

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΛΥΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΓΑΡΩΝ

Οικονομόπουλος Ε.¹, Παπαευθυμίου Ε.², Ιωαννίδης Κ.³ και Κουκουβέλας Ι.¹

¹ Τομέας Γενικής Θαλάσσιας Γεωλογίας και Γεωδυναμικής, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών 265 00 Πάτρα, iannis@upatras.gr

² Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα

³ Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 451 10 Ιωάννινα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετρήσεις των εκπομπών του αερίου ραδονίου από το έδαφος πραγματοποιήθηκαν σε 4 περιοχές των Μεγάρων. Οι μετρήσεις διήρκεσαν 20 μήνες ή 41 μετρητικές περιόδους των 14 ημερών η κάθε μια. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 164 ανιχνευτές CR-39. Οι ανιχνευτές υπέστησαν χημική επεξεργασία με διάλυμα NaOH 5N και στη συνέχεια καταγράφηκαν πέντε οπτικά πεδία σε κάθε ανιχνευτή. Σε κάθε εικόνα, με τη βοήθεια του προγράμματος TRACKA, γίνεται καταμέτρηση των ιχνών των σωματιδίων-α που προέρχονται από τη διάσπαση του ραδονίου. Οι συσκευές μέσα στις οποίες έχουν τοποθετηθεί οι ανιχνευτές ραδονίου, έχουν βαθμονομηθεί από το εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση της συσκευής, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου για το χρονικό διάστημα που έχει τοποθετηθεί η συσκευή. Η επίδραση των γεωλογικών συνθηκών, οι οποίες θεωρείται ότι έχουν σημαντική επίδραση στην έκλυση ραδονίου στο έδαφος με βάση τις χρησιμοποιηθείσες μετρητικές διατάξεις, είναι η ελάχιστη δυνατή λόγω του ότι αυτές βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Έτσι θεωρείται ότι μερικές από τις ανωμαλίες έκλυσης ραδονίου της μελέτης δεν οφείλονται στην ατμοσφαιρική πίεση, τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους.

IMPACT OF METEOROLOGICAL PROCESSES ON THE RANON EMISSION IN THE MEGARA REGION

Oikonomopoulos E¹, Papaefthymiou E.², Ioannides K.³, and Koukouvelas I.¹

¹ Division of Physical Geology, Marine Geology and Geodynamics, Department of Geology, University of Patras, 265 00, Patras, Greece, vag_econo@yahoo.gr, iannis@upatras.gr

² Section of Physical, Inorganic and Nuclear Chemistry, Department of Chemistry, University of Patras, 26500 Patras, Greece, epap@chemistry.upatras.gr.

³ Nuclear Physics Laboratory, Physics Department, University of Ioannina, 451 10 Ioannina, Greece, kioannid@cc.uoi.gr

ABSTRACT

The soil gas radon was monitored in four sites in Megara area, central Greece in order to detect the role of meteorological conditions in its emission. Measurements were carried out during 20 months, using CR-39 solid state nuclear track detectors in a passive measuring technique. The tubes were placed in holes, dug in the soil. The bottom end of the PVC tubes was covered with a 50 μm thick polyethylene film to exclude ²²⁰Rn, water vapors or any contamination from the measuring arrangement. The CR-39 detectors were thus exposed to the soil gas for a period of two weeks, after which they were replaced by new sets of detectors. Following exposure, the detectors were

etched in a 5N NaOH solution at 70o C for 7-8 h. Track densities were measured through a semi-automatic measuring arrangement, employing a microscope-video camera-frame grabber-computer chain. The computer code TRACKA was used to count the number of tracks per optical field. The detection arrangement was calibrated in the radon calibration chamber of Nuclear Physics Laboratory, Physics Department, University of Ioannina. Radon concentrations for each detector were deduced from the mean value of readings of five optical fields. The effect of geological conditions, which are known to strongly influence soil radon investigations using the above detection arrangement, was minimized by conducting the survey in the same site. Thus we detected that some of the radon anomalies during the study is not related to the atmospheric pressure, the temperature and the soil humidity.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών αποτελεί μια πρόκληση και είναι ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της σεισμολογίας. Στηρίζεται στη θεώρηση της «προπαρασκευής» του σεισμογόνου χώρου που έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση πρόδρομων φαινομένων. Ένα από τα πρόδρομα φαινόμενα είναι η διακύμανση της έκλυσης του ραδονίου που διαχέεται μέσω του φλοιού της γης η οποία σχετίζεται και με μετεωρολογικούς παράγοντες (Bolt, 1980). Η διακύμανση της έκλυσης λόγω της σεισμικότητας θεωρείται ότι οφείλεται ή διευκολύνεται από την ύπαρξη των ενεργών ρηγμάτων στο φλοιό της γης. Εφόσον η ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πρόκληση σεισμών, θεωρείται ότι η μέτρηση της έκλυσης του ραδονίου μπορεί να συνεισφέρει στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών.

Κοινό χαρακτηριστικό των φυσικών ραδιενεργών σειρών είναι η ύπαρξη σε όλες ισοτόπων του ραδονίου (Ehmann & Vance 1991). Το ραδόνιο είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο, ραδιενεργό και στερείται γενικά δραστηριότητας προς άλλους χημικούς παράγοντες, διότι έχει συμπληρωμένη τη στοιβάδα σθένους. Είναι το βαρύτερο μέλος της ομάδας των ευγενών αερίων. Το γεγονός ότι το ραδόνιο είναι ευγενές αέριο διασφαλίζει ότι δεν ακινητοποιείται με χημικές αλληλεπιδράσεις στο μέσο που διαπερνά. Κατά συνέπεια, η συγκέντρωσή του μειώνεται, υπό κανονικές συνθήκες, μόνο από τη ραδιενεργό διάσπασή του καθώς απομακρύνεται από την πηγή του (Amgarou, 2002). Εντούτοις, λόγω του σχετικά χαμηλού δυναμικού πρώτου ιονισμού διατηρεί τη δυνατότητα κάποιων αλληλεπιδράσεων.

