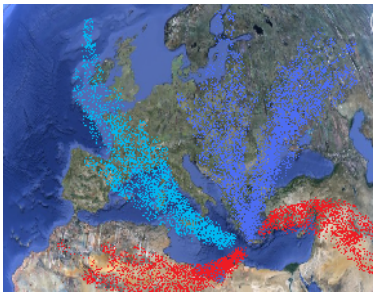
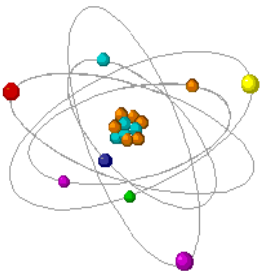
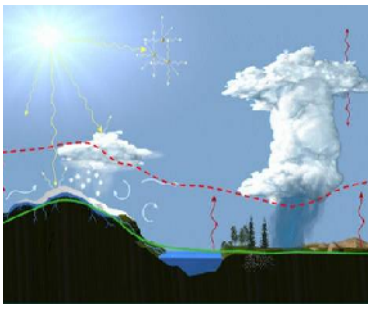
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
΄΄ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ΄΄

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ 222 ΣΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΣΤΗ ΦΙΝΟΚΑΛΙΑ


Αέριες μάζες


Ραδόνιο


Ατμ/ρικο Οριακό στρώμα


Φινοκαλιά

ΣΤΡΑΤΑΚΗ ΑΝΘΟΥΛΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: **ΚΑΝΑΚΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2009

Τριμελής επιτροπή:

Μαρία Κανακίδου
Καθ/τρια Τμήματος Χημείας (Επιβλέπουσα)

Νικόλαος Μιχαλόπουλος
Καθ/της Τμήματος Χημείας

Ευάγγελος Γερασόπουλος
Ερευνητής Β’ Αστεροσκοπείου Αθηνών

UNIVERSITY OF CRETE – DEPARTMENT OF CHEMISTRY

MASTER OF SCIENCE – M.Sc.
¨ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES˝

STUDY OF THE TEMPORAL VARIATION OF RADON 222 IN THE MIXING LAYER AT FINOKALIA

STRATAKI ANTHOULA

SUPERVISOR: **KANAKIDOY MARIA**

ENVIRONMENTAL CHEMICAL PROCESS LABORATORY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, UNIVERSITY OF CRETE

HERAKLIO 2009

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα χημείας στο εργαστήριο Περιβαλλοντικών και Χημικών διεργασιών, τμήμα Υπολογιστικής χημείας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστώ το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης και την Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, που μου έδωσαν την ευκαιρία να συμμετάσχω στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα ειδίκευσης ΄ΤΕ.ΠΡΟ.Π΄. Ευχαριστώ ιδιαίτερα το τμήμα Χημείας για την υποδομή και την υποστήριξη που μου δόθηκε για να ολοκληρωθεί η παρακάτω εργασία.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Κανακίδου Μαρία που με δέχθηκε στο εργαστήριο της και είχε την ολοκληρωτική ευθύνη για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ιδιαιτέρα την ευχαριστώ για τις χρήσιμες παρατηρήσεις της, και την καθοδήγηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον Γιώργο Κουβαράκη για την βοήθεια του και καθοδήγηση στην επεξεργασία των δεδομένων αλλά πιο πολύ των ευχαριστώ για την παρέα του.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νίκο Μιχαλόπουλο, τόσο για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία όσο και για την συμβολή του ως εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ πολύ τον κύριο Ευάγγελο Γερασόπουλο για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή, καθώς και για τις πολύτιμες παρατηρήσεις και διορθώσεις.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νίκο Δασκαλάκη για την πολύτιμη βοήθεια του στην παρουσίαση της εργασίας, τον Mustafa Kocak για την καθοδήγηση του στην χρήση του PMF, και την Χριστίνα Θεοδόση για την βοήθεια της με τα δεδομένα των ιόντων και των στοιχείων.

Πολύ σημαντικό ήταν για μένα και το όμορφο κλίμα στο εργαστήριο και ευχαριστώ ιδιαίτερα όλους για την ωραία φιλοξενία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου, για την υπομονή, την συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξαν σε όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού.

Βιογραφικό Σημείωμα:

Προσωπικά στοιχεία	
Επώνυμο	Στρατάκη
Όνομα	Ανθούλα
Ημερομηνία γέννησης	23 Ιουλίου 1980
Εκπαίδευση	
1998	Απόφοιτη Γενικού Λυκείου Ηρακλείου
1999-2004	Φοιτήτρια του τμήματος ΠΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ του ΤΕΙ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΓΜΟΓΩΝ. Πτυχιακή εργασία: «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΚΟΠΙΑ».
2006	Εισαγωγή στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ» του Πανεπιστήμιου Κρήτης –ΤΕΙ Κρήτης ΣΤΕΦ.
Επαγγελματική Εμπειρία	
2004	Πρακτική άσκηση στην εταιρεία Η/Μ Κατασκευαστική Ε.Π.Ε.
2004-2009	Τεχνική Εταιρεία «Μάντζος Νικ. & Σία Ε.Ε.»
Ξένες Γλώσσες	
1997	Αγγλικά (Lower)

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου

Περιεχόμενα:

Ευρετήριο Εικόνων.

Ευρετήριο Πινάκων.

Περίληψη

Βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου (^{222}Rn). Το ραδόνιο είναι ένα ραδιενεργό στοιχείο, προκύπτει δε από την διάσπαση του ραδίου 226 και περιέχεται στα πετρώματα του στερεού φλοιού της γης. Είναι αέριο και απαντάται κυρίως στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, εκπεμπόμενο από τους πόρους του εδάφους. Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκαν οι κύριες αιτίες μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου καθώς και οι μηχανισμοί που τις διέπουν. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιήθηκαν πέντε ετών μετρήσεις από το 2002 έως το 2006 από το σταθμό της Φινοκαλιάς στην περιοχή του Λασιθίου. Με την βοήθεια των μετρήσεων αυτών και σε συνδυασμό με μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων και του όζοντος προέκυψαν συμπεράσματα τόσο για την ημερήσια μεταβολή, όσο και για την εποχικότητα του ραδονίου.

Η περίοδος 2002-2006 χαρακτηρίζεται από μέση ημερήσια τιμή 56,57 pCi/m^3 ± 23,31 pCi/m^3 με μέγιστη μέση ημερήσια τιμή στα 137,40 pCi/m^3 και ελάχιστη στα 9,80 pCi/m^3. Η συγκέντρωση του ραδονίου που μετράται εκφράζει, το άθροισμα του ραδονίου που εκπέμπεται από το έδαφος μαζί με τις ποσότητες ραδονίου που μεταφέρονται από τις γειτονικές περιοχές. Οι κύριοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου αφορούν κυρίως α) την συσσώρευση τις ημέρες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου και σταθερές συνθήκες στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, β) την μεταφορά αέριων μαζών από απομακρυσμένες περιοχές πλούσιες σε ραδόνιο γ) οι συνθήκες που επικρατούν στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, όπου ημέρες που χαρακτηρίζονται από έντονη βραδινή θερμοκρασιακή αναστροφή αυξάνουν την συγκέντρωση του ραδονίου λόγω συσσώρευσης, δ) τέλος σημαντική επιρροή στην συγκέντρωση του ραδονίου έχουν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό εκπομπής του από το έδαφος (emanation), οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η υγρασία του εδάφους το πορώδες.

Στην παρούσα εργασία το ραδόνιο συσχετίστηκε τόσο με μετεωρολογικούς παράγοντες, το όζον, όσο και με τα αδρά και λεπτά σωματίδια. Οι συσχετίσεις αυτές επιτεύχθηκαν με την βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS και μεθόδων στατιστικής ανάλυσης όπως η απλή και πολυμεταβλητή γραμμική παλινδρόμηση και η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες.

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από ολόκληρη την διερεύνηση είναι ότι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο είναι οι κατ' εξοχήν εποχές όπου η συγκέντρωση του ραδονίου επηρεάζεται από την μεταφορά αέριων μαζών. Η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την συγκέντρωση του ραδονίου διότι υψηλές ταχύτητες ανέμου βοηθούν στον διασκορπισμό του. Τα συνοπτικής κλίμακας μετεωρολογικά φαινόμενα επηρεάζουν την κίνηση και τις συνθήκες που επικρατούν στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και εν τέλη την συγκέντρωση του ραδονίου. Το ραδόνιο αποδείχθηκε ότι είναι ένα καλό στοιχείο για να ερευνήσουμε τις συνθήκες και την κινητικότητα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Στην προσπάθεια συσχέτισης του ραδονίου με τα αδρά και λεπτά σωματίδια βρέθηκε ότι η ετήσια μεταβολή του ραδονίου σχετίζεται περισσότερο με τα λεπτά από ότι με τα αδρά σωματίδια. Με την βοήθεια της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες των αερολυμάτων και του ραδονίου, αυτό βρέθηκε να μοιράζετε κοινές συνιστώσες περισσότερο με δευτερογενή σωματίδια ανθρωπογενούς προέλευσης (SO_4^{2-}, $C_2O_4^{2-}$, NO_3^-, NH_4^+) ενώ δεν υπήρχε συσχέτιση με στοιχεία και ιόντα που χαρακτηρίζουν σωματίδια προερχόμενα από το στερεό φλοιό της γης.

Abstract.

The main purpose of this study was to investigate the variability of the atmospheric radon (^{222}Rn) concentration. Radon is a radioactive element produced during the radioactive decay series of radium (^{226}Ra) by ejecting an alpha- particle. In the present work we investigate the reasons for the gradient change in the concentration of radon and the mechanisms that control this change on Crete. For achieving this, targeted five year data (2002-2006) were used, from year 2002 to year 2006, from the monitoring station of Finokalia in the area of Lasithiou Crete. Using these data, meteorological parameters (wind speed and direction, relatively humidity, temperature) and ozone, conclusions are drawn for the daily, annually and seasonally variability of radon.

The period 2002-2006 is characterized by daily average concentration of radon of 56,57 pCi/m^3 ± 23,31 pCi/m^3 and minimum maximum concentrations 9,805pCi/m^3 , 137,40 pCi/m^3, respectively. The concentration of radon is related mainly with a) the accumulation of radon, during days that wind speed is very low and the conditions of the atmospheric boundary layer are stable, b) the air mass movement and transfer of air masses rich in radon that have passed over land a few days before the observation. c) the conditions that dominate in the atmospheric boundary layer, since days that are characterized by intense temperature inversion during the night favour the accumulation of radon.

In the present study radon was correlated not only with meteorological parameters and ozone but also with fine and coarse aerosols. The correlations were made by the mean of the statistical programme SPSS and the analytical methods simple and multiple linear regression and principle components analysis.

The main conclusions drawn are summarized as follows: summer and fall are the seasons during which the transport of air masses affects most the concentration of radon. The wind speed modulates the concentration of radon because it affects its accumulation and long range transport. Synoptic scale meteorological phenomena can impress the movement and the stability of the atmospheric boundary layer and ultimately the concentration of radon. Radon was proved to be a good tracer for the evolution of the atmospheric boundary layer.

The correlation of radon with the fine and coarse fraction of aerosols indicate that the seasonality of radon is closer to the seasonality of the fine particles. Principle components analysis shows that radon can coexist with secondary particles, from anthropogenic activity (SO_4^{2-}, $C_2O_4^{2-}$, NO_3^-, NH_4^+) whereas it doesn't show any correlation with the ions and elements from the earth's crust.

Κεφάλαιο 1. Σκοπός της εργασίας.

Το ραδόνιο (^{222}Rn) είναι ένα ευγενές ραδιενεργό αέριο που προκύπτει από την ραδιενεργή σειρά διάσπασης του ραδίου (^{226}Ra). Ο χρόνος ημιζωής του είναι 3,8 ημέρες, είναι ελάχιστα διαλυτό στο νερό (Jacob and Panther, 1990; Li and Chang, 1996; W. Zahorowski et al.,2004) και είναι αναίσθητο σε διαδικασίες υγρής και ξηρής εναπόθεσης (Jacob and Panther, 1900; Kritz et al., 1993; Li and Chang, 1996; Giannakopoulos et al., 2000). Η κύρια πηγή προέλευσης του ραδονίου είναι ο στερεός φλοιός της γης (κυρίως από πετρώματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε ουράνιο 238). Η ροή του ραδονίου από περιοχές που δεν είναι καλυμμένες με πάγο θεωρείται σταθερή και έχει εύρος από 0,72-1,2 atom $cm^{-2}s^{-1}$ (Turekian et al., 1977; Lambert et al.,1982). Σαν ραδιενεργό ευγενές αέριο ο βασικός μηχανισμός μείωσης της συγκέντρωσης του στην ατμόσφαιρα είναι η ραδιενεργός διάσπαση του.

Το ραδόνιο είναι ένα από τα πιο ευρέως ερευνημένα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία Έχει χρησιμοποιηθεί για την μελέτη διαδικασιών ανάμειξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Moses et al., 1960; John E. Pearson and Harry Moses, 1965, Kataota et al., 1998, 2001) καθώς και σαν στοιχείο ανιχνευτής στην μελέτη των διαδικασιών μεταφοράς στην τροπόσφαιρα (subscale and synoptic transport processes) (Liu et al., 1984; Dentener et al. 1999; Chevillard et al., 2002). Παρακάτω γίνεται εκτενείς αναφορά στους κυριότερους τομείς έρευνας του ραδονίου, που είναι:

- Η χρήση του στην παρακολούθηση της κίνησης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (κάθετη ανάμειξη) βοηθώντας στην χρήση και αξιολόγηση υπολογιστικών μοντέλων.
- Σαν ιχνηθέτης της κίνησης και μεταφοράς ατμοσφαιρικών αέριων μαζών καθώς και στην έρευνα του τρόπου κυκλοφορίας των μουσώνων.
- Πρόβλεψη ηφαιστειακών σεισμών και χαρτογράφηση γεωλογικών ρηγμάτων.
- Και τέλος το κομμάτι της έρευνας που αφορά τους κινδύνους υγείας που υπάρχουν από μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου τόσο στους εσωτερικούς χώρους σπιτιών όσο και σε υπόγειους χώρους εργασίας (ορυχεία).

Η μελέτη του ραδονίου στην περιοχή της Κρήτης είναι μια σύνθετη διαδικασία εξαιτίας της γεωγραφικής θέση του νησιού, δηλαδή η ύπαρξη ηπειρωτικών περιοχών σε κάθε προσανατολισμό δημιουργεί δυσκολίες στην διαφοροποίηση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου με την προέλευση των μαζών. Οι αέριες μάζες που φτάνουν στην περιοχή της Κρήτης χαρακτηρίζονται από τις εξής προελεύσεις: α) πολικές ηπειρωτικές αέριες μάζες που μεταφέρονται από τη βόρεια ή βορειοανατολική Ευρώπη, και είναι πολύ ψυχρές, ξηρές και ευσταθείς, β) πολικές θαλάσσιες αέριες μάζες του βορειοανατολικού Ατλαντικού, που είναι σχετικά ψυχρές, υγρές και ασταθείς, αλλά τροποποιούνται σημαντικά, καθώς διασχίζουν την ηπειρωτική Ευρώπη και εισβάλουν στην Μεσόγειο, γ) θερμές και ξηρές αέριες μάζες που μεταφέρονται από τη βόρεια Αφρική και σπανιότερα από τη μέση Ανατολή (Ιράκ, Συρία Πακιστάν).

Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους οι μεσογειακές αέριες μάζες είναι θερμές, υγρές και κατά κανόνα ασταθείς και μεταφέρονται προς την περιοχή μας από το νότιο ρεύμα που επικρατεί μπροστά από υφέσεις. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, που

δεν παρατηρείται υφεσιακή δραστηριότητα στην περιοχή, ο ρόλος της Μεσογείου εξαντλείται στην περιορισμένης κλίμακας τροποποίηση των τροπικών ηπειρωτικών αέριων μαζών που μεταφέρονται από τη βόρεια Αφρική. Οι θερμοδυναμικές διαδικασίες, που συνήθως λαμβάνουν χώρα όταν σαχαριανές αέριες μάζες μεταφερθούν πάνω από την Ελλάδα, θερμαίνουν και ξηραίνουν τον αέρα που φθάνει στην επιφάνεια. Στην Ελλάδα, την χειμερινή περίοδο του έτους παρατηρούνται έντονες κακοκαιρίες με τη σύγκλιση πάνω από την περιοχή μας ψυχρών και ξηρών πολικών αέριων μαζών με θερμές και υγρές μεσογειακές αέριες μάζες.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλη αναφορά στην ατμοσφαιρική μόλυνση και την αλλαγή του κλίματος εξαιτίας αστικών, και βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Τα αερολύματα εισέρχονται στην ατμόσφαιρα είτε απ’ ευθείας (πρωτογενή) από φυσικές ή ανθρωπογενείς δραστηριότητες, είτε έπειτα από αντιδράσεις που συμβαίνουν μέσα στην ατμόσφαιρα. Τα αερολύματα αυτά στην συνέχεια μέσων διαδικασιών μεταφοράς της ατμόσφαιρας, μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργούν προβλήματα σε περιοχές μακριά από την πηγή τους.

Στην παρούσα εργασία προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε:

α) την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την σταθερότητα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.
β) την συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου με την μεταφορά των αέριων μαζών, και πώς αυτή επηρεάζεται από την προέλευση.
γ) την χρήση του ραδονίου σαν ιχνηθέτη, διερευνώντας με ποια στοιχειά και ιόντα των ατμοσφαιρικών σωματιδίων έχει κοινή μεταβολή.

Η διεξαγωγή των παραπάνω εργασιών χωρίστηκε στις εξής ενότητες:

Ενότητα Α.

Στο κομμάτι αυτό γίνεται αναφορά:

i) Στις ιδιότητες του ραδονίου.
ii) Στις κύριες πηγές προέλευσης του.
iii) Στην χρήση του στην έρευνα.

Ενότητα Β.

Στην ενότητα αυτή διερευνήσαμε την ημερήσια και εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου. Συγκρίναμε την εποχιακή διακύμανση κάθε έτους καθώς και την μεταβολή των μέσων μηνιαίων τιμών του ραδονίου για την χρονική περίοδο 2002-2006.

Ενότητα Γ.

Στην ενότητα αυτή ασχοληθήκαμε με:

i) Τον ημερήσιο κύκλο του ραδονίου, την συχνότητα εμφάνισης των μεγίστων κατά την διάρκεια της ημέρας .
ii) Την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου.

iii) Την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου συγκρίνοντας το με την συγκέντρωση των συνολικών PM_{10}.
iv) Συγκρίναμε την ημερήσια και εποχιακή μεταβολή του ραδονίου με μετρήσεις από άλλους σταθμούς.

Ενότητα Δ.

Με την βοήθεια της απλής και πολλαπλής γραμμικής ανάλυσης συσχετίσαμε το ραδόνιο με το όζον, τους μετεωρολογικούς παράγοντες, το μέγιστο ύψος των αέριων μαζών από το έδαφος, και την μέγιστη απόσταση των αέριων μαζών από την περιοχή.

Ενότητα Ε

Στην ενότητα αυτή διερευνήσαμε την σχέση του ραδονίου με τα λεπτά και αδρά σωματίδια. Η διερεύνηση αυτή έγινε με την βοήθεια της απλής γραμμικής παλινδρόμησης και την ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες .

Ενότητα Ζ.

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων και γίνονται περαιτέρω προτάσεις διερεύνησης του ραδονίου.

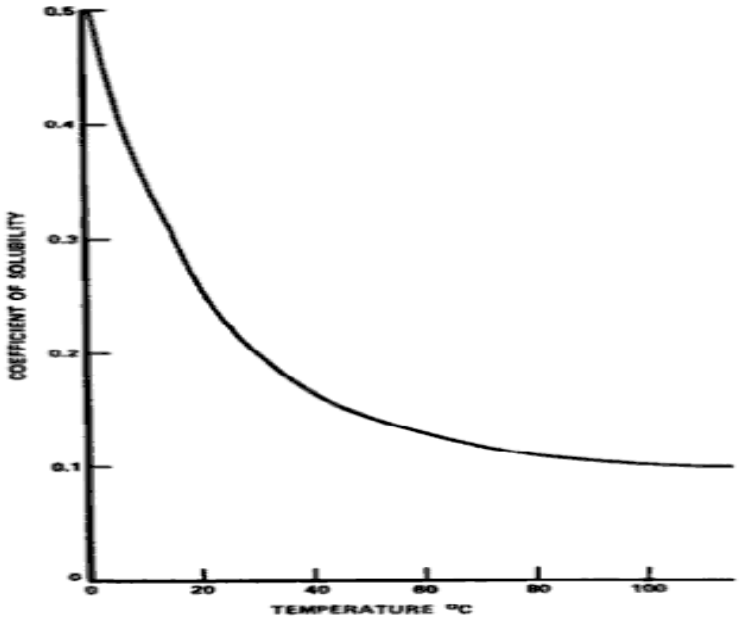
Κεφάλαιο 2. Εισαγωγικά.

2.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.

2.1.1.Φυσικά χαρακτηριστικά Ραδονίου.

Το ραδόνιο είναι ένα φυσικής προέλευσης, άχρωμο άοσμο, και σχεδόν αδρανές ραδιενεργό ευγενές αέριο. Συγκρίνοντας το με τα άλλα ευγενή αέρια, το ραδόνιο είναι το βαρύτερο, έχει το υψηλότερο σημείο τήξης, σημείο βρασμού, κρίσιμη θερμοκρασία και κρίσιμη πίεση. Είναι διαλυτό στο κρύο νερό και η διαλυτότητα του μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι η αιτία που του δίνει την δυνατότητα να απελευθερώνεται από το νερό κατά την διαδικασία ενεργειών όπως πλύσιμο ρούχων, κάνοντας μπάνιο κ.τ.λ.

Παρόλο που είναι αδρανές σχηματίζει κάποια στοιχεία όπως σύμπλοκα φθορίου, συγκεκριμένα σχηματίζει ένα σχεδόν ασταθές clathrate-hydrate με το νερό, $Rn\text{-}6H_2O$ (Martinelli, 1993). Ωστόσο ανεπιτυχείς προσπάθειες έχουν γίνει για να σχηματιστούν οξείδια και αλογονίδια με το ραδόνιο.



Εικόνα 1. Διάγραμμα του συντελεστή διαλυτότητας του ραδονίου συναρτήσει της θερμοκρασίας νερού. Ο συντελεστής διαλυτότητας στο νερό ορίζεται ως ο ρυθμός C_w/C_a, όπου C_w και C_a είναι οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο νερό και τον αέρα αντίστοιχα. (C. Richard Cothern, 1987)

Μερικές γενικές και φυσικές ιδιότητες του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Γενικές Ιδιότητες	Τιμή
Όνομα, σύμβολο, ατομικός αριθμός	*Ραδόνιο, Rn, 86*
Χημική σειρά	*Ευγενές αέριο*
Εμφάνιση	*Άχρωμο*
Ατομικό βάρος	*222gmol^{-1}*
Διαμόρφωση Ηλεκτρονίων	*[Xe] 4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{6}*
Σημείο βρασμού	*-61,8ºC*
Ηλεκτρόνια ανά στοιβάδα	*2, 8, 18, 32, 18, 8*
Φυσικές Ιδιότητες	**Τιμή**
Σημείο τήξης	*-71ºC*
Κρίσιμη θερμοκρασία	*104ºC*
Κρίσιμη πίεση	*62 atm*
Πυκνότητα (κανονική θερμοκρασία και πίεση)	*9,96kg/m^{3}*
Συντελεστής διαλυτότητας στο νερό σε ατμοσφαιρική πίεση, στην θερμοκρασία:	
0 ºC	*0,507*
20 ºC	*0,250*
37 ºC	*0,167*
100 ºC	*0,106*
Συντελεστής διαλυτότητας σε ατμοσφαιρική πίεση, στην θερμοκρασία των 18 ºC στο:	
Εξάνιο	*16,56*
Λάδι ελιάς	*29,00*
Πετρέλαιο (υγρή παραφίνη)	*9,20*
Τολουένιο	*13,24*

Πίνακας 1. Χημικές – Φυσικές Ιδιότητες του ραδονίου ^{222}Rn (National Council on Radiation Protection and Mesurements, NCRP).

2.1.2. Ιστορία και ετυμολογία.

Παρόλο που το ραδόνιο δεν είχε ανακαλυφθεί μέχρι το 1900 η επιρροή του στο άνθρωπο είναι γνωστή από το 16 αιώνα όταν ο Agricola George (ή George Bauer: ορυκτολόγος, θεραπευτής, διπλωμάτης) το 1957 παρατήρησε την υψηλή συχνότητα καρκίνου των πνευμόνων των μεταλλωρύχων στην πόλη Schneeberg, που βρίσκεται κοντά στα βουνά Erzgebirge (Ore mountains) (Lutz W. Weber, 2002). Η περιοχή αυτή βρίσκεται στην ανατολική Ευρώπη και χωρίζει την Γερμανία από την Τσεχοσλοβακία. Παρόμοια φαινόμενα είχαν παρατηρηθεί και σε μεταλλωρύχους στο Jachymov. Η συμβολή των μεταλλωρύχων έπαιξε μεγάλο ρόλο στην ανακάλυψη του ραδονίου παρέχοντας στους χημικούς την κύρια πηγή: το ορυκτό του πισσουρανίτη, μίγμα κυρίως ουρανινίτη και άλλων ουρανιούχων ορυκτών.

Η IUPAC (International Union and Pure and Applied Chemistry) και πολλές αναφορές στην βιβλιογραφία (Partington, J.R. 1957; Geiger and Sceel, 1900) αναγνωρίζουν ότι η ανακάλυψη του ραδονίου έγινε τα 1900 από το Γερμανό χημικό Friedrich Ernest Dorn. Το 1900 ο Friedrich Ernest Dorn ανέφερε κάποια πειράματα στα οποία παρατήρησε ότι το ράδιο εκπέμπει ένα ραδιενεργό αέριο το οποίο ονόμασε ¨πηγή ραδίου¨ (Radium Emanation). Πριν όμως ο Friedrich Ernest Dorn ερευνήσει το ραδόνιο υπήρξαν πολύ ερευνητές που είχαν ασχοληθεί με την μελέτη του ραδονίου

όπως ο Ernest Rutherford, Frederick Soddy, Marie and Pierre Curie, αλλά κάποιοι περιλαμβάνουν και τους William Crookes, Andre Debierne, J.J. Thomson. Για να καταφέρουμε να κάνουμε μια ιστορική αναδρομή μέχρι την ανακάλυψη του ραδονίου θα παρουσιάζουμε μαζί με αυτή και μια αναφορά στην ανακάλυψη της ραδιενέργειας.

Ο Γάλλος επιστήμονας Henri Becquerel, το 1896 πραγματοποίησε κάποια ευφυέστατα πειράματα με άλατα του ουρανίου. Με τα πειράματα αυτά κατάφερε να δείξει την ραδιενεργή ιδιότητα του ουρανίου. Έδειξε ότι τα άλατα ουρανίου εκπέμπουν ακτίνες που είναι συνεχείς για μεγάλες περιόδους χρόνου και είχαν μια μοναδική ιδιότητα, να είναι ικανές να αποφορτίζουν ένα ηλεκτροσκόπιο από φύλλο χρυσού. Αυτές οι ακτίνες παράγουν ιονισμό και απορροφούνται περισσότερο άμεσα από λεπτά φύλλα αλουμινίου από ότι οι ακτίνες Χ.

1597	Ο Agricola παρατήρησε υψηλά επίπεδα από αυτό που κατάληξε να είναι η αιτία καρκίνου των πνευμόνων στα ορυχεία του βουνού Erz.
1896	Ο Becquerel ανακάλυψε την ραδιενεργή ιδιότητα του ουρανίου.
1898	Οι Curies και Schmidt ανακάλυψαν την ραδιενεργή ιδιότητα του θορίου και επίσης τα στοιχεία ράδιο και πολώνιο.
1898	Ο Rutherford ανακαλύπτει τα άλφα και βήτα σωματίδια.
1899	Ο Thomson και Rutherford επέδειξε ότι ή ραδιενέργεια προκαλεί ιονισμό.
1899	Ο Rutherford ανακαλύπτει το θορόνιο και το αποκαλεί «εκπομπή» (emanation)
1900	Ο Dorn ανακαλύπτει την εκπομπή (emanation) από την ραδιενεργή σειρά του ^{238}U, η οποία τώρα αποκαλείται ραδόνιο.
1901	Ο Rutherford και Brooks επέδειξαν ότι το ραδόνιο είναι ένα ραδιενεργό αέριο.
1901	Ανακάλυψη της ενεργής απόθεσης του θορίου από τον Rutherford και του ραδίου από τους Curies.
1902	Ο Rutherford και Soddy ανακάλυψαν την μεταστοιχείωση.
1902	Ο Thomson ανακάλυψε την ύπαρξη ραδονίου σε νερό βρύσης
1903	Ο Rutherford και Soddy ανάπτυξαν εξισώσεις που περιέγραφαν την ραδιενεργή διάσπαση.
1904	Ο Geisel και Debierne ανακάλυψαν το άκτινον.

Πίνακας 2. Ιστορική αναδρομή ραδονίου.

Το 1898, ο Pierre και η Marie Curie ανακάλυψαν την ραδιενεργή ιδιότητα του θορίου και τα στοιχεία πολώνιο και ράδιο. Η Marie Curie ήταν η πρώτη που χρησιμοποίησε την λέξη ραδιενέργεια σε συνδυασμό με την έρευνα της, σε ενώσεις ουρανίου και θορίου. Το 1899, ο Pierre και η Marie Curie παρατήρησαν ένα αέριο που εκπέμπεται από το ράδιο και έμενε ραδιενεργό για ένα μήνα. Τον ίδιο χρόνο ο Robert B. Owens με τον ο Ernest Rutherford παρατήρησαν αποκλίσεις καθώς προσπαθούσαν να μετρήσουν την ραδιενέργεια από το οξείδιο του θορίου. Ο Rutherford παρατήρησε ότι οι ενώσεις θορίου συνεχώς εκπέμπουν ένα ραδιενεργό αέριο το οποίο διατηρούσε την ραδιενεργή του ιδιότητα για αρκετά λεπτά, και ήταν ο πρώτος που το ονόμασε εκπομπή «emanation» (από την λατινική λέξη ¨emanare¨ - να παρέρχομαι, και ¨emanatio¨ - εκπνοή). Αργότερα το ονόμασε εκπομπή θορίου «Thorium Emanation». Το 1901 επέδειξε ότι οι εκπομπές ήταν ραδιενεργές, αλλά έδωσε στους Curie την αναγνώριση της ανακάλυψης του στοιχείου. Η Marie Curie ήταν αυτή που με την προσεκτική δουλεία της πάνω στο ράδιο έδωσε στο Dorn το υλικό για την ανακάλυψη του ραδονίου. Το 1903, παρόμοιες εκπομπές

παρατηρήθηκαν από το ακτίνιο από τον Andre – Louis Debierne και ονομάστηκαν εκπομπή ακτινίου (Actinium Emanation Ac Em).

2.1.3. Κυριότερα ισότοπα Ραδονίου.

Υπάρχουν 27 γνωστά ισότοπα του ραδονίου από το ^{200}Rn έως το ^{226}Rn. Τα τρία πιο γνωστά ισότοπα του ραδονίου που βρίσκονται στην φύση είναι αυτά που έχουν ατομικές μάζες 219, 220 και 222.

Τα παραπάνω ισότοπα του ραδονίου ανήκουν στις ραδιενεργές σειρές διάσπασης του θορίου του ουρανίου και του ακτίνιου. Η σειρά διάσπασης του νεπτούνιου (Np) δεν συναντάτε στην φύση διότι ο χρόνος ημιζωής του μακροβιότερου μέλους του είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερος από την ηλικία που έχει το σύμπαν. Όμως στην πράξη, μόνο το ^{220}Rn και το ^{222}Rn διαφεύγουν στην ουσία στο περιβάλλον επειδή η σειρά διάσπασης του ακτίνιου που προέρχεται από το ^{235}U, είναι μόνο το 0,72% του φυσικού ουρανίου. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι και στην περίπτωση παρουσίας μεγάλης συγκέντρωσης ^{235}U που μπορεί να βρεθεί σε υψηλά εμπλουτισμένα με ουράνιο πετρώματα (HEU), το ^{219}Rn δεν μπορεί να διαφύγει στο περιβάλλον εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής του.

Το ^{222}Rn έχει χρόνο ημιζωής 3,8 ημέρες, και μπορεί να διαφύγει από τα πετρώματα όπου και δημιουργείται, αντιθέτως με το ^{220}Rn του οποίου ο μικρός χρόνος ημιζωής περιορίζει την απόσταση που αυτό μπορεί να ταξιδέψει πριν διασπαστεί.

Σαν συνέπεια η ποσότητα του ^{220}Rn που εισέρχεται στο περιβάλλον είναι λιγότερη από την ποσότητα του ^{222}Rn, έτσι το ^{220}Rn και τα προϊόντα διάσπασης του συνήθως θεωρούνται αμελητέα παρόλο που η συνεισφορά τους δεν είναι ασήμαντη σαν αυτή του ^{219}Rn. Συνοπτικά τα τρία φυσικά ισότοπα του ραδονίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ισότοπο ραδονίου	Προέλευση	Χρόνος ημιζωής
^{219}Rn: Ακτινόνιο.	*Αλυσίδα των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ακτίνιου.*	*3,96 seconds*
^{220}Rn: Θορόνιο	*Αλυσίδα των ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του θορίου-232*	*56 seconds*
^{222}Rn: Ραδόνιο	*Ράδιο- 226. Αλυσίδα των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ουρανίου-238.*	*3,8 days*

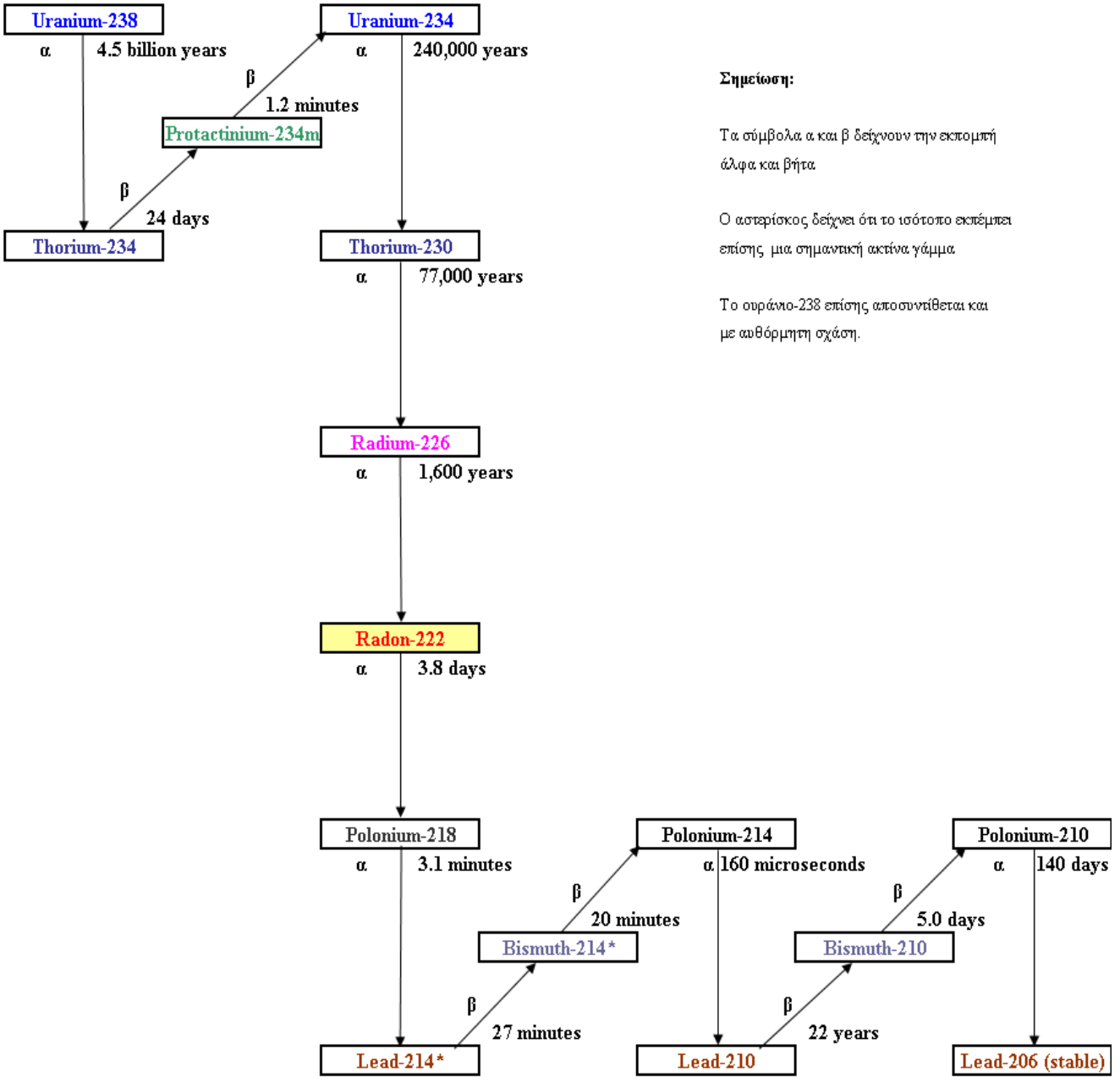
Πίνακας 3. Σημαντικότερα φυσικά ισότοπα του ραδονίου.

