωμα-Κόκκινη Σπηλιά στο Σουσάκι. Ένα άλλο κριτήριο επιλογής των θέσεων των μετρήσεων όπως φαίνονται στα σχήματα 1 και 2, ήταν η ύπαρξη ενεργών γεωθερμικών ρηγμάτων ή εμφανίσεις ατμίδων διότι εκεί η έκλυση ραδονίου αναμενόταν έντονη και υπήρχε η προϋπόθεση για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Οι χάρτες κατανομής των ισοτόπων και για τις δύο περιοχές αλλά και τα διαγράμματα συγκέντρωσης-θέσεων μέτρησης προέκυψαν από αυτές τις μετρήσεις, όπου η συγκέντρωση εκφράζεται σε κτύπους ανά λεπτό (c.p.m.).

Οι μετρήσεις έγιναν με τον ανιχνευτή Ραδονίου RM-1003 (I.M., 1982) που έχει την ικανότητα να καταγράφει συγκεντρώσεις ραδονίου τόσο στο έδαφος, όσο και στο νερό. Στην προκειμένη εργασία οι μετρήσεις αφορούσαν μόνο τις συγκεντρώσεις του ραδονίου των αερίων που υπάρχουν στους πόρους του εδάφους.

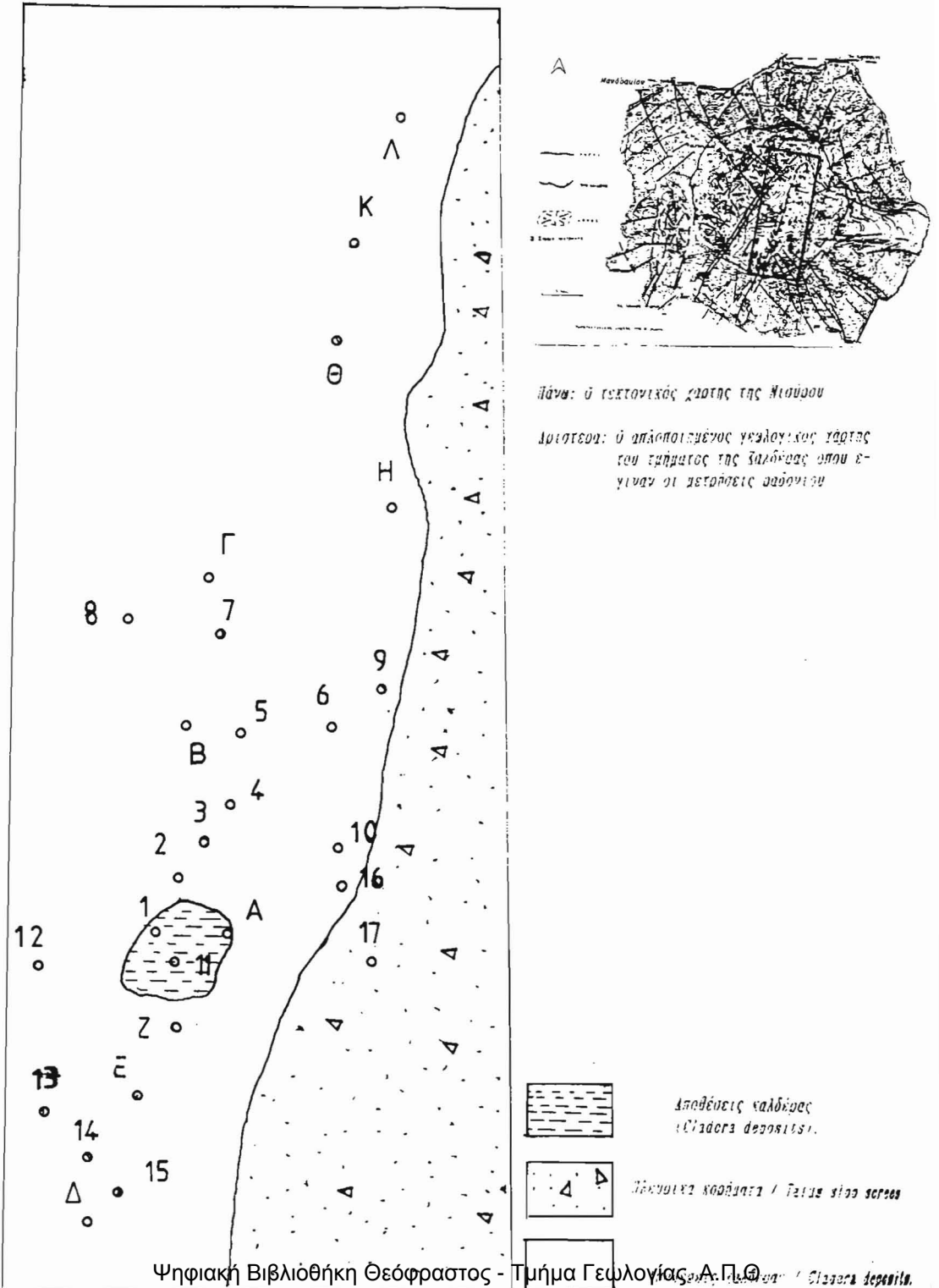
Σε βάθος 70cm περίπου ανοίγεται μία οπή στο έδαφος όπου εισέρχεται ο ανιχνευτής. Ακολούθως, υπάρχει ένα διάστημα αναμονής μέχρι την έναρξη της διαδικασίας της μέτρησης, έτσι ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι τόσο μικρότερο, όσο πιο έντονη είναι η έκλυση του αερίου στην περιοχή έρευνας και όσο πιο μικρή είναι η ανοιγόμενη, για τον ανιχνευτή, οπή. Μετά από την πάροδο αυτού του χρονικού διαστήματος μετράται πρώτα το βασικό επίπεδο ακτινοβολίας (background) για ορισμένη και επιλεγμένη κατάλληλα χρονική περίοδο. Η επιλογή της περιόδου μέτρησης γίνεται με βάση την αναμενόμενη ή ακόμα και την μετρούμενη, με επιλεγμένη τυχαία περίοδο, έκλυση ραδονίου. Αν η περίοδος δεν επιλεγεί κατάλληλα, τότε προκύπτει σφάλμα το οποίο περιορίζεται μόνο με επανάληψη της μέτρησης στην ίδια θέση και όχι απαραίτητα μία φορά.