Το ραδόνιο παράγεται συνεχώς με α-διάσπαση των ισοτόπων του ραδίου στα πετρώματα και τα ορυκτά. Υπάρχουν τρία φυσικά ισότοπα του στο περιβάλλον ραδόνιο (ή ραδόνιο-222 ή 222Rn), θορόνιο (ραδόνιο-220 ή 220Rn) και ακτινόνιο (ραδόνιο-219 ή 219Rn), που προέρχονται από τις φυσικές ραδιενεργές σειρές διάσπασης του ουρανίου, του θορίου και του ακτινίου, αντίστοιχα. Η σημασία των τριών ισοτόπων του ραδονίου αυξάνεται αναλογικά με τις μέσες ζωές και τη σχετική αφθονία τους. Από αυτά, το ραδόνιο έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 3,821 d, το θορόνιο 55,6 s, και το ακτινόνιο 4s (Durani and Ilic, 1997; Ehmann & Vance, 1991). Ο μικρός χρόνος υποδιπλασιασμού των δύο τελευταίων ισοτόπων δεν επιτρέπει μεγάλες συγκεντρώσεις τους να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις και πρακτικά αγνοούνται σε μετρήσεις ραδονίου ως πρόδρομου δείκτη επικείμενης γένεσης σεισμών.

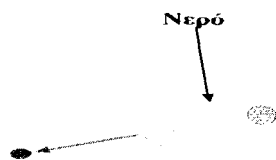
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να καθορίσει τους παράγοντες που επιδρούν στην έκλυση του ραδονίου και να περιγράψει τη σημασία των δικτύων παρακολούθησης και καταγραφής της έκλυσης ραδονίου σε περιοχές όπου υπάρχουν ενεργά ρήγματα. Στην εργασία αυτή θα παρατεθούν στοιχεία για την έκλυση του ραδονίου στην περιοχή των Μεγάρων από 4 σταθμούς παρατήρησης.

2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Όταν το ράδιο-226 διασπάται, δημιουργούνται ένα άτομο ραδονίου και ένα σωματίδιο-α. Ο πυρήνας του ραδονίου ανακρούεται προς την αντίθετη διεύθυνση για λόγους διατήρησης ενέργειας και ορμής. Το φαινόμενο αυτό απομακρύνει το άτομο ραδονίου από την αρχική θέση του εντός του κρυσταλλικού πλέγματος του ορυκτού ή του μορίου, όπου ήταν το άτομο του ραδίου. Επειδή το άτομο του ραδονίου έχει αρκετή ενέργεια (~86 keV) μετακινείται από τη θέση που δημιουργήθηκε μέχρι να μεταφέρει όλη του την ενέργεια στο υλικό (Amgarou 2002). Το ανακρουόμενο άτομο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, μπορεί, να παραμείνει στον ίδιο κόκκο πετρώματος, να μετακινηθεί σε κάποιο γειτονικό κόκκο ή να βγει από τον κόκκο και να περάσει στον αέρα ή νερό που βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους (Σχήμα 1).

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

- Ράδιο-226
- Σωματίδιο-α
- Ραδόνιο



Σχήμα 1: Ανακρουόμενο άτομο ραδονίου μεταβαίνει σε έναν γειτονικό κόκκο.

Για να εισέλθει το αέριο ραδόνιο στην ατμόσφαιρα θα πρέπει να μεταφερθεί μέσω των πόρων του υλικού, των διαρρήξεων των πετρωμάτων ή των σπηλαίων που αναπτύσσονται στα πετρώματα, έτσι ώστε ένα κλάσμα του να φθάσει στην επιφάνεια πριν διασπαστεί. Η ταχύτητα κίνησής του εξαρτάται από την ταχύτητα των άλλων ρευστών με τη βοήθεια των οποίων κινείται ή από το μέγεθος και τη γεωμετρία των ασυνεχειών και διαρρήξεων του φλοιού της γης μέσω των οποίων εκλύεται (Haki et al., 1996).

Υπάρχουν δυο διαφορετικοί μηχανισμοί κίνησης του ραδονίου προς την επιφάνεια της γης: η διάχυση και η μεταφορά. Η ύπαρξη νερού στους πόρους του εδάφους επιβραδύνει τη μεταφορά του ραδονίου, αλλά αυξάνει την πιθανότητα το ανακρουόμενο άτομο να παραμείνει στο διάκενο και τελικά να μεταφερθεί. Γενικά, η μοριακή διάχυση του ραδονίου στο έδαφος είναι μικρή, λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του. Σε υγρά εδάφη, η διάχυση είναι ακόμη πιο περιορισμένη. Η μεταφορά μέσω διάχυσης υπακούει στο νόμο του Fick. Ο αρχικός μηχανισμός μεταφοράς ραδονίου, πριν αυτό διασπασθεί, σε ένα συγκεκριμένο μέσο γίνεται μέσω τυχαίας μοριακής κίνησης. Όπως οποιοδήποτε ρευστό, έχει την τάση να μεταναστεύσει προς κατεύθυνση αντίθετη προς αυτή όπου αυξάνεται η συγκέντρωση μέσα στο υλικό. Αυτή η τάση περιγράφεται από το νόμο του Fick, ο οποίος συσχετίζει την πυκνότητα ροής του ρευστού κατά μήκος της περιοχής των πόρων με τη βαθμίδα της συγκέντρωσης. Ο συντελεστής που συνδέει τα μεγέθη αυτά καλείται ενεργός συντελεστής διάχυσης, D_e (με μονάδες $m^2 s^{-1}$), ενώ μπορεί να συνδεθεί με το συντελεστή διάχυσης στον αέρα D_0 (Amgarou, 2002; Durani & Ilic, 1997; Monnin & Seidel, 1997).