Τα κυριότερα βήματα διάσπασης για τα τρία φυσικά ραδιενεργά στοιχεία φαίνονται στις **Εικόνες 2 έως 4.**

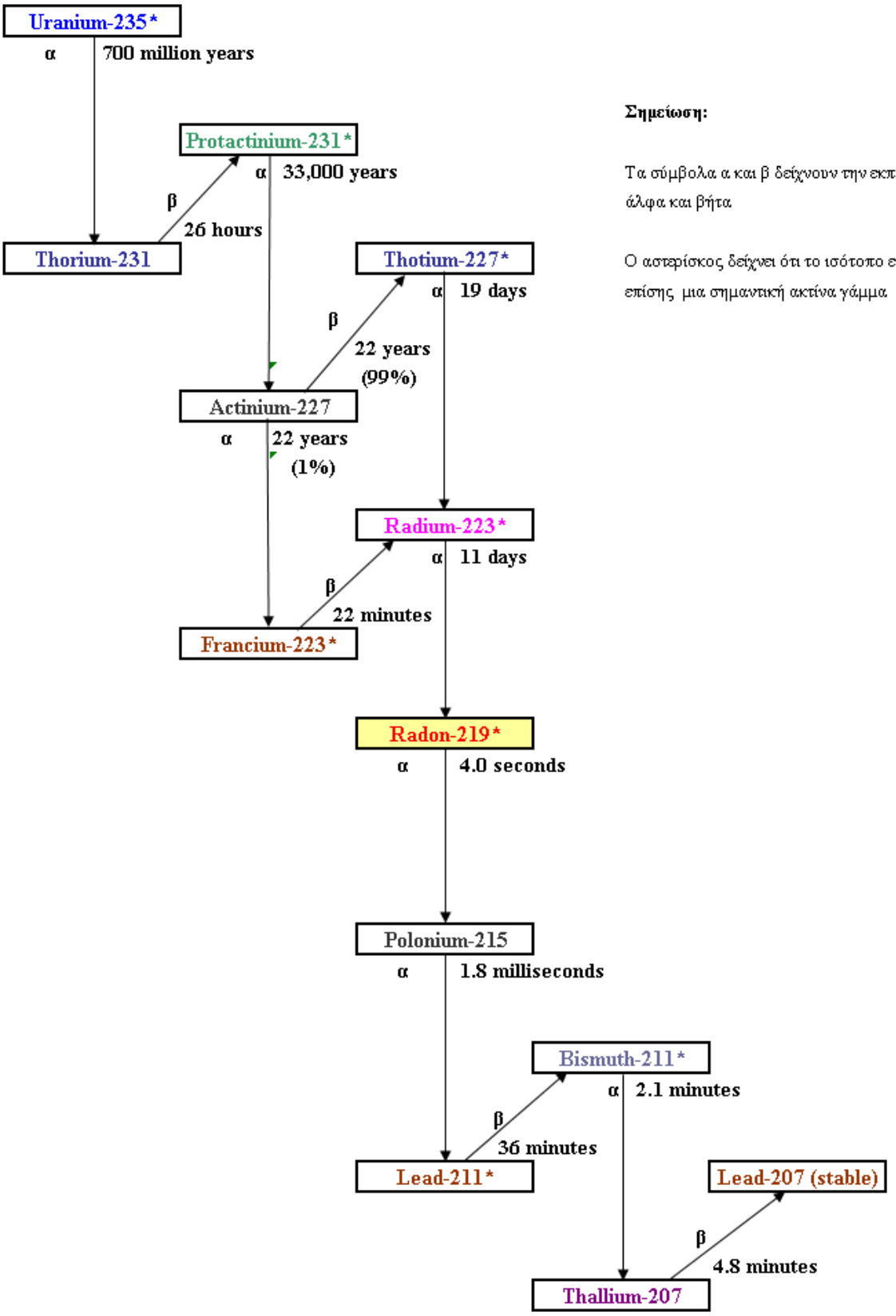
2.1.4. Αλυσίδες φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ουρανίου, ραδίου, και θορίου.

Το ουράνιο, το ράδιο και το θόριο απαντώνται σε τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές διάσπασης, του ουρανίου-238, θορίου-232, και του ουρανίου-235, αντίστοιχα. Στην φύση, οι ραδιενεργοί αυτοί πυρήνες σε αυτές τις τρεις σειρές βρίσκονται περίπου σε μια κατάσταση προσωρινής ισορροπίας, στην οποία η ενεργητικότητα όλων των ραδιενεργών πυρήνων κάθε σειράς είναι σχεδόν ίση.

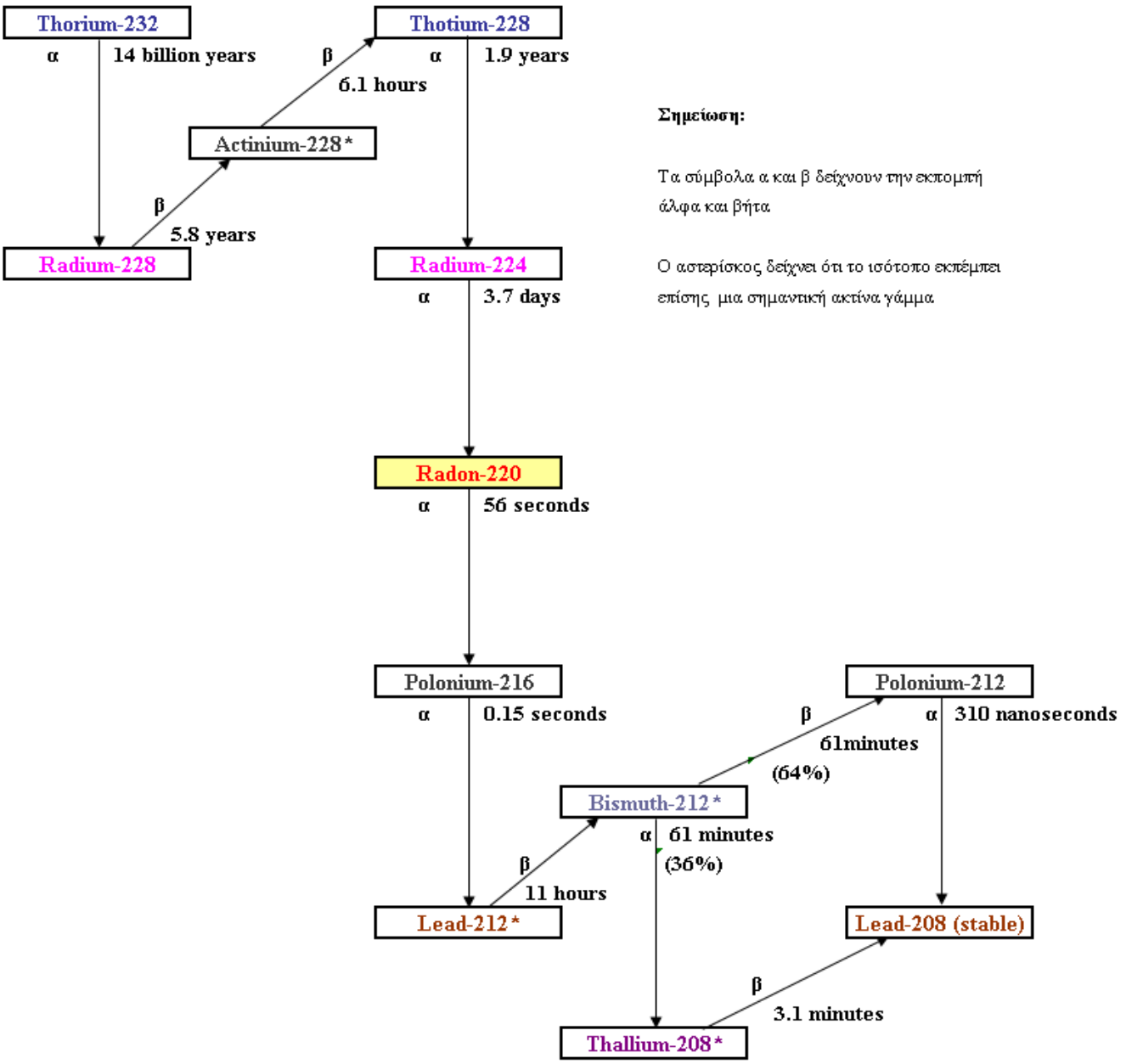
Οι αλυσίδες των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ουρανίου-238, θορίου-232, και ουρανίου-235 φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 2. Φυσική ραδιενεργός σειρά διάσπασης του Ουρανίου-238 (C. Richard Cothern, 1987; W. R. Van Schmus, 1995).



Εικόνα 3. Φυσική ραδιενεργός σειρά διάσπασης του Ουρανίου-235 (C. Richard Cothern, 1987; W. R. Van Schmus, 1995).



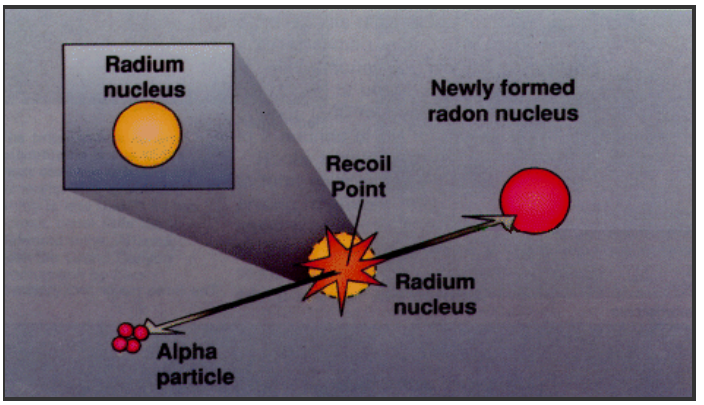
Εικόνα 4. Φυσική ραδιενεργός σειρά διάσπασης του Θορίου-232 (C. Richard Cothern, 1987; W. R. Van Schmus, 1995).

Οι συμβολισμοί α, β δείχνουν την εκπομπή α και β. Εκτενέστερη αναφορά για την ενέργεια που απελευθερώνεται από την ραδιενεργή διάσπαση γίνεται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

2.2. Τρόπος σχηματισμού του ραδονίου.

Το σημαντικότερο ισότοπο του ραδονίου είναι το ραδόνιο-222, το οποίο έχει το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής, 3,8 ημέρες. Σχηματίζεται κατά τη διάσπαση του ραδίου-226 και ανήκει στην αλυσίδα των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ουρανίου-238. Κάθε άτομο του ραδίου διασπάται ραδιενεργά εκπέμποντας από τον

πυρήνα του ένα σωματίδιο άλφα. Καθώς το σωματίδιο άλφα εκπέμπεται το νέο-σχηματιζόμενο ραδόνιο ανα-πηδά στην αντίθετη κατεύθυνση, όπως ένα όπλο κατά την διαδικασία βολής. Η αναπήδηση του σωματιδίου άλφα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απελευθέρωση του ραδονίου από τα ορυκτά πετρώματα.



Εικόνα 5. Σχηματισμός ραδονίου.
(Πηγή:http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/page8.gif)

2.3. Μονάδες μέτρησης ραδονίου.

Οι κυριότερες μονάδες μέτρησης των επιπέδων ραδονίου είναι:

- Pico Curies per liter (pCi/lt)
- Becquerels per cubic meter (Bq/m^3) (Σύστημα SI)

Μονάδα SI	Συντελεστής μετατροπής
Ένταση ραδιενεργούς πηγής (Bq)	*1 Ci = 3,7 × 10^{10} Bq (1pCi = 0,037 Bq)*
Συγκέντρωση (Bq/m^3)	*1 pCi/lt =37 Bq/m^3*

Πίνακας 4. Μονάδες ραδιενέργειας και συντελεστές μετατροπών.

2.4. Κυριότερες πηγές

Κύρια πηγή του ραδονίου (^{222}Rn) όπως είδαμε είναι το ^{238}U **(Εικόνα 2)**. Καθώς το ουράνιο είναι παρόν σε όλα τα πετρώματα και τον φλοιό της γης, έτσι είναι παρόν και το ράδιο και κατά συνέπεια και το ραδόνιο. Η μέση περιεκτικότητα ουρανίου στο φλοιό της γης είναι προσεγγιστικά 2 έως 4 ppm και για το θόριο 7 έως 13 ppm. Τα επίπεδα συγκέντρωσης σχετίζονται με τους τύπους των πετρωμάτων προέλευσης του εδάφους.

Πετρώματα που μπορεί να έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα από την μέση τιμή σε ουράνιο είναι:

- ✓ Όξινα πυριγενή πετρώματα, όπως γρανίτες και μερικά ηφαιστειογενή πετρώματα.
- ✓ Μαύροι, πλούσιοι σε οργανικό υλικό σχιστόλιθοι.
- ✓ Ασβεστόλιθοι και άλλα ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν φωσφορικά ορυκτά.
- ✓ Πετρώματα που προέρχονται από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω μετά από μεταμόρφωση τους εξαιτίας υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών. (μεταμορφωσιγενή πετρώματα).

Ονομαστικά μερικά από τα πιο σημαντικά ορυκτά του ουρανίου που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες, είναι ο ουρανινίτης, ο πισσουρανίτης, ο καρνοτίτης, ο αουτονίτης ή ωτουνίτης, ο δαβιδίτης, ο τορνμπερνίτης, κοφινίτης, ουρανοφάνης.

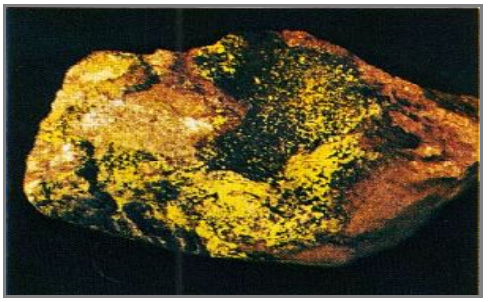
Ο ουρανινίτης είναι το πιο συνηθισμένο ορυκτό του ουρανίου. Το συναντάμε σε ιζηματογενή πετρώματα και γρανιτικά πετρώματα, πηγματίτες, και φλεβικά κοιτάσματα. Ο κοφινίτης είναι ένα πυριτικό ορυκτό του ουράνιου που συναντάτε σε μη οξειδωμένα ιζηματογενή πετρώματα. Ο καρνοτίτης, είναι ένυδρο ορυκτό του νατρίου, του βαναδίου και του ουρανίου. Απαντά σε ψαμμιτικές ή ασβεστιτικές αποθέσεις ή κοντά σε σχηματισμούς εποχιακών λιμνών (playas). Μερικές εικόνες των ορυκτών του ουρανίου φαίνονται παρακάτω.

α) Ουρανοφανής

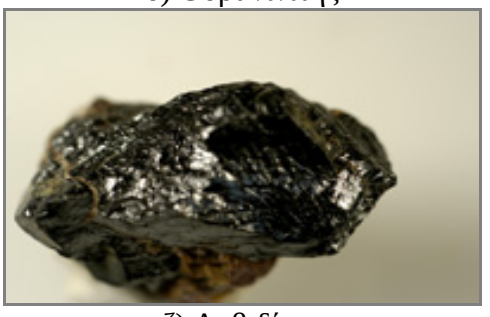
β) Τορνμπερνίτης

γ) Ωτουνίτης

δ) Ουρανινίτης



ε) Καρνοτίτης



ζ) Δαβιδίτης

Εικόνα 6. Ορυκτά πετρώματα του ουρανίου.

Πηγές: α,ε) http://www.alphatrack.ca/main/UMC.html,
β) http://www.wrightsrockshop.com/under_50/50_gallery4.htm,
γ) http://www.geo.auth.gr/106/0_properties/aggregate.htm,
δ) http://www.el.wikipedia.org/wiki/Ουρανινίτης,
ζ) http://www apo.cssmi.qc.ca/album/Minereaux/index.html

Περιοχές με πετρώματα πλούσια σε Καρνοτίτη, Ουρανινίτη, Ωτουνίτη.

Καρνοτίτης: Απαντάται σε πολλές περιοχές των Η.Π.Α., κυρίως στο Κολοράντο, το Ουαϊόμινγκ, την Αριζόνα, την Γιούτα και το Νέο Μεξικό. Ανευρίσκεται, επίσης, στο Μαρόκο, στο Ζαΐρ, στην περιοχή Radium Hill της Αυστραλίας και στο Καζακστάν.

Ουρανινίτης: Είναι σχετικά ευρέως διαδεδομένο ορυκτό. Εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματά του βρίσκονται στην Τσεχία, τη Γερμανία, τη Βρετανία (Κορνουάλλη), την Ισπανία (περιοχή Sierra Albarrana, Κόρδοβα, μεγάλοι κρύσταλλοι). Επίσης στον Καναδά, τις Η.Π.Α., την Τανζανία και το Ζαΐρ.

Ωτουνίτης: Απαντά, εκτός από την Ωτούν, και σε άλλες περιοχές της Γαλλίας, στην Πορτογαλία, στο Πιεμόντε της Ιταλίας, στην περιοχή Μπέργκεν (Bergen - Vogtland) της Γερμανίας και στην Κορνουάλλη της Βρετανίας. Επίσης στην Βραζιλία (Minas Gerais) και στην Αυστραλία.

Οι παρακάτω πίνακες δίνουν την εκτιμώμενη συγκέντρωση θορίου, ουρανίου και καλίου σε διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων καθώς και το επίπεδο σχετικής ραδιενέργειας από πετρώματα.

Rock Type	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)	Th/U	K/U	Th/K
Igneous						
Ultrabasic	0.02	0.007	0.01	2.8	1.4	2.0
Basic	3.4	0.8	1.0	4.3	1.3	3.4
Basic- intermediate	6.1	1.7	1.9	3.6	1.1	3.2
Intermediate	9.8	3.0	2.4	3.3	0.8	4.1
Intermediate-Acidic	16.0	3.6	3.0	4.4	0.8	5.3
Acidic	21.9	4.1	3.5	5.3	0.9	6.3
Sedimentary						
Evaporite	0.4	0.1	0.1	4.0	1.0	4.0
Carbonate	1.6	1.6	0.3	1.0	0.2	5.9
Sandstone	5.7	1.9	1.2	3.0	0.6	4.8
Shale	11.2	3.7	2.7	3.1	0.7	4.1
Metamorphic						
Amphibolite	2.0	0.9	0.6	2.2	0.7	3.3
Greenstone	3.4	0.8	1.0	4.3	1.3	3.4
Graywacke	6.7	2.1	2.8	3.2	1.3	2.4
Gneiss	10.6	2.3	3.4	4.6	1.5	3.1
Schist	13.5	4.1	2.5	3.3	0.6	5.5

Πίνακας 5. Εκτιμώμενη συγκέντρωση θορίου, ουρανίου και καλίου σε διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων (W. R. Van Schmus, 1995).

Rock Type	High	Moderate	Low
Igneous			
Granite	X		
Syenite	X		
Pegmatite	X		
Rhyolite	X		
Diorite		X	
Gabbro			X
Basalt			X
Diabase			X
Ultramafic			X
Metamorphic			
Gneiss (general)	←	—	→
Schist (general)	←	—	→
Marble			X
Slate			X
Quartzite			X
Sedimentary			
Sandstone	←	—	→
Shale	←	—	→
Carbonate (pure)			X
Siltstone	←	—	→

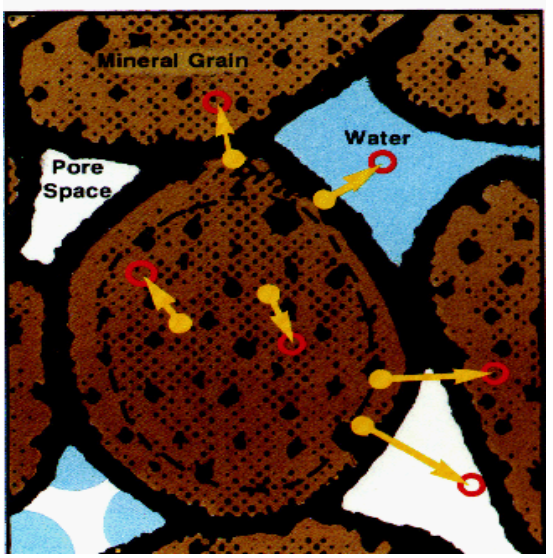
Πίνακας 6. Επίπεδο σχετικής ραδιενέργειας από πετρώματα (Stanley S. Johnson, 1991).

2.5. Τρόπος διαφυγής στην ατμόσφαιρα και παράγοντες που το επηρεάζουν.

Όλα τα άτομα του ραδονίου που δημιουργούνται από το ράδιο στο έδαφος δεν καταφέρνουν να διαφύγουν μέσα από τους πόρους και να ελευθερωθούν. Οι τρεις δυνατότητες που έχει το άτομο του ραδονίου μετά που θα σχηματιστεί είναι:

- Να ταξιδέψει σε μικρή απόσταση και να παραμείνει μέσα στον ίδιο κόκκο από όπου προήλθε.
- Να κινηθεί μέσα στον κόκκο του εδάφους και τελικά να μεταπηδήσει και να εγκλωβιστεί σε ένα διπλανό κόκκο ή στο νερό που εμπεριέχεται στους πόρους των πετρωμάτων.
- Να διαφύγει μέσω ενός κενού πόρου του εδάφους και να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

Σχηματικά οι τρεις αυτές δυνατότητες φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Περιοχή μέσα στον ορυκτό κόκκο από την οποία το ραδόνιο μπορεί πιθανά να διαφύγει στα πορώδη διαστήματα

Ράδιο πριν από την διάσπαση του σε ραδόνιο.

Νέο σχηματισμένο άτομο ραδονίου.

Εικόνα 7. Σχηματισμός ραδονίου μέσα σε ορυκτά πετρώματα και οι πιθανές περιπτώσεις διαφυγής του στα πορώδη διαστήματα (Πηγή: http://www.energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/page9.gif).

Το κλάσμα των ατόμων ραδονίου που απελευθερώνονται στα πορώδη διαστήματα των πετρωμάτων και του εδάφους καλείται «συντελεστής εκπομπής», «παράγοντας εκπομπής» ή «δυναμικότητα εκπομπής». Τυπικοί συντελεστές εκπομπής για πετρώματα και εδάφη έχουν εύρος από 0,05 σε 0,7 (Nazaroff et al. 1988).

Καθώς το έδαφος μετασχηματίζεται εξαιτίας των κλιματικών συνθηκών, η νέα μορφή του αρχικού πετρώματος καθορίζει σημαντικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, την θέση του ατόμου του ραδίου στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια του, καθώς και της συνθήκες υγρασίας στο έδαφος.

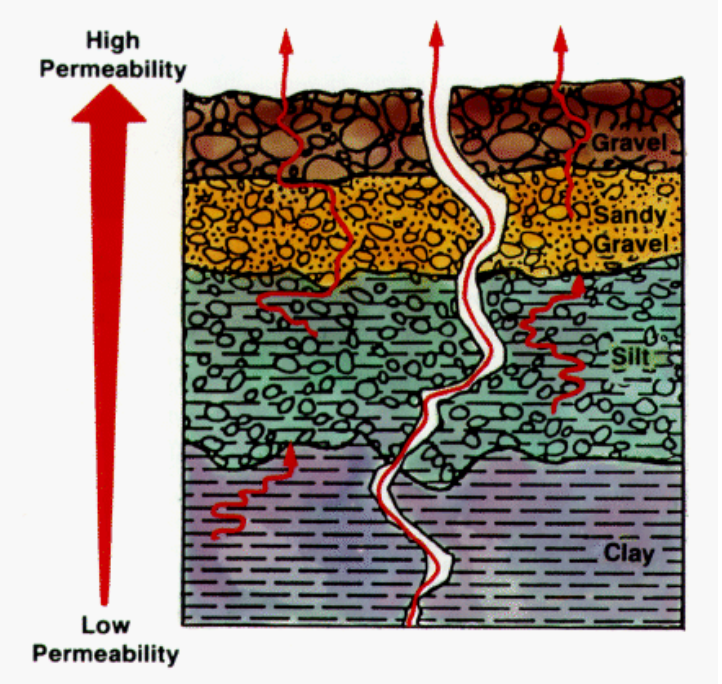
Για να καταφέρει ένα άτομο ραδονίου να διαφύγει από τους ορυκτούς κόκκους στο πορώδες του εδάφους, η διάσπαση πρέπει να συμβεί σε τέτοια απόσταση από τον πόρο που να μην ξεπερνάει την απόσταση που διανύει το ραδόνιο κατά την εκτίναξη του (εκτίναξη από την διάσπαση του ραδίου), και να εκτιναχθεί προς την διεύθυνση που το οδηγεί προς την επιφάνεια του κόκκου και όχι στο εσωτερικό του. Το εύρος της απόστασης αναπήδησης του ^{222}Rn είναι 20-70nm σε συνηθισμένα υλικά, 100nm σε νερό, και 63 μm στον αέρα (Tanner 1980). Το μέγεθος του κόκκου και το σχήμα είναι δύο σημαντικοί παράγοντες που ελέγχουν τον συντελεστή εκπομπής ραδονίου από το έδαφος, διότι εν μέρει καθορίζουν πόσο ουράνιο και ράδιο βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του κόκκου για να επιτρέψουν στο νεοσχηματισμένο ραδόνιο να διαφύγει προς τα πορώδη διαστήματα.

Η παρουσία κόκκων στους οποίους το ράδιο συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του εδάφους ή ορυκτού, αυξάνει την δύναμη της εκπομπής. Τα οξείδια μαγγανίου και σιδήρου, οι αλουμινοπυριτικοί άργιλοι, τα ανθρακικά άλατα είναι κοινά προϊόντα αποσάθρωσης του εδάφους που είναι σημαντικά για την δημιουργία του ραδονίου. Με την δημιουργία λεπτόκοκων στρωμάτων από χώμα ή κονίαμα (λόγω αποσάθρωσης) και με την απορρόφηση ή ανάμειξη με το ουράνιο και το ράδιο, ελέγχουν την διανομή ραδιονουκλεϊδίων στο έδαφος.

Η διήθηση και η πρόσχωση είναι οι χημικές και φυσικές διαδικασίες αντίστοιχα, με τις οποίες η ορυκτή ύλη και οι διαλυμένες ουσίες μετακινούνται προς τα κάτω διαμήκους του εδάφους και συγκεντρώνονται σε διακριτές ζώνες. Τα ραδιονουκλεϊδια μπορεί να αφαιρεθούν από ή να συγκεντρωθούν σε συγκεκριμένους

ορίζοντες του εδάφους από αυτές τις διαδικασίες, εξαρτώμενοι από το pH, το περιεχόμενο διαλελυμένο οξυγόνο, και την παρουσία και διαθεσιμότητα χουμικών και φουλβικών οξέων.

Μικροσκοπικά ρήγματα και ρωγμές, που ονομάζονται νανοπόροι, καθώς και ανοίγματα που έχουν δημιουργηθεί από φθορές στο έδαφος, παρέχουν πρόσθετα μονοπάτια στο ραδόνιο για να καταφέρει να διαφύγει από το έδαφος. Έτσι αυξάνεται ο συντελεστής εκπομπής. Αν το έδαφος ή ο ορυκτός κόκκος είναι γεμάτος με νανοπόρους, η συγκεκριμένη περιοχή επιφάνειας του κόκκου αυξάνεται σε τέτοιο μέγεθος έτσι ώστε ο συντελεστής εκπομπής του ραδονίου μπορεί να είναι μια ή δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ότι μπορεί να θεωρηθεί για την διαφυγή από την εξωτερική επιφάνεια του κόκκου μόνο (Rama and Moore,1984), συγκεκριμένα για κόκκους μεγέθους άμμου και μεγαλύτερους.



Εικόνα 8. Διαπερατότητα του εδάφους ανάλογα με το μέγεθος των πόρων (Πηγή: http://www.energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/page10.gif).

Η υγρασία του εδάφους είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το συντελεστή εκπομπής ραδονίου από το έδαφος. Η εδαφολογική υγρασία επηρεάζει άμεσα το κλίμα και την τοπογραφία, και ασκεί ισχυρό έλεγχο στο ποσοστό διάβρωσης και στις διαδικασίας ανάπτυξης, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τις φυσικές και χημικές διαδικασίες του εδάφους. Μια πιο άμεση επιρροή της υγρασίας του εδάφους στην εκπομπή ραδονίου είναι αυτή του λεπτού φιλμ από νερό, που περιβάλει του κόκκους του εδάφους και καθυστερεί τα άτομα του ραδονίου καθώς αυτά εκτινάσσονται από τον στερεό κόκκο, αυξάνοντας την πιθανότητα να μείνει μέσα στον πόρο από το να διασχίσει τον πόρο και να εγκλωβισθεί σε ένα διπλανό κόκκο. (Tanner 1980; Thamer et al. 1981). Σε εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα υγρασίας, μια σημαντική ποσότητα ραδονίου μπορεί να εγκλωβιστεί στην υγρή φάση μέσα στους πόρους του εδάφους (Washington and Rose 1990), με αποτέλεσμα λιγότερο ραδόνιο είναι διαθέσιμο στην αέρια φάση. Αυτό δεν έχει επιρροή στο συντελεστή εκπομπής, αλλά επηρεάζει σημαντικά τις συγκεντρώσεις ραδονίου που είναι στην αέρια φάση και μπορούν να ακολουθήσουν διαδικασίες μεταφοράς.

2.6. Χρήση του ραδονίου στην έρευνα.

Το ραδόνιο είναι ένα από τα πιο ευρέως ερευνημένα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία. Η έρευνα του ραδονίου κατευθύνεται τόσο στην μελέτη ατμοσφαιρικών διαδικασιών όσο και στην μελέτη γεωφυσικών διαδικασιών. Ακόμα ένα μεγάλο κομμάτι που αφορά την έρευνα του ραδονίου, αναφέρεται στην έρευνα των κινδύνων για την υγεία του ανθρώπου από την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων ραδονίου στον περιβάλλοντα αέρα. Παρακάτω γίνεται αναφορά στους κυριότερους τομείς έρευνας του ραδονίου, που είναι:

- Η χρήση του στην παρακολούθηση της κίνησης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (κάθετη ανάμειξη) βοηθώντας στην χρήση και αξιολόγηση υπολογιστικών μοντέλων.
- Σαν ιχνηθέτης της κίνησης και μεταφοράς ατμοσφαιρικών αέριων μαζών καθώς και στην έρευνα του τρόπου κυκλοφορίας των μουσώνων.
- Πρόβλεψη ηφαιστειακών σεισμών και χαρτογράφηση γεωλογικών ρηγμάτων.
- Και τέλος το κομμάτι της έρευνας που αφορά τους κινδύνους υγείας που υπάρχουν από μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου τόσο στους εσωτερικούς χώρους σπιτιών όσο και σε υπόγειους χώρους εργασίας (ορυχεία).

2.6.1. Παρακολούθηση διαδικασιών ανάμειξης και μεταφοράς.

Το ^{222}Rn έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ατμοσφαιρικών διαδικασιών μεταφοράς αέριων μαζών. Η χρήση αυτή του ραδονίου οφείλεται στα ελκυστικά χαρακτηριστικά του.

Σαν ευγενές αέριο και προϊόν της ραδιενεργής σειράς διάσπασης του ραδίου (^{226}Ra) το ραδόνιο υπάρχει στους περισσότερους τύπους πετρωμάτων, και εκπέμπεται από εδαφικές περιοχές που δεν είναι καλυμμένες με πάγο. Η ροή του ραδονίου από τις περιοχές αυτές συχνά θεωρείται σταθερή και έχει εύρος 0,72-1,2 atom $cm^{-2}s^{-1}$ (Turekian et al,1977; Lambert et al,1982). Αποκλείοντας τις περιοχές των πόλων η ροή πολύ συχνά θεωρείται να είναι 1 atom $cm^{-2}s^{-1}$ το οποίο είναι ακριβές εντός το 25% παγκοσμίως (Jacob et al,1997). Η ισχύς της πηγής ραδονίου σε εδαφικές περιοχές, που δεν είναι καλυμμένες με πάγο ή κορεσμένες, είναι τυπικά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις θαλάσσιες πηγές (Wilkening and Clements 1975).

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του ραδονίου είναι η ιδιότητα του ευγενούς αερίου. Σαν ευγενές αέριο δεν αντιδρά με άλλα χημικά στοιχεία και ο κυριότερος μηχανισμός μείωσης της συγκέντρωσης του είναι η ραδιενεργή σειρά διάσπασης. Επιπρόσθετα, επειδή είναι σχετικά αδιάλυτο στο νερό και δεν σχετίζεται με άλλα αερολύματα δεν επηρεάζεται από τις διαδικασίες υγρής εναπόθεσής (Jacob and Prather,1990; Kritz et al,1993; Li and Chang,1996; Giannakopoulos et al., 2000).

Αλλά θετικά στοιχεία του ραδονίου που βοηθάνε στην χρήση του σαν στοιχείο ανιχνευτής είναι ο χρόνος ημιζωής του (3,8 ημέρες) που είναι συγκρίσιμος με τους χρόνους ζωής μικρής διάρκειας ατμοσφαιρικών ρύπων (π.χ. NOx, SO_2, CO, O_3) (Vinod Kumar et al., 1999, Guadry et al., 1990) και του ατμοσφαιρικού χρόνου παραμονής του νερού και των αερολυμάτων.

Τα χαρακτηριστικά του ραδονίου το κάνουν έναν αξιόπιστο δείκτη της εκτεταμένης επαφής αέριων μαζών με το έδαφος και της μεταφοράς τους σε θαλάσσιες περιοχές.

Το ραδόνιο δεν σχετίζεται με αερολύματα και δεν ακολουθεί διαδικασίες ξηρής και υγρής εναπόθεσης. Οι περισσότεροι όμως από τους μη αέριους απογόνους του στην ατμόσφαιρα σχετίζονται με αερολύματα και σχηματίζουν ραδιενεργά αερολύματα. Η συμπεριφορά του ενσωματωμένου ραδιοϊσοτόπου στη συνέχεια καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την φυσική συμπεριφορά των αερολυμάτων. Οι διαδικασίες αφαίρεσης (υγρής και ξηρής εναπόθεσης) από την ατμόσφαιρα είναι η κύρια επιρροή στην ενεργή συγκέντρωση των μικρής ζωής απογόνων του ραδονίου.