Έπειτα και για την ίδια περίοδο, γίνεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου με ικανοποιητική ακρίβεια (I.M., 1982) από τον ανιχνευτή ο οποίος έχει σαν ενδείξεις τις C_1 , C_2 , C_3 που είναι εκφρασμένες σε κτύπους ανά λεπτό. Από τις ενδείξεις αυτές αφού προηγουμένως αφαιρεθεί το background και μέσω των σχέσεων (1) και (2) προκύπτουν οι συγκεντρώσεις του ραδονίου (R) και θόρου (T), οι οποίες εκφράζονται σε κτύπους ανά λεπτό (c.p.m.), ως κάτωθι:

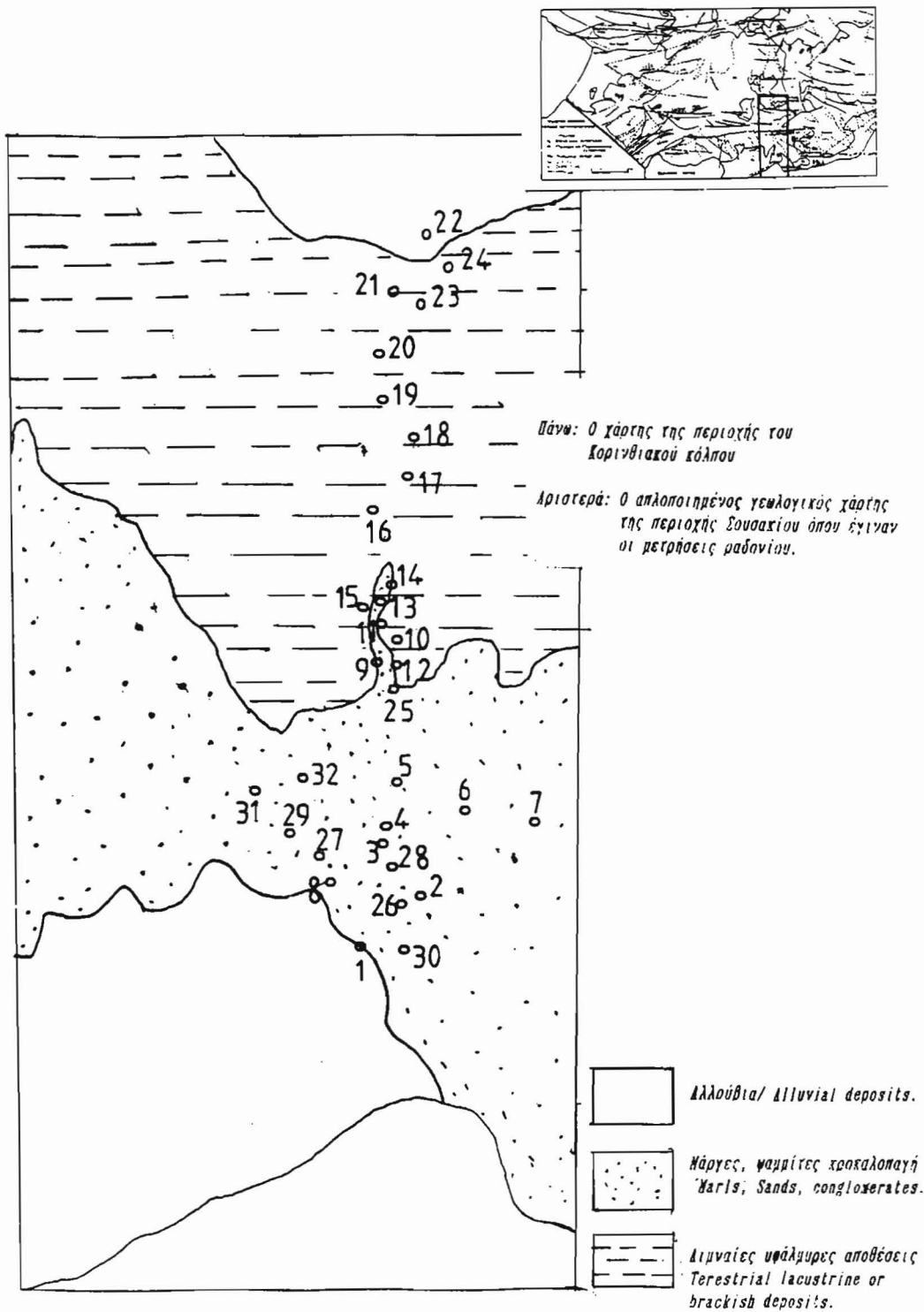
$$R = 0.87C_3 + 0.32C_2 - 0.34C_1 \quad (1)$$

$$T = C_1 + C_2 + C_3 - R \quad (2)$$

Σχ. 1: Απώσιπτοι γράτες Ηιούσου.



Σχ. 2: Απλοποιημένος χάρτης περιοχής Σουσακίου.



3. Μελέτη Έκλυσης Ραδονίου στα Γεωθερμικά Πεδία

3.1. Νίσυρος:

3.1.1. Γεωλογία: Η Νίσυρος είναι ένα μικρό ηφαιστειακό νησάκι με διάμετρο μόλις 7km και βρίσκεται στο νότιο Αιγαίο, στην ανατολική απόληξη του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου. Οι πρώτες συστηματικές μελέτες στο νησί έγιναν από την Davis (1967) ενώ η πιο πρόσφατη γεωλογική αλλά και τεκτονική ανάλυση της Νισύρου, έγινε από τους Παπανικολάου και Λέκκα (1991). Στο σχήμα 1 φαίνεται ο απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του νησιού, όπου διακρίνονται και οι θέσεις των μετρήσεων. Τα ενδιαφέροντα γεωλογικά και τεκτονικά στοιχεία του νησιού είναι οι κύριες ρηξιγενείς ζώνες καθώς και τα τμήματα που συνθέτουν το ηφαιστειακό οικοδόμημα. Διακρίνονται τρεις περίοδοι τεκτονικής δραστηριότητας (Παπανικολάου και Λέκκας, 1991):

- Το προκαλδερικό στάδιο, που εκδηλώνεται με την ανάπτυξη του ηφαιστείου και με τη δημιουργία ρηγμάτων τα οποία μετακινούν διαφορικά τα τεκτονικά τεμάχια και ελέγχουν τη ροή της λάβας γύρω από το ηφαίστειο.

- Το συνκαλδερικό στάδιο, όπου έχουμε εκρήξεις που οδήγησαν στο σχηματισμό της τυπικής καλδερικής δομής.