Αποτελέσματα πειραμάτων έδειξαν ότι η διάχυση θεωρείται κυρίαρχος μηχανισμός εισόδου του ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα (Nazaroff et al., 1988). Η μεταφορά του ραδονίου και του θορονίου περιγράφεται από το νόμο του Darcy. Όταν ένα ρευστό χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό Reynolds, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μεταφοράς του ραδονίου και του θορονίου, η τυρβώδης ή/και ομαλή ροή τους στο έδαφος προκαλείται από διαφορά πίεσης. Η διαφορά πίεσης μπορεί να δημιουργηθεί κυρίως από μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών.

Η εκκλιση του ραδονίου στο έδαφος εξαρτάται συνήθως από τη σύσταση του υποκειμένου μητρικού πετρώματος. Μετρήσεις έχουν δείξει αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στον εδαφικό αέρα και τα υπόγεια νερά επάνω από ζώνες διαρρήξεων και ρηγμάτων στο μητρικό πέτρωμα και συσχέτιση με τη σεισμικότητα (Monnin & Seidel, 1997). Οι παρατηρήσεις αυτές έδειξαν ότι το ραδόνιο θα μπορούσε να εκλύεται και να μεταφέρεται πιο γρήγορα στις ζώνες διάρρηξης από ότι με διάχυση ή μετακίνησή του διαλυμένου στα υπόγεια νερά ή στις ζώνες διάρρηξης. Έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες για τη μεταφορά του ραδονίου. Σύμφωνα με μια θεωρία το ραδόνιο μεταφέρεται με τα γεωαέρια (π.χ. CO_2 , CH_4 και N_2) τα οποία προέρχονται από βαθύτερα τμήματα του στερεού φλοιού της γης και ανέρχονται προς την επιφάνειά της (Zmazek et al., 2002a). Στις ζώνες διάρρηξης η αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου σχετίζεται με αυξημένες συγκεντρώσεις CO_2 και συχνά He (Vikr et al., 2001; Vikr & Walla 2001). Το CO_2 θεωρείται ότι προέρχεται από το μανδύα, τη μεταμόρφωση ανθρακικών πετρωμάτων, την αποικοδόμηση οργανικού υλικού και από επιφανειακές βιολογικές δραστηριότητες ή από συνδυασμό τους. Η διάλυσή του, σε αλκαλικά νερά σε μεγάλο βάθος είναι πολύ συχνό χαρακτηριστικό και μπορεί να οδηγήσει σε εμπλουτισμό σε στοιχεία χαμηλής διαλυτότητας, όπως το He (Toutain & Baubron, 1999). Το He εκλύεται και ανέρχεται προς την επιφάνεια από βαθύτερα στρώματα του εξωτερικού φλοιού της Γης, όπως συμβαίνει με το ραδόνιο, Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

όταν αυξάνεται η τάση στα ενεργά ρήγματα. Στα κανονικά ρήγματα θεωρείται ότι τα πετρώματα της οροφής και της βάσης τους χαρακτηρίζονται από αυξημένο ενεργό πορώδες, λόγω διάνοιξης νέων ή διεύρυνσης παλαιών ρωγμών. Στα ανάστροφα ρήγματα, το ενεργό πορώδες μειώνεται, αλλά θεωρείται ότι τα τελευταία ευνοούν υψηλή ροή ρευστών και μεγαλύτερη έκλυση ραδονίου.

Οι μεταβολές στις μετρούμενες συγκεντρώσεις του ραδονίου εξαρτώνται όχι μόνο από διεργασίες στο εσωτερικό του φλοιού της γης, όπως οι σεισμοί, αλλά και από τις μετεωρολογικές συνθήκες στη θέση μέτρησης. Μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν την έκλυση του ραδονίου είναι η βροχόπτωση, ο άνεμος, η υγρασία, η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση (Planinic et al., 2001; Wattananikorn et al., 1988). Οι Pinault και Baubron (1996) θεωρούν ότι η έκλυση του επηρεάζεται από τη δομή του εδάφους (π.χ. ρωγμές). Επίσης θεωρούν ότι η επίδραση της βροχόπτωσης στην έκλυση ραδονίου μπορεί να είναι ανιχνεύσιμη έως και 20 ημέρες μετά την εκδήλωσή της. Η ατμοσφαιρική πίεση έχει σημαντική επίδραση στο ρυθμό έκλυσης ραδονίου, όταν η μετανάστευση του ραδονίου ελέγχεται από το φαινόμενο της μεταφοράς, το οποίο επηρεάζεται από μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (Touatin & Baubron, 1999). Αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης συνεπάγεται μείωση της έκλυσης, ενώ μείωσή της πίεσης αυξάνει την έκλυση. Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στη συγκέντρωση του ραδονίου θεωρητικά παρουσιάζει μικρή υστέρηση η οποία αντικατοπτρίζει τη γραμμική σύνδεση της ατμοσφαιρικής πίεσης/έκλυσης ραδονίου (Haki et al., 1996). Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει ότι για να χρησιμοποιηθεί η διακύμανση ραδονίου ως αξιόπιστο πρόδρομο σεισμού πρέπει να διακρίνουμε ανωμαλίες ραδονίου λόγω εξωγενών από ενδογενείς παράγοντες.