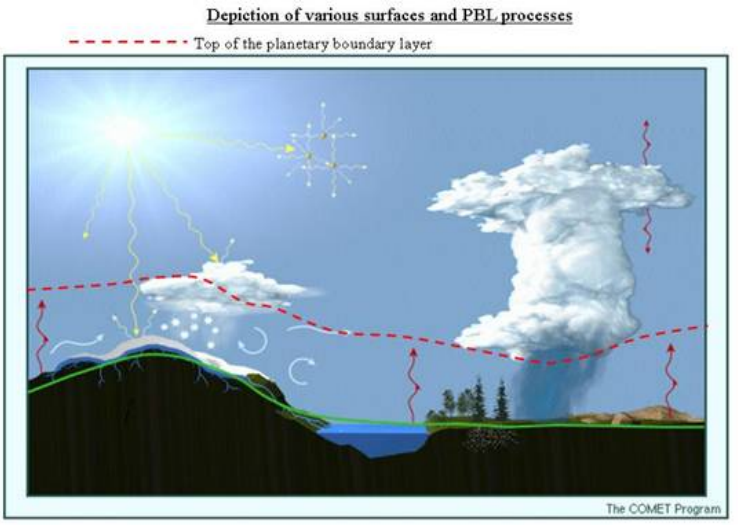
Εκτός όμως από την χρήση του σαν ανιχνευτής της μεταφοράς αέριων μαζών το ραδόνιο χρησιμοποιείται για να δείξει την σταθερότητα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Μελέτες των Moses et al, 1960 και John E. Pearson and Harry Moses, 1965 έδειξαν ότι η ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος επηρεάζει την μετρούμενη συγκέντρωση του ραδονίου. Διαδικασίες με έντονη ανάμειξη στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα δίνουν πάντα χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου λόγω διασκορπισμού του ραδονίου σε υψηλότερα στρώματα. Ενώ μια έντονη θερμοκρασιακή αναστροφή προσδίδοντας σταθερότητα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα θα δώσει υψηλότερες τιμές ραδονίου λόγω της εδαφικής εκπομπής ραδονίου και εγκλωβισμού του εκεί.

Λόγω της χρήσης του ως δείκτη μεταφοράς αέριων μαζών και της σταθερότητας του οριακού στρώματός θα γίνει μια μικρή αναφορά παρακάτω στις διαδικασίες που αναπτύσσονται στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Ακόμα θα αναφέρουμε τους βασικούς μηχανισμούς ανύψωσης αέριων μαζών από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα στην τροπόσφαιρα όπως ψυχρά μέτωπα (Littmann,1991), βαθιά κατακόρυφη μεταφορά ή ανωμεταφορά (deep convection) (Balkanski et al.,1992; Dibb et al.,1997).

2.6.1.1. Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

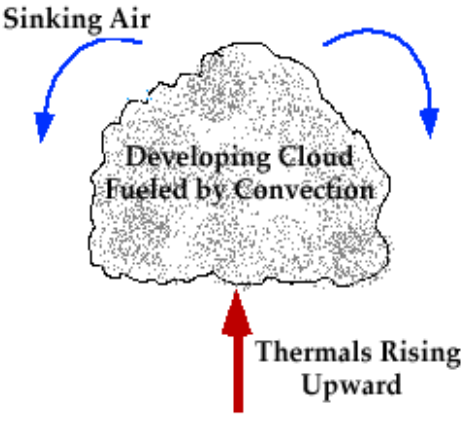
Ως ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα γενικά αναφέρεται το μέρος της ατμόσφαιρας όπου η επιρροή της επιφανειακής τριβής, της θέρμανσης και της ψύξης είναι αισθητή. Η μεταφορά ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του αέρα εν μέρει επιτυγχάνεται από τυρβώδεις στροβιλισμούς. Οι ατμοσφαιρικές τύρβες στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα παράγονται βασικά από δυνάμεις συναφείς με τον άνεμο και την άνωση. Η δύναμη του ανέμου κυρίως δημιουργείται από την επιφανειακή προστριβή, αλλά μπορεί να συμβεί και λόγω μέσης κλίμακας βαροκλινικών διαδικασιών όπως οι αύρες (αλλαγή ταχύτητας ανέμου). Η θέρμανση του εδάφους είναι η κύρια πηγή τυρβώδους κατακόρυφου τύπου μεταφοράς – ανωμεταφοράς. Η απώλεια θέρμανσης κατά την διάρκεια της νύχτας λόγω ψύξης του εδάφους και η σταθερά πλέον διαστρωματομένη ατμόσφαιρα τείνουν να εξουδετερώσουν την άνωση των αέριων μαζών.

Άλλες διαδικασίες που επηρεάζουν το επίπεδό της τυρβώδους κίνησης στην ατμόσφαιρα είναι η κίνηση των αέριων μαζών και η ενέργεια που καταναλώνεται από αυτές κατά την διάρκεια καταστάσεων μεταφοράς. Η κατανάλωση αυτή διευκολύνει την ανάπτυξη του οριακού στρώματος αργότερα από την εισχώρηση του ζεστού αέρα από την ελεύθερη ατμόσφαιρα μέσα στο ψυχρότερο στρώμα ανάμειξης.



Εικόνα 9. Απεικόνιση διάφορων επιφανειών και διαδικασιών του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Πηγή:http://www.esrl.noaa.gov/reseach/pbl).

Το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (h) είναι μια βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη δομή του (Gryning et al., 1987). Ανάλογα με τον επικρατών μηχανισμό ανάμειξης υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι που μπορούν να διακριθούν: α) ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα ανάμειξης με μεταγωγή θερμότητας (Convective boundary layer CBL), β) το ουδέτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και γ) το σταθερό οριακό στρώμα. Η κύρια πηγή, που δημιουργεί το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα ανάμειξης (CBL), είναι η υπερθέρμανση του εδάφους από τον ήλιο. Στις περιπτώσεις αυτές ο αέρας που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, θερμαινόμενος από αυτό διαστέλλεται και καθώς γίνεται λιγότερο πυκνός σε σχέση με το γειτονικό αέρα, αρχίζει σιγά σιγά να εγκαταλείπει το έδαφος. Το κενό, που δημιουργείται στη θέση των θερμών φυσαλίδων που ανέρχονται στην ατμόσφαιρα, καλύπτει λιγότερο θερμός αέρας από τις γειτονικές περιοχές έως ότου θερμανθεί και αυτός και αρχίσει νέα διαδικασία ανύψωσης.



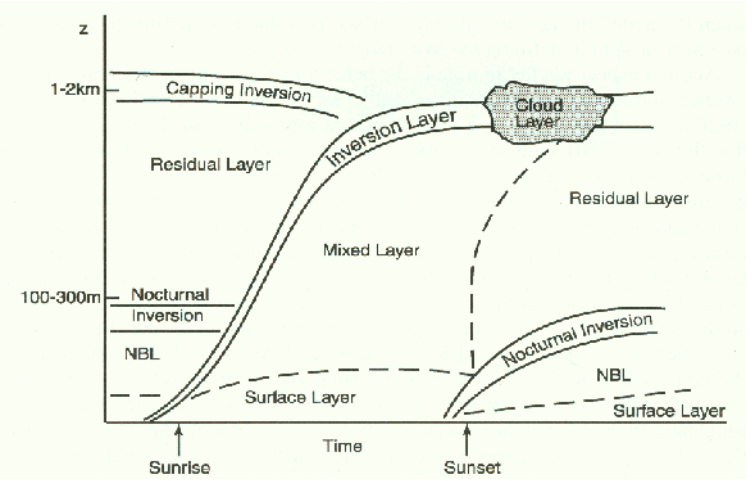
Εικόνα 10. Κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας (Πηγή:http://ww2010.atmos.uiuc.edu /(Gh)/wwhlpr/convection.rxml).

Οι μεγάλες φυσαλίδες του θερμού αέρα που ανεβαίνουν στα ανώτερα στρώματα είναι γνωστά ως θερμικά (Thermals). Το στρώμα ανάμειξης στην κάθετη του έκταση περιορίζεται από το στρώμα θερμοκρασιακής αναστροφής που υπάρχει στην επάνω

επιφάνεια του CBL. Το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος ακολουθεί την τυπική ημερήσια μεταβολή, έχει μικρό ύψος το πρωί και έχει την μέγιστη του τιμή αργά το απόγευμα.

Περαιτέρω το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Στην Ευρώπη το ύψος του στρώματος ανάμειξης αργά το απόγευμα είναι τυπικά ένα με δύο χιλιόμετρα.

Η χαρακτηριστική δομή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος χωρίζεται σε:



Εικόνα 11. Δομή του ατμοσφαιρικού οριακούς στρώματος. (Πηγή: Wyngaard, 1992)

1. **Επιφανειακό στρώμα.**

- Καλύπτει το 5-10% του CBL. Η θερμοκρασία, υγρασία και ορμή θεωρούνται να είναι περίπου σταθερά με το ύψος στο επιφανειακό στρώμα.

2. **Στρώμα Ανάμιξης (Mixed Layer)**

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στο στρώμα ανάμειξης είναι οι παρακάτω:

- Δημιουργία οργανωμένων αερίων μαζών (thermals) λόγω μεταφοράς θερμότητας από τα χαμηλότερα στα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα.
- updrafts (ανερχόμενες **θερμές** αέριες μάζες που ψύχονται), ελεύθερη μεταφορά (free convection).
- downdrafts (κατερχόμενες **ψυχρές** αέριες μάζες που θερμαίνονται), εξαναγκασμένη μεταφορά (forced convection).

Εξαιτίας της έντονης ανάμειξης το προφίλ των περισσότερων μετεωρολογικών παραμέτρων είναι σχεδόν σταθερό σε σχέση με το ύψος. Αυτό έχει αποδειχθεί να είναι χαρακτηριστικό για την λανθάνουσα θερμοκρασία, αλλά επίσης μια καλή προσέγγιση για την σχετική υγρασία, καθώς και για συγκεντρώσεις αερίων και αερολυμάτων.

3. **Η ζώνη εισόδου (entrainment zone)**

Η ζώνη εισόδου αποτελεί το σημείο όπου γίνεται μεταφορά μεταξύ του στρώματος ανάμειξης και της μόνιμα διαστρωματομένης ελαφρά αναμειγμένης

ελεύθερης ατμόσφαιρας. Αυτό το στρώμα είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του τυρβώδους στροβιλισμού και των θερμικών στην κορφή του στρώματος ανάμειξης με την διαστρωματομένη ελεύθερη ροή από επάνω. Η διείσδυση ενεργητικών θερμικών στο σταθερό στρώμα σε μεγαλύτερα ύψη έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο ξηρού και θερμού (απουσία σύννεφων) αέρα από την ελεύθερη τροπόσφαιρα πάνω από την ζώνη εισόδου. Η ζώνη εισόδου καταλαμβάνει το 20-40% του CBL αλλά μπορεί να είναι ακόμα βαθύτερη από ότι το στρώμα ανάμειξης ειδικά το πρωί όταν αυτό είναι ρηχό και αυξάνεται γρήγορα.

4. Εναπομένον Στρώμα (Residual Layer)

- Δημιουργείται 30΄ πριν τη δύση του ήλιου
- Ευρίσκεται μεταξύ σταθερού οριακού στρώματος και της κορυφής ΑΟΣ (entrainment zone)
- Ουδέτερα στρωματοποιημένο (ομοιόμορφη διάχυση ρύπων)

5. Σταθερό Οριακό Στρώμα (Stable Boundary Layer)

- Δημιουργείται κατά τη διάρκεια της νύχτας
- Ύπαρξη θερμών αερίων μαζών πάνω από ψυχρό έδαφος.

Από διάφορες προτάσεις στην βιβλιογραφία (Stull, 1988; Garrant, 1990) είναι εμφανές ότι ο πρακτικός προσδιορισμός του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος δεν είναι εύκολος. Ο πιο διαδεδομένος προσδιορισμός είναι όταν η βαθμωτή μεταβολή της θερμοκρασίας αναστρέφεται.

Κατά την διάρκεια μια τυπικής ημέρας η ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Seibert et al., 1998) είναι η εξής:

Όταν η βραδινή θερμοκρασιακή αναστροφή καταστρέφεται ένα ρηχό CBL σχηματίζεται κοντά στο έδαφος. Αναπτύσσεται βαθμιαία μέχρι η νυκτερινή αναστροφή να διαβρωθεί τελείως. Ακολουθείται από μια ραγδαία ανάπτυξη του CBL μέσα από το μικρό σταθερό εναπομένον στρώμα μέχρι το επίπεδο τερματισμού (capping inversion) της αναστροφής της προηγούμενης ημέρας. Στην συνέχεια το στρώμα ανάμειξης ελαττώνεται καθώς διεισδύει στη σταθερά διαστρωματομένη ελεύθερη τροπόσφαιρα. Σε αυτό το στάδιο μεγάλη κλίμακας κάθετες κινήσεις αέρα που μπορεί και να επιδρούν στις διαδικασίες διείσδυσης και προκαλούν την μείωση του στρώματος ανάμειξης, μπορεί να έχουν μια σημαντική επιρροή στην εξέλιξη του στρώματος ανάμειξης. Τελικά η θερμικά καθοδηγούμενη τυρβώδη και κάθετη ανάμειξη αποσυντίθενται και ακολουθούνται από το σχηματισμό ενός ρηχού και σταθερού στρώματος κοντά στο έδαφος, το οποίο μετατρέπει το CBL σε ένα υψωμένο εναπομένον στρώμα για την επόμενη ημέρα.

2.6.1.2. Κλάσεις ευστάθειας του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Ο αέρας στην ατμόσφαιρα βρίσκεται σε ευσταθή ισορροπία όταν σε περίπτωση που εξαναγκασθεί να ανυψωθεί ή να βυθιστεί τείνει να επιστρέψει στην αρχική του θέση, δηλαδή όταν αντιστέκεται στις ανοδικές ή καθοδικές κινήσεις. Αντίθετα ο αέρας βρίσκεται σε ασταθή ισορροπία όταν σε μια μικρή ώθηση απομακρύνεται πολύ

από την αρχική του θέση. Η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής όταν η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι μικρή. Κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι ο ρυθμός ροής με τον οποίο η θερμοκρασία ελαττώνεται με το ύψος. Κατά μέσο όρο 6,5 ^{o}C/km (ξηρή ατμόσφαιρά 10 ^{o}C/km και υγρή μικρότερο των 6,5 ^{o}C/km). Συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας δημιουργούν οι μηχανισμοί που θερμαίνουν τον αέρα στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιράς ή ψύχουν τον αέρα στα κατώτερα στρώματα. Ασταθής ατμόσφαιρα είναι όταν η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι μεγάλη. Οι μηχανισμοί αποσταθεροποίησης της ατμόσφαιρας που οδηγούν σε αύξηση της αστάθειας είναι αυτοί που ψύχουν τον αέρα στα ανώτερα στρώματα και/ή θερμαίνουν τον αέρα που βρίσκεται κοντά στο έδαφος.

Η ευρύτερα χρησιμοποιημένη απλή μέθοδος για να καθοριστεί η κατηγορία της ευστάθειας είναι η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Pasquill (Pasquill,1961) και ελαφρώς τροποποιήθηκε από τον Turner (Turner, 1967). Έτσι μετά από συστηματικές συσχετίσεις, που έχουν αναπτυχθεί κατά την διάρκεια μετεωρολογικών μετρήσεων ρουτίνας (ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα από το έδαφος, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, νέφωση) και μετρήσεων της κατάστασης ευστάθειας της ατμόσφαιρας έχει προταθεί από τον Pasquill ο παρακάτω πίνακας:

Οι καταστάσεις ευστάθειας σύμφωνα με τον πίνακα του Pasquill χωρίζονται σε εφτά κατηγορίες:

Κατηγορία A: Εξαιρετικά ευσταθής κατάσταση.
Κατηγορία B: Ενδιάμεσα ασταθής κατάσταση.
Κατηγορία C: Ελαφρά ασταθής κατάσταση.
Κατηγορία D: Ουδέτερη κατάσταση.
Κατηγορία E: Ελαφρά ευσταθής κατάσταση
Κατηγορία F: Ευσταθής κατάσταση.
Κατηγορία G: Πολύ ευσταθής κατάσταση ατμόσφαιρας.

Επιφανειακός άνεμος m/s	Ημερήσια ηλιοφάνεια			Νυχτερινές συνθήκες	
	Ισχυρή	Μέση	Ελαφρά	Ελαφρά νέφωση ή >4/8 χαμηλά νέφη	Νέφωση ≤3/8
<2	A	A-B	B	G	G
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Πίνακας 7. Μετεωρολογικές συνθήκες καθορισμού ευστάθειας κατά Pasquill (Πηγή: Gifford, 1976).

Οι κατηγόριες στην ουδέτερη κατάσταση είναι εφαρμόσιμες για βαριά νέφωση ημέρα και νύχτα. Σαν νέφωση ορίζεται το τμήμα εκείνο του ουρανού πάνω από τον τοπικό ορίζοντα που καλύπτεται από σύννεφα.

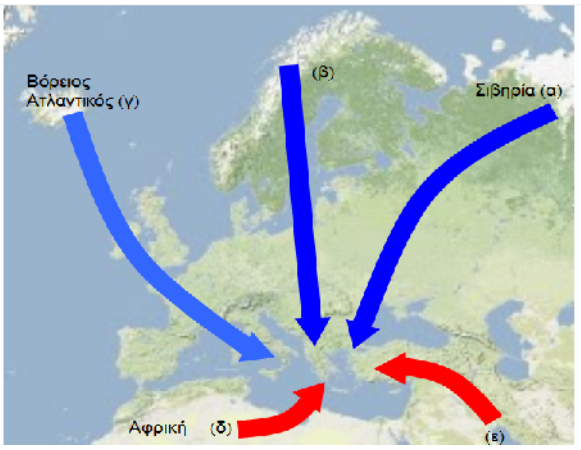
2.6.1.3. Αέριες μάζες.

Στην συνοπτική μετεωρολογία με τον όρο αέριες μάζες εννοούμε τεράστιες ποσότητες αέρα που καλύπτουν εκτάσεις πολλών χιλιάδων τετραγωνικών

χιλιομέτρων και έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά, δηλαδή θερμοκρασία και υγρασία. Οι αέριες μάζες καθώς απομακρύνονται από την πηγή τους υφίστανται αλλαγή στα αρχικά χαρακτηριστικά τους. Οι αλλαγές αυτές έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του νέου περιβάλλοντος στο οποίο φτάνουν.

Οι αέριες μάζες που επηρεάζουν την χώρα μας έχουν τις εξής προελεύσεις: α) πολικές ηπειρωτικές αέριες μάζες που μεταφέρονται από τη βόρεια ή βορειοανατολική Ευρώπη, και είναι πολύ ψυχρές, ξηρές και ευσταθείς, β) πολικές θαλάσσιες αέριες μάζες του βορειοανατολικού Ατλαντικού, που είναι σχετικά ψυχρές, υγρές και ασταθείς, αλλά τροποποιούνται σημαντικά, καθώς διασχίζουν την ηπειρωτική Ευρώπη και εισβάλουν στην Μεσόγειο, γ) θερμές και ξηρές αέριες μάζες που μεταφέρονται από τη βόρεια Αφρική και σπανιότερα από τη μέση Ανατολή (Ιράκ, Συρία Πακιστάν).

Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους οι μεσογειακές αέριες μάζες είναι θερμές, υγρές και κατά κανόνα ασταθείς και μεταφέρονται προς την περιοχή μας από το νότιο ρεύμα που επικρατεί μπροστά από υφέσεις. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, που δεν παρατηρείται υφεσιακή δραστηριότητα στην περιοχή, ο ρόλος της Μεσογείου εξαντλείται στην περιορισμένης κλίμακας τροποποίηση των τροπικών ηπειρωτικών αέριων μαζών που μεταφέρονται από τη βόρεια Αφρική. Οι θερμοδυναμικές διαδικασιες που συνήθως λαμβάνουν χώρα όταν σαχαριανές αέριες μάζες μεταφερθούν πάνω από την Ελλάδα, θερμαίνουν και ξηραίνουν τον αέρα που φθάνει στην επιφάνεια.



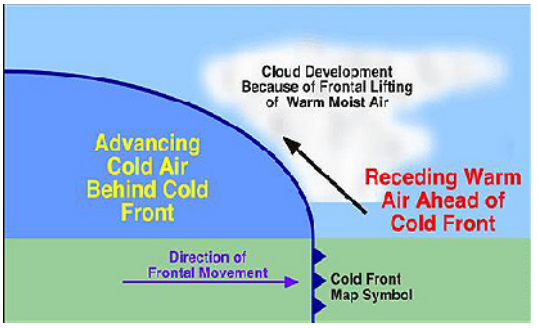
Εικόνα 12. Οι αέριες μάζες που επηρεάζουν την Ελλάδα (Ζιακόπουλος Δ. 2008).

Στην Ελλάδα, την χειμερινή περίοδο του έτους παρατηρούνται έντονες κακοκαιρίες με τη σύγκλιση πάνω από την περιοχή μας ψυχρών και ξηρών πολικών αέριων μαζών με θερμές και υγρές μεσογειακές αέριες μάζες. (Πηγή: Βιβλίο «Καιρός» Δ.Ζιακόπουλος, 2008).

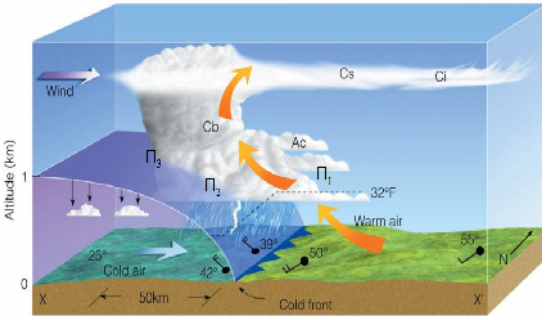
2.6.1.4. Ψυχρό μέτωπο.

Το ψυχρό μέτωπο είναι μια μετακινούμενη ζώνη, κατά μήκος της οποίας ψυχρός, ξηρός και ευσταθής αέρας εκτοπίζει θερμό, υγρό και ασταθή αέρα. Το ψυχρό μέτωπο παριστάνεται με συνεχή μπλε γραμμή, στην οποία υπάρχουν μπλε τρίγωνα που κατευθύνονται προς το θερμό αέρα, προς τον οποίο κινείται το μέτωπο. Οι μετεωρολόγοι χαράσσουν ένα ψυχρό μέτωπο έχοντας υπ’ όψιν:

- Απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας σε μικρή απόσταση.
- Μεταβολές στην υγρασία του αέρα που φαίνονται από τις μεταβολές του σημείου δρόσου
- Απότομες μεταβολές της διεύθυνσης του ανέμου
- Την ατμοσφαιρική πίεση και κυρίως τις μεταβολές της (βαρομετρική τάση)
- Την καιρικότητα (ύπαρξη νεφών και υετού).



Εικόνα 13. Σχηματική απεικόνιση ψυχρού μετώπου (Πηγή:http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect14/Sect14_1c.html).



Εικόνα 14. Κατακόρυφη δομή ψυχρού μετώπου (Πηγή: http://www.grossmont.edu/scotttherkalsen/physical/lectureresources /lectures.htm).

Μετεωρολογική παράμετρος	Πριν το πέρασμα το μετώπου (Π1)	Την ώρα που περνά το μέτωπο (Π2)	Μετά το πέρασμα του μετώπου (Π3)
Άνεμοι	Ν-ΝΔ	Ριπαίοι, στρεφόμενοι σε Δ-ΒΔ	Β-ΒΔ
Θερμοκρασία	Σχετικά Υψηλή	Απότομη πτώση	Σταθερή πτώση
Ατμοσφαιρική πίεση	Σταθερή πτώση	Απότομη άνοδος	Σταθερή άνοδος
Σύννεφα	Ci, Cs, Cu, Cb	Cu, Cb	Λίγα Cu ή ανέφελος ουρανός
Υετός	Σύντομοι όμβροι	Ισχυροί όμβροι βροχής ή χιονιού, καταιγίδες	Παύση υετού

Πίνακας 8. Μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων που προκαλούνται από το πέρασμα ενός ψυχρού μετώπου. Τα σημεία Π1, Π2, και Π3, που είναι αποτυπωμένα και στην εικόνα 14 αντιπροσωπεύουν περιοχές που βρίσκονται μπροστά από το μέτωπο, πάνω στο μέτωπο και πίσω από το μέτωπο αντίστοιχα. (Πηγή: Βιβλίο «Καιρός» Δ. Ζιακόπουλος, 2008).

2.6.2. Αξιολόγηση μοντέλων με την χρήση του ραδονίου (^{222}Rn)

Η επιρροή της ατμοσφαιρικής χημείας στις κλιματολογικές αλλαγές είναι ένας τομέας με μεγάλο ενδιαφέρων τα τελευταία χρόνια. Πολλά μοντέλα τόσο μεταφοράς και χημείας (CTMs) όσο και γενικής κυκλοφορίας (GCMs) έχουν εφαρμοστεί για να ερευνήσουν αυτό το γεγονός.

Το αντίκτυπο των αέριων εκπομπών στην τοπική και παγκόσμια τροποσφαιρική χημεία εξαρτάται σημαντικά από την μεταφορά των αερίων και των προϊόντων τους από το ηπειρωτικό οριακό στρώμα στην ελεύθερη τροπόσφαιρα και την μεταφορά τους σε απομακρυσμένες περιοχές.

Οι πιο σημαντικές διαδικασίες μεταφοράς που πρέπει να συμπεριληφθούν σε ένα μοντέλο είναι η μεγάλης κλίμακας μεταφορά αέριων μαζών, η μεταγωγή θερμότητας μέσω σωρειτών σύννεφων και η κάθετη διάχυση. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών για παγκόσμιας και τοπικής κλίμακας μοντέλα έχει αφιερωθεί στην προσομοίωση του ^{222}Rn. Η ορθότητα της προσομοίωσης της μεταφοράς αέριων μαζών και της χημείας είναι ένα σημαντικό κομμάτι για την αξιολόγηση μεγάλης κλίμακας μοντέλων.

Η προσομοίωση της μεταφοράς ^{222}Rn μέσω παγκόσμιας και τοπικής κλίμακας μοντέλων είναι ένα από τους καλύτερους διαθέσιμους τρόπους για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των προσομοιώσεων της μεταφοράς αέριας ρύπανσης από ηπείρους σε απομακρυσμένες περιοχές.

Η δουλειά των Genthon και Armengaud (1995) ήταν η πρώτη στην βιβλιογραφία που χρησιμοποίησε το ραδόνιο για να δοκιμαστούν και να συγκριθούν οι διαδικασίες μεταφοράς ανιχνευτών σε ένα GCMs. Οι προσομοιώσεις ραδονίου έχουν χρησιμοποιηθεί έκτοτε για διάφορους σκοπούς σε μελέτες αξιολόγησης όπως:

i. Την ανάπτυξη σχεδίων των υποπλεγμάτων ανάμειξης (Subgrid mixing schemes) (Brost and Chatfield, 1989; Jacob and Prather, 1990; Fiechter and Crutzen, 1990; Rind and Lerner, 1996; Allen et al, 1996)
ii. Την δοκιμή αριθμητικών σχεδίων μεταφοράς αέριων μαζών (Petersen et al, 1998).
iii. Για την σύγκριση διαφορετικών μοντέλων (Jacob et al, 1997; Raschet al, 2000)
iv. Ή για την σύγκριση διαφορετικών σετ μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου στο μοντέλο (Manowald et al, 1997; Olive et al, 2004).

2.6.3.Χαρτογράφηση ρηγμάτων και πρόγνωση σεισμών χρησιμοποιώντας το ραδόνιο.

Η γήινη προέλευση του ραδονίου σε συνδυασμό με την μικρή ημιπερίοδο ζωής και την ιδιότητα του ως ευγενές αέριο κάνουν το ραδόνιο ένα από τα πλέον κατάλληλα αέρια ως δείκτη διεργασιών. Η χρήση του και η συσχέτιση της συγκέντρωσης του με το δυναμισμό που υπάρχει σε ενεργές τεκτονικές και ηφαιστειακές περιοχές έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. (Connor et al., 1996, Segovia et al., 1997, 1999, 2003, Monnin and Seidel, 1997, Wattananikorn, et al., 1998; Walia et al., 2003; Planinie et al., 2004, Yasuoka et. al., 2005, Imme et al., 2006, C. Papastefanou et al., 2001).

Το ραδόνιο κατά την παραγωγή του δεσμεύεται από την στερεά μάζα αν δεν βρει τρόπο διαφυγής στη ατμόσφαιρα. Κατά την διάρκεια κίνησης των πλακών και δημιουργίας ρηγματώσεων δηλ. ρήξη της στερεάς μάζας αυτό καταφέρνει να διαφύγει πιο αποτελεσματικά προς την ατμόσφαιρα αυξάνοντας την συγκέντρωση του. Οι διαδικασίες αυτές γίνονται σε διάφορες φάσεις εκδήλωσης από αρκετούς μήνες πριν το σεισμικό γεγονός, μέχρι μερικές μέρες μετά την εκδήλωση του σεισμικού ρήγματος. Ακόμα κατά την διάρκεια ηφαιστειακής επαναδραστηριοποίησης, αυξάνεται η έκκληση ραδονίου τόσο λόγω θραύσης των πετρωμάτων όσο και λόγω μεταφοράς ραδονίου στην επιφάνεια μαζί με την αυξημένη ροή CO_2. Είναι λοιπόν εμφανές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σαν προάγγελος για την πρόγνωση σεισμών όσο και για την χαρτογράφηση θαμμένων ρηγμάτων.

Από πολύ παλιά υπήρχαν αποδείξεις της συσχέτισης του ραδονίου με τους σεισμούς, όταν βρέθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στο μεταλλικό νερό στην λεκάνη του ποταμού στο Tashkent (Ουζμπεκιστάν) πριν από τον καταστροφικό σεισμό του 1966 (Ulamov and Mavasher, 1967).

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για την διερεύνηση του ραδονίου τόσο σαν πρόδρομο σεισμών, όσο για την συσχέτιση του με περιοχές με έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Ωστόσο, στην χρήση του ραδονίου σαν προδρόμου ενός σεισμού, πρέπει να ληφθούν υπ’ όψιν και οι αλλαγές στην συγκέντρωση του και από την

αλλαγή μετεωρολογικών παραμέτρων όπως η βροχόπτωση, υγρασία εδάφους, θερμοκρασία εδάφους και ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι για να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα το ραδόνιο σαν πρόδρομος ενός σεισμού θα πρέπει να διαφοροποιήσουμε τις περιπτώσεις όπου η αύξηση του ραδονίου οφείλεται σε έναν επικείμενο σεισμό ή στην αλλαγή μετεωρολογικών παραμέτρων.

2.6.4. Επίδραση του ραδονίου στην ανθρώπινη υγεία.

Η φυσική ραδιενέργεια ήταν πάντα ένα μέρος του ανθρώπινου περιβάλλοντος. Όλοι οι ανθρώπινοι οργανισμοί καθημερινά εκτίθενται σε ιονίζουσα ακτινοβολία. Οι κυριότερες πηγές προέλευσης είναι: η κοσμική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το απώτερο σύμπαν και την επιφάνεια του ήλιου, οι ραδιενεργοί πυρήνες που προέρχονται από το στερεό φλοιό της γης και τέλος φυσικές ραδιενεργές ουσίες οι οποίες εμπεριέχονται στο φαγητό το νερό και τον αέρα που αναπνέουμε.

Εκτός όμως από τις φυσικές ραδιενεργές πηγές στις οποίες εκτίθεται ο άνθρωπος, υπάρχουν περιπτώσεις έκθεσης όπου η ακτινοβολία οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες. Οι κυριότερες από αυτές τις περιπτώσεις έχουν συνδεθεί με τον χώρο εργασίας των ανθρώπων. Η χρήση ραδιενεργών υλικών στην βιομηχανία, γεωργία, η χρήση ακτινοβολίας στην ιατρική (διαγνωστική ραδιολογία, ραδιοθεραπεία κλπ.), η δοκιμές πυρηνικών όπλων είναι μερικές από τις ανθρωπογενείς περιπτώσεις έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ακτινοβολία που δέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός ποικίλει και εξαρτάται από την θέση, για παράδειγμα κοσμική ακτινοβολία είναι πιο έντονη σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, από την συγκέντρωση ουρανίου και θορίου, καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο που βρίσκεται το άτομο (π.χ. χώρος εργασίας). Παρακάτω δίνονται οι πίνακες της ετήσιας δόσης που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος του πλανήτη σε mSv.

Η βασική ποσότητα που χρησιμοποιείται για να εκφράσουμε την έκθεση του ανθρώπινου σώματος σε ακτινοβολία είναι η δόση απορρόφησης για την οποία η μονάδα μέτρησης είναι το Gray (Gy). Ωστόσο οι βιολογικές επιρροές ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης ποικίλουν με τον τύπο ακτινοβολίας και το μέρος του σώματος που εκτίθενται. Για να λάβουμε υπ’ όψιν αυτές τις αποκλίσεις, μια σταθμισμένη ποσότητα που ονομάζεται δραστική δόση χρησιμοποιείται και η μονάδα μέτρησης της είναι το Sievert (Sv).

Πηγή	Παγκόσμια μέση ετήσια δραστική δόση (mSv)
Εξωτερική έκθεση	
Κοσμική ακτινοβολία	0,4
Ακτίνες γ από το έδαφος	0,5
Εσωτερική ακτινοβολία	
Εισπνοή (κυρίως ραδόνιο)	1,2
Απορρόφηση (φαγητό, νερό)	0,3
Συνολικά	**2,4**

Πίνακας 9. Μέση δόση ακτινοβολίας από φυσικές πηγές. (Πηγή: United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation 2000).

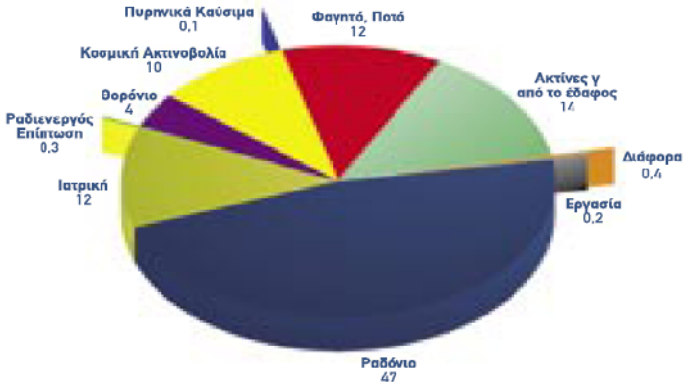
Επίπεδο περίθαλψης	Πληθυσμός ανά γιατρό	Ετήσιος αριθμός εξετάσεων ανά 1.000 πληθυσμό	Μέση ετήσια δραστική δόση προς τον πληθυσμό (mSv)
I	<1.000	920	1,2
II	1.000-3.000	150	0,14
III	3.000-10.000	20	0,02
IV	>10.0000	<20	<0,02
Παγκόσμιος μέσος		**330**	**0,4**

Πίνακας 10. Έκθεση σε ακτινοβολία από διαγνωστικές ιατρικές εξετάσεις με ακτίνες γ ή χ. (Πηγή: United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation 2000).

Πηγή / εφαρμογή	Αριθμός παρακολουθούμενων εργαζόμενων (χιλιάδες)	Μέση ετήσια δραστική δόση (mSv)
Ανθρώπινης προέλευσης πηγές		
Πυρηνικά καύσιμα (μαζί με την εξόρυξη ουρανίου)	800	1,8
Βιομηχανικές χρήσεις της ακτινοβολίας	700	0,5
Δραστηριότητες άμυνας	420	0,2
Ιατρικές χρήσεις της ακτινοβολίας	2320	0,3
Εκπαίδευση / κτηνιατρική	360	0,1
Συνολική ποσότητα από ανθρώπινης προέλευσης πηγές.	**4600**	**0,6**
Αυξημένη ακτινοβολία από φυσικές πηγές		
Ταξίδια αεροπορικά (πλήρωμα)	250	3,0
Εξόρυξη ορυχεία (εκτός κάρβουνο)	760	2,7
Εξόρυξη κάρβουνου	3910	0,7
Επεξεργασία μεταλλευμάτων	300	1,0
Εργασιακούς χώρους κάτω από το έδαφος	1250	4,8
Συνολική ποσότητα από αυξημένη ακτινοβολία από φυσικές πηγές	6500	1,8

Πίνακας 11. Έκθεση σε ακτινοβολία σε επαγγελματικούς χώρους. (Πηγή: United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation 2000).