- Το μετακαλδερικό στάδιο, με χαρακτηριστικό γνώρισμα την εκροή ρυολιθικών και δακιτικών λαβών. Η πρόσφατη γεωλογική και τεκτονική δραστηριότητα έχει επιδράσει σε όλους τους προϋπάρχοντες σχηματισμούς. Οι Παπανικολάου κ.α. (1991) διέκριναν τέσσερις κύριες ρηξιγενείς ζώνες:

- Η ζώνη F₁ με διεύθυνση N40°W, κλίση 70°-80°SE και άλμα 100m.
- Η ζώνη F₂ με διεύθυνση περίπου N30°, κλίση 70°-80°WNW και άλμα της τάξης των 120m.
- Η ζώνη F₃ με διεύθυνση N40°W, κλίση 70°-80°NE και άλμα 50m.
- Η ζώνη F₄ με διεύθυνση N20°W, κλίση 70°-80°EW και άλμα 40m. Η ζώνη αυτή διασταυρώνεται με τη ζώνη F₂ στο κέντρο του νησιού.

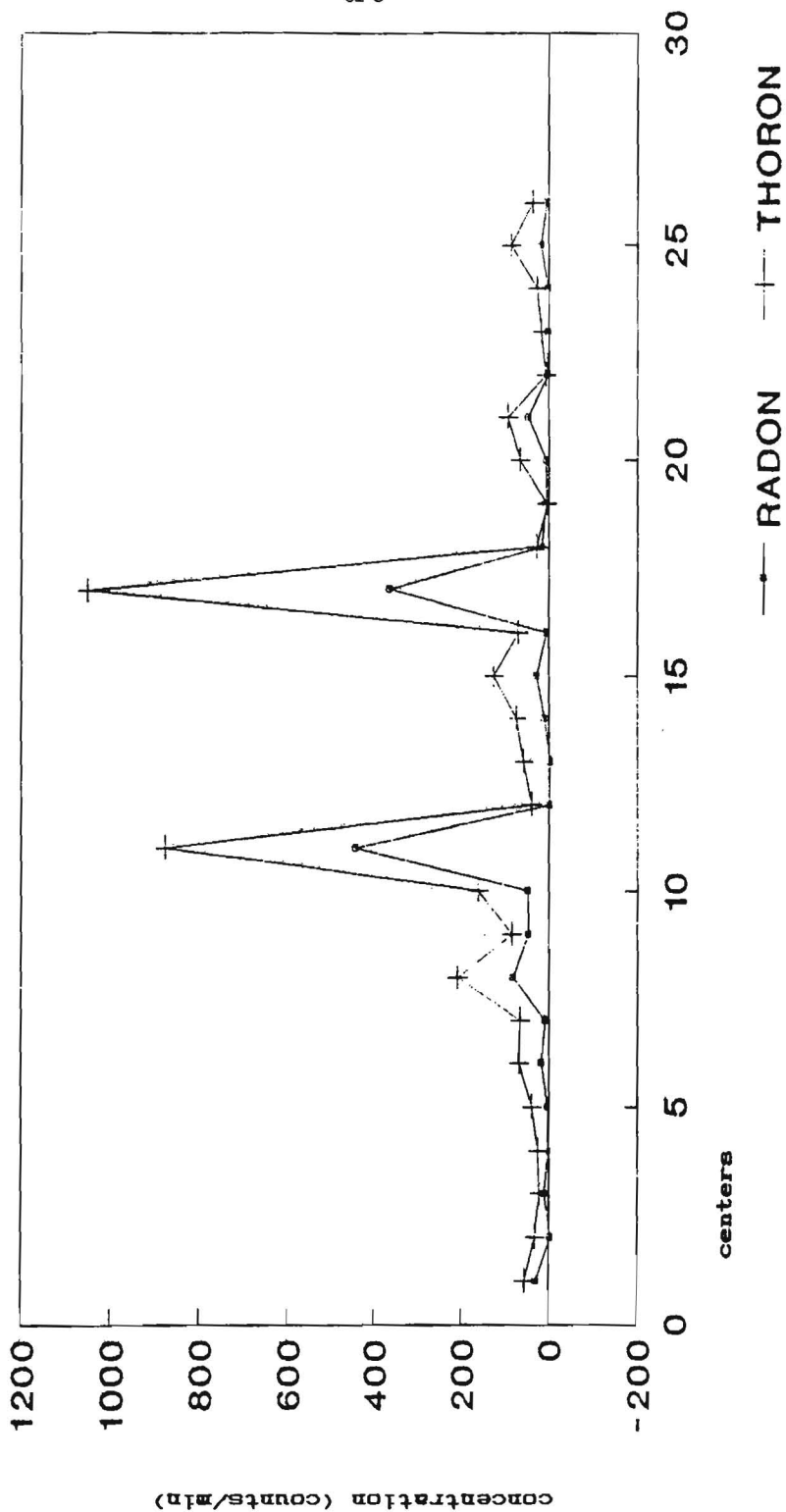
Πέρα όμως από την διάκριση αυτή των εν λόγω συγγραφέων, είναι σημαντική η ύπαρξη πολλών μικρότερων ρηγμάτων μέσα στην καλδέρα. Ο Κρατήρας Στέφανος που δεσπόζει λόγω διαστάσεων, είναι φρεατικής έκρηξης και βρίσκεται στην τομή των ρηξιγενών ζωνών F₂ και F₄.

3.1.2. Επεξεργασία των Μετρήσεων στη Νίσυρο

Στη Νίσυρο έγιναν δύο ομάδες μετρήσεων. Η πρώτη περιλαμβάνει μετρήσεις που έγιναν τον Ιούλιο του 1990, ενώ οι μετρήσεις της δεύτερης ομάδας έγιναν τον Απρίλιο του 1991. Οι μετρήσεις της πρώτης ομάδας είναι οι Δ, Ε, Ζ, Α, Β, Γ, Η, Θ, Κ και Λ, ενώ οι μετρήσεις 1-17 αποτελούν τη δεύτερη ομάδα (Σχ. 3). Από το διάγραμμα συγκέντρωσης ραδονίου-θέσεων μέτρησης στην Νίσυρο (Σχ. 3), φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των δύο ισοτόπων μεταβάλλονται ομοιόμορφα κατά μήκος της διατομής. Δηλαδή, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του ραδονίου, αυξάνεται και η συγκέντρωση του θόρου, συνήθως σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι το ραδόνιο.

Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις τόσο στη Νίσυρο (Σχ. 3), όσο Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

ΣΧ. 3 : ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗ ΝΙΣΥΡΟ



και στο Σουσακι (Σχ. 4), το θόρο εμφανίζεται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από το ραδόνιο. Μια πιθανή εξήγηση του φαινομένου αυτού θα μπορούσε να είναι το γεγονός ότι το θόρο, ως παράγωγο του Th^{232} , είναι μεγαλύτερο σε ποσότητα από το ραδόνιο, που παράγεται από το U^{238} , διότι ο λόγος της συγκέντρωσης του U^{238} προς τη συγκέντρωση του Th^{232} κυμαίνεται στη φύση από 0.25 έως 0.33. Πέρα όμως από το λόγο αυτό, η εμφάνιση της μεγαλύτερης συγκέντρωσης του θόρου αποδίδεται και σε φαινόμενα ραδιενεργών αντισσοροπιών στα οποία δεν θα επεκταθούμε στην παρούσα εργασία. Έτσι οι μεγαλύτερες τιμές έκλυσης του θόρου μας διευκολύνουν στην ευχερέστερη αναγνώριση και εντοπισμό των ανωμαλιών.

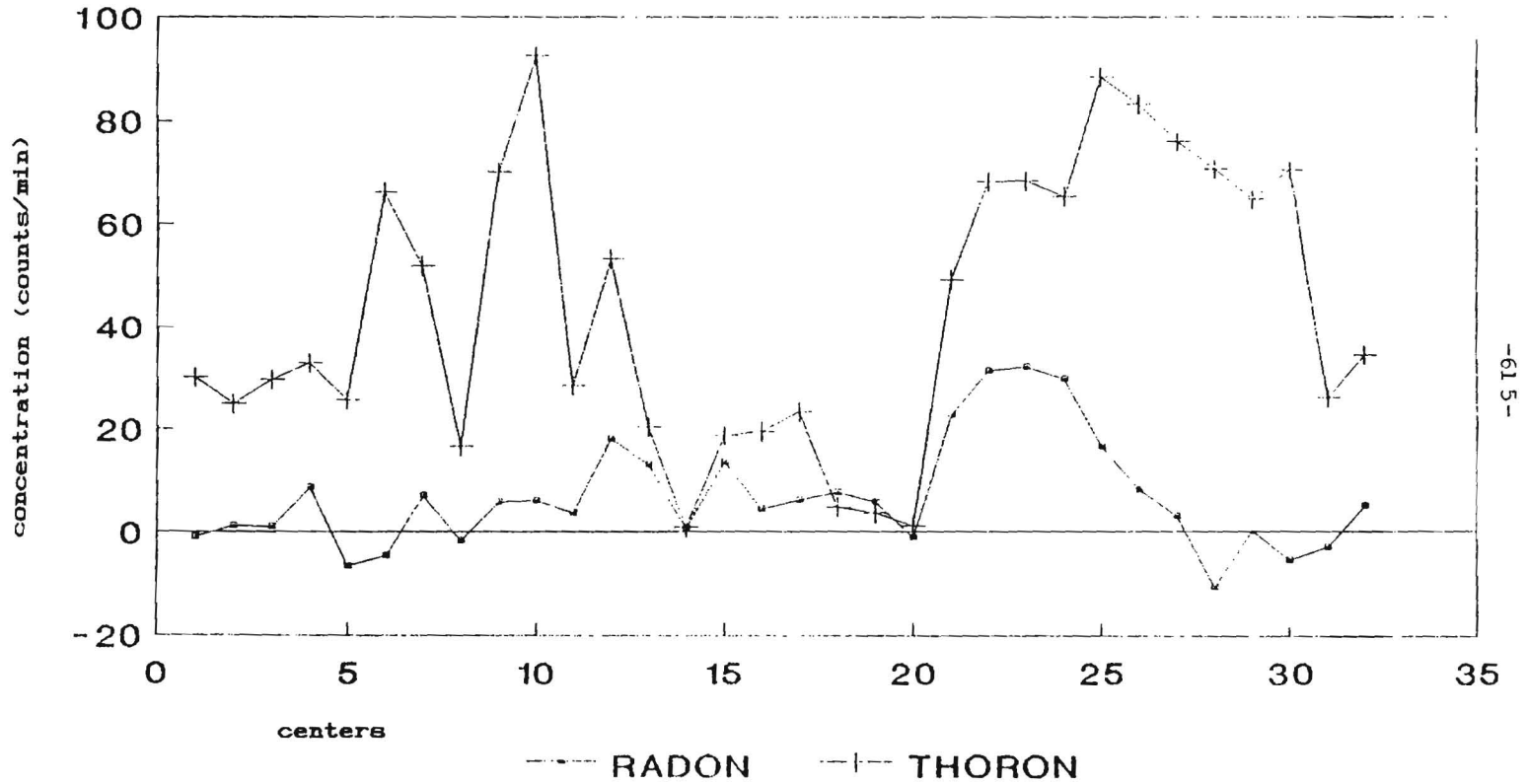
Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται ένα επίπεδο συγκεντρώσεων για το ραδόνιο μεταξύ 0 και 50 c.p.m. και για το θόρο μεταξύ 50 και 120 c.p.m., ενώ μόνο εκεί που υπάρχουν οι ανωμαλίες φαίνονται οι σχετικά μεγάλες τιμές των συγκεντρώσεων των ισοτόπων. Γενικά οι τιμές των συγκεντρώσεων των ισοτόπων του ραδονίου κυμαίνονται από 0 έως και 1000 c.p.m..

Αντίθετα με τα αναμενόμενα δεν είχαμε έκλυση ραδονίου στις μετρήσεις των θέσεων Z και A, οι οποίες έγιναν στην περιοχή του κρατήρα Στέφανος. Η μέτρηση Z έγινε λίγο έξω από αυτόν και πάνω στο ρήγμα F₂ και δεν φάνηκε να υπάρχει μετρήσιμη ποσότητα κανενός από τα εξεταζόμενα ισοτόπα. Το σημείο Z πιθανόν να μην βρίσκεται πάνω στην F₂, αλλά σε κάποιο άλλο ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που δεν ανήκει σε κάποια από τις κύριες ρηξιγενείς ζώνες. Σε μια τέτοια περίπτωση, η υπόθεση που γίνεται για να δικαιολογήσει την ανυπαρξία έκλυσης, είναι ότι παρά την δραστηριότητα του ηφαιστείου του νησιού και τη σαφή τεκτονική ανησυχία, το ρήγμα αυτό είναι "ήρεμο". Όσον αφορά την μέτρηση στο σημείο A, αυτή δείχνει όχι καθαρά, την παρουσία έκλυσης ραδονίου. Το σημείο A είναι μέσα στον μεγάλο κρατήρα του Στέφανου, και συγκεκριμένα στο ανατολικό του τμήμα όπου υπάρχει έντονη επιφανειακή εμφάνιση της δραστηριότητας του ηφαιστείου με ταυτόχρονη ύπαρξη ατμίδων. Ραδόνιο φαίνεται να εκλύεται και στο σημείο B, αλλά και πάλι η έκλυση δεν είναι μεγάλη. Το σημείο B βρίσκεται πάνω σε ένα λόφο, δίπλα σε δύο μικρούς κρατήρες φρεατικής έκρηξης, από τους πολλούς που υπάρχουν εκεί.