3 ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΡΑΔΟΝΙΟ

Το ραδόνιο έχει χρησιμοποιηθεί στη διερεύνηση πολλών γεωλογικών προβλημάτων, όπως π.χ. στην περίπτωση της ανάλυσης τεκτονικών ασυνεχειών, για την οποία το ραδόνιο θεωρείται ως ένα χρήσιμο εργαλείο που συμπληρώνει γεωφυσικές και γεωλογικές μεθόδους (Pinault & Baubron 1996; Ioannides et al. 2003). Τα τελευταία χρόνια και μετά τη μακρόχρονη παρακολούθηση ραδονίου στην Ιταλία και Ιαπωνία, οι ενδείξεις πιθανού συσχετισμού της έκλυσής του από το έδαφος και της σεισμικής ή ηφαιστειακής δραστηριότητας, έχουν αυξήσει τις προσδοκίες ότι το ραδόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στη βραχείας διάρκειας πρόγνωση ενδογενών διεργασιών. Σημαντική ενθάρρυνση για τη συνεχή παρακολούθηση του ραδονίου, ως πρόδρομο φαινόμενο σεισμού, δόθηκε από τον Ulopon, το 1967 στο νερό φρέατος μεγάλου βάθους στην Τασκένδη. Η υψηλότερη συγκέντρωση ραδονίου στο φρέαρ προηγήθηκε σεισμού μεγέθους 5,2 R. Η μεταβολή αυτή θεωρήθηκε ελπιδοφόρα για την πρόγνωση, επειδή η έκλυση του ραδονίου αυξανόταν πριν το σεισμό, η αύξηση σταμάτησε λίγο πριν και μειώθηκε μετά το σεισμό. Αυτή η συσχέτιση όμως δεν έχει καθολική ισχύ. Για το λόγο αυτόν σε διάφορες περιοχές του κόσμου υπάρχουν σταθμοί μακρόχρονης παρακολούθησης των μεταβολών της έκλυσης του ραδονίου και της σεισμικότητας. Από τα στοιχεία των μετρήσεων προέκυψε ότι η έκλυση ραδονίου χαρακτηρίζεται από δύο τύπους προσεισμικών ανωμαλιών έκλυσης, συνήθως όμως εμφανίζεται μόνο ο ένας εκ των δύο. Ο ένας τύπος έκλυσης αφορά σταδιακή ή απότομη αύξηση του εκλυόμενου ραδονίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σταδιακής αύξησης παρατηρήθηκε στο σεισμό ($M=7.2$) του Kobe της Ιαπωνίας (17 Ιανουαρίου 1995). Εκεί μετρήσεις σε φρέαρ έδειξαν ότι δύο μήνες πριν το σεισμό η συγκέντρωση του ραδονίου αυξήθηκε από 20 Bq L^{-1} σε 60 Bq L^{-1} . Παράδειγμα απότομης μεταβολής της συγκέντρωσης ραδονίου έχει παρατηρηθεί επίσης στο σεισμό του Kobe η οποία εκδηλώθηκε ως σύντομη προσεισμική μεταβολή 10 ημέρες πριν από το σεισμό. Ο σεισμός αυτός επιβεβαίωσε ότι τουλάχιστον προς το παρόν, οι μεταβολές του ραδονίου δε μπορούν ακόμα να αποτελέσουν ασφαλές πρόδρομο σεισμού, καθώς 45 ημέρες μετά το σεισμό μετρήθηκε και δεύτερη απότομη αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου, την οποία όμως δεν ακολούθησε σεισμός. Ο άλλος τύπος ανώμαλης έκλυσης αφορά προσεισμική μείωση της έκλυσης ραδονίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σεισμός ($M=7,0$) στο Izu-Oshima-Kinkai της Ιαπωνίας τον Ιανουάριο του 1978, όπου η έκλυση του ραδονίου μειωνόταν τρεις μήνες μέχρι μια περίπου εβδομάδα, πριν από το σεισμό και επανήλθε στην αρχική τιμή της μετά το σεισμό (Durani & Ilic, 1997).

Ανωμαλίες έκλυσης ραδονίου, πρόδρομες σεισμών, μπορούν να ανιχνευθούν ανάλογα με την απόσταση του σταθμού από το επίκεντρο του σεισμού. Έτσι προσεισμική διαταραχή έκλυσης διαπιστώνεται σε σταθμούς ελέγχου αρκετά μακριά από την επικεντρική περιοχή (Ioannides et al., 2003). Συνήθως, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του σεισμού τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση στην οποία μπορεί να υπάρξει καταγραφή ανωμαλιών έκλυσής του. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι οι

ανωμαλίες της έκλυσης δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένες γύρω από το επίκεντρο του σεισμού, αλλά όπως απέδειξαν δεδομένα μετρήσεων στη Νότια Ισλανδία σημεία ελέγχου ραδονίου ανατολικά του επίκεντρου επηρεάζονταν σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι σημεία ελέγχου στα δυτικά του. Η διαφοροποίηση αυτή πιθανά οφείλεται σε σημαντικές ασυνέχειες του φλοιού (Hauksson & Goddard, 1981). Η μείωση ή η αύξηση της έκλυσης ραδονίου πριν από τους σεισμούς μπορεί επίσης να συσχετισθεί με τον γεγονός ότι οι τάσεις του σεισμού μπορεί να είναι συμπίεστικές ή εφελκυστικές ανάλογα με τον τύπο του ρήγματος ή την κατανομή της παραμόρφωσης στο φλοιό (Durani & Illic, 1997).