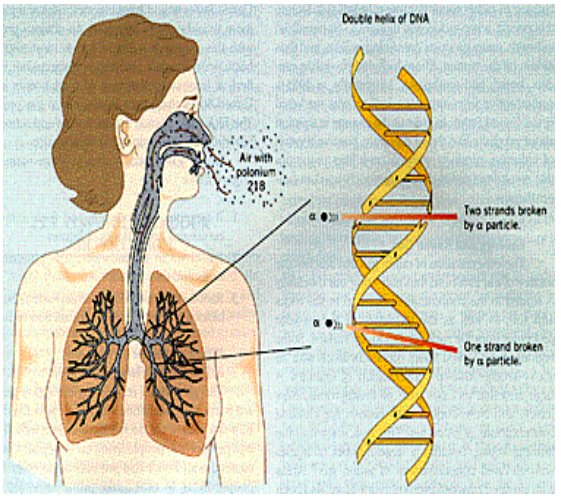
Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέραμε παραπάνω περίπου το 47% της ετήσιας δόσης που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος του πλανήτη οφείλεται στο ραδόνιο και στα επίσης ραδιενεργά παράγωγα του.



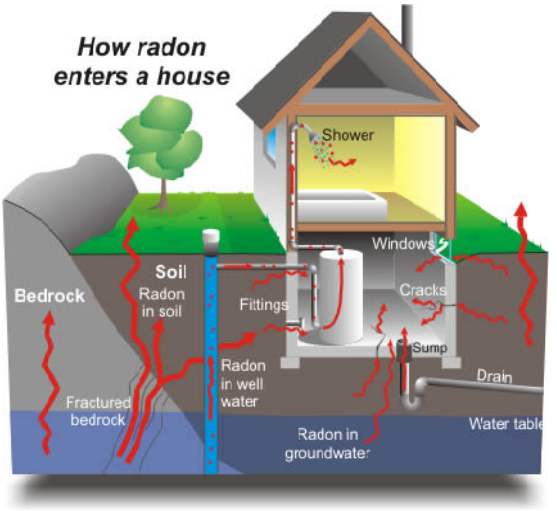
Εικόνα 15. Διάγραμμα ποσοστιαίας κατανομής την ετήσιας δόσης ακτινοβολία που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος του πλανήτη. (Πηγή: United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation 2000).

Τα ισότοπα του ραδονίου ^{222}Rn και ^{220}Rn προέρχονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω από το ^{238}U και ^{232}Th. Από αυτά το ^{220}Rn παρόλο που βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες στην φύση δεν επηρεάζει τόσο την ανθρώπινη υγεία λόγω του μικρότερου χρόνου ημιζωής που δεν το αφήνει να διαφύγει από το έδαφος.

Το ^{222}Rn είναι αυτό που η συγκέντρωση του επηρεάζει την ανθρωπινή υγεία, αυτό εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό με την διαδικασία της εισπνοής **(Εικόνα 16)**. Επειδή το ραδόνιο είναι χημικά αδρανές και ο χρόνος ημιζωής του είναι σχετικά μεγάλος, συγκρινόμενος με το χρόνο της αναπνοής, μόνο ένα μικρό ποσοστό από το εισπνεόμενο ραδόνιο προλαβαίνει να διασπαστεί μέσα στους πνεύμονες. Όταν όμως το ραδόνιο διασπάται σχηματίζει ραδιενεργά στοιχεία (βαριά μέταλλα) ^{218}Po και ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν ηλεκτροστατικά με πολύ μικρά σωματίδια σκόνης, με νερό στην μορφή ατμού, ίχνη αερίων και άλλες στερεές επιφάνειες. Αυτά τα αερολύματα μπορούν εύκολα να εισπνευθούν και να προσαρτηθούν στο βρογχικό επιθήλιο, και να παράγουν υπερβολική τοπική δόση ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή είναι πυκνά ιονισμένη μεγάλα (LET: linear energy transfer) και μπορεί να επηρεάσει το DNA των κυττάρων προκαλώντας βλάβες στις ευαίσθητες κυψελίδες του πνεύμονα αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου. Μελέτες που εκπονήθηκαν σε χιλιάδες εργαζομένους σε ορυχεία ουρανίου σε διάφορες χώρες στηρίζουν αυτό το γεγονός.



Εικόνα 16. Απόθεση πολωνίου 218 στους πνεύμονες. Τα α σωματίδια (ακτινοβολία) σπάνε το ένα ή και της δύο αλυσίδες του DNA στο κύτταρο (Πηγή: http://enhs.umn.edu/hazards/hazardssite/radon/radonmolaction.html).



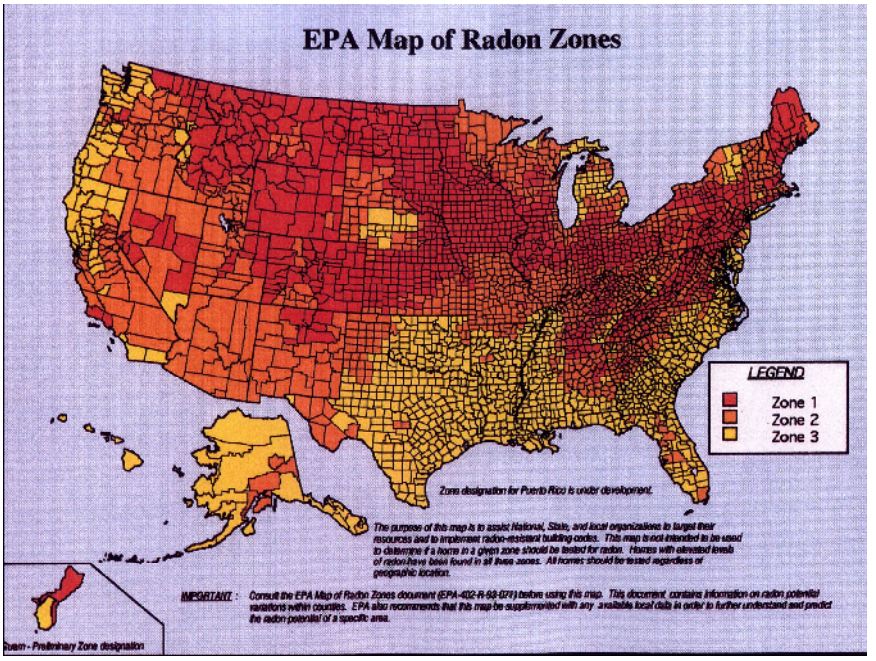
Εικόνα 17. Τρόποι εισόδου του ραδονίου στο εσωτερικό του σπιτιού. (Πηγή: http://www.radon-services.com/diagrams/how_radon_enters.htm).

Έχει εκτιμηθεί ότι το ραδόνιο στα σπίτια, αποτελεί περισσότερο από το 50% της ισοδύναμης δόσης που λαμβάνεται από το γενικό πληθυσμό, από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβολίας, και την ανθρώπινης προέλευσης ακτινοβολία. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση της συγκέντρωσης του ραδονίου στον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου είναι: ο ρυθμός εκροής ραδονίου από το έδαφος, το είδος θεμελίωσης της οικοδομής, το ύψος της κατοικίας, η εκροή του ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά, ο εξαερισμός και η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό του κτιρίου και το εξωτερικό περιβάλλον.

Η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ (NAS) στην έκθεση: «Τα αποτελέσματα στην υγεία λόγω της έκθεσης σε ραδόνιο είναι η δεύτερη αιτία

ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα. Στην έκθεση αυτή εκτιμάται ότι στις ΗΠΑ 15.000 θάνατοι το χρόνο έχουν κύρια αιτία τον καρκίνο του πνεύμονα από το ραδόνιο. Σύμφωνα με την ίδια έκθεση, οι εργαζόμενοι καπνιστές που εκτίθενται σε ραδόνιο στο χώρο εργασίας τους έχουν 10 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα σε σχέση με τους μη καπνιστές. Λόγω των βιολογικών επιπτώσεων του, το ραδόνιο θεωρείται ισχυρός καρκινογόνος παράγων και κατατάσσεται στην κορυφή της αντίστοιχης κατηγορίας σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Υγείας (WHO / IARC 1988).

Η Υπηρεσία Προστασία Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. κατευθύνθηκε από τον IARC 1988 να φτιάξει λίστες και να αναγνωρίσει περιοχές τον Η.Π.Α με την πιθανότητα μεγάλων επιπέδων ραδόνιου στους εσωτερικούς χώρους. Ο χάρτης δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας διάφορους παράγοντες όπως: μετρήσεις ραδονίου στο εσωτερικό των σπιτιών, την γεωλογία εδάφους, την εναέρια ραδιενέργεια, την διαπερατότητα του εδάφους, και το είδος της θεμελίωσης των σπιτιών. Οι χάρτες αυτοί έχουν βασικό σκοπό να ενημερώσουν τους εθνικούς, κρατικούς, και τοπικούς οργανισμούς για τις πηγές ραδονίου και να βρουν τους κωδικούς αντίστασης ραδονίου για τα κτήρια.



Εικόνα 18. Χάρτης ζωνών ραδονίου των Η.Π.Α. (Πηγή: http://www.nationalsafety.biz/radon/EPA_Map_of_Radon_Zones.htm).

Κεφάλαιο 3. Εποχιακή και ημερήσια διακύμανση ραδονίου - Ανάλυση δεδομένων.

3.1. Εισαγωγή.

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από το σταθμό της Φινοκαλιάς στην περιοχή του Λασιθίου για τις χρονιές 2002-2006. Αφορά τα δεδομένα ^{222}Rn, O_3, μετεωρολογικούς παράγοντες (θερμοκρασία σχετική υγρασία διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου) λεπτά και αδρά σωματίδια. Παρακάτω δίνονται στοιχεία για τα όργανα και τις αρχές λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2. Όργανα ανάλυσης:

Αναλυτής ραδονίου:

Για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται ένα ανιχνευτής σωματιδίων άλφα **(Εικόνα 19)**. Ο ανιχνευτής άλφα σωματιδίων λειτουργεί με βάση την ευαισθησία στην ανίχνευση της ενέργειας που έχει η ακτινοβολία άλφα. Μέσα σε ένα σκουρόχρωμο θάλαμο είναι τοποθετημένη μια συστοιχία φωτοδιόδων. Στο θάλαμο εισέρχεται περιβάλλον αέρας, ο οποίος φιλτράρεται στην είσοδο για να αποφευχθεί η είσοδος προϊόντων των απογόνων του ραδονίου. Η κινητική του σωματιδίου όταν ανιχνευθεί από την δίοδο (αλληλεπιδράσει με τα υλικά της διόδου) δημιουργεί ελευθέρα ηλεκτρόνια που είναι ανάλογα της κινητικότητας του. Το ρεύμα ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε τάση σε ένα προενισχυτή που είναι συνδεδεμένος με τον ανιχνευτή. Οι μετρήσεις του ραδονίου είναι δίωρες και οι μονάδες μέτρησης pCi/m^3.

Εικόνα 19. Αναλυτής ραδονίου στο σταθμό της Φινοκαλιάς

(Πηγή: http://finokalia.chemistry.uoc.gr/).

Αναλυτής τροποσφαιρικού όζοντος (O_3):

Τα δεδομένα όζοντος που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν στο σταθμό της Φινοκαλιάς την χρονική περίοδο 2002-2006. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον αναλυτή Thermo electron model 49C **(Εικόνα 20).** Η

καταγραφή δεδομένων από το όργανο είναι 5 min και οι μονάδες μέτρησης είναι ppb_v.

Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην απορρόφηση του όζοντος στα 254 nm. Ο βαθμός με τον οποίο απορροφάει την UV ακτινοβολία εξαρτάται από τη συγκέντρωση του όζοντος στο δείγμα, σύμφωνα με τον νόμο των Beer-Lambert:

$$\frac{I}{I_o} = e^{-KLC} \quad \text{(Εξ.1)}$$

Όπου:	K: ο μοριακός συντελεστή απορρόφησης του όζοντος	308cm-^{1}, στους 0^{o}C, 1atm
	L: μήκος κελιού	
	C: συγκέντρωση όζοντος σε ppm,	
	I: η ένταση της ακτινοβολία όταν περνά δείγμα αέρα με όζον (sample gas)	
	I_o: η ένταση της ακτινοβολία όταν περνά αέρας χωρίς όζον (reference gas)	

Εικόνα 20. Αναλυτής Thermo electron model 49C, για την μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος στην Φινοκαλιά (http://finokalia.chemistry.uoc.gr/).

Ανιχνευτής σωματιδίων PM_{10}.

Οι μετρήσεις των PM_{10} έγιναν με το Eberline FH 62I-R (Eberline Instruments Gmbh) όργανο παρακολούθησης σωματιδίων, το οποίο έχει σχεδιαστεί να μετράει την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στον περιβάλλον αέρα βασισμένο στην εξασθένηση β (β-attenuation) (Gerasopoulos et al., 2006).

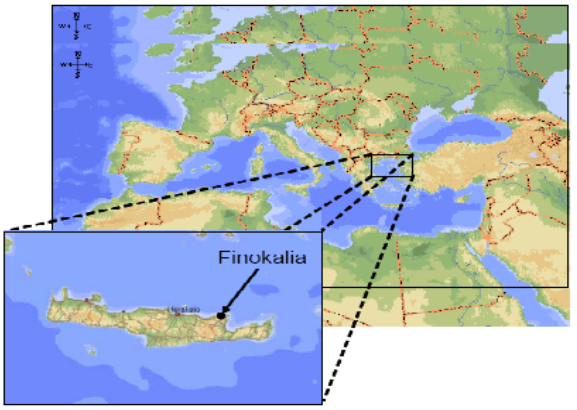
Αναλυτές αδρών και λεπτών σωματιδίων.

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από το σταθμό της Φινοκαλιά αναλύθηκαν με την βοήθεια της ιοντικής χρωματογραφίας (IC) για τον καθορισμός της συγκέντρωσης των ανιόντων (Cl^-, Br^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, $C_2O_4^{2-}$, MS^-) και των κατιόντων (Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}). Τα στοιχεία (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS). Φίλτρα χαλαζία αναλύθηκαν για τον οργανικό και στοιχειακό άνθρακα (OC και EC) με την οπτική – θερμική μέθοδο εκπομπής (thermal-optical transmission method), χρησιμοποιώντας ένα αναλυτή άνθρακα που αναπτύχθηκε από το Sunset Labroratory Inc. Oregon (E. Koulouri et al., 2008).

3.3. Ανάλυση δεδομένων.

Η διερεύνηση βασίσθηκε σε μετρήσεις του ραδονίου, του όζοντος και των μετεωρολογικών παραγόντων από το σταθμό στην περιοχή της Φινοκαλιάς Λασιθίου. Όλοι οι μετεωρολογικοί παράμετροι και το όζον, είναι διαθέσιμες με χρονική

ανάλυση 5 λεπτών, ενώ το ραδόνιο καταγράφεται σε δίωρη βάση. Για το λόγο αυτό μέσοι όροι υπολογίσθηκαν για την αναγωγή όλων των μετρήσεων σε δίωρη βάση. Συνεπώς όλοι οι ημερήσιοι κύκλοι έχουν δίωρη μεταβολή συγκεντρώσεων. Στην συνέχεια ημερήσιοι μέσοι όροι υπολογίστηκαν και μηνιαίοι για την διερεύνηση της συσχέτισης της μεταβολής του ραδονίου με μετεωρολογικούς παράγοντες. Ακόμα ρετροπορείες πέντε ημερών (five day back trajectories) των αέριων μαζών υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου HYSPLIT του NOAA (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory).



Εικόνα 21. Τοποθεσία του μετεωρολογικού σταθμού στην περιοχή Φινοκαλιάς Λασιθίου.

Οι μονάδες μέτρησης είναι pCi/m^3 για το ραδόνιο, ppb_v για το όζον, ^oC για την θερμοκρασία, % για την σχετική υγρασία, m/s για την ταχύτητα ανέμου. Ο χρόνος αναφοράς για όλες της μετρήσεις είναι ο συγχρονισμένος παγκόσμιος χρόνος συν δύο ώρες (UTC+2 Coordinated Universal Time). Μέσω του προγράμματος HYSPLIT υπολογίσθηκαν οι γωνίες διεύθυνσης του ανέμου, το μέγιστο ύψος που απέκτησε η αέρια μάζα πριν φτάσει στο σταθμό, και η μέγιστη γωνία σε μοίρες που μας δίνει μια εικόνα πόσο μακρινή είναι η προέλευση, για μέση διέλευση 3ημέρου.

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας αναφοράς των περιόδων της δειγματοληψίας καθώς και σχετικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν.

Παράμετρος	Περίοδος	Σχετικός μηχανισμός/ πηγή
^{222}Rn	01/07/01-31/12/06	Μεταφορά (οριζόντια), εδαφική εκπομπή.
O_3	01/01/01-31/12/06	Φωτοχημική παραγωγή, Μεταφορά από την ελεύθερη τροπόσφαιρα σε χαμηλότερα ύψη.
Σχετική υγρασία	21/07/01-31/12/06	Μετεωρολογία
Ταχύτητα ανέμου	21/07/01-31/12/06	Μετεωρολογία
Διεύθυνση ανέμου	01/01/02-31/12/06	Μετεωρολογία
Ηλιακή ακτινοβ.	21/07/01-31/12/06	Μετεωρολογία

Πίνακας 12. Περίοδος μετρήσεων των παραμέτρων με τον σχετικό μηχανισμό που επηρεάζει την πηγή του.

Με αυτά τα δεδομένα προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε τον τρόπο μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου, πως και κατά πόσο επηρεάζεται από τους

μετεωρολογικούς παράγοντες και την μεταφορά αέριων μαζών. Ακόμα προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε τη χρήση του ραδονίου σαν ιχνηθέτης.

3.4. Μελέτη της διακύμανσης του ραδονίου και της εποχικότητας με την βοήθεια ποσοστιαίων σημείων.

Λόγοι επιλογής των εκατοστημορίων στην ανάλυση του ραδονίου.

Τα εκατοστημόρια είναι ένας τρόπος με τον οποίο μπορούμε να περιγράψουμε την μεταβλητότητα μιας παραμέτρου, που στην περίπτωση μας είναι το ραδόνιο. Με την βοήθεια τους μπορούμε να διερευνήσουμε πως κατανέμονται τα δεδομένα μας γύρω από την διάμεσο. Σαν εκατοστημόριο ορίζουμε την τιμή για μία μεταβλητή όπου ένα συγκεκριμένο ποσοστό των παρατηρήσεων είναι μικρότερο από αυτή την τιμή. Για αυτό το λόγο με την βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS υπολογίστηκαν το 10, 25, 50, 75, 90, εκατοστημόρια. Αυτό έγινε για κάθε έτος καθώς και για τις εποχές του κάθε έτους. Έτσι μας δόθηκε η δυνατότητα να έχουμε μια εικόνα για να συγκρίνουμε την μεταβολή του ραδονίου μεταξύ των ετών και των εποχών. Εκτενέστερη αναφορά για τα εκατοστημόρια, το ενδοτεταρτομοριακό εύρος και την καμπύλη κανονικής κατανομής γίνεται στο Παράρτημα ΙΙ.

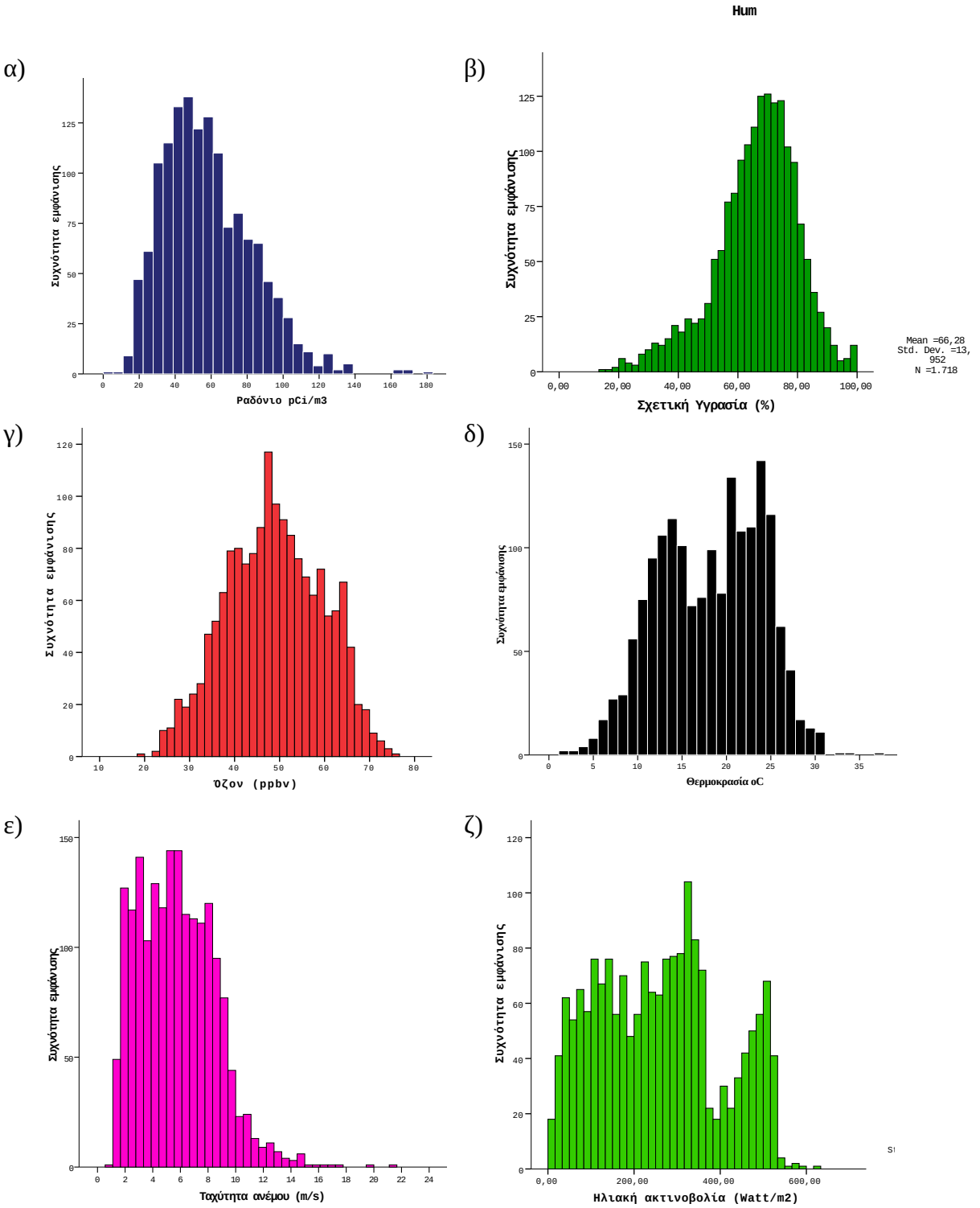
Αποτελέσματα ανάλυσης.

Το ραδόνιο κατά την περίοδο 2002-2006 παρουσιάζει εύρος μέσων ημερήσιων τιμών από 9,80 pCi/m^3 έως 137,40 pCi/m^3. Από διαγράμματα της συχνότητας εμφάνισης της μέσης ημερήσια συγκέντρωσης του ραδονίου στην ατμόσφαιρα, παρατηρούμε ότι η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης είναι μεταξύ 28 pCi/m^3και 64 pCi/m^3 (με συχνότητα εμφάνισης μεγαλύτερη του 110), και μέση τιμή 56,57pCi/m^3 ±23,3 pCi/m^3.

Την ίδια χρονική περίοδο το όζον εμφανίζει εύρος ημερήσιων τιμών από 19,00ppbv έως 75,30 ppb_v, με το 50% της διακύμανσης να είναι μικρότερο των 49,40 ppb_v. Η θερμοκρασία εμφανίζει μέγιστη τιμή από 37,70 ^oC και ελάχιστη 1,60^oC με μέση τιμή 18,00 ^oC. Η σχετική υγρασία εμφανίζει ελάχιστη τιμή 13,60% και μέση ημερήσια τιμή 68,10% ενώ η ταχύτητα του ανέμου έχει μέγιστη τιμή 21,40m/s και ελάχιστη 1,00m/s με μέση τιμή τα 5,71m/s και συχνότητα μεγαλύτερης εμφάνισης από 2 m/s έως 8,5 m/s. Η διεύθυνση του ανέμου έχει μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης μεταξύ 0 έως 60 μοίρες και από 260 έως 360 μοίρες.

	Ραδόνιο	Σχετική Υγρασία	Όζον	Θερμοκρασία	Ταχύτητα ανέμου	Ηλιακή ακτινοβολία
N	1.419	1.718	1.623	1.718	1.855	1.829

Πίνακας 13. Πίνακας πλήθους δεδομένων με βάση τα όποια δημιουργήθηκαν τα συχνοτικά διαγράμματα.



Εικόνα 22. Ιστογράμματα συχνοτήτων εμφάνισης α) ραδονίου (pCi/m^3), β) σχετικής υγρασίας (%) γ) όζον (ppb_v),δ) θερμοκρασία (^oC) ε) ταχύτητα ανέμου (m/s), ζ) ηλιακή ακτινοβολία (Watt/m^2) για την περίοδο 2001-2006.

	Ραδόνιο (pCi/m^3)	Όζον ppbv	Θερμ/σια (^{o}C)	Σχετική Υγ/σία (%)	Ταχύτ. Ανέμ. (m/s)	Ηλ. Ακτινοβ. (Watt/m^2)	Διεύ/ση ανέμ. Μοίρες	Μέγιστο ύψος (m)	Μέγιστη μήκος Μοίρες
Μέση τιμή	56,57	49,29	18,00	66,44	5,71	254,45	216,18	3401,27	28,81
Τυπική απόκλιση	23,31	10,78	5,81	14,12	2,78	142,26	122,56	1461,85	20,46
Ελάχιστο	9,80	19,00	1,60	13,60	1,00	-	0,00	1.000,00	0,60
Μέγιστο	137,40	75,30	37,70	100,00	21,40	627,40	360,00	9.533,00	192,40
Εκατοστημόρια									
25%	38,90	41,70	13,30	59,00	3,44	134,60	58,10	2.305,00	14,10
50%	53,30	49,40	18,40	68,10	5,50	253,20	275,90	3.230,00	23,70
75%	72,10	57,80	22,90	75,77	7,60	345,20	310,70	4.298.00	37,75

Όπου: μέγιστο ύψος: είναι το μέγιστο ύψος που αποκτάει η αέρια μάζα κατά την πορεία προέλευσης τις πέντε ημέρες πριν φτάσει στο σταθμό της Φινοκαλιάς στα χίλια μέτρα (σε μέτρα) (5 days back trajectories), Μέγιστη απόσταση σε μοίρες: η μέγιστη απόσταση που διανύει η αέρια μάζα κατά την πορεία προέλευσης της πέντε ημέρες πριν φτάσει στο σταθμό της Φινοκαλιάς στα χίλια μέτρα (σε μοίρες) (5 days back trajectories).

Πίνακας 14. Μεταβολή της διακύμανσης των μέσων ημερήσιων τιμών του ραδονίου, όζοντος, θερμοκρασία, σχετικής υγρασία, ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας, διεύθυνσης ανέμου, μέγιστου ύψους και μέγιστης απόστασης κατά την χρονική περίοδο 2002-2006.

Διαχωρίζοντας τα δεδομένα της περιόδου 2002-2006 ανά εποχή και ανά έτος προκύπτουν οι **Πίνακες 15 έως 19**. Παρατηρώντας τους πίνακες αυτούς βλέπουμε ότι το 2003 είχε τη μεγαλύτερη διάμεσο με 59,15pCi/m^3 και ελάχιστη το 2006 με 47,95 pCi/m^3 ενώ το 2002, 2004 και 2005 είχαν διάμεσο 58,10 pCi/m^3, 54,10 pCi/m^3 και 54,80 pCi/m^3 αντίστοιχα. Σύμφωνα με αυτούς τους πίνακες η μέγιστη ημερήσια τιμή ραδονίου για την περίοδο 2002-2006 σημειώθηκε το φθινόπωρο του 2004 ενώ η ελάχιστη τιμή στην αρχή του καλοκαιριού του 2006. Γενικά το 2006 στην συνολική του διακύμανση εμφανίζει τα χαμηλότερα εκατοστημόρια σε σύγκριση με τα υπόλοιπα έτη.

	2002				
Ραδόνιο pCi/m^3	**Συνολικά**	**Χειμώνας**	**Άνοιξη**	**Καλοκαίρι**	**Φθινόπωρο**
Ελάχιστο	26,60	30,60	26,60	32,20	34,20
Μέγιστο	111,30	98,20	83,10	111,30	107,70
Εκατοστημόρια					
10%	34,23	36,82	29,94	46,07	42,34
25%	43,35	43,87	33,75	62,87	49,15
50%	58,10	61,95	43,90	72,30	62,00
75%	73,90	73,42	52,70	93,32	75,25
90%	93,87	81,14	61,92	103,17	93,04

Πίνακας 15. Συνολική και εποχιακή διακύμανση ραδονίου για το έτος 2002 με βάση τα εκατοστημόρια σε pCi/m^3.

Ραδόνιο pCi/m^3	2003				
	Συνολικά	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Ελάχιστο	19,40	22,70	19,40	33,50	22,30
Μέγιστο	129,10	47,90	86,70	129,10	110,40
Εκατοστημόρια					
10%	29,76	22,98	22,71	44,42	32,20
25%	41,45	26,55	29,28	55,98	43,20
50%	59,15	34,60	37,75	67,40	68,90
75%	79,08	45,25	52,83	80,55	88,00
90%	96,84	47,50	75,60	99,09	98,10

Πίνακας 16. Συνολική και εποχιακή διακύμανση ραδονίου για το έτος 2003 με βάση τα εκατοστημόρια σε pCi/m^3.

Ραδόνιο pCi/m^3	2004				
	Συνολικά	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Ελάχιστο	13,60	13,60	16,70	34,00	18,50
Μέγιστο	137,40	96,50	69,70	100,40	137,40
Εκατοστημόρια					
10%	30,62	26,60	24,82	46,60	31,53
25%	40,75	33,00	34,80	55,05	40,85
50%	54,10	46,70	45,60	69,20	56,25
75%	70,30	55,90	55,10	79,85	82,83
90%	88,00	69,30	63,16	89,80	109,61

Πίνακας 17. Συνολική και εποχιακή διακύμανση ραδονίου για το έτος 2004 με βάση τα εκατοστημόρια σε pCi/m^3.

Ραδόνιο pCi/m^3	2005				
	Συνολικά	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Ελάχιστο	20,70	20,70	20,70	28,90	29,40
Μέγιστο	136,40	104,70	96,70	106,10	136,40
Εκατοστημόρια					
10%	30,73	27,96	29,66	38,46	46,87
25%	39,25	30,70	36,40	49,53	56,70
50%	54,80	39,00	43,40	62,30	70,40
75%	72,60	58,90	55,10	79,58	89,30
90%	87,45	75,52	71,08	86,78	113,82

Πίνακας 18. Συνολική και εποχιακή διακύμανση ραδονίου για το έτος 2005 με βάση τα εκατοστημόρια σε pCi/m^3.

Ραδόνιο pCi/m^3	2006				
	Συνολικά	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Ελάχιστο	9,80	20,30	12,50	9,80	29,30
Μέγιστο	125,30	94,90	77,00	125,30	102,80
Εκατοστημόρια					
10%	20,70	32,08	16,70	29,62	41,70
25%	30,83	38,30	19,70	42,60	47,50
50%	47,95	48,80	26,00	57,20	61,00
75%	64,05	65,25	38,60	74,60	80,20
90%	85,51	84,54	53,66	95,42	92,70

Πίνακας 19. Συνολική και εποχιακή διακύμανση ραδονίου για το έτος 2006 με βάση τα εκατοστημόρια σύμφωνα με τα εκατοστιαία σημεία σε pCi/m^3.

3.4.1. Χειμερινή περίοδος.

Κατά την εποχιακή διακύμανση ο χειμώνας του 2005 είχε την μέγιστη ημερήσια τιμή με 104,70 pCi/m^3 ενώ ο χειμώνας του 2003 είχε την μικρότερη ημερήσια τιμή με 47,90 pCi/m^3. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη από τις μέγιστες τιμές των υπόλοιπων ετών. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι είχαμε πολύ μικρό αριθμό μετρήσεων για το χειμώνα του 2003, με αποτέλεσμα να μην έχουμε αντιπροσωπευτικό δείγμα για την συγκεκριμένη περίοδο. Παρόλο που το 2005 είναι αυτό που εμφανίζει την μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια τιμή, το 2006 είναι αυτό που κατά 10% έχει τιμές μεγαλύτερες του 84,54 pCi/m^3 που είναι και η υψηλότερη εκατοστιαία τιμή για το 90% της διακύμανσης για όλα τα έτη. Σε αυτή την χειμερινή αύξηση παρατηρήσαμε ότι βοήθησε και η περίοδος μεταξύ 04/12/2006 έως 14/12/2006 όπου είχαμε αρκετές μέσες ημερήσιες τιμές μεγαλύτερες του 84,54 pCi/m^3. Οι τιμές αυτές ανταποκρίνονται σε ημέρες με ΒΔ, Α και ανάμεικτες προελεύσεις.

3.4.2. Ανοιξιάτικη περίοδος.

Η ανοιξιάτικη περίοδος παρουσιάζει για όλα τα έτη την μεγαλύτερη τιμή στο 96,70 pCi/m^3 το 2005 και την ελάχιστη τιμή στα 12,50 pCi/m^3 το 2006. Η χαμηλή ανοιξιάτικη τιμή οφείλεται στον Μάιο του 2006 που ήταν ένας πολύ θερμός μήνας για τα ανοιξιάτικα δεδομένα. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η άνοιξη έχει μικρότερα 90% εκατοστημόρια από τα αντίστοιχα της χειμερινής περιόδου. Ο χειμώνας παρατηρήθηκε ότι πάντα δίνει κάποιες μεγάλες τιμές αρχή και τέλος Φεβρουαρίου, και περίπου στην αρχή ή στα μέσα του Δεκεμβρίου. Λόγω των υψηλών αυτών τιμών έχουμε και μεγαλύτερα 90% εκατοστημόρια.

3.4.3. Καλοκαιρινή περίοδος.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το καλοκαίρι του 2006 είναι αυτό που εμφάνισε την μικρότερη τιμή όχι μόνο για την καλοκαιρινή περίοδο αλλά και για όλο το διάστημα 2002-2006. Η μέγιστη καλοκαιρινή μέση ημερήσια τιμή που παρατηρήθηκε ήταν 129,10 pCi/m^3 για το καλοκαίρι του 2003. Από τους **πίνακες 15 έως 19** βλέπουμε ότι ένα 10% της διακύμανσης είναι μεγαλύτερο από 103,17 pCi/m^3 για το 2002 (είχε κενά δειγματοληψιών καθόσον λείπει όλος ο Ιούνιος και λίγο ο Ιούλιος) και μεγαλύτερες από 99,09 pCi/m^3 για το 2003. Από μια διερεύνηση στις μετρήσεις

είδαμε όλες οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε Β, ΒΑ, ΒΔ προέλευσης με μεσαίες ταχύτητες ανέμου. Το ίδιο ισχύει και για το 2004 και 2006 ενώ για το 2005 είχαμε και αρκετές ανάμεικτες προελεύσεις αέριων μαζών.

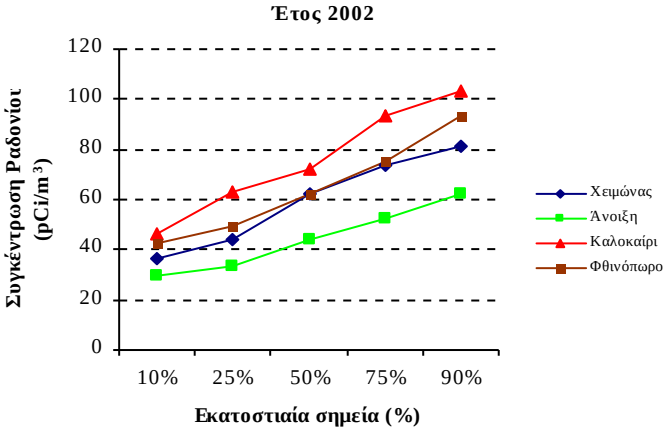
3.4.4. Φθινοπωρινή περίοδος.