Αντίθετα, οι μετρήσεις στα κέντρα 11 και 8 παρουσιάζουν μεγάλη έκλυση των ισοτόπων του ραδονίου. Το κέντρο 11, είναι και αυτό μέσα στον κρατήρα του Στέφανου, αλλά στην δυτική του πλευρά και πολύ κοντά με το σημείο της μέτρησης A. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κέντρο 8, ήταν μέσα σε έναν από τους μικρούς κρατήρες που υπήρχαν πάνω στο λόφο. Πολύ κοντά σε αυτό το κέντρο υπήρχαν, όπως και αλλού στην περιοχή, έντονες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις. Σε μια άλλη περιοχή όπου οι εξαλλοιώσεις αυτές ήταν πολύ έντονες και τα πετρώματα του εδάφους ήταν πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων, με ταυτόχρονη παρουσία ατμίδων, εξαιτίας της ισχυρής έκλυσης ραδονίου δημιουργήθηκε πρόβλημα υπερδιέγερσης στον μηχανισμό μέτρησης του οργάνου.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι οι ανωμαλίες στην έκλυση των ισοτόπων παρουσιάζονται μόνο κοντά στους ενεργούς, από γεωθερμική άποψη χαρακτήρες, ενώ οι συγκεντρώσεις στα υπόλοιπα "ήρεμα" από γεωθερμικής άποψης τμήματα της καλδέρας είναι ομοιόμορφες και σαφώς μικρότερες.

Σχ. 4: ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΓΡΗΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΣΟΥΣΑΚΙ



-615-

3.2. Σουσακί

3.2.1. Γεωλογία: Η περιοχή Σουσακίου, στη δυτική απόληξη του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου, είναι πολύ ενδιαφέρουσα από γεωθερμική άποψη, με την ύπαρξη θερμών ατμίδων καθώς και ζεστών υπόγειων νερών. Οι Μέττος κ.α. (1988) πραγματοποίησαν λεπτομερή γεωλογική μελέτη, βάσει της οποίας γίνεται και η παρουσίαση των γεωλογικών χαρακτηριστικών στις ακόλουθες σειρές. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ο απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής Σουσακίου μαζί με τις θέσεις των μετρήσεων.

Η περιοχή του Σουσακίου-Αγ. Θεοδώρων, καθώς και η ευρύτερη περιοχή της τάφρου του Κορινθιακού, καταλαμβάνεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από νεογενείς-τεταρτογενείς αποθέσεις με πολύπλοκη στρωματογραφία και τεκτονική. Η περιγραφή της γεωλογίας θα γίνει συγκεκριμένα για τους σχηματισμούς Αγ. Δημητρίου-Θειοχώματος όπου και έγιναν οι μετρήσεις ραδονίου. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι μαργαϊκά κροκαλοπαγή με χρώμα καστανό, υποπράσινο ή κιτρινωπό, που βέβαια ποικίλει από θέση σε θέση και με έντονες εξαλλοιώσεις από παλιές ατμίδες. Τα μαργαϊκά κροκαλοπαγή, αποτελούνται από κροκάλες ή λατύπες οφιολιθικές (μικρού μεγέθους) αλλά και ασβεστολιθικές σε μικρό ποσοστό και με μέγεθος που φθάνει μέχρι και 30 cm. Τα κροκαλοπαγή αυτά πολλές φορές εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ψαμμίτες που μεταβαίνουν, προς τα Ανατολικά, σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Στη συνέχεια μεταβαίνουν πλευρικά στις αμμούχες μάργες της περιοχής Θειόχωμα, που βρίσκονται σε άμεση επαφή με τις ατμίδες Σουσακίου.

Έτσι, είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση της μεταμόρφωσης (μικρού βαθμού) των αποθέσεων που βρίσκονται σε επαφή με τις ατμίδες και την αυξημένη θερμοκρασία των υδάτων των υδροφόρων οριζώντων. Από τη δράση των ατμίδων δημιουργούνται κρύσταλλοι γύψου που κατά θέσεις εμφανίζονται σε μεγάλες ποσότητες. Τα ιζήματα στην περιοχή Θειόχωμα είναι λιμναία με πάχος πάνω από 200m και αποτελούνται από εναλλαγές υπόλευκων αμμούχων μαργών συνεκτικών κροκαλοπαγών καστανού χρώματος, κυρίως στα ανώτερα μέλη, άμμων και χαλαρών κροκαλοπαγών. Μέσα στους σχηματισμούς αυτούς απαντούν μικρές λιγνιτικές ενστρώσεις, που έχουν υποστεί και αυτές την επίδραση των ατμίδων, ενώ υπάρχουν και δακτιλικές κροκάλες. Στην προέκταση του ρέματος που είναι οι μοφέττες του Σουσακίου μέσα στους λιμναίους σχηματισμούς, παρατηρείται μικρή εμφάνιση ηφαιστειακού τόφου με γωνιώδη τεμάχια δακίτη.

Η περιοχή Αγ. Θεοδώρων είναι έντονα διαρρηγμένη και παρουσιάζει όπως όλη η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου, έντονη σεισμικότητα. Η κύρια διεύθυνση των ρηγμάτων που έχουν επηρεάσει όλους τους σχηματισμούς είναι Α-Δ και δευτερεύουσα ΒΔ-ΝΑ. Κατά την απόθεση των πλειοπλειστοκαινικών έλαβαν χώρα κατακόρυφες κινήσεις. Οι κινήσεις αυτές, προκάλεσαν ολίσθηση των πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών πάνω στο οφιολιθικό υπόβαθρό τους. Τα καλύμματα ολίσθησης οφείλονται στη γρήγορη άνοδο του βόρειου τμήματος της περιοχής κατά τη διάρκεια του πλειο-πλειστοκαινού. Η αστάθεια αυτή, προκάλεσε την προς Νότο απόσπαση των νεογενών αποθέσεων λόγω βαρύτητας. Οι συμπίεστικές τάσεις επικρατούσαν στο Κάτω Πλειόκαινο, ενώ από το Μέσο Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, επικρατούν οι εφελκυστικές τάσεις. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

(κατακόρυφων) κινήσεων κατά μήκος ρηγμάτων που είναι ταυτόχρονες με πρόσφατους σεισμούς στον Κορινθιακό.