4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΜΕΓΑΡΩΝ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μετρητικές διατάξεις σε τρεις θέσεις μέτρησης στη λεκάνη των Μεγάρων. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνταν από κυλινδρικό σωλήνα rnc διαμέτρου 0,1 m και μήκους 0,5 m. Σε μια διάταξη μέτρησης ο σωλήνας είχε μήκος 1 m. Ο σωλήνας τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση μετά την ανόρυξη αβαθούς γεώτρησης. Το άνω μέρος της διάταξης σφραγίζονταν με υδατοστεγές πώμα. Στο εσωτερικό μέρος του πώματος στερεώνονταν πλακίδιο ανιχνευτή CR-39, με διαστάσεις 1mm x 1mm, το οποίο και αντικαθίστατο με νέο κάθε 14 ημέρες.

Πίνακας 1: Παρουσιάζει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των θέσεων μέτρησης.

ΘΕΣΗ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ (Χαρακτηριστικά της)
1	Μέγαρα (0,5m)
2	Μέγαρα (με μεμβράνη πολυαιθυλενίου, 0,5m)
3	Μέγαρα (με μεμβράνη πολυαιθυλενίου και θερμομόνωση, 0,5m)
4	Μέγαρα (1m)

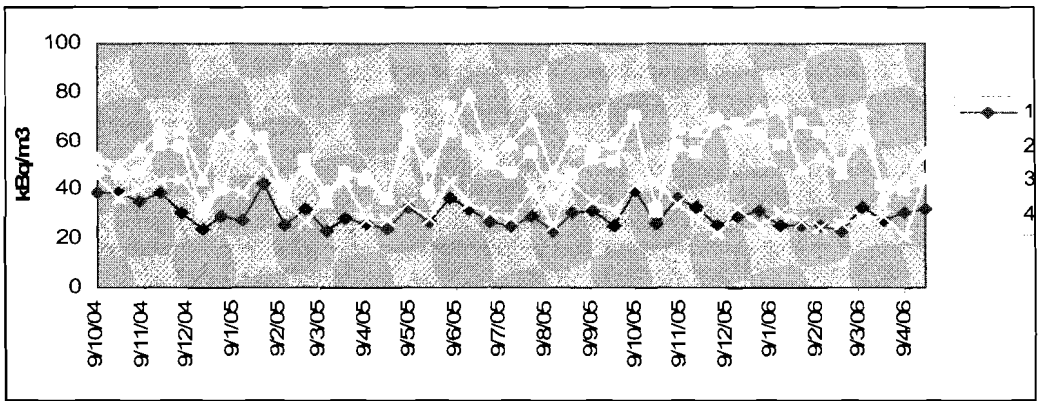
Οι διατάξεις χαρακτηρίζονται από παραλλαγές με σκοπό να μελετηθούν η επίδραση της υγρασίας, της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και του όγκου της διάταξης. Ο τρόπος κατασκευής και ο σκοπός της κάθε διάταξης θα περιγραφούν στη συνέχεια. Στη διάταξη στη θέση (2) ο πυθμένας είχε καλυφθεί με μεμβράνη πολυαιθυλενίου, πάχους 20×10^{-6} m, ώστε να αποκλεισθεί η επίδραση υγρασίας και σκόνης στη μέτρηση. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μεμβράνη πολυαιθυλενίου έχει την ιδιότητα, εκτός από την υγρασία και τη σκόνη, να αποκλείει την είσοδο του θορονίου στη διάταξη μέτρησης, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 95%, ενώ δεν επηρεάζει την καταγραφή πυρηνικών ιχών ραδονίου (Csige et al., 1995). Η διάταξη της θέσης (3) είχε μονωθεί θερμικά, με χρήση πολουρεθάνης και στον πυθμένα της είχε τοποθετηθεί μεμβράνη πολυαιθυλενίου. Σκοπός αυτής της πειραματικής διάταξης ήταν ο έλεγχος της επίδρασης της θερμοκρασίας στην έκλυση ραδονίου. Η πλειοψηφία των δημοσιευμένων πειραματικών εργασιών ανά τον κόσμο θεωρούν ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί μεταβολή της έκλυσης ραδονίου (Pinault & Baubron, 1996; Wattananikorn et al., 1988). Τέλος, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του βάθους μέτρησης στην έκλυση ραδονίου, στη διάταξη (4) χρησιμοποιήθηκε σωλήνας μέτρησης μήκους 1 m. Ο Πίνακας (1) παρουσιάζει τις διατάξεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε διάταξης.