Το φθινόπωρο για κάθε έτος παρουσιάζει διακύμανση τιμών στα ίδια επίπεδα με το καλοκαίρι. Είναι χαρακτηριστικό ότι το φθινόπωρο του 2004 εμφάνισε την μεγαλύτερη μέση ημερήσια τιμή αλλά και την μικρότερη μέση ημερήσια τιμή για την φθινοπωρινή περίοδο στα 137,40 pCi/m^3 και 18,50 pCi/m^3 αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό για το φθινόπωρο και ιδίως αυτό του 2005 είναι ότι η προέλευση αέριων μαζών τις ημέρες με συγκέντρωση μεγαλύτερη του 113,62 pCi/m^3 (μεγαλύτερη του 90% εκατοστημορίου) είναι Β, ΒΕ, ΒΔ, για όλες τις τιμές με μεσαίες ταχύτητες ανέμου. Οι ίδιες προελεύσεις για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 90% της εκατοστιαίας τιμής ισχύουν και για το 2002, 2003 και 2006. Ενώ το 2004 είχε αντίστοιχες προελεύσεις που σε συνδυασμό με την εμφάνιση ανάμεικτων (mixed) προελεύσεων και ανατολικών ανέμων με χαμηλές ταχύτητες έδωσε τιμές μεγαλύτερες του 109,61 pCi/m^3.

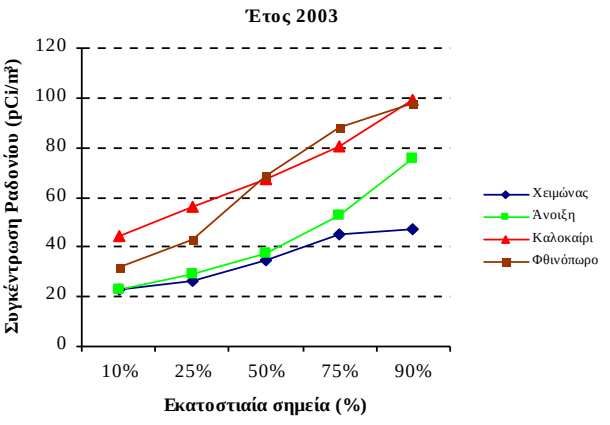
3.5. Σύγκριση της εποχιακής διακύμανσης κάθε έτους.

Κατασκευάζοντας τα διαγράμματα των εκατοστημορίων για κάθε εποχή θα μελετήσουμε πως μεταβάλλεται η εποχιακή συγκέντρωση του ραδονίου για κάθε έτος.

Για το 2002 **(Εικόνα 23)**, η άνοιξη χαρακτηρίζεται από τις χαμηλότερες τιμές στην συνέχεια ακολουθεί ο χειμώνας με απόκλιση από την άνοιξη από 6,88 pCi/m^3 έως 20,72 pCi/m^3. Σε κάποια σημεία ο χειμώνας συμβαδίζει με το φθινόπωρο που γενικά έχει λίγο μεγαλύτερες τιμές, από 0,05 pCi/m^3 έως 1,90 pCi/m^3. Τέλος τις μεγαλύτερες τιμές στην διακύμανση του έτους τις έχει το καλοκαίρι και διαφέρει από το φθινόπωρο από 3,73 pCi/m^3 έως 18,07 pCi/m^3.



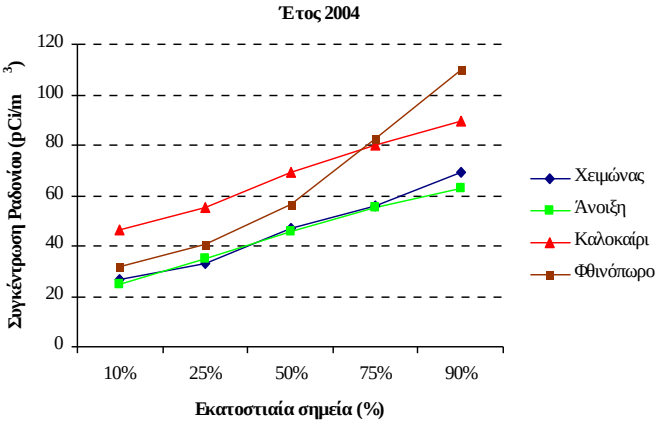
Εικόνα 23. Μεταβολή των εκατοστημόριων του ραδονίου ανά εποχή για το έτος 2002.



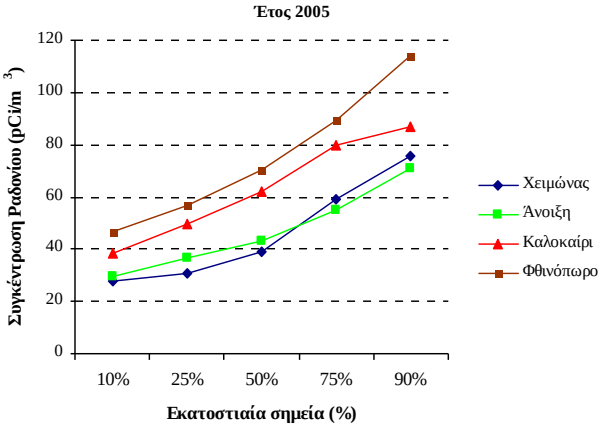
Εικόνα 24. Μεταβολή των εκατοστημόριων του ραδονίου ανά εποχή για το έτος 2003.

Το έτος 2003 **(Εικόνα 24)** η εποχή με τα χαμηλότερα εκατοστημόρια είναι ο χειμώνας, στην συνέχεια ακολουθεί η άνοιξη με μια διαφορά έως 28,10 pCi/m^3. Το φθινόπωρο έχει μεγαλύτερα εκατοστημόρια από την άνοιξη. Επιπρόσθετα το

φθινόπωρο για τιμές μικρότερες της διάμεσου εμφανίζει εκατοστημόρια χαμηλότερα από τα καλοκαιρινά κατά 12,22 pCi/m^3 έως 12,78 pCi/m^3 ενώ τα εκατοστημόρια μετά την διάμεσο είναι κατά 1,5 pCi/m^3-7,5 pCi/m^3 υψηλότερα από τα καλοκαιρινά.

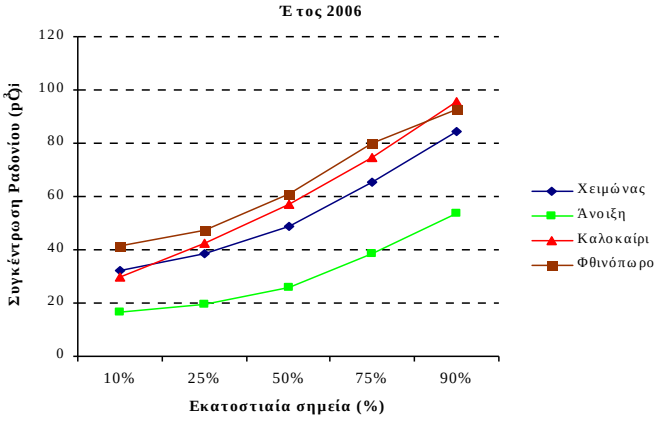


Εικόνα 25. Μεταβολή των εκατοστημόριων του ραδονίου ανά εποχή για το έτος 2004.



Εικόνα 26. Μεταβολή των εκατοστημόριων του ραδονίου ανά εποχή για το έτος 2005.

Βλέποντας το έτος 2004 **(Εικόνα 25)** παρατηρούμε ότι η άνοιξη και ο χειμώνας έχουν της ίδιας τάξης συγκεντρώσεις ραδονίου στην διακύμανση τους με ελάχιστες αποκλίσεις. Στην συνέχεια λίγο μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει το φθινόπωρο που όμως μετά τη διάμεσο αυξάνεται απότομα και εν τέλει ξεπερνάει και το 90% εκατοστημόριο του καλοκαιριού. Η διαφορά των επιπέδων του φθινοπώρου από την άνοιξη και τον χειμώνα ξεκινάει από τα 6,71 pCi/m^3 και φτάνει στα 46,45 pCi/m^3. Τα εκατοστημόρια του ραδονίου για το καλοκαίρι είναι από 12,95 pCi/m^3 έως 15,07 pCi/m^3 μεγαλύτερα των φθινοπωρινών ενώ το 90% εκατοστημόριο είναι κατά 19,81 pCi/m^3 μικρότερο.



Εικόνα 27. Μεταβολή των εκατοστημόριων του ραδονίου ανά εποχή για το έτος 2006

Όπως το 2004 έτσι και το 2005 **(Εικόνα 26)** για την άνοιξη και το χειμώνα η μεταβολή των τιμών του ραδονίου είναι στα ίδια επίπεδα. Τα εκατοστημόρια αποκλίνουν κατά 1,70 pCi/m^3 έως 5,70 pCi/m^3 με την άνοιξη υψηλότερη και 3,80 pCi/m^3 έως 4,44 pCi/m^3 με τον χειμώνα υψηλότερο. Στην συνέχεια ακολουθεί το καλοκαίρι με μεγαλύτερες τιμές από την άνοιξη εύρους από 8,80 pCi/m^3 έως 24,48 pCi/m^3, και από το χειμώνα 10,50 pCi/m^3 έως 23,40 pCi/m^3. Το φθινόπωρο του 2005 είναι η εποχή του έτους που εμφάνισε τα μεγαλύτερα εκατοστημόρια.

Η άνοιξη του 2006 **(Εικόνα 27)** είναι η εποχή που εμφάνισε τα χαμηλότερα εκατοστημόρια. Με αρκετά μεγαλύτερες τιμές ακολουθεί ο χειμώνας. Η απόκλιση του από την άνοιξη είναι της τάξεως των 15,38 pCi/m3 έως 30,88 pCi/m^3. Το

καλοκαίρι είναι υψηλότερο από το χειμώνα σε όλα τα εκατοστημόρια εκτός από το 10% εκατοστημόριο, και εμφανίζει υψηλότερες τιμές κατά 4,30 pCi/m^3 έως 10,88 pCi/m^3. Τέλος το φθινόπωρο του 2006 όπως και το φθινόπωρο του 2005 έχει τα μεγαλύτερα εκατοστημόρια με απόκλιση των τιμών από το καλοκαίρι από 12,08 pCi/m^3 έως -2,72 pCi/m^3. (το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο υψηλότερο 90% εκατοστημόριο που παρουσιάζει το καλοκαίρι από το φθινόπωρο).

Οι εποχές με τις μεγαλύτερες τιμές είναι οι εποχές που επηρεάζονται περισσότερο από την μεταφορά αέριων μαζών. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε όλα τα έτη εναλλάσσονται το καλοκαίρι και το φθινόπωρο σαν εποχές με τις μεγαλύτερες τιμές στην διακύμανση τους. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικού ραδονίου τις εποχές αυτές βοηθούνται από την κατάσταση ξηρασίας του εδάφους με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται μεγαλύτερες ποσότητες στην ατμόσφαιρά και εν συνεχεία να μεταφέρονται στο σταθμό της Φινοκαλιάς. Καταδεικνύοντας έτσι την επιρροή τους από την οριζόντια μεταφορά. Ακόμα την περίοδο του χειμώνα οι βροχοπτώσεις κλίνουν τους πόρους του εδάφους και δεν υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα, οπότε και σε περιπτώσεις έντονης οριζόντιας μεταφοράς η συγκέντρωση του ραδονίου θα ήταν χαμηλή.

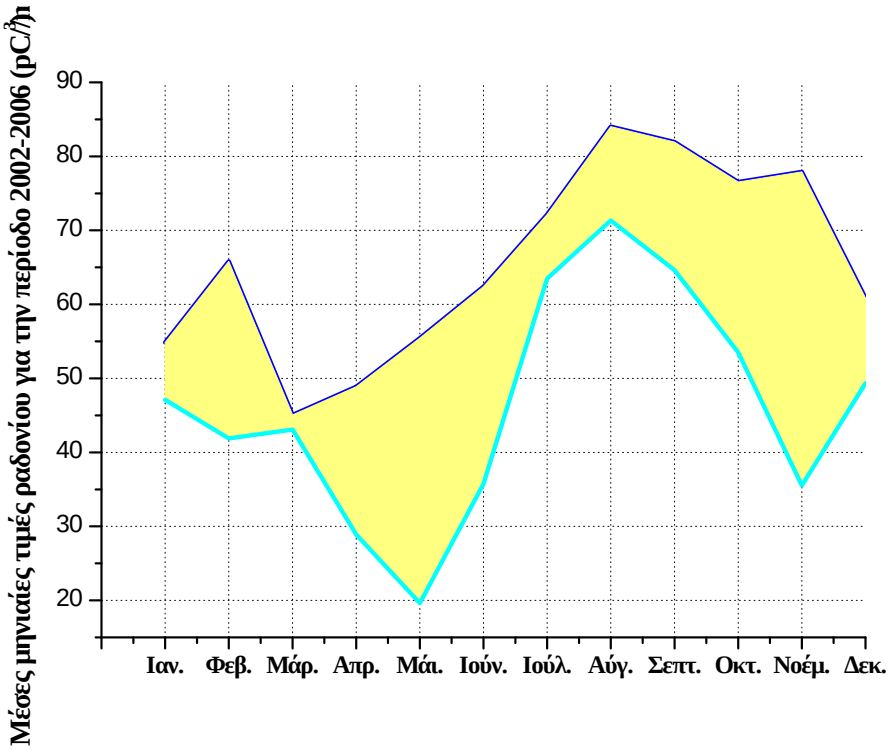
3.6. Μεταβολή των μέσων μηνιαίων τιμών ραδονίου για την χρονική περίοδο 2002-2006.

Η **Εικόνα 28** δίνει τις μέγιστες (μαύρη γραμμή) και ελάχιστες (μπλε γραμμή) μέσες μηνιαίες τιμές του ραδονίου για την περίοδο 2002-2006. Παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές έχουν ένα εύρος από 20 pCi/m^3 (Μάιος) σε 85 pCi/m^3 (Αύγουστος). Παρατηρώντας τον κάθε μήνα ξεχωριστά βλέπουμε ότι:

Ο Ιανουάριος παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα 55 pCi/m^3 και 47 pCi/m^3. Τα 55 pCi/m^3 είναι η μέγιστη μέση μηνιαία τιμή για χειμερινό μήνα και οφείλεται στο Ιανουάριο του 2002. Χαρακτηριστικό των ημερών που έδωσαν αυτή την μέγιστη τιμή είναι οι Β/ΒΔ, Ν/ΝΔ προελεύσεις με αέριες μάζες που κινούνταν κοντά στο έδαφος.

	Ελάχιστα		**Μέγιστα**	
	Έτος	**Αρ. Παρ.**	**Έτος**	**Αρ. Παρ.**
Ιανουάριος	2005	28	2002	10
Φεβρουάριος	2005	23	2002	11
Μάρτιος	2006	24	2004	24
Απρίλιος	2006	17	2004	19
Μάιος	2006	20	2005	25
Ιούνιος	2006	21	2004	28
Ιούλιος	2006	25	2002	20
Αύγουστος	2005	20	2003	29
Σεπτέμβριος	2006	21	2003	26
Οκτώβριος	2002	5	2005	26
Νοέμβριος	2003	5	2005	20
Δεκέμβριος	2005	16	2006	26

Πίνακας 20. Αριθμός παρατηρήσεων για των μηνών με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές ραδονίου για την περίοδο 2002-2006.



Εικόνα 28. Εύρος μέσων μηνιαίων τιμών ραδονίου για την περίοδο 2002-2006 σε pCi/m^3. Η ανοιχτή μπλε γραμμή δίνει τις ελάχιστες μέσες μηνιαίες τιμές που παρουσιάστηκαν την περίοδο 2002-2006 ενώ η μαύρη γραμμή δίνει τις μέγιστες μέσες μηνιαίες τιμές που παρουσιάστηκαν την περίοδο 2002-2006.

Ο Φεβρουάριος έχει μέσες μηνιαίες τιμές από 42 pCi/m^3 έως 66 pCi/m^3. Η επίσης υψηλή μέγιστη μέση μηνιαία τιμή του Φεβρουάριου οφείλεται στο 2002, για τα υπόλοιπα έτη η τιμή αυτή δεν ξεπέρασε το 48 pCi/m^3. Το δείγμα που ανταποκρίνεται στην παραπάνω υψηλή τιμή είναι επί το πλείστον τοπικής προέλευσης με χαρακτηριστική κίνηση σε πολύ χαμηλό ύψος από το έδαφος και ταχύτητες ιδιαίτερα χαμηλές (1,5 m/s-3,5m/s), όμως η μέση μηνιαία τιμή του 2002 για το μήνα Φεβρουάριο όσο και για τον Ιανουάριο αντιστοιχεί σε μικρό αριθμό δειγμάτων γεγονός που δεν την κάνει αντιπροσωπευτική.

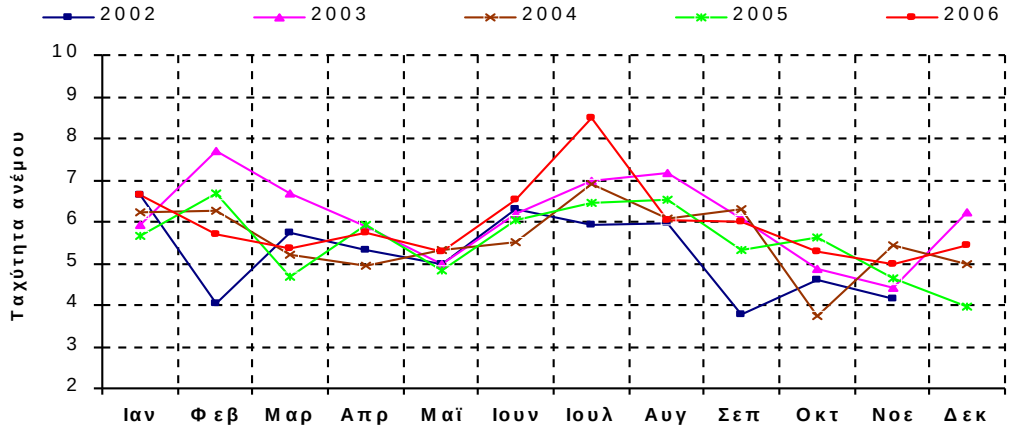
Οι ελάχιστες μέσες μηνιαίες τιμές του Μαρτίου, Απριλίου, Μάιου, Ιουνίου και Ιουλίου προέρχονται από το έτος 2006. Ο Μάρτιος παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα δεδομένου ότι το εύρος τιμών είναι μεταξύ 43 pCi/m^3 και 45 pCi/m^3. Αξίζει να αναφέρουμε για τα πέντε έτη που μελετήθηκαν, ότι και η μέγιστη των μέσων μηνιαίων και η ελάχιστη τιμή του Μαρτίου χαρακτηρίζεται από παραπλήσιες ταχύτητες ανέμου. Ακόμα μετρήσεις για τον Μάρτιο του 2002 και του 2003 δεν υπήρχαν με αποτέλεσμα οι παρατηρήσεις αυτές να αντιστοιχούν στη 3ετία 2004-2006, ίσως αν είχαμε μετρήσεις του ραδονίου για το 2002 και 2003 να άλλαζε η απόκλιση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών ραδονίου για τον μήνα Μάρτιο.

Ο Απρίλιος παρουσιάζει εύρος τιμών από 29 pCi/m^3 έως 49 pCi/m^3, ο Μάιος από 20 pCi/m^3 έως 55 pCi/m^3, ο Ιούνιος από 36 pCi/m^3 έως 62 pCi/m^3, ο Ιούλιος από 63 pCi/m^3 έως 72 pCi/m^3. Όλες οι ελάχιστες μέσες τιμές ραδονίου για τον Απρίλιο τον Μάιο και τον Ιούνιο προκύπτουν από το έτος 2006 που είχε πολύ χαμηλότερες τιμές ραδονίου από τα υπόλοιπα έτη. Ένας λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι οι λίγο μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου που σε συνδυασμό με την κατάσταση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος έδωσαν τις χαμηλές τιμές (παρατηρήθηκε μέσω ραδιοβολίσεων ότι δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές αναστροφές

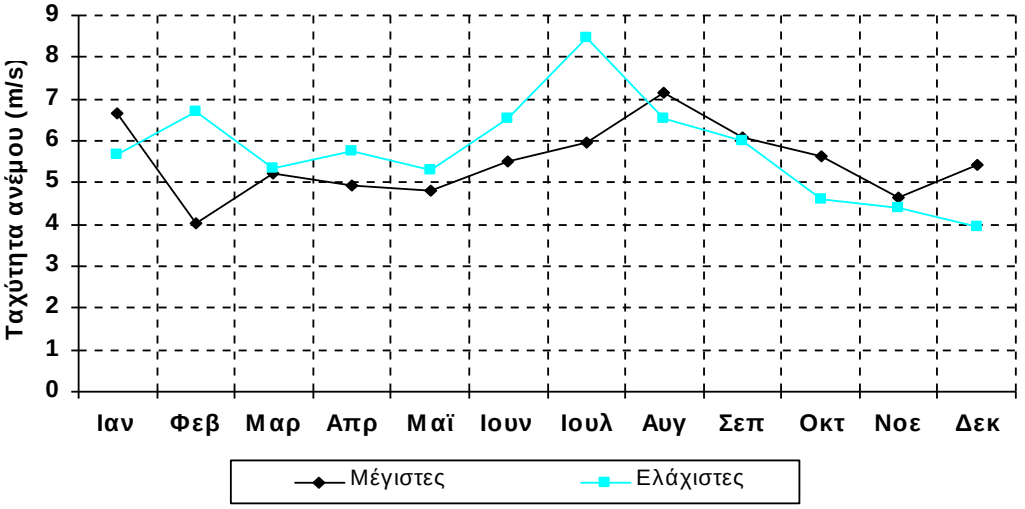
σε χαμηλά ύψη ιδίως για τον μήνα Μάιο). Σημαντική επιρροή στην συγκέντρωση του ραδονίου για το μήνα Μάιο είχε και η προέλευση των αέριων μαζών. Εκτενέστερη αναφορά θα γίνει παρακάτω. Ο Ιούλιος του 2006 ενώ είχε μεγάλη μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου, παρουσίασε, την ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή ραδονίου για την περίοδο 2002-2006 αλλά δεν έδωσε πολύ χαμηλή τιμή ραδονίου σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη (η διαφορά του από τον Ιούλιο του 2002 που έδωσε την μέγιστη τιμή είναι 8,65 pCi/m^3). Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό ΒΑ και Β διευθύνσεων ανέμου που βοήθησαν στην αύξηση της μέσης τιμής. Επιπρόσθετα, έτη με παραπλήσιες ταχύτητες ανέμου με το 2006 είχαν λίγο περισσότερο αυξημένες μηνιαίες τιμές ραδονίου, ενώ οι μέγιστες μηνιαίες τιμές από τον Απρίλιο έως τον Ιούλιο παρουσιάστηκαν στα έτη που είχαν τις χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, δηλαδή τον Απριλίου του 2004, τον Μάιο του 2005 τον Ιούνιο 2004, και τον Ιούλιο του 2002.

Μέχρι και τον Ιούλιο βλέπουμε ότι υπήρχε σημαντική επίδραση από την ταχύτητα του ανέμου, τον Αύγουστο όμως η μέγιστη μηνιαία τιμή του ραδονίου είναι 84 pCi/m^3 και αντιστοιχεί στο 2003 που είχαμε όμως και την μεγαλύτερη μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου, ενώ η ελάχιστη τιμή ραδονίου μετρήθηκε τον Αύγουστο του 2005 στα 71 pCi/m^3 που είχαμε λίγο χαμηλότερη μέση ταχύτητα και χαμηλότερο συνολικό ποσοστό ΒΑ, Β, ΒΔ ανέμων. Είναι όμως αισθητό από τα διαγράμματα της ποσοστιαίας μεταβολής της διεύθυνσης του άνεμου ανά μήνα ότι ο Αύγουστος του 2003 έχει άθροισμα ΒΑ, Β, ΒΔ προελεύσεων σε ποσοστό 90% ενώ ο Αύγουστος του 2005 σε 65%.

Το ίδιο μοτίβο επαναλαμβάνεται τον Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Ο Οκτώβριος έχει εύρος τιμών από 53 pCi/m^3 έως 76pCi/m^3 η μεγίστη του τιμή είναι του έτους 2005 και η ελάχιστη από το 2002 ενώ τα συνολικά ποσοστά ΒΑ, Β, ΒΔ ήταν 48% και 77% αντίστοιχα. Ο Νοέμβριος έχει εύρος τιμών από 35 pCi/m^3 έως 77 pCi/m^3. Η μέγιστη του τιμή αντιστοιχεί στο έτος 2005 και η ελάχιστη στο 2003, ενώ το άθροισμα των ΒΑ, Β, ΒΔ προσελεύσεων ήταν 27% και 53% αντίστοιχα. Ο Δεκέμβριος έχει εύρος τιμών από 49 pCi/m^3 έως 61 pCi/m^3 η μέγιστη τιμή είναι του έτους 2006 και η ελάχιστη από το 2005 (δεδομένα για 2002-2003 δεν υπήρχαν) ενώ το άθροισμα ΒΑ, Β, ΒΔ προελεύσεων ήταν 29% και 52% αντίστοιχα. Τέλος οι μέγιστες και οι ελάχιστες μηνιαίες τιμές του Σεπτεμβρίου κυμαινόντουσαν από 81 pCi/m^3 το 2003 έως 65 pCi/m^3 του 2006. Ο Σεπτέμβριος δεν εμφανίζει μεγάλες διαφορές λόγω προέλευσης ανέμων μιας και το άθροισμα των ΒΑ, Β, ΒΔ του 2003 είναι 73% και του 2006 70% αλλά ούτε διαφορές στην ταχύτητα ανέμου. Αυτό που παρατηρήθηκε τον Σεπτέμβριο είναι ότι η μέση μηνιαία υγρασία το 2003 ήταν 72,6% ενώ το 2006 63,17%. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα των μέσων μηνιαίων ταχυτήτων ανέμου για τα έτη 2002–2006 καθώς και τα διαγράμματα των ταχυτήτων που αντιστοιχούν στα έτη με τις μέσες μηνιαίες μέγιστες και ελάχιστες τιμές ραδονίου.



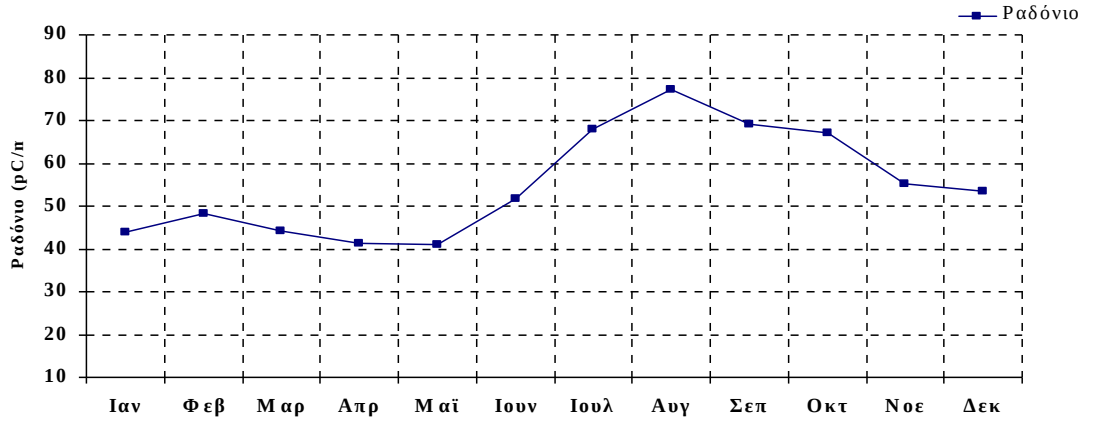
Εικόνα 29. Μέσες μηνιαίες ταχύτητες για τα έτη 2002 – 2006.



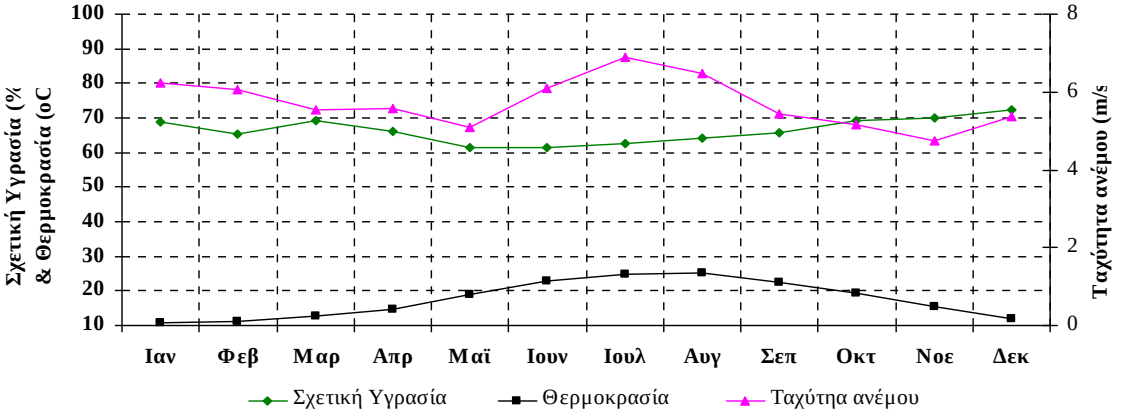
Εικόνα 30. Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου που μετρήθηκαν τα έτη που είχαμε τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές ραδονίου.

Οι **Εικόνες 31 έως 32** αντιστοιχούν στα διαγράμματα των μέσων τιμών ραδονίου, των μετεωρολογικών παραμέτρων και του όζοντος ανά μήνα για την περίοδο 2002-2006. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε τα εξής: η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου αρχίζει να αυξάνετε από το Μάιο και μετά. Την περίοδο αυτή μετά τον Μάη αρχίζει να αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου λόγω μεγαλύτερου ποσοστού Β, ΒΑ, ΒΔ προελεύσεων. Η συγκέντρωση του ραδονίου στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται όταν μειώνεται και η ταχύτητα του ανέμου. Ακόμα η αύξηση του ραδονίου ακολουθείται από χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας και υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας. Αυτό εξηγείται αν θυμηθούμε ότι η κύρια προέλευση του ραδονίου είναι το έδαφος και πώς η υγρασία εδάφους δρα σαν ανασταλτικός παράγοντας (Moses et al., 1963, Pearson and Moses, 1966, Israël et al., 1966). Έτσι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία έχουμε χαμηλότερα επίπεδα υγρασίας στο έδαφος με αποτέλεσμα μεγαλύτερες ποσότητες να απελευθερώνονται τόσο τοπικά όσο και σε μακρινότερες περιοχές από όπου με την βοήθεια του ανέμου μεταφέρονται στην περιοχή της Κρήτης.

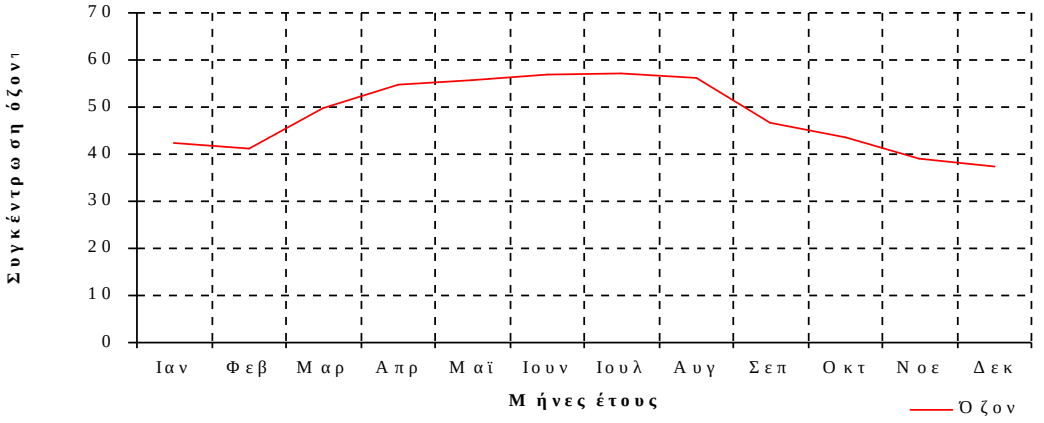
Από την ετήσια μεταβολή του ραδονίου και του όζοντος παρατηρούμε τα εξής: η αύξηση του όζοντος ξεκινάει από την αρχή της άνοιξης, ενώ η αύξηση του ραδονίου ξεκινάει από το Μάιο και μετά όπου έχουμε περισσότερη ξηρασία του εδάφους. Η αύξηση του όζοντος την άνοιξη αποδίδεται περισσότερο στην υπερσυγκέντρωση πρόδρομων ενώσεων του όζοντος από τους χειμερινούς μήνες όπου έχουμε μειωμένη φωτοχημεία αλλά και στην αύξηση της παρουσίας του όζοντος από την στρατόσφαιρα.



Εικόνα 31. Μεταβολή μέσης τιμής ραδονίου ανά μήνα για την περίοδο 2002-2006.



Εικόνα 32. Μεταβολή μέσης τιμής μετεωρολογικών παραμέτρων ανά μήνα για την περίοδο 2002-2006.



Εικόνα 33. Μεταβολή μέσης τιμής του όζοντος ανά μήνα για την περίοδο 2002-2006.

Κεφάλαιο 4. Ραδόνιο και ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

4.1. Μελέτη του τρόπου αλλαγής του ημερήσιου κύκλου του ραδονίου.

Όπως είδαμε προηγουμένως η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Συνοπτικά είναι οι ακόλουθοι:

- Η κατάσταση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.
- Η ταχύτητα του ανέμου.
- Η υγρασία
- Η διεύθυνση προέλευσης των αέριων μαζών, καθώς και η επαφή αυτών με το έδαφος.
- Ο ρυθμός εκπομπής ραδονίου από την κύρια πηγή του, το έδαφος.

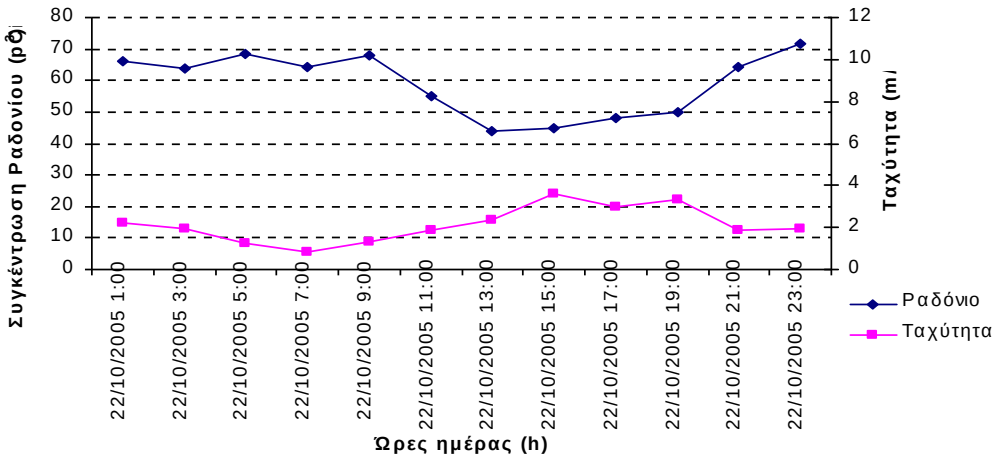
Οι παραπάνω παράγοντες σε διάφορους συνδυασμούς επηρεάζουν σημαντικά τον ημερήσιο κύκλο της συγκέντρωσης του ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Στην προσπάθεια μας να δούμε πως μεταβάλλεται ο τυπικός κύκλος του ραδονίου συνειδητοποιούμε ότι δεν χαρακτηρίζεται από ένα σταθερό κύκλο και ο μόνος τρόπος για να βγάλουμε συμπεράσματα είναι να τον κατηγοριοποιήσουμε στις βασικότερες μορφές, που ως επί το πλείστον τον χαρακτηρίζουν.