3.2.2. Επεξεργασία των Μετρήσεων στο Σουσάκι

Στην περιοχή Σουσακίου οι ενδείξεις της δραστηριότητας είναι πολύ πιο ασθενείς σε σχέση με το ηφαίστειο της Νίσυρου. Η έκλυση των ισοτόπων δεν ήταν ισχυρή, γεγονός αναμενόμενο, εξαιτίας της σχετικής ηρεμίας από γεωθερμική κατά κάποιον τρόπο, άποψη στην περιοχή αυτή. Στη διατομή των μετρήσεων ραδονίου στο Σουσάκι (Σχ. 4) φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου και θόρου κυμαίνονται από 0 έως 100 c.p.m.. Υπάρχει λοιπόν σημαντική διαφορά στην έκλυση των ισοτόπων του ραδονίου μεταξύ των δύο περιοχών. Η διαφορά αυτή εκφράζει αφ' ενός μεν, την ηρεμία της περιοχής, αφ' ετέρου δε την αλλαγή της λιθολογίας: Στη Νίσυρο επικρατούν τα όξινα ηφαιστειακά, ενώ στο Σουσάκι, υπάρχει ποικιλία λιθολογίας με ηφαιστίτες (όξινοι πλειο-πλειστοκαινικοί), θαλάσσιες υφάλμυρες και λιμναίες αποθέσεις ακόμα και οφιόλιθους. Κι όλα αυτά τα διάφορα είδους και προέλευσης πετρώματα, απαντούν σε ένα χαλαρό σύνολο που σαφώς διεκολύνει τη διαφυγή των αερίων ισοτόπων του ραδονίου.

Με αυτές τις υποθέσεις είναι δυνατόν να εξηγηθεί αυτή η διαφορά στην τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων των ισοτόπων. Στη διατομή από το Σουσάκι οι καμπύλες μεταβολής των συγκεντρώσεων δεν ήταν ομοιόμορφες, αλλά φάνηκε καθαρά η αλληλοεξάρτηση μεταξύ των δύο ισοτόπων, όπως και στη Νίσυρο. Το θόρο αυξανόταν εκεί όπου αυξανόταν και το ραδόνιο, με διαφορετικούς φυσικά ρυθμούς. Στη Νίσυρο, οι καμπύλες χαρακτηρίζονταν από την ένδειξη ενός επιπέδου τιμών συγκεντρώσεων και σε διάφορες θέσεις έδειχναν τα μέγιστα. Αντίθετα στο Σουσάκι οι καμπύλες δεν έχουν αυτήν την ομοιομορφία, γεγονός που εξηγείται από την ασθενική σχετικά έκλυση των ισοτόπων.

3.3. Δυτική Κώς

Περιορισμένου αριθμού μετρήσεις έγιναν στην περιοχή Βουλκανίων στη Δυτική Κώ, διότι εκεί υπάρχουν στην επιφάνεια οι πλέον έντονες γεωθερμικές εξαλλοιώσεις. Στην περιοχή αυτή υπάρχει επίσης και ένα εμφανές ρήγμα, με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, που διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στο γεωθερμικό σύστημα της δυτικής Κώ (Lagios & Dawes 1989, Tzanis et al. 1991).

Οι μετρήσεις σε αυτή την γεωθερμικώς ενδιαφέρουσα περιοχή έδειξαν τα αναμενόμενα, κυρίως μετά την εμπειρία στη Νίσυρο. Η έκλυση που παρατηρήθηκε στην περιοχή των Βουλκανίων ήταν της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους με εκείνη που παρατηρήθηκε στη Νίσυρο. Περαιτέρω συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού των μετρήσεων, οι οποίες όμως είναι αρκετά ενδεικτικές και οι έντονες τιμές που παρατηρήθηκαν, μάλλον συνηγορούν στον ενεργό χαρακτήρα του εν λόγω ρήγματος της περιοχής.

4. Συζήτηση

Σημαντικού χαρακτήρα είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν

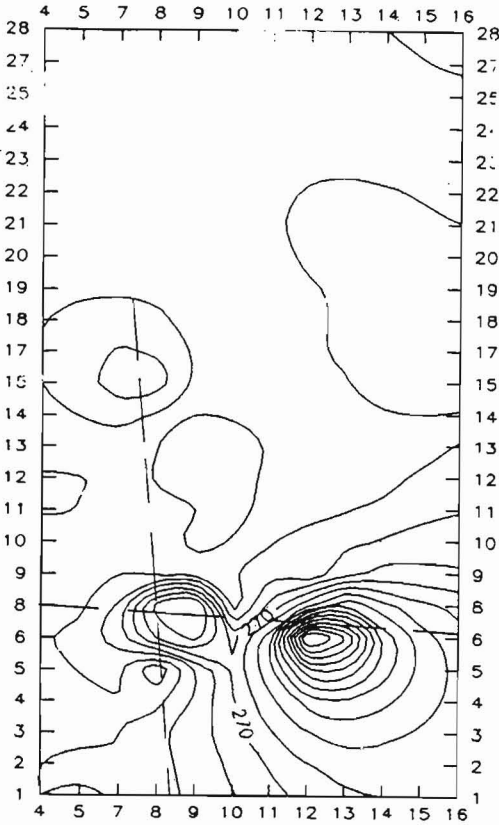
παρατηρούντες τους χάρτες έκλυσης αλλά και κατανομής των ισοτόπων του ραδονίου στο γεωθερμικό πεδίο της Νισύρου (Σχ. 5 και 6). Οι χάρτες αυτοί δείχνουν μια εκλεκτική εμφάνιση των μέγιστων των συγκεντρώσεων των ισοτόπων αφ'ενός μεν μέσα στις έντονα ενεργές περιοχές του πεδίου (Dawes & Lagios 1991, Λάγιος 1990), αφ'ετέρου δε, τα μέγιστα αυτά δείχνουν ορισμένους κύριους γεωλογικούς χαρακτήρες. Πιο συγκεκριμένα, στην περιφέρεια του γεωθερμικού πεδίου, δηλαδή στο Ν-ΝΔ και Β-ΒΑ τμήμα της καλδέρας όπου δεν υπάρχουν ρήγματα ή ατμίδες, στοιχεία δηλαδή του εσωτερικού τμήματος του ηφαιστείου, παρατηρούνται μειωμένες αισθητά συγκεντρώσεις των ισοτόπων. Αυτό πιθανά εξηγείται με την κυκλοφορία των ρευστών στην ευρύτερη περιοχή του πεδίου, αλλά και με την αλλαγή άλλων παραγόντων, όπως η χημική σύσταση των ρευστών. Ο λόγος των συγκεντρώσεων των δύο ισοτόπων είναι σίγουρα συνάρτηση του ΡΗ αλλά και άλλων, τέτοιου είδους, παραμέτρων κάτι που έχει αποδειχτεί και από άλλους ερευνητές, κατά τη διάρκεια μελέτης της συμπεριφοράς διαφόρων ισοτόπων μέσα σε γεωθερμικά πεδία (Tanner, 1964b).