Μετά έκθεση 14 ημερών οι ανιχνευτές CR-39 αντικαθίσταντο από νέους και αποθηκεύονταν μέχρι τη στιγμή της χημικής επεξεργασίας και της καταμέτρησης των ιχών τους. Η χημική επεξεργασία περιλάμβανε τη χημική διάβρωσή τους σε διάλυμα NaOH 5N και σε θερμοκρασία 70 °C για χρονικό διάστημα 7-8 ωρών. Στη συνέχεια, απομακρύνονταν από το διάλυμα αυτό, ξεπλένονταν με απιονισμένο νερό και τοποθετούνταν στο μικροσκόπιο για την καταμέτρηση των ιχών. Από κάθε ανιχνευτή καταγράφονταν 5 εικόνες πεδίου (Ioannides et al., 2003). Σε κάθε εικόνα, με τη βοήθεια του προγράμματος TRACKA (Ioannides et al., 2000), γίνονταν η καταμέτρηση των ιχών των σωματιδίων-α από τη διάσπαση του ραδονίου. Από τον ολικό αριθμό των ιχών που είχαν καταμετρηθεί αφαιρέθηκε ο αριθμός των ιχών του υποβάθρου. Τα ιχών του υποβάθρου αποκτώνται από τους ανιχνευτές κατά το χρόνο που βρίσκονται αποθηκευμένοι, λόγω έκθεσής τους σε σωματίδια-α στη διάρκεια αποθήκευσής τους. Οι διατάξεις μέσα στις οποίες είχαν τοποθετηθεί οι ανιχνευτές ραδονίου βαθμονομήθηκαν σε θάλαμο ραδονίου στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση της

διάταξης, υπολογίστηκε η μέση συγκέντρωση ραδονίου για το χρονικό διάστημα έκθεσης του ανιχνευτή.

Οι μετρήσεις ραδονίου στην παρούσα εργασία έγιναν στο χρονικό διάστημα από 9 Οκτωβρίου του 2004 έως και τις 6 Μαΐου του 2006 (δηλαδή συνολικά 20 μήνες). Η έκθεση κάθε ανιχνευτή CR-39 ήταν 14 ημέρες και το πείραμα διήρκησε 41 μετρητικές περιόδους. Για κάθε περίοδο χρησιμοποιήθηκαν 4 ανιχνευτές, συνολικά 164 ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές υπέστησαν χημική επεξεργασία σε ομάδες των 16 για οκτώ ώρες, ήτοι απαιτήθηκαν 655 ώρες εργαστηριακής ανάλυσης. Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν σε μικροσκοπίο και έγινε φωτογράφησή τους. Σε κάθε ανιχνευτή μετρήθηκαν 5 πεδία, δηλαδή συνολικά αναλύθηκαν ίχνη σωματιδίων-α σε 820 πεδία.

Για την εύρεση της συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδονίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS v.12. Επιλέχθηκε να γίνει η επεξεργασία αυτή για τις πειραματικές διατάξεις των Μεγάρων επειδή ήταν όλες στον ίδιο χώρο και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η επίδραση της γεωλογίας ήταν όμοια σε όλες τις διατάξεις. Οι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ της έκλυσης ραδονίου και των μετεωρολογικών δεδομένων.



Σχήμα 2. Γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων ραδονίου (kBq/m³) για τις θέσεις μέτρησης της περιοχής των Μεγάρων.

Πίνακας 2. Οι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ των μετεωρολογικών δεδομένων και της συγκέντρωσης ραδονίου στις τέσσερις πειραματικές διατάξεις της περιοχής των Μεγάρων. Στον Πίνακα όπου T: η θερμοκρασία, P: Η βαρομετρική πίεση, PRE: Η βροχόπτωση και T-D: η διαφορά της θερμοκρασίας με το σημείο δρόσου.

	T	P	PRE	T-D	1	2	3	4
T	1							
P	-,356*	1						
PRE	-,241	-,133	1					
T-D	,741**	-,333*	-,403**	1				
1	-,017	,244	,067	-,115	1			
2	-,173	,095	,047	-,056	,413**	1		
3	,030	,121	,087	,054	,402**	,733**	1	
4	,036	,398**	-,086	,102	,536**	,029	,106	1

* Συσχέτιση σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

** Συσχέτιση σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01.

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι η θερμοκρασία εμφανίζει μέτρια αρνητική, αλλά σημαντική συσχέτιση σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 με τη βαρομετρική πίεση, ενώ εμφανίζει σημαντική και

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

υψηλή σχετικά θετική συσχέτιση με τη διαφορά θερμοκρασίας με το σημείο δρόσου (σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01). Επίσης, φαίνεται ότι η διαφορά θερμοκρασίας με το σημείο δρόσου εμφανίζει μέτρια αρνητική, αλλά σημαντική συσχέτιση με τη βροχόπτωση και τη βαρομετρική πίεση (σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 και 0,01, αντίστοιχα). Είναι άξιο να αναφερθεί ότι η θερμοκρασία δεν εμφανίζει συσχέτιση με την εκλυόμενη συγκέντρωση ραδονίου σε καμία από τις 4 θέσεις μέτρησης. Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει εξάρτηση της έκλυσης ραδονίου από τη θερμοκρασία. Η βαρομετρική πίεση εμφανίζει μέτρια θετική, αλλά σημαντική συσχέτιση (σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01), μόνο με τη συγκέντρωση του εκλυόμενου ραδονίου στην πειραματική διάταξη 4. Σημειώνεται ότι η πειραματική διάταξη 4 διαφέρει από τις υπόλοιπες πειραματικές διατάξεις της περιοχής των Μεγάρων στο ότι το βάθος μέτρησης είναι 1 m και όχι 0,5 m, όπως στις άλλες 3 πειραματικές διατάξεις. Συνεπώς, η βαρομετρική πίεση μπορεί να επηρεάζει τις μετρήσεις τόσο περισσότερο όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του σωλήνα μέτρησης. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι η βροχόπτωση και η διαφορά της θερμοκρασίας από το σημείο δρόσου δεν εμφανίζουν συσχέτιση με τη συγκέντρωση του εκλυόμενου ραδονίου σε καμία από τις 4 διαφορετικές πειραματικές διατάξεις.