4.1.1. Κατηγορία 1^{η}: Κάθετη ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

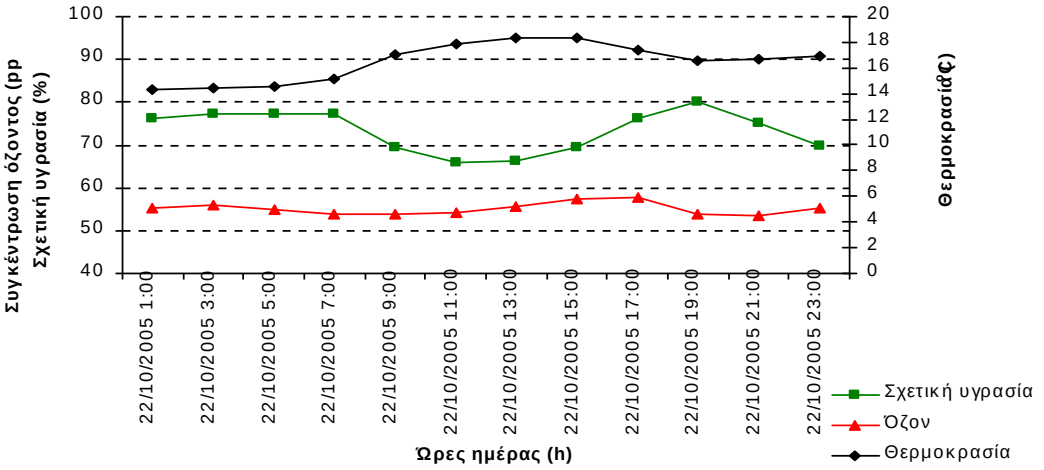
Το ραδόνιο επηρεάζεται από την κατάσταση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Στις περιπτώσεις υψηλών πιέσεων το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μετά την δύση του ηλίου και μέχρι την επόμενη ανατολή του αποκτάει μια σταθερότητα λόγω θερμοκρασιακής αναστροφής από την ύπαρξη θερμών αέριων μαζών πάνω από το ψυχρό έδαφος. Αυτή είναι η περίπτωση όπου το ραδόνιο συσσωρεύεται κοντά στο έδαφος με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η συγκέντρωση του. Κατά την ανατολή του ηλίου λόγω θέρμανσης από τον ήλιο, ανερχόμενες θερμές και κατερχόμενες ψυχρές μάζες δημιουργούν ένα στρώμα ανάμειξης που μεταφέρει όμως μαζί του το ραδόνιο (μαζί με άλλους αέριους ρύπους) σε υψηλότερα στρώματα διασκορπίζοντας το. Η παραπάνω κατάσταση αναφέρεται στον τυπικό ημερήσιο κύκλο του ραδονίου, και εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό. Είναι δε χαρακτηριστικός των ηλιόλουστων μερών (ενισχύουν το στρώμα ανάμειξης) και των μεσαίων ταχυτήτων (χαμηλότερες κατά την διάρκεια της νύχτας).

Πολλές μελέτες έχουν γίνει για την κάθετη ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος με την χρήση του ραδονίου σαν ανιχνευτή της κίνησης. Μερικές από αυτές είναι των Kataoka et al., 1998,2001, J. F Vinuesa and S. Galarini,2007, Piero Di Carlo et al., 2008.

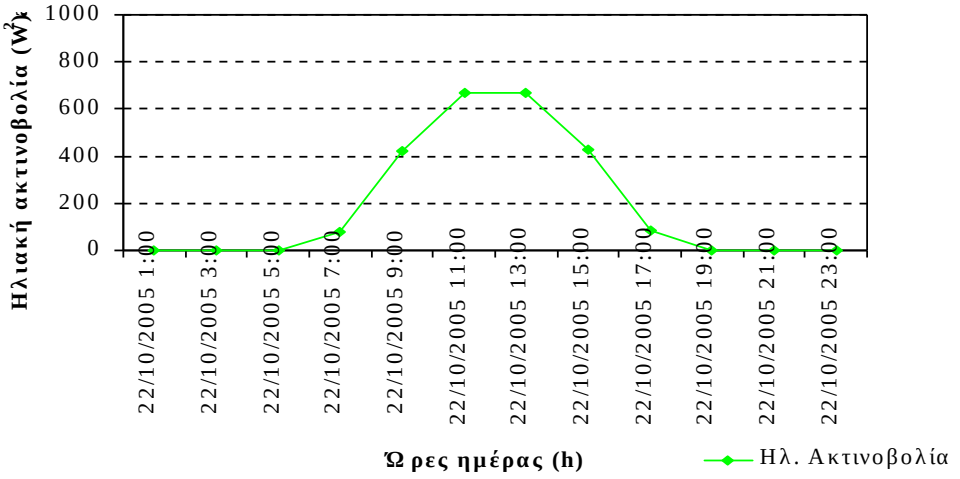
α)



β)



γ)



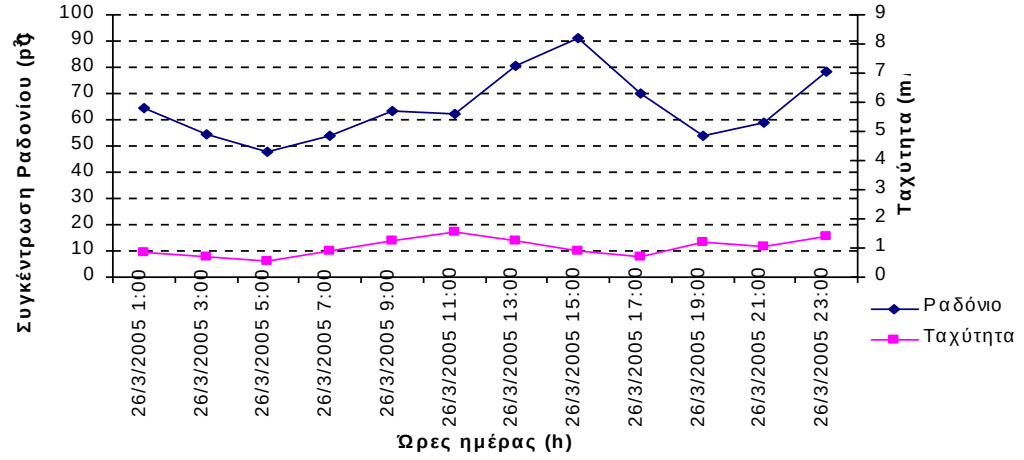
Εικόνα 34. Μεταβολή της συγκέντρωσης α) του ραδονίου και της ταχύτητας ανέμου, β) θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και όζοντος, γ) ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας στις 22/10/2005.

Μια αντιπροσωπευτική κατάσταση τέτοιας ημέρας είναι η 22/10/2005 **(Εικόνα 34)**. Η συσσώρευση του ραδονίου γενικά χαρακτηρίζεται από μικρές και μεσαίες ταχύτητες ανέμου. σε μεγαλύτερες ταχύτητες το ραδόνιο γενικά δεν συσσωρεύεται.

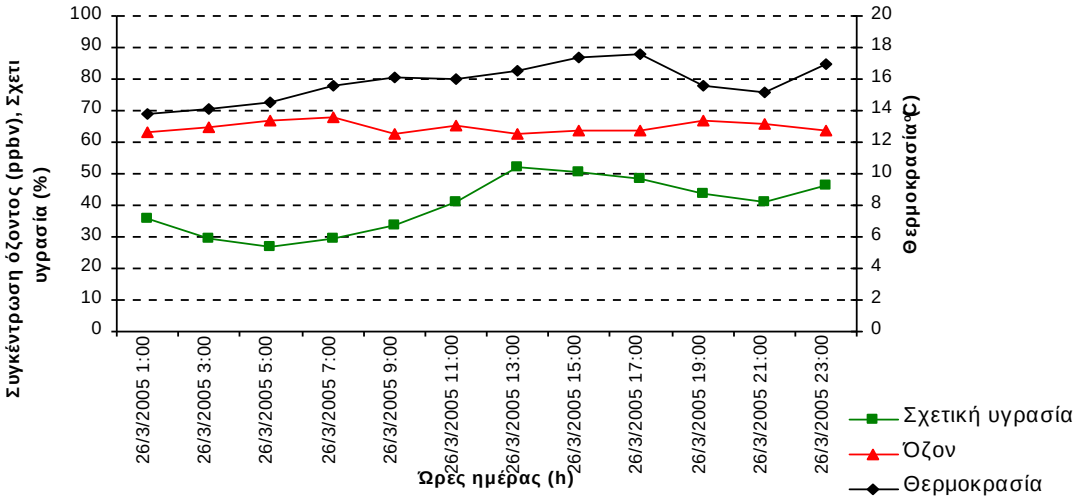
Είναι εμφανές ότι μόλις αρχίσει να αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία αυξάνεται η κινητικότητα του αέρα με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η συγκέντρωση του ραδονίου και να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα μέχρι αργά το

απόγευμα. Το ραδόνιο ξαναρχίζει να συσσωρεύεται μετά την δύση του ηλίου. Είναι χαρακτηριστική η αντίθεση του όζοντος με το ραδόνιο. Το όζον παρουσιάζει μέγιστα την μεσημεριανή περίοδο τόσο λόγω έντονης ανάμειξης και μεταφοράς από ψιλά όσο και λόγω φωτοχημικής παραγωγής.

α)

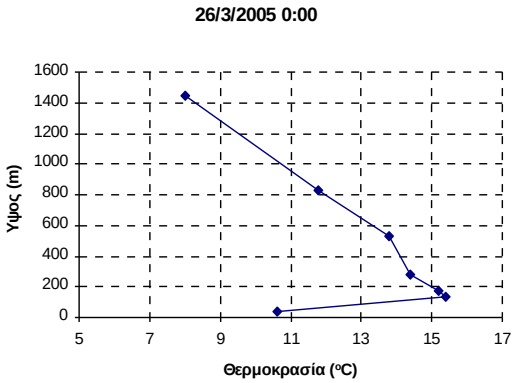


β)

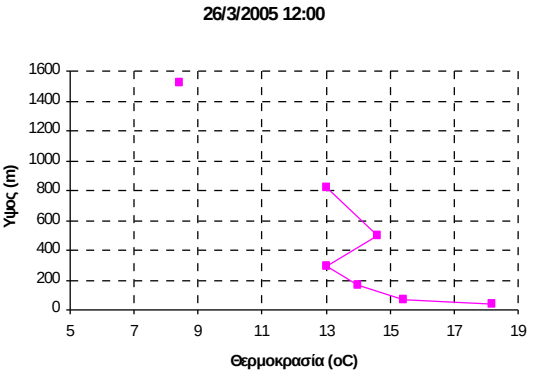


Εικόνα 35. Μεταβολή της συγκέντρωσης α) του ραδονίου και της ταχύτητας ανέμου, β) θερμοκρασίας σχετικής υγρασίας και όζοντος, κατά την διάρκεια της ημέρας στις 26/03/2005.

α)



β)



Εικόνα 36. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος από το έδαφος μέσω μετρήσεων ραδιοβολίσεων ξημερώματα 0:00 στις 26/03/2005 και μεσημέρι 12:00.

Μερικές φορές η σταθερότητα και κατά την διάρκεια της ημέρας με πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου δίνει μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου και κατά την διάρκεια της ημέρας μετατοπίζοντας τις μέγιστες τιμές του μεταξύ 9:00, 11:00, 13:00, και 15:00. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η 26/03/2005 **(Εικόνα 35)** όπου λόγω της χαμηλής ταχύτητας ανέμου και της υψηλής ακτινοβολίας είχαμε συσσώρευση ραδονίου κατά την διάρκεια της ημέρας. Από τις ραδιοβολίσεις για το 2005 που έγιναν στον σταθμό του αεροδρομίου Ηρακλείου παρατηρήθηκε θερμοκρασιακή αναστροφή κατά την διάρκεια της ημέρας (ραδιοβόλιση των 12:00) **(Εικόνα 36).** Γενικά τις ηλιόλουστες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου το ραδόνιο συσσωρεύεται σε υψηλά επίπεδα (L. Sesana et al., 1998). Αυτές όμως οι περιπτώσεις είναι λιγότερες σε ποσοστό σε σχέση με την κλασική περίπτωση ανάμειξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Κατά την διάρκεια της ημέρας αυτής η υγρασία ακολουθεί την αύξηση του ραδονίου μέχρι της 13:00. Στην συνέχεια λόγω αύξησης της θερμοκρασίας η υγρασία παραμένει σταθερή όμως το ραδόνιο συνεχίζει να συσσωρεύεται. Μετά της 19:00 έχουμε εισβολή ξηρότερων αέριων μαζών με αποτέλεσμα να αυξηθεί η συγκέντρωση του όζοντος, και να μειωθεί η συγκέντρωση του ραδονίου λόγω διασκορπισμού του.

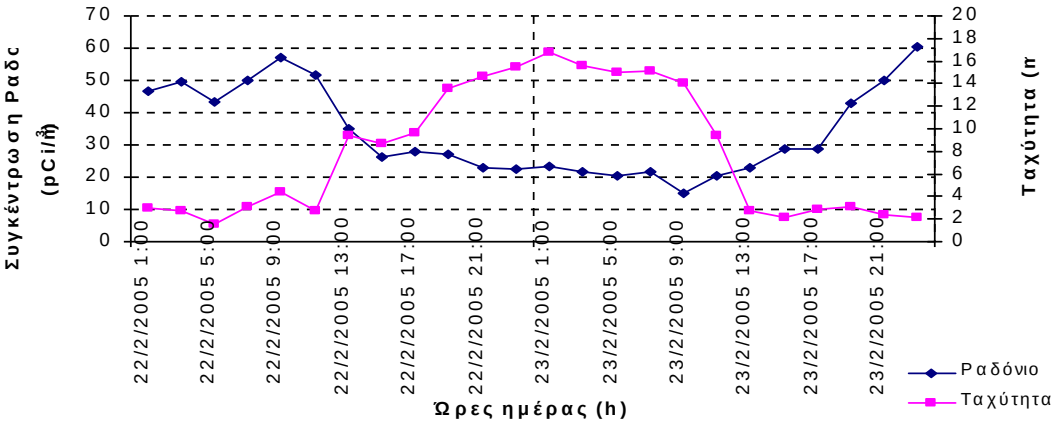
4.1.2. Κατηγορία 2η: Κάθετη ανάμειξη χωρίς θερμοκρασιακή αναστροφή σε χαμηλό υψόμετρο κατά την διάρκεια της νύχτας με υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Κατά την περίοδο καταστάσεων χαμηλών πιέσεων, που εν γένει χαρακτηρίζουν τους κρύους μήνες, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα δεν παρουσιάζει βραδινή σταθερότητα. Στην περίπτωση αυτή με την ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων ανέμου το ραδόνιο δεν συσσωρεύεται (L. Sesana et al., 1998) αλλά διασκορπίζεται εξαιτίας του έντονα αναμειγμένου στρώματος δίνοντας χαμηλές ημερήσιες τιμές και εν συνεχεία χαμηλές νυκτερινές τιμές **(Εικόνα 37)**. Τέτοια μορφή 24ωρης διακύμανσης του ραδονίου αυτή παρατηρείται τόσο ηλιόλουστες όσο και συννεφιασμένες ημέρες με υψηλές ταχύτητες ανέμου.

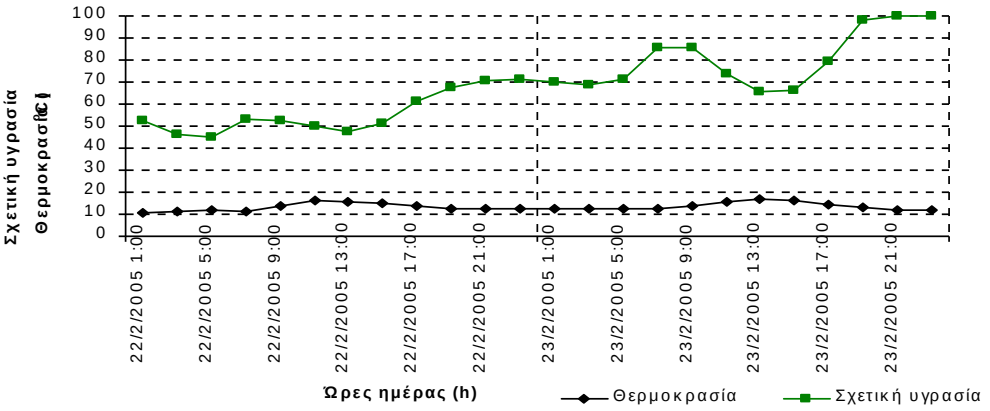
Βλέπουμε στα παραπάνω διαγράμματα ότι κατά την διάρκεια της νύχτας μεταξύ 22 και 23/02/2005 που είχαμε μεγάλες ταχύτητες ανέμου (και οι δύο ημέρες είχαν μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που έφτανε τα 750 και 650 Watt/m^2 αντίστοιχα) ότι η συγκέντρωση του ραδονίου πέφτει κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας στα 10 με 20 pCi/m^3. Άρα σε καταστάσεις έντονης ανάμειξης το ραδόνιο δεν συσσωρεύεται Για τις ημέρες αυτές δεδομένα για την μεταβολή του όζοντος δεν υπάρχουν Η διεύθυνση του άνεμου είναι ΝΔ αλλά χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις υγρασίας. Οι ΝΔ χαρακτηρίζονται συνήθως από χαμηλότερη σχετική υγρασία αλλά την εποχή αυτή οι θερμές αέριες μάζες από τις περιοχές της Σαχάρας επιδρούν στα νερά της Μεσογείου και προκαλούν εξάτμιση υδρατμών που βρίσκονται στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

Εκτός όμως από τις περιπτώσεις που η συγκέντρωση του ραδονίου επηρεάζεται από την κατάσταση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος υπάρχουν και οι περιπτώσεις της μεταφοράς ηπειρωτικής προέλευσης αέριων μαζών πλούσιων σε ραδόνιο. Οι περιπτώσεις αυτές κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες.

α)



β)



Εικόνα 37. Μεταβολή της συγκέντρωσης α) του ραδονίου και της ταχύτητας ανέμου, β) θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, κατά την διάρκεια της ημέρας στις 22 και 23/02/2005

4.1.3. Κατηγορία 3η: Μάζες με υψηλή περιεκτικότητα ραδονίου με μέτριες και υψηλές ταχύτητες ανέμων..

Οι περιπτώσεις αυτές παρατηρούνται όλες τις εποχές του έτους με διαφορετική συχνότητα κάθε φορά επηρεασμένη από την προέλευση των αέριων μαζών. Εμφανίζουν δε διάφορες μορφές και ώρες μεγίστων.

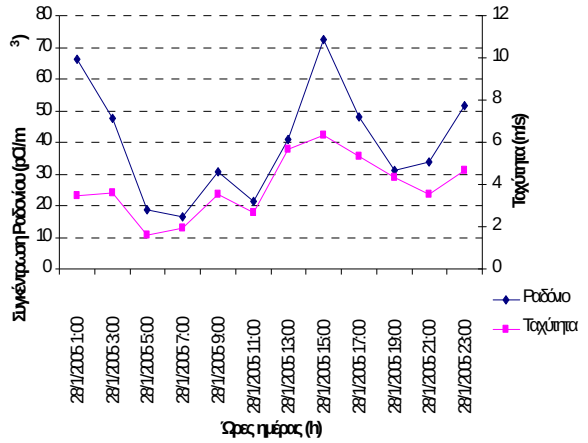
Περίπτωση 1η: Με ημερήσια μέγιστα ακολουθώντας την αύξηση και ένταση των ανέμων.

Τις περιπτώσεις αυτές τις συναντάμε όλες τις εποχές του χρόνου, όπου μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου παρατηρούνται σε συνδυασμό με μεσαίες ταχύτητες ανέμου.

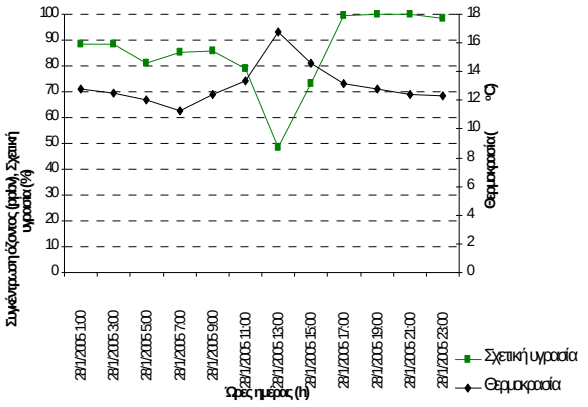
Και στα δύο παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε το ραδόνιο να ακολουθεί τις αλλαγές της ταχύτητας. Στις 28/01/2005 **(Εικόνα 38)** μετρήσεις όζοντος δεν υπήρχαν, τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας έφτασαν στα 154 Watt/m^2 δηλώνοντας με τις συγκεκριμένες ταχύτητες ανέμου μια ασταθή, ουδέτερη κατάσταση στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η διεύθυνση ανέμου την συγκεκριμένη ήμερα ήταν ΝΔ με τις αέριες μάζες να περνάνε σε χαμηλό ύψος πάνω από το έδαφος.

Είναι χαρακτηριστικό ότι την ώρα που έχουμε την μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου η σχετική υγρασία πέφτει στο 50%. Άρα ξηρότεροι καταβατικοί άνεμοι από την περιοχή της Σαχάρας με μεγάλη περιεκτικότητα σε ραδόνιο έφτασαν στην Κρήτη.

α)

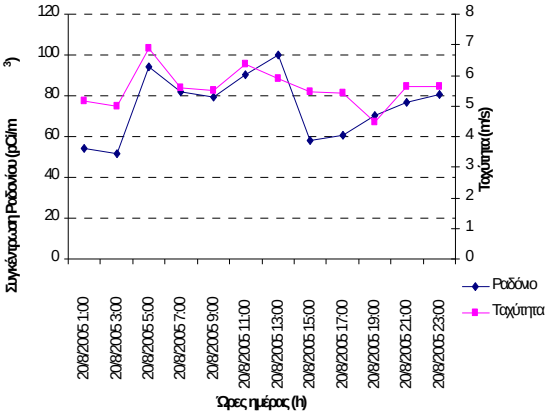


β)

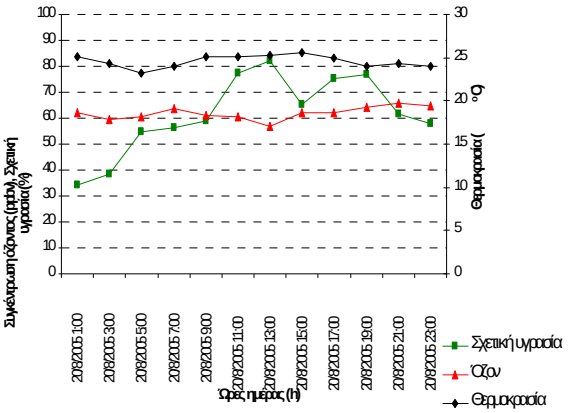


Εικόνα 38. Μεταβολή α) της συγκέντρωσης ραδονίου και της ταχύτητας του ανέμου β) της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, στις 28/01/2005.

γ)



δ)



Εικόνα 39. Μεταβολή γ) της συγκέντρωσης ραδονίου και της ταχύτητας ανέμου δ) της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, στις 20/08/2005.

Στις 20/08/05 **(Εικόνα 39)** μετρήσεις για την ηλιακή ακτινοβολία δεν είχαμε αλλά η αυξημένη σχετική υγρασία είναι ένδειξη νεφών που χαρακτηρίζουν συνήθως την παρουσία των μελτεμιών. Στην περίπτωση αυτή με τις συγκεκριμένες ταχύτητες έχουμε μια ελαφριά αστάθεια στην ατμόσφαιρα, και το ραδόνιο σε μεγάλο βαθμό ακολουθεί την μεταβολή της ταχύτητας. Η διεύθυνση του ανέμου την ημέρα αυτή ήταν ΒΔ με κύρια προέλευση από την κεντρική Ευρώπη. Το όζον την ημέρα αύτη είχε μέση τιμή 61,6 ppb_v, συγκέντρωση που είναι μεγαλύτερη από το 75% εκατοστιαίο σημείο που αντιστοιχεί στο όζον την περίοδο 2002-2006.

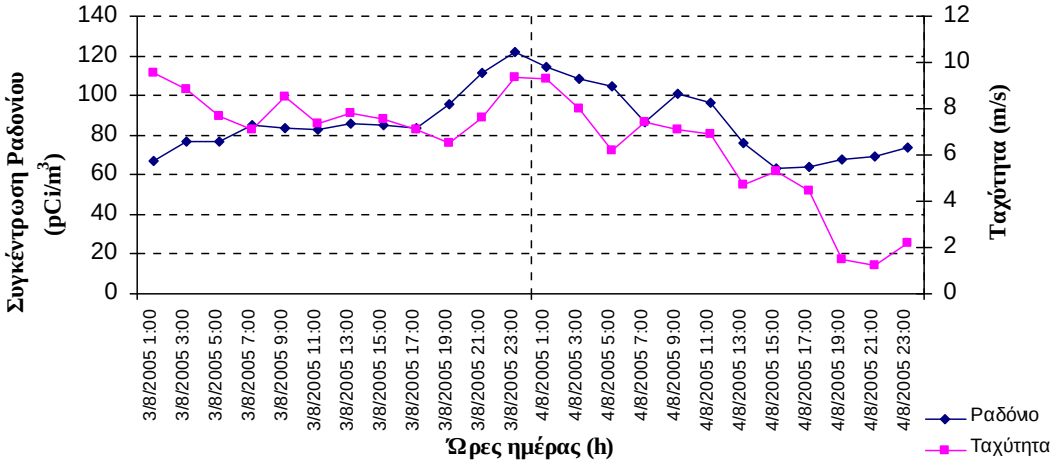
Εκτός από αυτές τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις υπάρχουν αρκετές ημέρες που το ραδόνιο ακολουθεί την αύξηση και την μείωση της ταχύτητας του ανέμου και αυτό μπορεί να συμβεί και κάποια στιγμή κατά την διάρκεια της ημέρας.

Περίπτωση 2η. Βραδινή αύξηση την συγκέντρωσης του ραδονίου ακολουθώντας την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

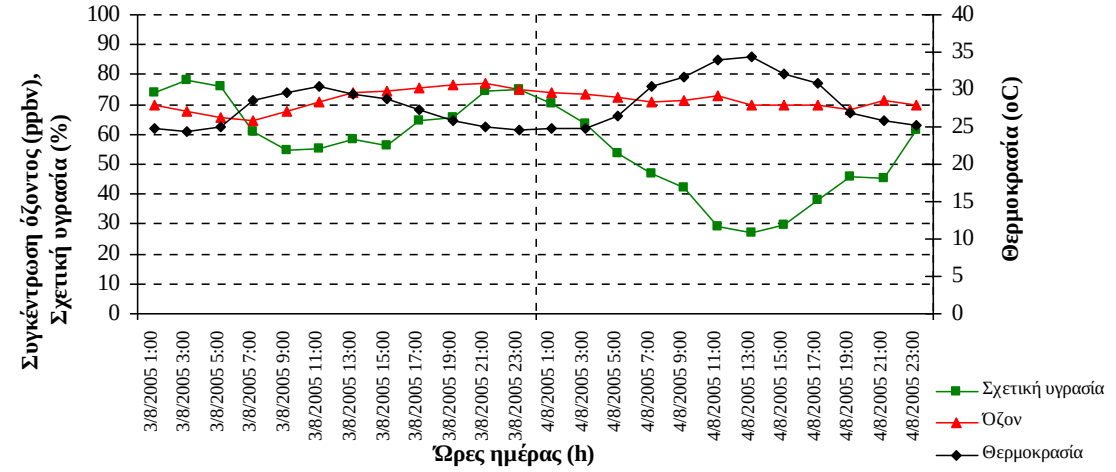
Σε πολλές περιπτώσεις ιδίως κατά την καλοκαιρινή περίοδο παρατηρήθηκε βραδινή αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου ακολουθώντας την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Μια τέτοια περίπτωση αναφέρεται παρακάτω:

α)



β)



Εικόνα 40. Μεταβολή α) της συγκέντρωσης του ραδονίου και της ταχύτητας ανέμου, β) της θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και όζοντος, κατά την διάρκεια των ημερών 03/08/2005-04/08/2005.

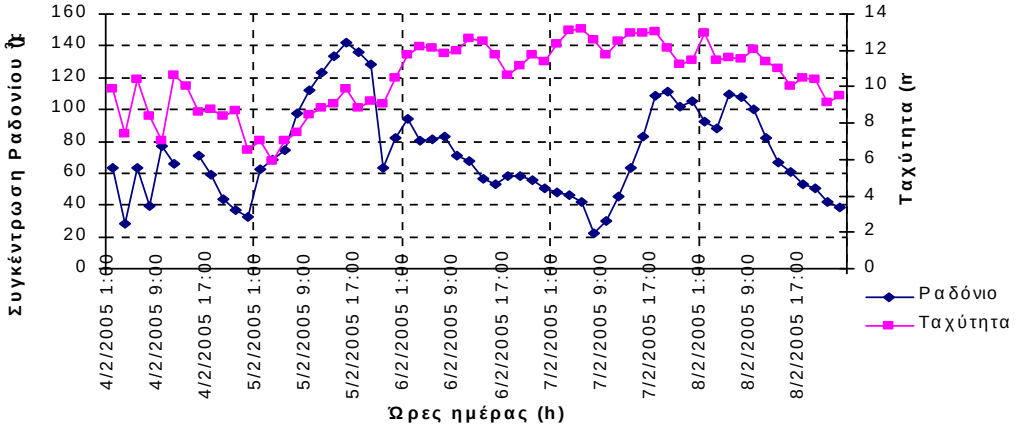
Στην **Εικόνα 40** φαίνεται η αλλαγή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε δυο ημέρες με ΒΑ διεύθυνση ανέμων. Είναι χαρακτηριστικό ότι τις νυχτερινές ώρες παρά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου το ραδόνιο συνεχίζει να αυξάνεται και να ακολουθεί τις αλλαγές της ταχύτητας κατά την διάρκεια της ημέρας. Ακόμα παρατηρείται ότι την ίδια περίοδο έχουμε αύξηση της σχετικής υγρασίας η οποία συμβαδίζει με την μείωση της θερμοκρασίας. Μέσω ραδιοβολίσεων είδαμε ότι στις 04/08/2005 και ώρα 0:00 υπήρχε μια θερμοκρασιακή αναστροφή στα 770 περίπου μέτρα. Το ύψος αυτό σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα δεν δικαιολογούν την συσσώρευση του ραδονίου για την νυχτερινή περίοδο. Το όζον την νύχτα αυτή αυξάνονταν μέχρι της 23:00 το βράδυ στις 03/08/2005 όπου έφτασε στα 77,3ppb$_v$

(ξηρότερες αέριες μάζες από την τροπόσφαιρα) και στην συνέχεια άρχισε να μειώνεται μέχρι τις 19:00 της επόμενης ημέρας εάν εξαιρέσουμε μια μικρή αύξηση στις 11:00 το πρωί (λόγο φωτοχημικής παραγωγής). Οι μέσες ημερήσιες τιμές του όζοντος τις δύο αυτές ημέρες ήταν 71,1 ppb_v στις 03/08/09 και 71,6 ppb_v στις 03/08/09 (συγκεντρώσεις που είναι μεγαλύτερες από το τρίτο τεταρτημόριο που αντιστοιχεί στο όζον την περίοδο 2002-2006).

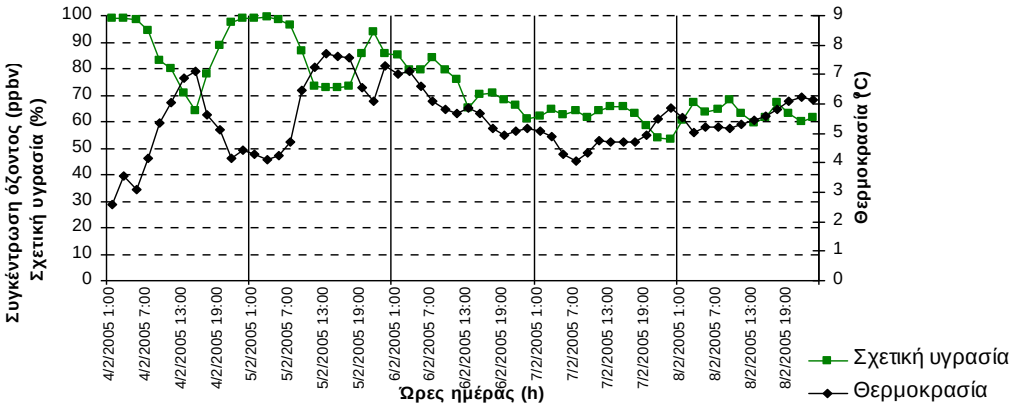
Περίπτωση 3η. Υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου με υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Χαρακτηριστική περίπτωση που είχαμε μεγάλες ταχύτητες ανέμου και υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου ήταν από τις 04/02/05 έως 08/02/2005 **(Εικόνα 41).**

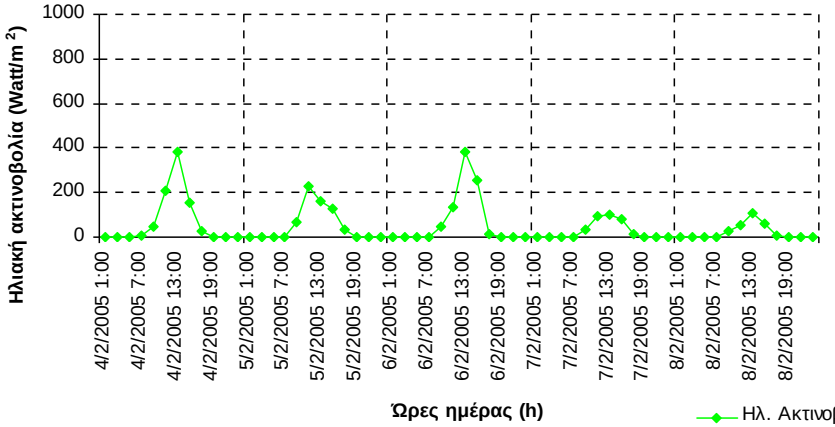
α)



β)



γ)



Εικόνα 41. Μεταβολή α) της συγκέντρωση ραδονίου και ταχύτητας ανέμου, β) της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, γ) της ηλιακής ακτινοβολίας από της 04/02/2005 έως 08/02/2005.

Οι ημέρες αυτές είχαν βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου με περισσότερο ανατολική προέλευση. Χαρακτηριστικό είναι ότι παρά την μικρή ηλιακή ακτινοβολία των ημερών αυτών τις δύο πρώτες ημέρες η σχετική υγρασία πέφτει δείχνοντας ότι έχουμε ξηρές αέριες μάζες. Η θερμοκρασία αυξάνεται κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Έχουμε δηλαδή ψυχρές ξηρές αέριες μάζες χαρακτηριστικό των βορειοανατολικών προελεύσεων. Ακόμα χαρακτηριστικό των ημερών αυτών είναι ότι δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές αναστροφές και αν υπάρχουν είναι πάνω από τα 2500 μέτρα. Την περίοδο αυτή παρατηρήθηκε έντονη κακοκαιρία στην περιοχή της Κρήτης με χιόνι ακόμα και σε χαμηλού υψομέτρου περιοχές. Η αστάθεια που χαρακτηρίζει τις ημέρες αυτές αποκλείει την περίπτωση συσσώρευσης ραδόνιου ή βραδινής ευστάθειας. Άρα τα βραδινά μέγιστα των περιπτώσεων αυτών είναι λόγω προέλευσης. Χαρακτηριστικό των προελεύσεων αυτών είναι το πέρασμα τους από περιοχές της Ρωσίας, Ουκρανίας, Καζακστάν και Αρμενίας.