Τα μέγιστα των συγκεντρώσεων των ισοτόπων οριοθετούν, όπως παρατηρείται στους χάρτες με τις ισοκαμπύλες, κάποια ρήγματα τα οποία υπάρχουν στη περιοχή της καλδέρας της Νισύρου. Πιο συγκεκριμένα από το χάρτη κατανομής του ραδονίου αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από το χάρτη κατανομής του θόρου, διαφαίνεται η οριοθέτηση τόσο της κύριας ρηξιγενούς ζώνης F₂ όσο και της F₄, γεγονός που φυσικά πηγάζει από τον τρόπο και τις διόδους μεταφοράς των δύο αυτών ισοτόπων με την βοήθεια της κυκλοφορίας των υδροθερμικών ρευστών.

Η παρατήρηση της ύπαρξης των ανωμαλιών έκλυσης των ισοτόπων στο εσωτερικό του πεδίου επιβεβαιώθηκε και στο Σουσάκι. Παρατηρήθηκε δηλαδή ότι μέσα στο κυρίως ρήγμα και κοντά στις διάφορες ατμίδες, είχαμε αρκετά έντονη έκλυση των δύο ισοτόπων όχι βέβαια στο βαθμό εμφάνισης της Νισύρου.

Τα σχήματα 7 και 8 παρουσιάζουν την κατανομή της έκλυσης των ισοτόπων στο Σουσάκι και φαίνεται η συσχέτιση της έκλυσης με τη γεωλογία. Δηλαδή, οριοθετείται μέσω αυτών των δύο χαρτών, το κυρίως ρήγμα και πάλι με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από την κατανομή του θόρου. Επίσης, από τον πιο λεπτομερή χάρτη του θόρου διακρίνεται στο βόρειο τμήμα του και με διεύθυνση περίπου Α-Δ μια σειρά από ατμίδες επί του παρόντος σχετικά ενεργές, οι οποίες και παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου. Οι ατμίδες αυτές, εκτός μίας ή δύο εξαιρέσεων, είναι οι μόνες ενεργές στην περιοχή αυτή και η ύπαρξή τους γίνεται φανερή από τις καταγραφές της μεθόδου. Ενδέχεται οι ατμίδες να αποτελούν την επιφανειακή εμφάνιση ενός μικρού ρήγματος που είναι περίπου κάθετο στο μεγάλο. Η ύπαρξη αυτού του ρήγματος, δεν είναι βέβαιη διότι δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία στο υπαίθρο εκτός βέβαια από τις ατμίδες. Επομένως στο Σουσάκι λαμβάνουμε ανάλογα αποτελέσματα με αυτά της Νισύρου με μόνη κύρια διαφορά το χαμηλότερο επίπεδο έκλυσης των ισοτόπων. Έχουμε και εδώ οριοθέτηση των κύριων, αλλά και περισσότερο ενεργών χαρακτήρων από γεωθερμικής πλευράς και σε αυτό το γεωθερμικό πεδίο.

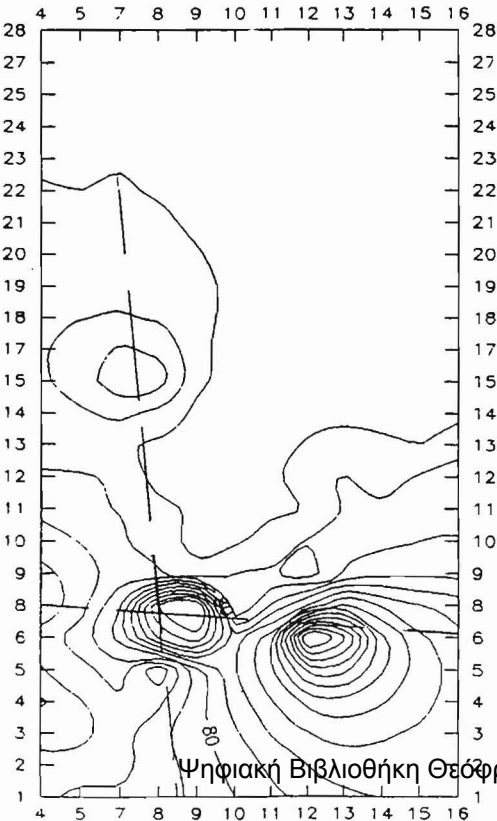
Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος καταγραφής της έκλυσης των ισοτόπων είναι ευαίσθητη στα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι



Εκ. 6 ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΗΚΑΥΣΗΣ ΘΟΡΟΥ
ΣΤΗ ΝΙΣΣΥΡΟ

ΙΣΟΔΙΑΣΤΑΣΗ: 55 counts/min

100m

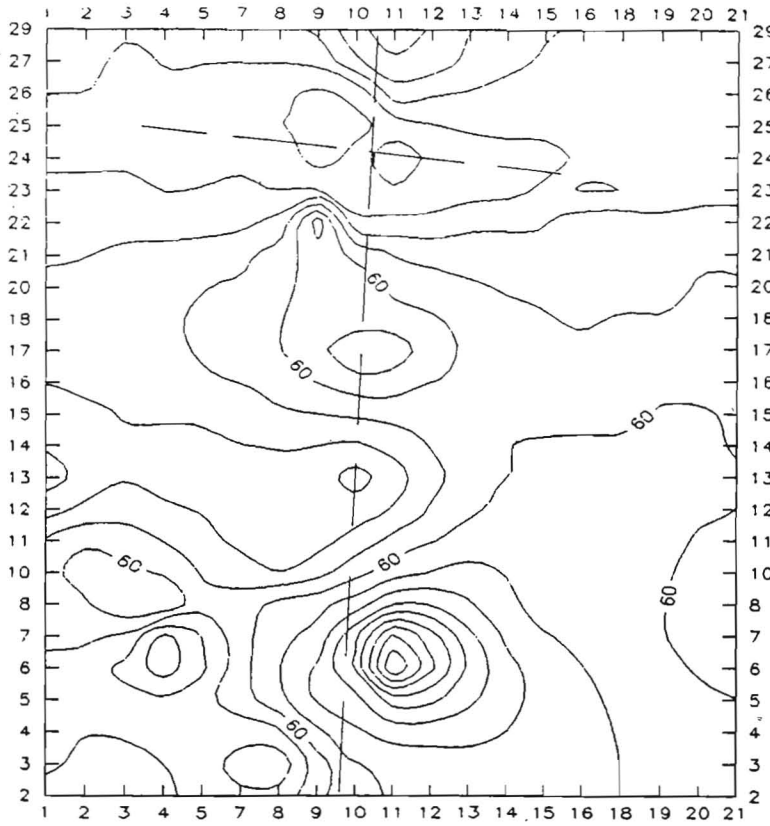


Εκ. 5 ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΗΚΑΥΣΗΣ ΡΑΔΙΟΥ
ΣΤΗ ΝΙΣΣΥΡΟ