Η συγκέντρωση ραδονίου στην πειραματική διάταξη 1 εμφανίζει μέτρια θετική, αλλά σημαντική συσχέτιση (σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01) με τις μετρούμενες συγκεντρώσεις σε όλες τις υπόλοιπες πειραματικές διατάξεις των Μεγάρων. Η συγκέντρωση ραδονίου στην πειραματική διάταξη 2, εμφανίζει μέτρια θετική, αλλά σημαντική συσχέτιση τόσο με τη συγκέντρωση του εκλυόμενου ραδονίου στην πειραματική διάταξη 1, όσο και με τη συγκέντρωση στην πειραματική διάταξη 3 (σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01). Τέλος, η συγκέντρωση ραδονίου στη πειραματική διάταξη 4 εμφανίζει μέτρια θετική, αλλά σημαντική συσχέτιση μόνο με τη συγκέντρωση ραδονίου στην πειραματική διάταξη 1. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι γεγονός ότι είναι οι θέσεις 2 και 3 των Μεγάρων είναι οι μόνες που δεν καλύπτονται από μεμβράνη πολυαιθυλενίου. Έτσι από αυτή τη στατιστική επεξεργασία έγινε εμφανές πως η μόνη πειραματική διάταξη που επηρεάζεται από τα μετεωρολογικά φαινόμενα είναι αυτή που το μήκος μέτρησης του σωλήνα της διάταξης είναι 1m. Συνεπώς η αιτία της διαβάθμισης των συγκεντρώσεων των υπόλοιπων καμπύλων του Σχήματος 2 οφείλεται σε άλλα αίτια που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης για να δειχθεί η πιθανή συσχέτισή τους με τη σεισμικότητα της περιοχής.

5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έκλυση ραδονίου στην επικεντρική περιοχή θεωρείται πρόδρομο φαινόμενο της εκδήλωσης ενός σεισμού ή μιας σεισμικής ακολουθίας αν και η αξιοποίησή της ως πρόδρομο φαινόμενο δεν είναι πλήρως αποδεκτή. Η παρούσα εργασία στόχευσε στη διερεύνηση του είδους των μετρητικών διατάξεων για να παραχθούν βέλτιστες μετρήσεις έκλυσης ραδονίου σε δίκτυο για πρώτη φορά στο Ελληνικό χώρο. Επιπλέον έγινε προσπάθεια να διευκρινιστεί ποιες μεταβολές συγκεντρώσεων ραδονίου μπορούν να συσχετισθούν με μετεωρολογικά φαινόμενα, ώστε να διαπιστωθεί αν μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως πρόδρομα φαινόμενα σεισμών. Οι μετρήσεις στη διάρκεια του πειράματος έδειξαν ότι τα δεδομένα πρέπει να καλύπτουν μεγάλη χρονική διάρκεια και να χρησιμοποιείται δίκτυο. Το δίκτυο προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης της μορφής του σχήματος, αλλά και του ύψους της ανωμαλίας σε περισσότερους των ενός σταθμών. Ως ανωμαλία ραδονίου θεωρείται κάθε τάση αύξησης ή μείωσης της έκλυσης που διαπιστώνεται σε περισσότερες της μιας θέσεων στο δίκτυο.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αποφεύγεται να καθορίζονται τιμές έκλυσης «υποβάθρου», επειδή μια προσωρινή, προκαλούμενη από σεισμικό γεγονός, απότομη αύξηση στη συγκέντρωση του ραδονίου ακολουθείται από χαμηλή αλλά μόνιμη αύξησή της μετά το σεισμό (Monnin & Seidel, 1997). Με βάση τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου σε 164 ανιχνευτές τύπου CR-39 που συλλέχθηκαν κατά την περίοδο 9/10/2004 έως 5/5/2006 δε μπορεί να ορισθεί μια γενική συγκέντρωση «υποβάθρου» έκλυσης ραδονίου. Στις γραφικές παραστάσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου υπάρχουν κάποιες κορυφές που όμως δε συνδέονται με κάποιο μετεωρολογικό φαινόμενο. Οι δύο αυτοί τύποι ανωμαλιών (απότομη αύξηση ή μείωση) πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω και να συσχετισθούν με τη σεισμικότητα. Η ανάλυση αυτή δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας εργασίας λόγω έλλειψης χώρου.

Τα επίπεδα της συγκέντρωσης του «υποβάθρου» δεν είναι απαραίτητα για τη χρησιμοποίηση της έκλυσης ραδονίου ως πρόδρομο σεισμού. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στις μεταβολές της έκλυσης και όχι στις απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεών της. Στην καταγραφή μεταβολών περιλαμβάνονται ανωμαλίες έκλυσης από κοντινές, αλλά και σχετικά απομακρυσμένες πηγές. Η

προσπάθεια εξήγησης των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων ραδονίου είναι σύνθετη διαδικασία, επειδή όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις του πειράματος αυτού η έκλυση του ραδονίου μπορεί να οφείλεται σε περισσότερες από μία αιτίες. Το μήκος του σωλήνα μέτρησης του 0,5 m με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φαίνεται να είναι το καλύτερο για μετρήσεις έκλυσης ραδονίου στην περιοχή των Μεγάρων. Στις θέσεις μέτρησης του σωλήνα 0,5 m οι εκλυόμενες συγκεντρώσεις ραδονίου είναι ίσες περίπου με το 80% των αντίστοιχων εκλυόμενων συγκεντρώσεων στη θέση μέτρησης με βάθος 1 m. Επιπλέον, η μέτρηση σε σωλήνα 1 m φαίνεται πως επηρεάζεται από τη βαθμίδα της βαρομετρικής πίεσης. Η κάλυψη των διατάξεων μέτρησης με μεμβράνη πολυαιθυλενίου κρίνεται αναγκαία σε ένα δίκτυο. Θέσεις μέτρησης καλυμμένες με μεμβράνες πολυαιθυλενίου βοηθούν στην καταγραφή περισσότερων ιχνών σωματιδίων-α που προέρχονται από ραδόνιο.