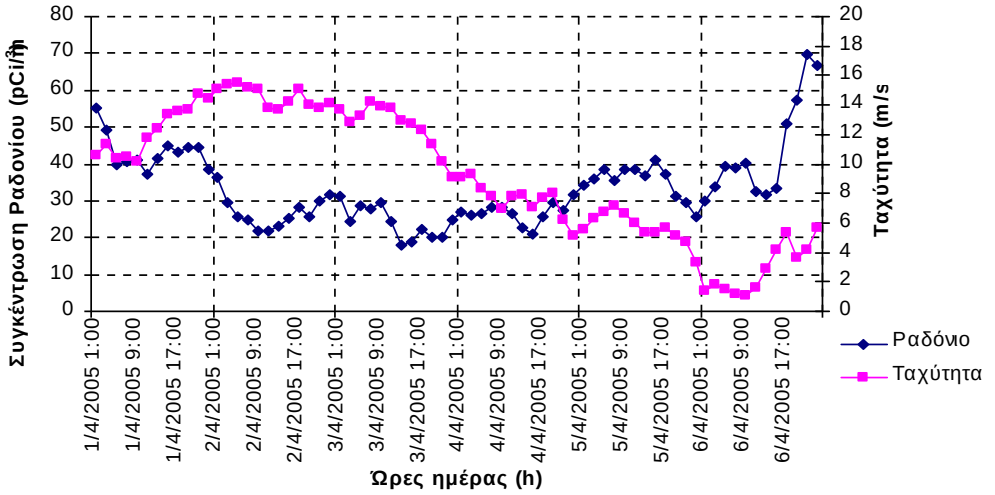
4.1.4. Κατηγορία 4η: Μάζες με χαμηλή περιεκτικότητα ραδονίου με μέτριες και υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Παρατηρήσαμε κατά την διάρκεια διερεύνησης των μετρήσεων ότι ακόμα και περιπτώσεις αέριων μαζών με ηπειρωτική προέλευση δεν έδωσαν μεγάλες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου. Αυτό οφειλόταν σε δύο χαρακτηριστικά: α) οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου που διασκόρπιζαν το ραδόνιο και β) δεν υπήρχαν μεγάλες ποσότητες ραδονίου σε αυτές.

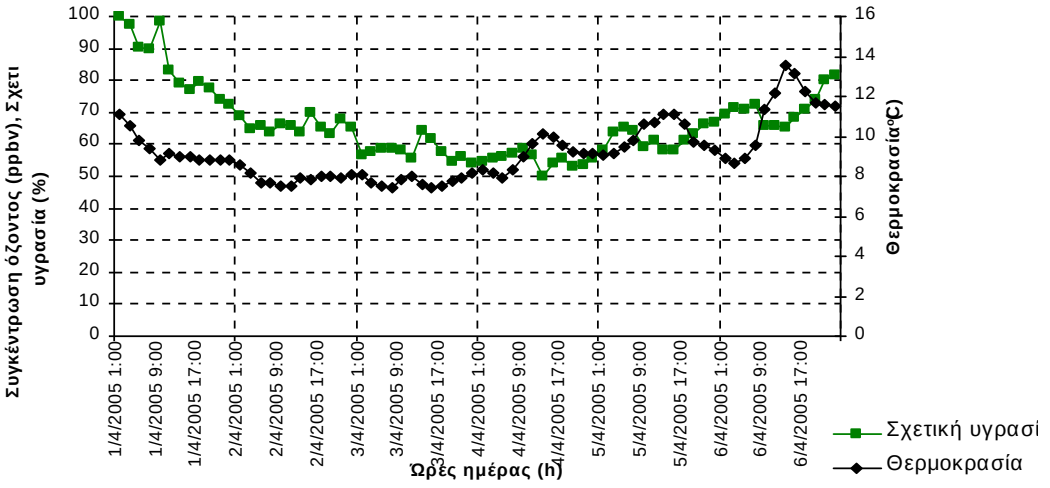
Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση από τις 01/04/2005 έως 06/04/2005 **(Εικόνα 42)**. Είναι μια περίοδος με ΒΑ διευθύνσεις ανέμου, με αέριες μάζες από μακρινές προελεύσεις όπως περιοχές της Ρωσίας, Νορβηγίας, Σουηδίας, με μεγάλη υψομετρική απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Ακόμα μέσω ραδιοβολίσεων είδαμε ότι η θερμοκρασία με την αύξηση του ύψος ελαττώνονταν απότομα με αποτέλεσμα να έχει πολύ αρνητικές τιμές (σε χαμηλό υψόμετρο) και δεν υπήρχαν θερμοκρασιακές αναστροφές. Τόσο τα παραπάνω χαρακτηριστικά των αέριων μαζών όσο και οι μεγάλες ταχύτητες του ανέμου που δεν άφησαν το ραδόνιο να συσσωρευτεί έδωσαν χαμηλές τιμές ραδονίου, μικρότερες ή περίπου ίσες τμε την διάμεσο της διακύμανσης (μέσες ημερήσιες τιμές 43,4 pCi/m^3, 27,0 pCi/m^3, 24,2 pCi/m^3, 26,7 pCi/m^3, 35,2 pCi/m^3, 43,6 pCi/m^3 αντίστοιχα).

Είναι εμφανές από τα παραπάνω ότι η συγκέντρωση του ραδονίου εξαρτάται από την ποιότητα των μαζών που φτάνουν στην περιοχή καθώς και την κατάσταση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Περιπτώσεις μεταφοράς αέριων μαζών πλούσιες σε ραδόνιο υπάρχουν σε όλες τις εποχές του έτους.

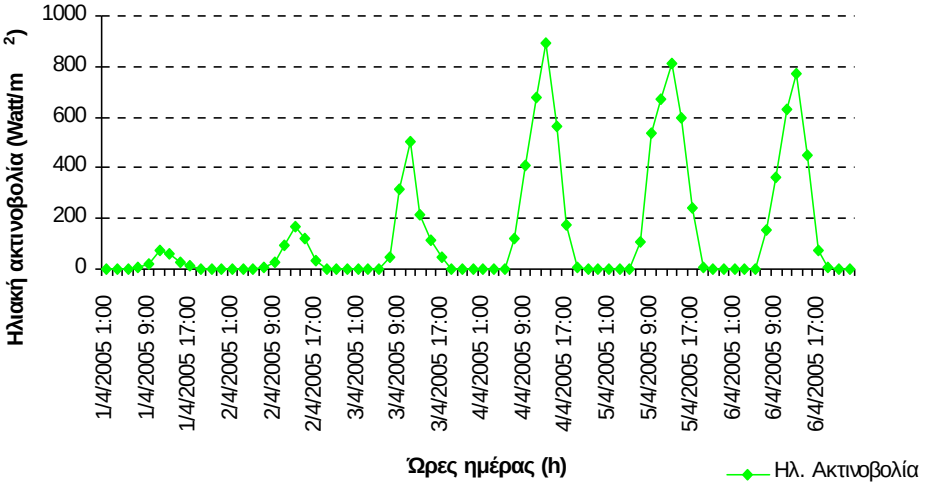
α)



β)



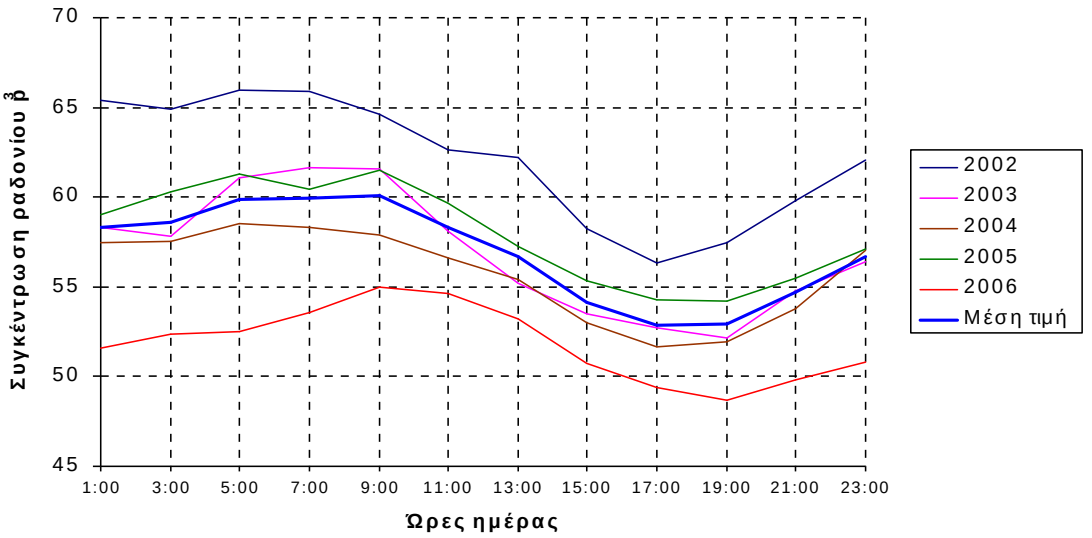
γ)



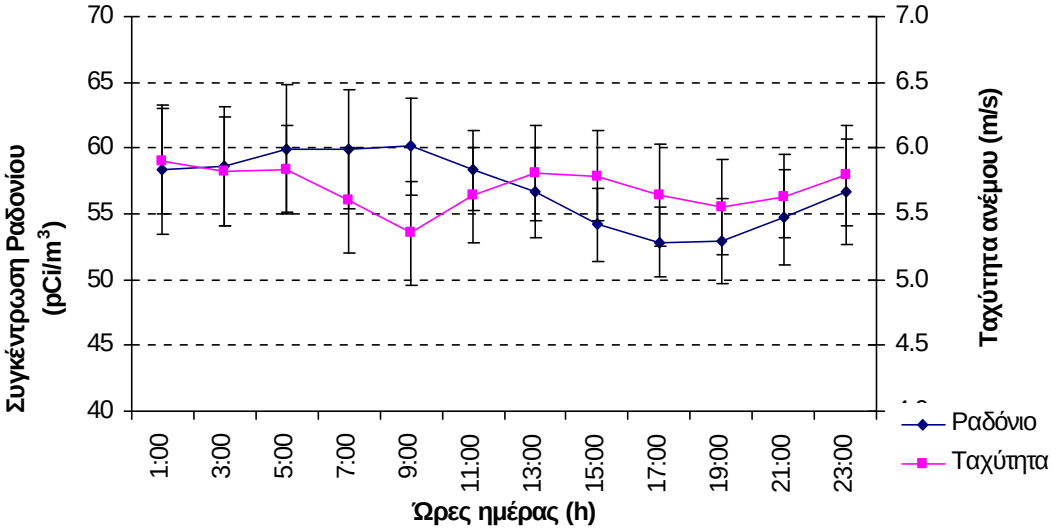
Εικόνα 42. Μεταβολή της α) συγκεντρώσεως του ραδονίου και ταχύτητας ανέμου β) της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας γ) της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας την περίοδο 01/04/2005-06/04/2005.

4.2. Διερεύνηση του ημερήσιου κύκλου με βάση την συχνότητα εμφάνισης μεγίστων.

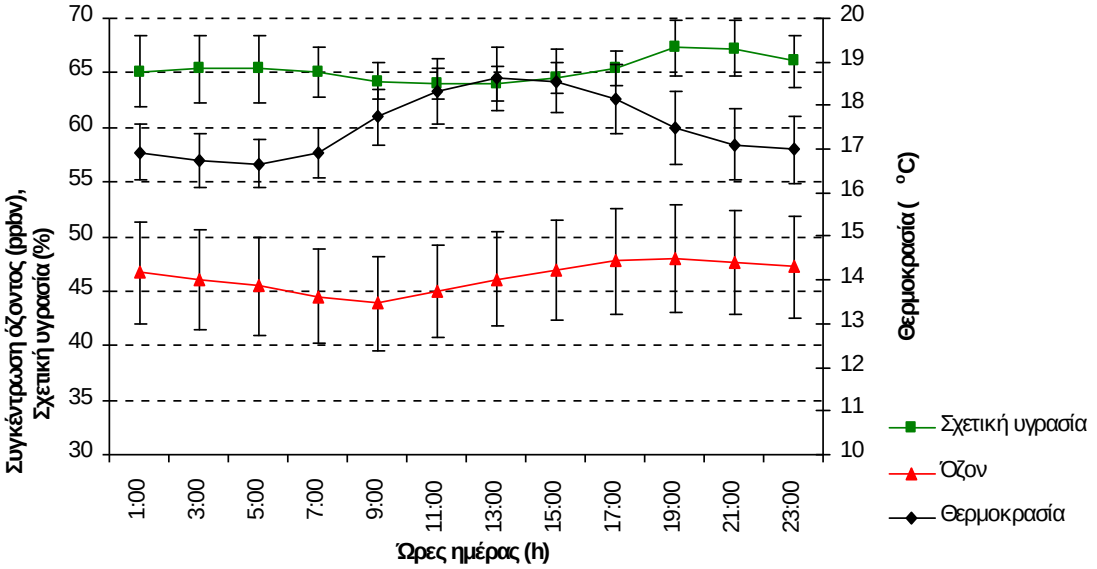
Στην **Εικόνα 43** φαίνονται οι ημερήσιοι κύκλοι του ραδονίου για τα έτη 2002-2006 καθώς και η μέση τιμή της περιόδου. Όλες οι τυπικές ημέρες για όλα τα έτη παρουσιάζουν την κλασική μορφή του κύκλου του ραδόνιου με τις ελάχιστες τιμές τις μεσημεριανές απογευματινές ώρες της ημέρας με την μεγαλύτερη ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Από την εικόνα αυτή φαίνεται ότι κατά μέσο όρο οι υψηλότερες τιμές ανά δίωρο της ημέρας δίνονται από το έτος 2002 (οι μετρήσεις του 2002 βασίζονται κυρίως στην καλοκαιρινή και φθινοπωρινή περίοδο ίσως γι' αυτό να έδωσε τον μεγαλύτερο ημερήσιο κύκλο) με ημερήσια απόκλιση του πρωινού μέγιστου από το απογευματινό ελάχιστο κατά 9,63 pCi/m^3, στην συνέχεια ακολουθεί το 2005 με 7,26 pCi/m^3, το 2003 με επίσης 9,47 pCi/m^3, το 2004 με 6,88 pCi/m^3 και τέλος με τον χαμηλότερο ημερήσιο κύκλο το 2006 με 6,30 pCi/m^3. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο ημερήσιος κύκλος του 2006 έχει μετατοπισμένα τα μέγιστα του στις πιο πρωινές ώρες και δεν χαρακτηρίζεται από μεγάλη βραδινή συσσώρευση. Συγκρίνοντας τον μέσο ημερήσιο κύκλο του ραδονίου με αυτόν της ταχύτητας του ανέμου παρατηρούμε ότι ενώ η διακύμανση του ραδονίου κατά την διάρκεια της ημέρας είναι αντίθετη την ταχύτητας του ανέμου, μετά τις πρώτες απογευματινές ώρες (μετά της 17:00) ενώ η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και το ραδόνιο αυξάνεται συγχρόνως. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και η ταυτόχρονη αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου είναι σε αντίθεση με την 1^η κατηγορία **(Εικόνα 34)** όπου το ραδόνιο ακολουθώντας τις διαδικασίες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αυξάνεται τις βραδινές ώρες λόγω ευστάθειας της ατμόσφαιρας όταν χαρακτηριστικά πέφτει η ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 43. Μεταβολής του μέσου ημερήσιου κύκλου του ραδονίου για τα έτη 2002-2006 μαζί με την μέση τιμή της περιόδου αυτής.



Εικόνα 44. Μέσος ημερήσιος κύκλος ραδονίου και ταχύτητας ανέμου μαζί με την τυπική απόκλιση.

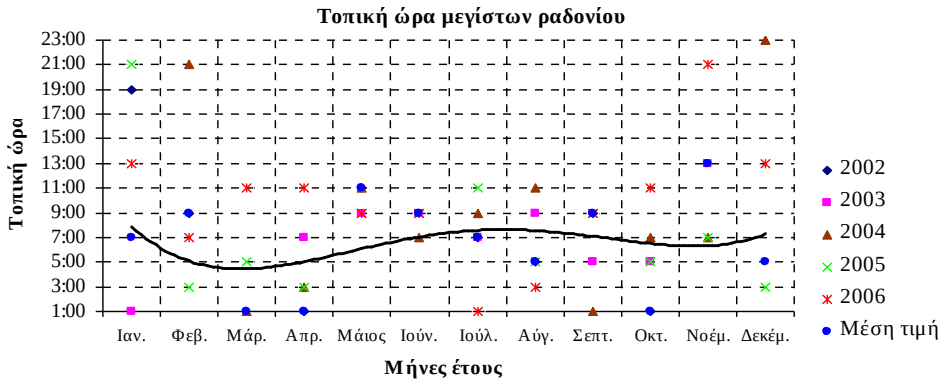


Εικόνα 45. Μέσος ημερήσιος κύκλος θερμοκρασία και σχετικής υγρασίας .

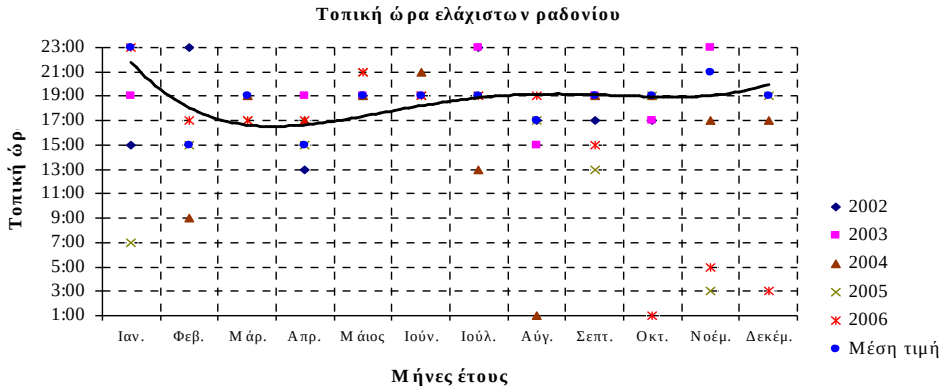
Από τον μέσο ημερήσιο κύκλο του ραδονίου και της ταχύτητας βλέπουμε ότι χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις από ότι ο μέσος ημερήσιος κύκλος της σχετικής υγρασίας, της θερμοκρασίας και του όζοντος. Σύμφωνα με όσα είδαμε παραπάνω αναλύοντας την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε περιπτώσεις, το ραδόνιο δεν έχει ένα σταθερό μοτίβο συσχέτισης του με την ταχύτητα του ανέμου. Η συγκέντρωση του ραδονίου δεν έχει καθόλου επαναλαμβανόμενη συγκέντρωση κατά την διάρκεια των ημερών, κάτι που οφείλεται στον συνδυασμό της ταχύτητας του ανέμου και της προέλευσης των αέριων μαζών. Από τον ημερήσιο κύκλο της θερμοκρασίας, της υγρασία και του όζοντος συμπεραίνουμε ότι το ραδόνιο συμβαδίζει περισσότερο με την ημερήσια μεταβολή της σχετικής υγρασίας και έρχεται σε αντίθεση με τον ημερήσιο κύκλο της θερμοκρασίας. Εν γένει αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση του ποσοστού της σχετικής υγρασίας συνδέεται με ελάττωση της συγκέντρωσης του ραδονίου. Πράγμα όμως που δεν ισχύει στην

μεταφορά αέριων μαζών. Είναι εμφανέστατο ότι μόλις ανατείλει ο ήλιος και αυξηθεί η θερμοκρασία αρχίζουν να μειώνονται τα επίπεδα της συγκέντρωσης του ραδονίου και της υγρασίας. Μόλις η θερμοκρασία αρχίσει να μειώνεται μετά της 13:00 και αυξάνεται η υγρασία, το ραδόνιο συνεχίζει να μειώνεται ακολουθώντας μέχρι το βράδυ την πορεία της ταχύτητας. Συγχρόνως όμως μετά τις 21:00 πέφτει η τιμή της σχετικής υγρασίας ενδεικνύοντας ότι έχουμε ξηρότερες αέριες μάζες και αύξηση του ραδονίου. Η κατάσταση αυτή είναι η περίπτωση που επικρατεί κατά μέσο όρο. Οι τυπικές αποκλίσεις του ημερήσιου κύκλου κάθε έτους φανερώνουν την αστάθεια στην συγκέντρωση του ραδονίου. Το όζον εμφανίζει μια αντίθεση των μεγίστων με το ραδόνιο. Αυτό είναι χαρακτηριστικό διότι το όζον αυξάνεται κατά την διάρκεια της ημέρας από την φωτοχημική παραγωγή όσο και λόγω μεταφοράς του από υψηλότερα στρώματα σε χαμηλότερα (αργά το απόγευμα). Η είσοδος όζοντος από την ελεύθερη τροπόσφαιρα είναι μια διαδικασία που συμβαίνει όταν η έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα να σταματάει ή έντονη ανάμειξη και να αρχίσει να δημιουργείται ένα σταθερά διαστρωματομένο στρώμα λόγω ψύξης του εδάφους. Την ώρα δηλαδή που καταρρέει το στρώμα ανάμειξης, μάζες από την ελεύθερη τροπόσφαιρα εισχωρούν στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Σε αντίθεση με το ραδονίου που την ημέρα λόγω μεγαλύτερης ανάμειξης διασκορπίζεται προς υψηλότερα στρώματα και συνεχίζεται ο διασκορπισμός του την ώρα κατάρρευσης του στρώματος ανάμειξης λόγω έντονων τυρβωδών καταστάσεων. Αναφορές για την αντίθεση του ραδονίου και του όζοντος υπάρχουν στις έρευνες των E. Gerasopoulos et.al.,2006, 2005, D. Desideri at al., 2006, L.Sesana et al.,1998).

α)

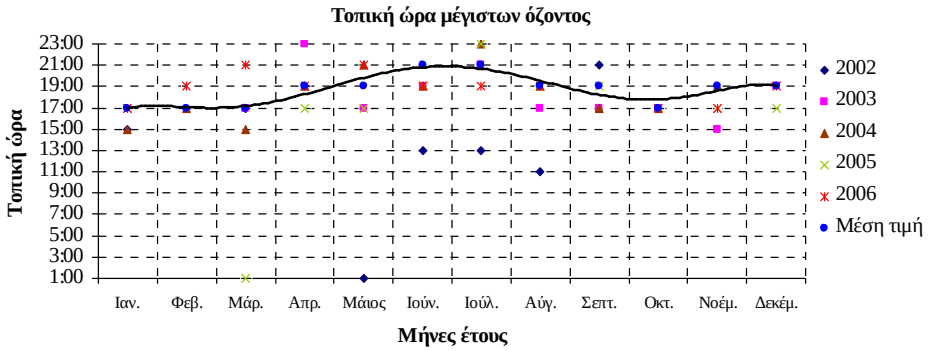


β)

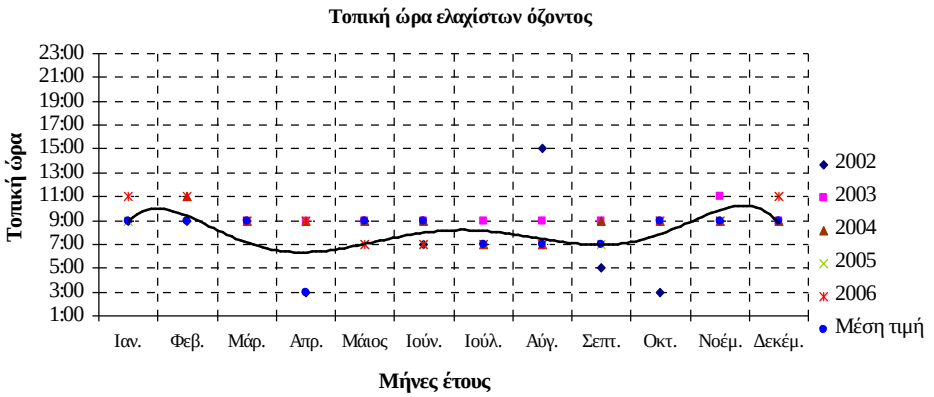


Εικόνα 46. Τοπική ώρα εμφάνισης ημερήσιων μέγιστων α) και ελάχιστων β) τιμών συγκέντρωσης ραδονίου ανά μήνα έτους.

α)



β)



Εικόνα 47. Τοπική ώρα εμφάνισης ημερήσιων μέγιστων α) και ελάχιστων β) τιμών συγκέντρωσης όζοντος ανά μήνα έτους.

Από την **Εικόνα 47** είναι εμφανής η σταθερότητα του όζοντος στα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα (τοπική ώρα σε UTC+2). Είναι χαρακτηριστικό ότι οι ώρες μεταξύ 17:00 και 21:00 είναι οι ώρες εμφάνισης των μέγιστων τιμών ενώ μεταξύ 7:00 και 11:00 είναι οι πιο συνηθισμένες ώρες εμφάνισης ελάχιστων τιμών όζοντος. Από την **Εικόνα 46** του ραδονίου αρχικά βλέπουμε ότι τόσο οι μέγιστες όσο και οι ελάχιστες τιμές του ραδονίου εμφανίζονται όλη την διάρκεια της ημέρας αλλά με μια προτίμηση των μέγιστων τιμών στις βραδινές ή πρώτες πρωινές ώρες και των ελάχιστων στις απογευματινές ώρες. Όμως θα δούμε και παρακάτω αρκετές φορές έχουμε εμφάνιση μέγιστων τιμών και κατά την διάρκεια της ημέρας.

4.3. Μελέτη των μεγίστων τιμών των ημερήσιων κύκλων του ραδονίου.

Βλέποντας από στην **Εικόνα 46** την αστάθεια που χαρακτηρίζει το ραδόνιο αποφασίσαμε να διερευνήσουμε εκτενέστερα τις ώρες εμφάνισης των μέγιστων συγκεντρώσεων του ραδονίου. Για αυτό το λόγο διερευνήσαμε την μεταβολή του ημερήσιου κύκλου. Ο τρόπος που επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα αναφέρεται παρακάτω.

4.3.1. Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων για την δημιουργία των ημερήσιων κύκλων.

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για να μπορέσουμε να δούμε πως μεταβάλλεται ο ημερήσιος κύκλος του ραδονίου, του όζοντος και των μετεωρολογικών δεδομένων είναι η παρακάτω:

α) Αρχικά χωρίσαμε τα δίωρα δεδομένα του κάθε έτους ανά μήνα. Δουλεύοντας τα δεδομένα για κάθε μήνα ξεχωριστά κρατήσαμε τις ημέρες του μήνα όπου δεν υπήρχαν κενά (είχαμε και τις 12 δίωρες τιμές).
β) Στη συνέχεια υπολογίσαμε την μέση τιμή κάθε ημέρας και διαιρέσαμε τις δίωρες μετρήσεις με αυτή. Η μέση τιμή του λόγου αυτού για τις δώδεκα μετρήσεις είναι ίση 1,000 ένδειξη ότι η διαδικασία που ακολουθείται είναι σωστή.
γ) Για να προκύψει ένας τυπικός λόγος συγκεντρώσεων που να εκφράζει όλο το μήνα υπολογίσαμε το μέσο όρο του κάθε δίωρου για τις ώρες 1:00, 3:00,……..23:00.
δ) Τέλος ο λόγος για κάθε δίωρο, πολλαπλασιάζεται με την μέση τιμή του μήνα που προκύπτει από τις μέσες ημερήσιες τιμές για τις ημέρες που χρησιμοποιήθηκαν στα προηγούμενα στάδια.

Για να προκύψουν οι εποχιακοί ημερήσιοι κύκλοι υπολογίστηκαν μεσοί όροι για τους μήνες κάθε εποχής.

4.3.2. Ημερήσιοι κύκλοι των ετών 2004-2006.

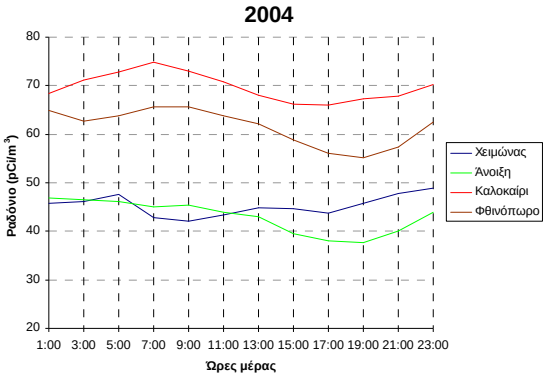
Αρχικά είδαμε μέσω των ημερήσιων κύκλων ανά εποχή και ανά έτος την μετακίνηση των μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου κατά την διάρκεια την ημέρας. Οι πιο αντιπροσωπευτικοί ημερήσιοι κύκλοι για το ραδόνιο, όπου είχαμε για όλες τις εποχές ένα καλό δείγμα ημερών, είναι για τα έτη 2004 έως 2006. Για αυτά τα έτη δίνεται το εύρος μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής του ημερήσιου κύκλου στον **Πίνακα 21**, καθώς και ο λόγος του εύρους με την μέση τιμή ανά εποχή και έτος, **Πίνακας 22**.

pCi/m^3	2004	2005	2006
Συνολικά	6,88	7,26	6,30
Χειμώνας	6,89	7,49	5,01
Άνοιξη	9,21	7,95	6,15
Καλοκαίρι	8,84	12,93	6,00
Φθινόπωρο	10,38	6,27	12,04

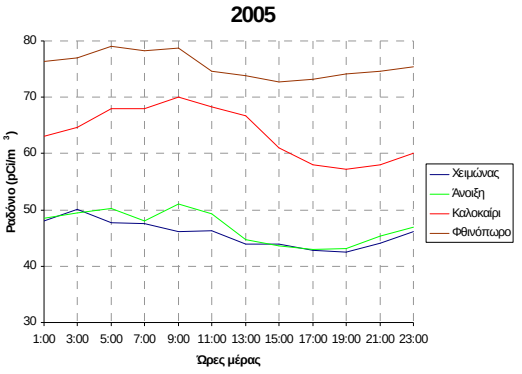
Πίνακας 21. Εύρος ημερήσιου κύκλου ραδονίου για την περίοδο 2004-2006.

	2004	2005	2006
Συνολικά	0,13	0,13	0,13
Χειμώνας	0,15	0,19	0,10
Άνοιξη	0,20	0,18	0,24
Καλοκαίρι	0,13	0,21	0,10
Φθινόπωρο	0,18	0,09	0,20

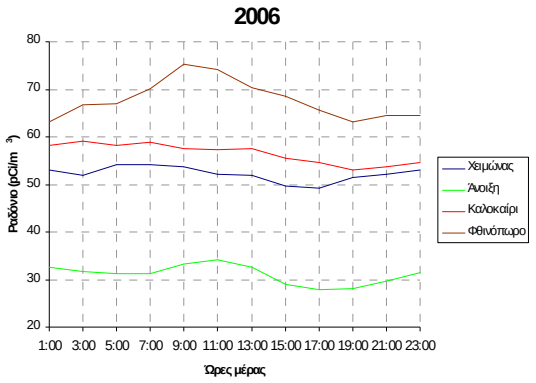
Πίνακας 22. Λόγος εύρους προς την μέση τιμή εποχής και έτους για την περίοδο 2004-2006.



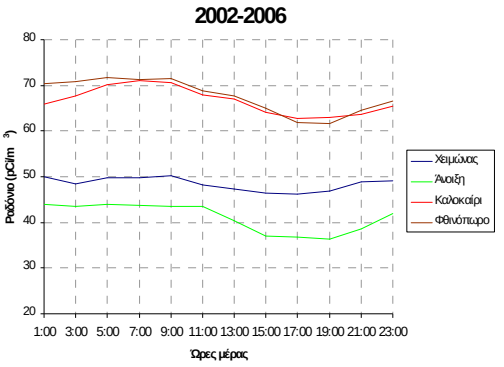
Εικόνα 48. Εποχιακή ημερήσια διακύμανση ραδονίου έτους 2004.



Εικόνα 49. Εποχιακή ημερήσια διακύμανση ραδονίου έτους 2005.



Εικόνα 50. Εποχιακή ημερήσια διακύμανση ραδονίου έτους 2006.



Εικόνα 51. Εποχιακή ημερήσια διακύμανση ραδονίου έτους 2002-2006.

	2004	2005	2006
Χειμώνας	42	62	41
Άνοιξη	52	71	61
Καλοκαίρι	61	73	40
Φθινόπωρο	59	46	40

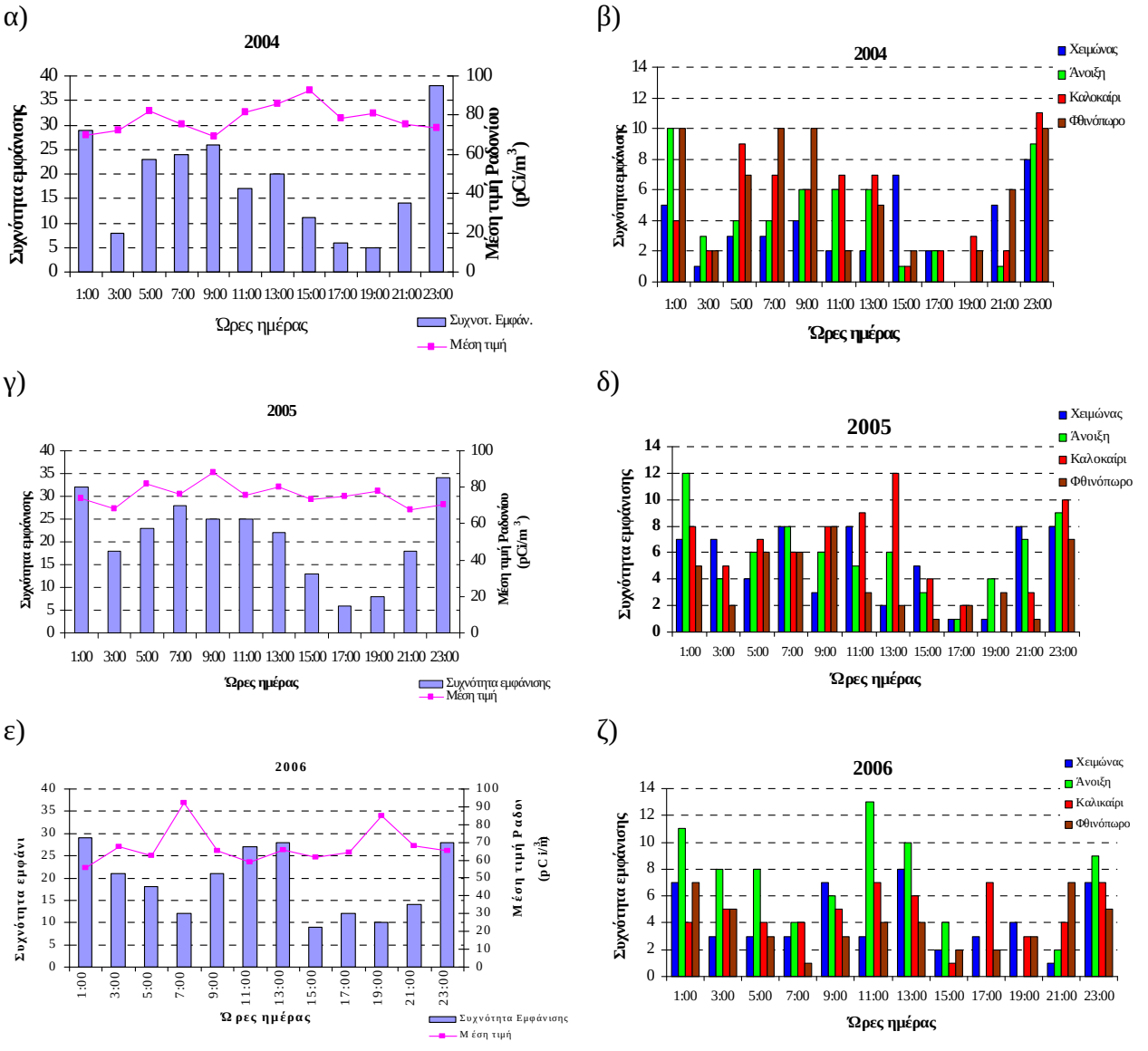
Πίνακας 23. Αριθμός παρατηρήσεων που αντιστοιχούν στον υπολογισμό του ημερήσιου κύκλου ανά εποχή.