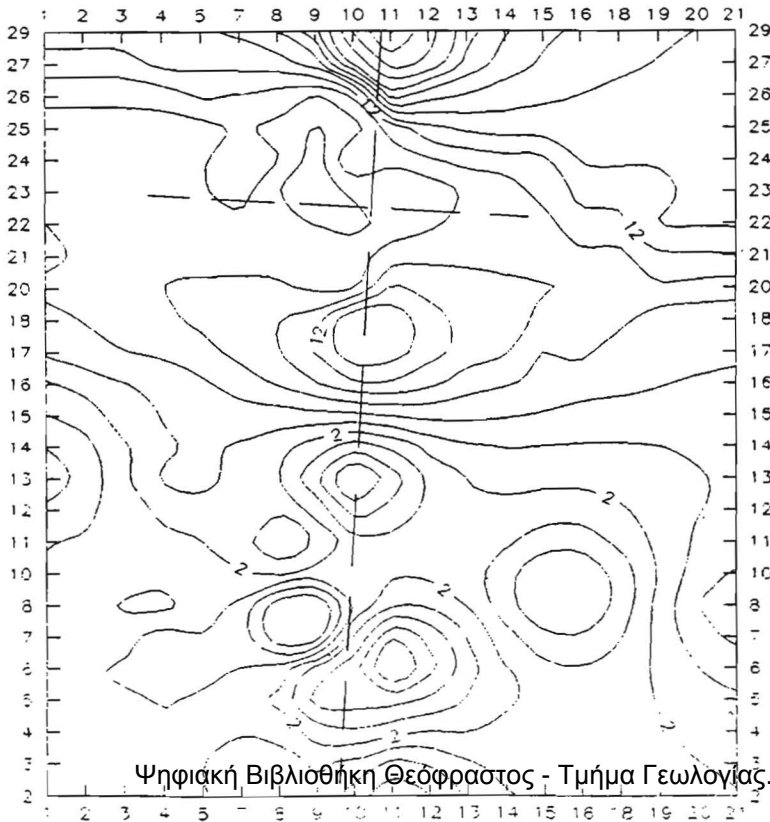
ΙΣΟΔΙΑΣΤΑΣΗ: 20 counts/min

100m





Εκ. 6 ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΚΡΑΥΣΗΣ ΟΣΟΥ
ΕΤΟ ΕΔΡΕΑΚΙ
ΙΣΟΔΙΑΣΤΑΣΗ: 10 counts/min
200m



Εκ. 7 ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΚΡΑΥΣΗΣ ΡΑΔΙΟΥ
ΕΤΟ ΕΔΡΕΑΚΙ
ΙΣΟΔΙΑΣΤΑΣΗ: 2 counts/min
200m

"γεωθερμικά ενεργά", συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην έρευνα γεωθερμικών συστημάτων.

Βιβλιογραφία

- Davis, E.N. (1967). Zur Geologie und Petrologie der Inseln Nisyros und Jali (Dodecanes). *Practika Acd. Athen*, 42, 235-252.
- Dawes, G.J.K. and Lagios, E. (1991). A magnetotelluric survey of the Nissyros Geothermal Field. *Geothermics*, 20, p.225-235.
- Fleischer, R.L. and Likes, R.S. (1978). Uranium exploration Technical Information Series (General Electric).
- Instruction manual (1980). RD-200/RDU-200 EDA Instruments (Toronto Canada).
- Instruction manual R.M.-1003 Radon detector (1982). Pylon Instruments (Ottawa-Canada).
- Καβουρίδης, Θ. και Φυτίκας, Μ. (1988). Γεωθερμική έρευνα περιοχής Σουσακίου (Ν. Κορινθίας.). Ι.Γ.Μ.Ε.
- Lagios, E. and Dawes, G.J.K. (1989). Audio-Magnetotelluric survey of Nissyros geothermal field. Final report submitted to PPC, Dept. of Alternative Energy Resources, Athens, Greece.
- Λάγιος, Ε. (1990). Μαγνητοτελλουρική Έρευνα Δομής του Γεωθερμικού Πεδίου της Νισύρου. Δελτ. Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τ. XXV/3, σελ. 393-407.
- Μέττος, Α., Ροντογιάννη, Θ., Βαβay, Ph. (1988). Οι πλειοπλειστοκαινικές αποθέσεις περιοχής Σουσακίου-Αγ.Θεοδώρων (Κορινθίας): Τομογραφία-παραμόρφωση. Δελτ. Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμ. XX/2, σελ. 91-111.
- Nagao, K., Kita, I., Matsuda, J., Mitropoulos, P. (1991). Noble gas isotope geochemistry of volcanic gases from the Aegean island arc., Δελτ. Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμ. XXV, p. 33-42.
- Παπανικολάου, Δ.Ι. και Λέκκας, Ε.Α. (1991). Γεωλογική δομή και εξέλιξη του ηφαιστείου της Νισύρου. Δελτ. Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμ. XXV, σελ. 405-419.
- Pedersen, C.P., Dunbier, J., Gingrich, J.E. (1980). Experience with the TRACK-ETCH method in Northern Australia. Proc. of International Uranium Symposium on the Pine Creek Geosyncline, p. 351-356.
- Tanner, A.B. (1964a). Radon migration in the ground: A review. *The Natural Radiation Environment*, Univ. of Chicago Press, p. 161-190.

- Tanner, A.B. (1964b). Physical and chemical controls on distribution of Radium-226 and Radon-222 in Ground Water near Great Salt Lake, Utah. The Natural Radiation Environment, Univ. of Chicago Press, p. 253-276.
- Tzanis, A., Lagios, E. and Dawes, G.J.K. (1991). Gravity and AMT study of the western Kos island geothermal prospect, Greece. Paper pres. UKGA XV, Leicester, U.K.
- Writh, R.J., Pacer, J.C. (1980). Gases in Uranium exploration. IAEA-AG-162/03, p. 47-60.