Με βάση τα ανωτέρω, θεωρείται ότι στις καταγραφές της έκλυσης του ραδονίου αναγνωρίζονται ανωμαλίες, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στους ακόλουθους λόγους:

1. Οι μεταβολές προέρχονται από κοντινές αλλά και από σχετικά απομακρυσμένες πηγές.
2. Η συσχέτιση των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων ραδονίου είναι πολυπαραγοντική.
3. Στις διατάξεις σε σωλήνα 0,5 m οι εκλυόμενες συγκεντρώσεις ραδονίου είναι ίσες περίπου με το 80% των αντίστοιχων εκλυόμενων συγκεντρώσεων της διάταξης με σωλήνα 1 m. Η μέτρηση με σωλήνα 1 m φαίνεται πως επηρεάζεται έντονα από τη βαθμίδα της βαρομετρικής πίεσης. Έτσι, για δίκτυα αλλά και μεμονωμένους σταθμούς το μήκος του σωλήνα μέτρησης 0,5 m μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστο για μετρήσεις έκλυσης ραδονίου.
4. Η κάλυψη των διατάξεων μέτρησης με μεμβράνη πολυαιθυλενίου κρίνεται αναγκαία σε ένα δίκτυο.
5. Οι μετρήσεις ραδονίου σε διαστήματα μέτρησης δυο εβδομάδων δεν είναι το κατάλληλο εργαλείο για πρόγνωση σεισμών, διότι στην περίοδο αυτή μπορεί να περιλαμβάνονται περισσότερες της μιας διακυμάνσεις πίεσης ή περισσότεροι του ενός σεισμοί. Για παραγωγικές διατάξεις εκτιμάται ότι η συνεχής μέτρηση θα είναι πιο επιτυχής (π.χ. Monnin & Seidel, 1998).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Al-Hilal, M., Sbeinati, M., Darawcheh R., 1998. "Radon Variations and Mikroearthquakes in Western Syria", Applied Radiation Isotopes, 49, 117-123.
- Amgarou K., 2002. "Long-Term Measurements of Indoor Radon and its Progeny in the Presence of Thoron Using Nuclear Track Detectors: A Novel Approach", PhD Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona Grup de Física de les Radiacions.
- Bolt, B.A., 1980. Earthquakes and Volcanoes, Scientific American, Freeman and Co, San Francisco.
- Csige I., Haki J., Vasarehlyi A., Hunyadi I., 1995. "Radon transport in a drilled well studied by etched track type radon monitors", Radiation Measurements, Volume 25, Pages 561-564.
- Durani S., Ilic R., 1997. "Radon Measurements by etched track detectors", World Scientific Publ., New Jersey.
- Ehmann W., Vance D., 1991, "Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis", John Wiley & Sons.
- Haki J., Csige I., Hunyadi I., Varhegyi A., Geczy G., 1996. "Radon transport in fractured porous media- Experimental study in caves", Environment International, 22, 433-437.
- Hauksson E., Goddard J., 1981. "Radon earthquake precursor studies in Iceland", Journal of Geophysical Research, 86, 7037-7054.
- Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., 2000. "A survey of 222Rn concentrations in dwellings of the town of Metsovo in north-western Greece", Health Physics, 79, 697-702.
- Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A., Karakala E., 2003. "Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones", Applied Radiation and Isotopes, 59, 205-213.
- Monnin M., Seidel J., 1997, "Physical models related to radon emission in connection with dynamic manifestations in the upper terrestrial crust: a review", Radiation Measurements, 28, 703-712.
- Monnin M., Seidel J., 1998. "An automatic radon probe for earth science studies", Journal of Applied Geophysics, 39, 209-220.
- Nazaroff W., Moed B., Sextro R., 1988. "Radon and its decay products in indoor air", John Wiley & Sons.
- Pinault J., Baubron J., 1996. "Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture and soil temperature data: A new approach for radon concentration modelling", Journal of Geophysical research, 101, 3157-3171.
- Toutain J., Baubron J., 1999. "Gas geochemistry and seismotectonics: a review", Tectonophysics, 304, 1-27.

- Planinić J., Radolić V., Lazanin Ž., 2001, "Temporal variations of radon in soil related to earthquakes", *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 267-272.
- Virk H., Walia V., 2001. "Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake", *India, Radiation Measurements*, 34, 379-384.
- Virk H., Walia V., Kumar N., 2001. "Helium/radon precursory anomalies of Chamoli earthquake, Garhwal Himalaya, India", *Journal of Geodynamics*, 31, 201-210.
- Wattananikorn K., Kanaree M., Wiboolsake S., 1998. "Soil gas radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement", *Radiation Measurements*, 29, 593-598.
- Zmazek B., Živčić M., Vaupotič J., Bidovec M., Poljak M., Koba I., 2002. "Soil radon monitoring in the Krško Basin, Slovenia", *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 649-657.