Από τους **πίνακες 21 έως 22** σε συνδυασμό με τις **Εικόνες 48 έως 52** των ημερήσιων κύκλων βλέπουμε, ότι οι εποχές κάθε έτους που εμφανίζουν το μεγαλύτερο εύρος στους ημερήσιους κύκλους έχουν μετατοπισμένα τα μέγιστα τους τις ώρες μεταξύ 5:00 και 11:00. Αυτή η μετατόπιση είναι χαρακτηριστική της προέλευσης των αέριων, αλλά σε εποχές όπως το φθινόπωρο και η άνοιξη μπορεί να συμβεί και λόγω συσσώρευσης εξαιτίας χαμηλών ταχυτήτων ανέμων και παρατεταμένης ηρεμίας του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (σε πολύ μικρότερο όμως ποσοστό σε σχέση με την προέλευση). Γενικά τους ψυχρότερους μήνες όταν η σταθερότητα του οριακού στρώματος διατηρείται και κατά την διάρκεια της ημέρας το ραδόνιο αποκτάει υψηλές τιμές και κατά την διάρκεια της ημέρας (D.Dosideri et al., 2006). Έτσι για το 2004 η άνοιξη και το φθινόπωρο είναι οι εποχές που παρουσίαζαν σε μεγαλύτερο ποσοστό ημερήσια μέγιστα, το 2005 το καλοκαίρι και το 2006 το φθινόπωρο. Βλέποντας αυτή την αλλαγή στους ημερήσιους κύκλους, διερευνήσαμε την συχνότητα εμφάνισης των μέγιστων τιμών κατά την διάρκεια της ημέρας για τα έτη 2004, 2005 και 2006, την μέση τιμή ραδονίου που εμφάνισαν αυτά τα μέγιστα και την εποχικότητα.

Ακόμα παρατηρούμε ότι στις 1:00 και 23:00 έχουμε μεγάλη συχνότητα εμφάνισης σε όλα τα έτη αυτό είναι χαρακτηριστικό της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (σταθερότητας του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος) αλλά δεν αποκλείει και τις περιπτώσεις εμφάνισης βραδινών μεγίστων λόγω προέλευσης. Οι βραδινές μέγιστες τιμές είναι ένδειξη σταθερότητας του οριακού στρώματος αλλά δίνουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις περιπτώσεις προέλευσης. Ακόμα μεγάλη συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζουν και τα ημερήσια μέγιστα στο σύνολό τους, και ιδίως μεταξύ 5:00, 7:00 9:00, 11:00 και 13:00. Τέλος τις ώρες 15:00, 17:00 και 19:00 έχουμε και στα τρία έτη τον μικρότερο ποσοστό εμφάνισης μέγιστων τιμών. Αναλυτικότερα για το κάθε έτος παρατηρούμε:

Το 2004:

Τα βραδινά μέγιστα (23:00 και 1:00) χαρακτηρίζονται και τις τέσσερις εποχές αλλά εμφανίζουν χαμηλότερες μέσες τιμές. Τα ημερήσια μέγιστα έχουν μικρότερες συχνότητες εμφάνισης αλλά μεγαλύτερες μέσες τιμές κυρίως τις ώρες 11:00, 13:00 και 15:00. Έτσι τα μέγιστα στις 5:00 και 7:00 εμφανίζονται το καλοκαίρι αλλά και το φθινόπωρο. Των 9:00 είναι ως επί το πλείστον φθινοπωρινά, των 11:00, 13:00 καλοκαιρινά με συνεισφορά της άνοιξης, ενώ αυτά με την μεγαλύτερη μέση τιμή είναι τα μέγιστα του χειμώνα στις 15:00. Τα μεγάλα μέγιστα του χειμώνα στις 15:00 παρουσιάζονται από τον Δεκέμβριο του 2004 με ανάμεικτες (mixed) και Ν/ΝΔ προέλευσης αέριες μάζες, αλλά η μέση τιμή τους επηρεάσθηκε πολύ από τις υψηλές τιμές του φθινοπώρου και καλοκαιριού.



Εικόνα 52. Συχνότητα εμφάνισης μέγιστων τιμών ραδονίου κατά την διάρκεια της ημέρας και οι μέσες μέγιστες τιμές (σημεία) (α, γ, ε) καθώς και διαχωρισμός τους ανά εποχή (β, δ, ζ) για τα έτη 2004-2006.

Το 2005 παρατηρούμε:

Οι μεγαλύτερες μέσες τιμές εμφάνισης των μεγίστων αντιστοιχούν στις 5:00, 9:00 και 13:00. Χαρακτηριστική είναι η συνεισφορά του καλοκαιριού στις μέγιστες συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στις 13:00. Η καλοκαιρινή μέση τιμή του ραδονίου χωρίς δηλαδή να λαμβάνουμε υπ όψιν τις άλλες εποχές που εμφάνισαν μέγιστα στις 13:00 έφτασε τα 90,7pCi/m^3. Η μεγαλύτερη μέση τιμή παρατηρήθηκε στης 9:00 και ήταν περίπου 88 pCi/m^3. Κοιτάζοντας τις ημέρες που αντιστοιχούν τα μέγιστα αυτά παρατηρήσαμε ότι η άνοιξη και λίγο το φθινόπωρο, αλλά σε μικρό ποσοστό, είχε ημέρες με ταχύτητα ανέμου μικρότερη των 2 m/s (ευστάθεια κατά Pasquill). Τα καλοκαιρινά μέγιστα χαρακτηρίζονται από μεγάλες ταχύτητες και αρκετά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία στης 9:00.

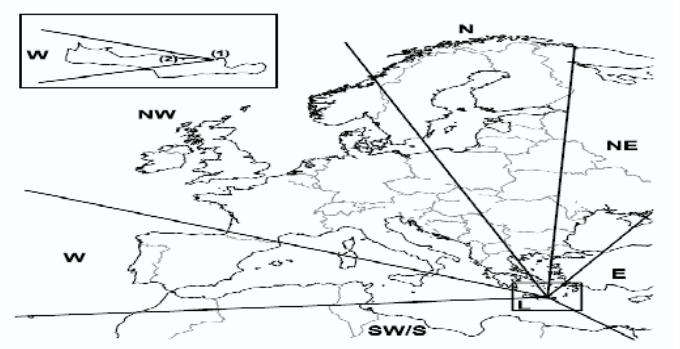
Το 2006 είναι εμφανές:

Ότι η άνοιξη είχε την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στις 1:00 3:00, 5:00, 11:00 και 13:00. Τα μέγιστα της άνοιξης του 2006 έχουν κύρια αιτιολογία τον Μάρτιο του 2006 καθόσον, ο Απρίλιος και ο Μάιος είχαν χαρακτηριστικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Ακόμα στα μέγιστα των 13:00 σημαντική συμβολή είχε ο Δεκέμβριος του 2006 που όπως αναφέρθηκε παραπάνω είχε την υψηλότερη μέση μηνιαία τιμή λόγω προέλευσης ανέμων. Η άνοιξη χαρακτηρίζονταν από χαμηλές τιμές, ιδίως ο Μάιος του 2006. Χαρακτηριστικό του Μάιου του 2006 ήταν η εξαιρετικά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία καθώς και οι θερμοκρασιακές αναστροφές στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε μεγάλο υψόμετρο (για τον αριθμό των ραδιοβολίσεων που έγιναν στο σταθμό Ηρακλείου το συγκεκριμένο μήνα), τόσο για την ημέρα όσο και για την νύχτα.

4.4. Μελέτη της διεύθυνσης του ανέμου ανά έτος και μήνα.

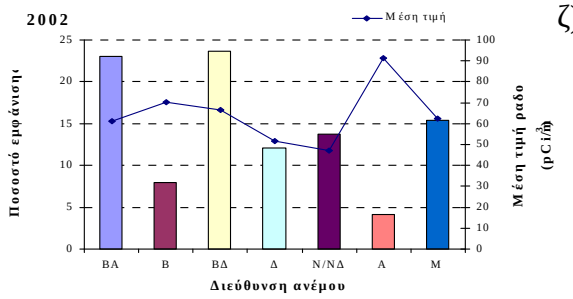
Με την βοήθεια του μοντέλου HYSPLIT της NOAA και τις ρετροπορίες της κάθε ημέρας καταφέραμε να προσδιορίσουμε την προέλευση των αέριων μαζών που έφταναν στο σταθμό για την περίοδο 2002-2006.

Ο χαρακτηρισμός της διεύθυνσης του ανέμου για κάθε ημέρα, και για τις αέριες μάζες που έφταναν στο σταθμό της Φινοκαλιάς έγινε οπτικά και με την βοήθεια του παρακάτω χάρτη **(Εικόνα 53)** στην συνέχεια οι προελεύσεις διαχωρίστηκαν με βάση την προέλευση και υπολογίστηκαν τα ποσοστά για κάθε διεύθυνση ανέμου. Έτσι προέκυψαν οι **Εικόνες 54 και 55**.

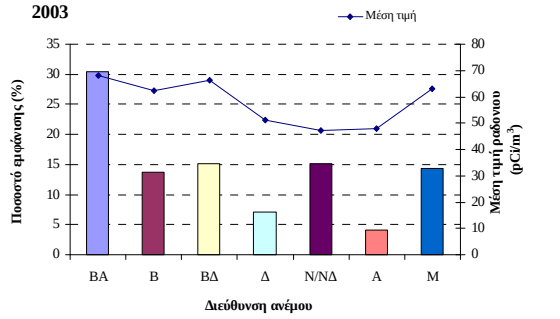


Εικόνα 53. Κατηγοριοποίηση των διευθύνσεων ανέμων για αέριες μάζες που φτάνουν στο σταθμό της Φινοκαλιάς.

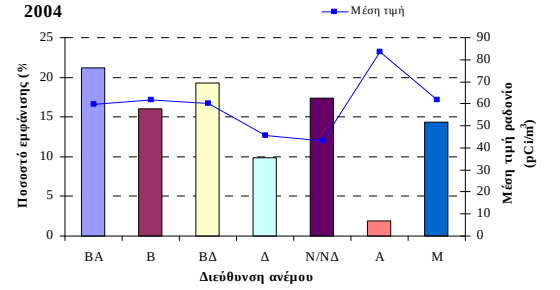
α)



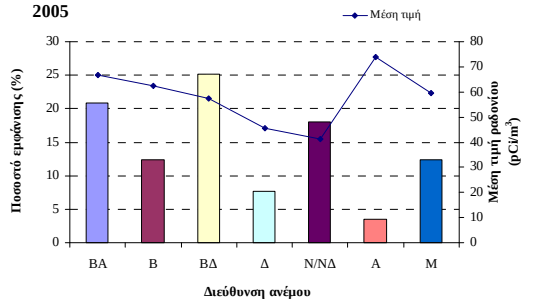
β)



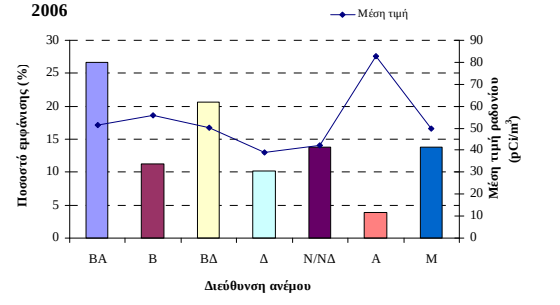
γ)



δ)

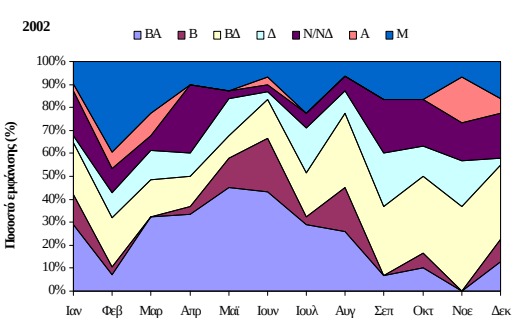


ε)

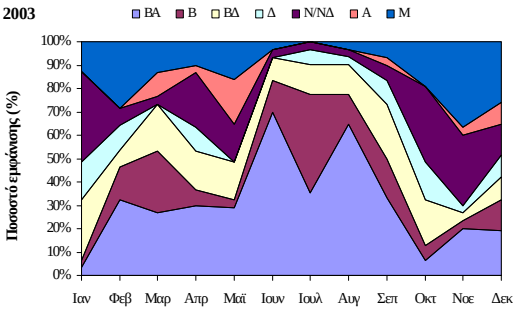


Εικόνα 54. Εμφάνιση συχνότητας ανέμων και αντιστοιχία μέσης τιμή ραδονίου για τα έτη 2002-2006. (α, β, γ, δ, ε).

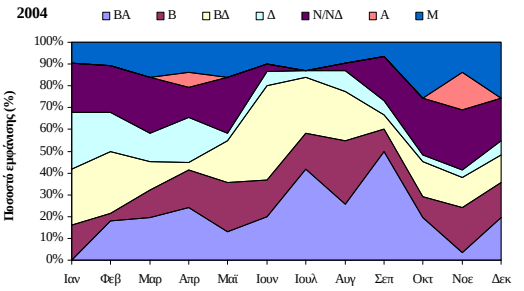
ζ)



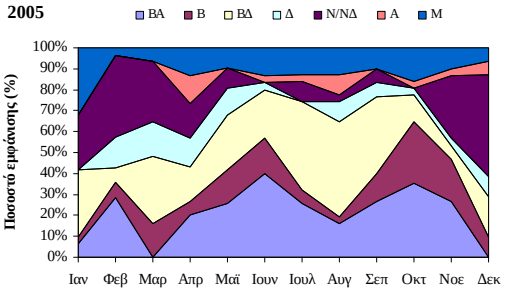
η)



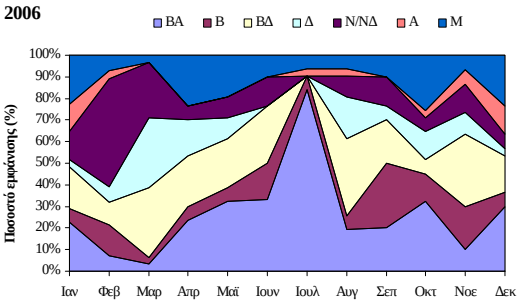
θ)



ι)



κ)



Εικόνα 55. Κατανομής ποσοστού εμφάνισης ανέμων ανά μήνα για τα έτη 2002-2006 (ζ, η, θ, ι, κ).

Με βάση την διεύθυνση δημιουργήσαμε ομάδες προέλευσης και υπολογίσαμε την μέση τιμή ραδονίου που αντιστοιχεί σε κάθε ομάδα. Στην **Εικόνα 54** (α, β, γ, δ, ε,) με το ποσοστό της εμφάνισης της συγκεκριμένης διεύθυνσης ανέμου και της μέσης τιμής ραδονίου φαίνεται παρακάτω για κάθε έτος. Την μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση αλλά το μικρότερο ποσοστό εμφάνισης έδωσαν οι ανατολικοί άνεμοι για όλα σχεδόν τα έτη της περιόδου. Τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης σε κάθε έτος δίνουν οι ΒΑ, ΒΔ και Β άνεμοι με μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου μεγαλύτερες των 60 pCi/m^3. Οι μικρότερες μέσες τιμές ραδονίου είναι χαρακτηριστικό των Δ και Ν/ΝΔ ανέμων. Οι δυτικής προέλευσης άνεμοι λόγω της θαλάσσιας επιφάνειας που διανύουν οι αέριες μάζες είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε ραδόνιο. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικά ανά διεύθυνση τι επηρεάζει την συγκέντρωση του ραδονίου. Στην **Εικόνα 55** (δεξιά) εμφανίζονται τα ποσοστά εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά μήνα κάθε έτους (ζ, η, θ, ι, κ). Οι Ετησίες, ή όπως είναι πιο γνωστοί, τα μελτέμια, εμφανίζονται από αρχές Μάιου (πρόδρομοι Ετησίες ή πρώιμα μελτέμια) μέχρι σε μερικές φορές και τον Οκτώβρη (μέτοπωροι Ετησίες ή όψιμα μελτέμια).

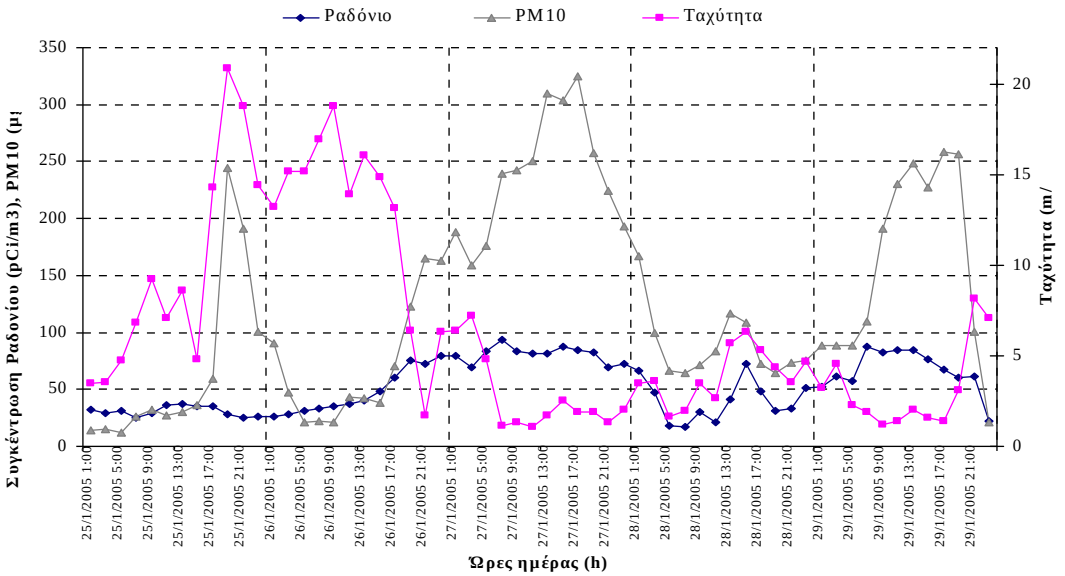
4.4.1. Νότιοι άνεμοι.

Οι νότιοι άνεμοι έχουν συχνότερη περίοδο εμφάνισης από τον Οκτώβριο έως το Φεβρουάριο αλλά και από το Μάρτιο έως τον Ιούνιο. Οι άνεμοι αυτοί όπως όλοι οι νότιοι άνεμοι πνέουν μπροστά από βαρομετρικά χαμηλά που κινούνται από τη δυτική στην ανατολική μεσόγειο. Την ανοιξιάτικη περίοδο τα χαρακτηριστικά ενός ανέμου Φεν (Foehn) (θερμοί και ξηροί άνεμοι που πνέουν στις υπήνεμες περιοχές οροσειρών η μεγάλων ορεινών όγκων) ή λίβες, παίρνουν τη μορφή θερμών καταβατικών ανέμων στο βόρειο μέρος της Κρήτης. Οι άνεμοι τύπου σιρόκο, νοτιοανατολικός άνεμος, παρατηρούνται μπροστά από τις σαχριανές υφέσεις και έχουν μεγαλύτερη συχνότητα από το Μάρτιο έως τον Ιούνιο. Οι άνεμοι αυτοί είναι πλούσιοι σε σκόνη και προκαλούν την συμπύκνωση των υδρατμών που βρίσκονται στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

Οι Ν και Ν/Δ προελεύσεις ανέμων δίνουν μέσες ημερήσιες τιμές συχνότερα μεταξύ 30pCi/m^3 και 50pCi/m^3. Μεγαλύτερες μέσες ημερήσιες τιμές ραδονίου έχουν παρατηρηθεί με μικρές ταχύτητες ανέμου (συμβάλει η συσσώρευση) ενώ σε μεσαίες και υψηλές ταχύτητες η τιμή του ραδονίου διατηρείται στα παραπάνω όρια. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις του νότιου τομέα είναι και αποτέλεσμα της γεωλογίας των πετρωμάτων. Τα παράλια στην βόρειας περιοχής της Σαχάρας σε μεγαλύτερο ποσοστό αποτελούνται από ιζηματογενή πετρώματα που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερης περιεκτικότητας σε ουράνιο που στην ουσία είναι η κύρια πηγή για το ^{222}Rn. Προχωρώντας προς το εσωτερικό της Σαχάρας τα πετρωμάτων είναι πιο πλούσια σε ραδόνιο και έτσι αυξάνει την συγκέντρωση του ραδονίου.

4.4.1.1. Ραδόνιο και PM_{10} από νότιες / νοτιοδυτικές προελεύσεις.

Οι άνεμοι του νότιου τομέα περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό όπως είπαμε σκόνη. Προσπαθήσαμε μέσω των μετρήσεων των PM_{10} να δούμε αν σε περιπτώσεις αύξησης του ραδονίου αυτό συμβάδιζε με την αύξηση των συγκεντρώσεων των PM_{10}.

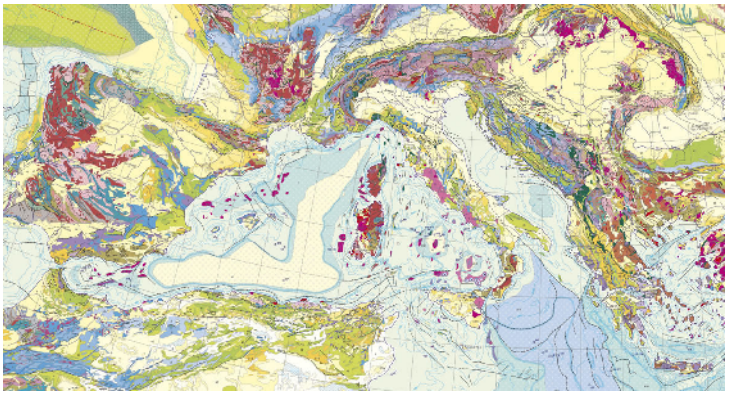


Εικόνα 56. Μεταβολή της συγκέντρωσης ραδονίου, PM_{10} και της ταχύτητας του ανέμου από τις 25/01/2005 έως 29/01/2005 επί επίδραση Ν, ΝΔ ανέμων.

Την περίοδο μεταξύ 25/01/2009-29/01/2009 συσχετίσαμε την Ν/Δ διεύθυνση ανέμων με την μεταβολή των PM_{10} **(Εικόνα 56**). Είναι εμφανές ότι η μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου ακολουθεί την μεταβολή της συγκέντρωσης των PM_{10}. Ακόμα μεγαλύτερες τιμές ραδονίου παρατηρήθηκαν ημέρες που μειωνόταν η ταχύτητα του ανέμου. Υψηλές ταχύτητες του ανέμου δεν έδωσαν υψηλές τιμές ραδονίου αλλά αύξησαν την συγκέντρωση των PM_{10} (25/01/2005 19:00). Στις 27/01/2005 η αύξηση του ραδονίου επηρεάστηκε τόσο από την μείωση της ταχύτητας του ανέμου όσο και από το γεγονός ότι τις πρώτες ημέρες η προέλευση της ήταν από την περιοχή της Ισπανίας.

4.4.2. Δυτικοί άνεμοι.

Οι δυτικές διευθύνσεις ανέμων εμφανίζονται σε ποσοστό 10% ετησίως. Εξαφανίζονται περισσότερο Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο και μερικές φορές Σεπτέμβριο, Οκτώβριο. Οι δυτικές προελεύσεις ανέμων έχουν κατά μέσο όρο από 30pCi/m^3 έως 50pCi/m^3 ραδονίου. Μεγαλύτερες τιμές ραδονίου από 50pCi/m^3 παρατηρήθηκαν ημέρες με χαμηλές ταχύτητες (<3 m/s). Οι χαμηλές τιμές τόσο τους θερμούς όσο και τους κρύους μήνες εξηγείται από την μεγάλη επαφή των αέριων μαζών με την θάλασσα. Ακόμα ο μέσος όρος του ραδονίου ανεβαίνει αν οι αέριες μάζες περάσουν από την Ισπανία. Η Ισπανία καθώς και η Σαρδηνία χαρακτηρίζονται από πυριγενή πετρώματα έτσι αν οι αέριες μάζες περάσουν χαμηλά από τις περιοχές αυτές θα εμπλουτιστούν σε ραδόνιο. Οι περιπτώσεις αυτές είναι πολύ λίγες.



Εικόνα 57. Γεωλογικός χάρτης Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα. (Πηγή: http://www.bgr.de/karten/IGM E5000/IGME5000.htm).

Γεωλογικός χάρτης ολόκληρης της Ευρώπης μαζί πίνακα εξηγήσεων υπάρχει στο Παράτημα Ι.

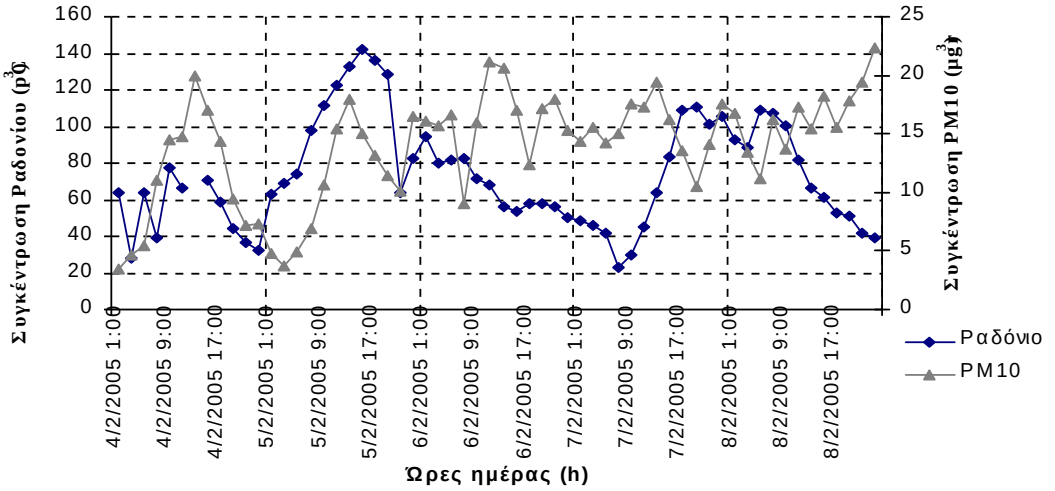
4.4.3. Βορειοανατολικοί άνεμοι.

Οι βορειοανατολικοί άνεμοι παρατηρούνται όταν υπάρχει συνδυασμός αντικυκλώνα στην κεντρική Ευρώπη και τα βόρεια Βαλκάνια και χαμηλές πιέσεις στην περιοχή των Συρτέων ή λίγο βορειότερα στην κεντρική Μεσόγειο. Το ποσοστό εμφάνισης τους ετησίως είναι μεταξύ 20% και 30%. Οι μέσες ημερήσιες τιμές ραδονίου σε αυτές τις προσελεύσεις είναι μεγαλύτερες των 50 pCi/m^3. Είναι λίγες οι περιπτώσεις χειμερινές ή καλοκαιρινές που η βορειανατολική διεύθυνση θα δώσει μικρότερες μέσες ημερήσιες τιμές, αλλά υπαρκτές.

Όπως είδαμε στην 3^{η} περίπτωση υψηλές ταχύτητες ανέμου χαρακτηρίζουν την βορειοανατολική διεύθυνση ανέμων (04/02/2005-08/02/2005). Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου όμως ήταν υψηλές παρά τις μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

4.4.3.1. Ραδόνιο και PM_{10} από βορειοανατολικές προελεύσεις.

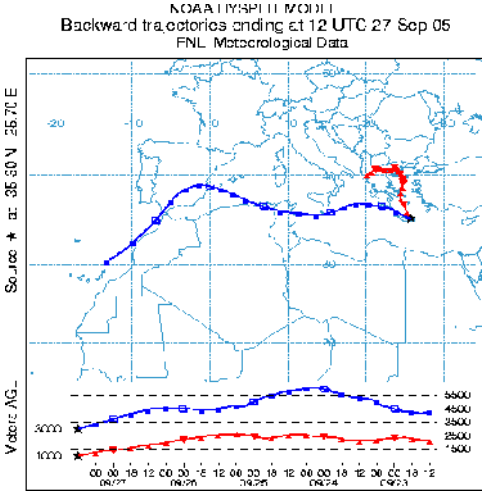
Το διάγραμμα του ραδονίου με τα PM_{10} για την περίοδο 04/02/2005 έως 08/02/2005 φαίνεται παρακάτω **(Εικόνα 58).** Χαρακτηριστικό είναι ότι τις δύο πρώτες ημέρες η αύξηση των σωματιδίων ακολουθεί την αύξηση του ραδονίου στην συνέχεια όμως αυτό δε ισχύει. Οι μέσες ημερήσιες τιμές των PM_{10} κυμαίνονταν από 10 μgr/m^3 έως 17 μgr/m^3 ενώ του ραδονίου από 52,8 pCi/m^3 έως 102 pCi/m^3.



Εικόνα 58. Μεταβολή της συγκέντρωσης ραδονίου, και των PM_{10} από τις 04/02/2005 έως 08/02/2005.

4.4.4.. Βόρειοι άνεμοι.

Οι ψυχροί βόρειοι άνεμοι εμφανίζονται σε όλες τις εποχές του έτους. Το ποσοστό τους ετησίως δεν ξεπερνάει 10% με 15%. Κατά την διάρκεια του χειμώνα το κινούμενο βαρομετρικό χαμηλό που διέρχεται από το Αιγαίο προκαλεί κακοκαιρία με μεγάλα ύψη υετού, ενώ την θερινή περίοδο οι αέριες μάζες χαρακτηρίζονται από την παντελή έλλειψη υγρασίας. Η μέση τιμή που χαρακτηρίζει την Βόρεια διεύθυνση ανέμων κυμαίνεται από 50pCi/m^3 έως 70pCi/m^3 μέση ημερήσια τιμή ραδονίου. Χαρακτηριστικό είναι ότι τους κρύους μήνες ($1^{ος}$, $2^{ος}$, $3^{ος}$, $4^{ος}$, $5^{ος}$,$11^{ος}$ $12^{ος}$) η μέση τιμή του είναι περίπου στα 50pCi/m^3 ενώ τους ζεστούς μήνες ($6^{ος}$, $7^{ος}$, $8^{ος}$, $9^{ος}$, $10^{ος}$) είναι στα 70pCi/m^3. Μερικές φορές οι βόρειοι άνεμοι έχουν τοπικό χαρακτήρα και προέρχονται από την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας. Σε τέτοιες περιπτώσεις έχουμε υψηλές τιμές ραδονίου. Χαρακτηριστική είναι η 27 Σεπτεμβρίου του 2005 όπου προελεύσεις αέριων μαζών από την ευρύτερη περιοχή της βόρειας Ελλάδας έδωσαν υψηλή μέση ημερήσια τιμή ραδονίου 127,4pCi/m^3 **(Εικόνα 59**).



Εικόνα 59. Βορειοδυτικές προελεύσεις αέριων μαζών από την περιοχή της Ελλάδας.

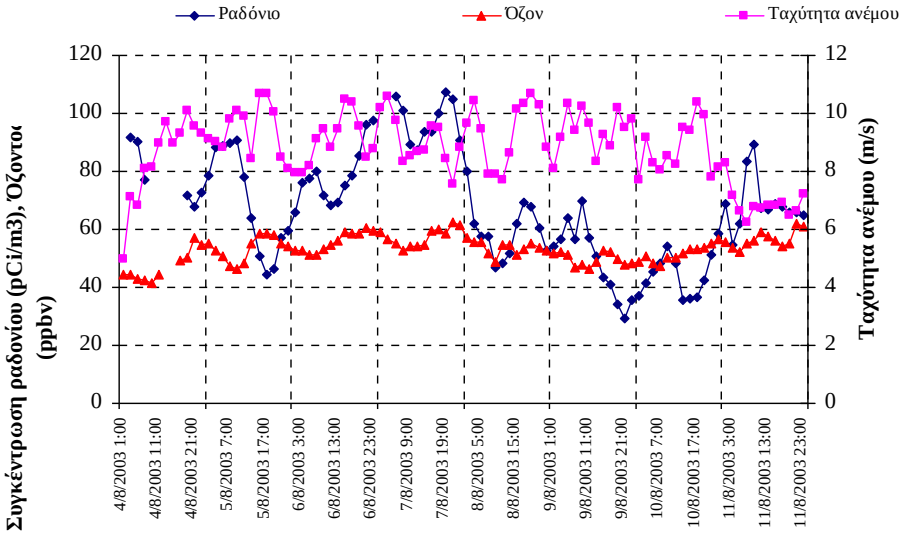
4.4.5. Βορειοδυτικοί άνεμοι.

Κατά την διάρκεια του χειμώνα βορειοδυτικοί άνεμοι παρατηρούνται με το πέρασμα μετωπικών υφέσεων που κινούνται βασικά από Δ-ΝΔ προς Α-ΒΑ. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, βορειοδυτικοί άνεμοι παρατηρούνται την πρώτη ημέρα της επικράτησης μελτεμιού στη χώρα. Οι βορειοδυτικοί άνεμοι έχουν 20% με 25% ποσοστό εμφάνισης το έτος και οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 50pCi/m^3 έως 70pCi/m^3. Ακόμα τους κρύους μήνες η μέση ημερήσια τιμή του μειώνεται στα 40-45pCi/m^3.

4.4.6. Ετησίες

Στο Αιγαίο Πέλαγος οι Ετησίες ή όπως είναι πιο γνωστοί, τα μελτέμια, είναι άνεμοι του βόρειου τομέα που πνέουν στην περιοχή του Αιγαίου και της ανατολικής Μεσογείου με περίοδο εμφάνισης από τις αρχές Μάιου έως τα μέσα του Οκτωβρίου με μέγιστη συχνότητα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Η ένταση των Ετησίων μια ή δύο ημέρες από τη στιγμή της επικράτησης τους συνήθως παρουσιάζει ημερήσια κύμανση με μέγιστο το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα και ελάχιστο τη νύχτα. Τη νύχτα, που στο οριακό στρώμα επικρατούν συνθήκες ευστάθειας δεν γίνεται μεταφορά ορμής και η ένταση του ανέμου μειώνεται σημαντικά. Όταν υπάρχει δυναμικό αίτιο, οι Ετησίες παρουσιάζονται ενισχυμένοι όλο το εικοσιτετράωρο. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα στις 4 έως 11 Αυγούστου του 2003 (Ζιακόπουλος Δ. 2008). Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία εμποδισμού τύπου Ωμέγα στην Ευρώπη προκάλεσε ισχυρούς και επίμονους βορειοανατολικούς ανέμου στην Αττική. Την ίδια χρονική περίοδο στην Κρήτη επικράτησαν Βορειοανατολικοί άνεμοι μεγάλων ταχυτήτων με μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου από 44,6 pCi/m^3 έως 97,5pCi/m^3 **(Εικόνα 60).**

Τις ημέρες 07/08/03 και 08/08/03 έχουμε μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου και όζοντος. Στην συνέχεια οι μέσες ημερήσιες τιμές μειώνονται για να ξανά αυξηθούν στις 11/08. Παρατηρώντας περισσότερο το όζον αυτές τις ημέρες είδαμε ότι η αύξηση του συνεχίζεται μέχρι τις 21:00 το βράδυ.

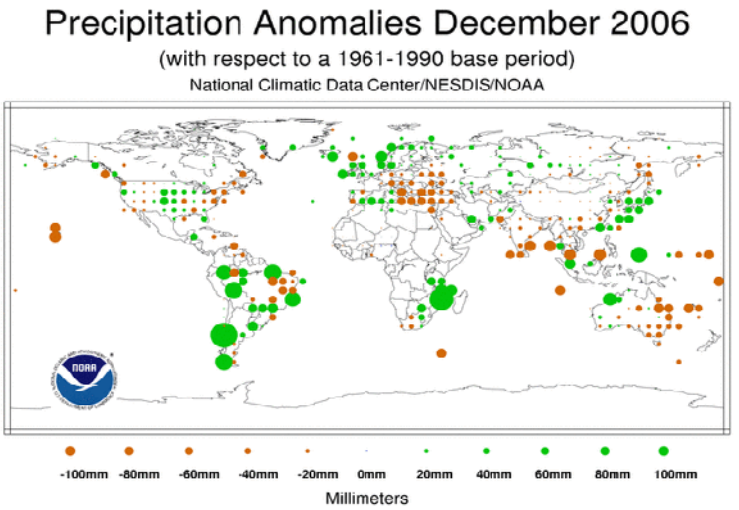


Εικόνα 60. Μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου, όζοντος και ταχύτητας του ανέμου από τις 04/08/2003-11/08/2003.

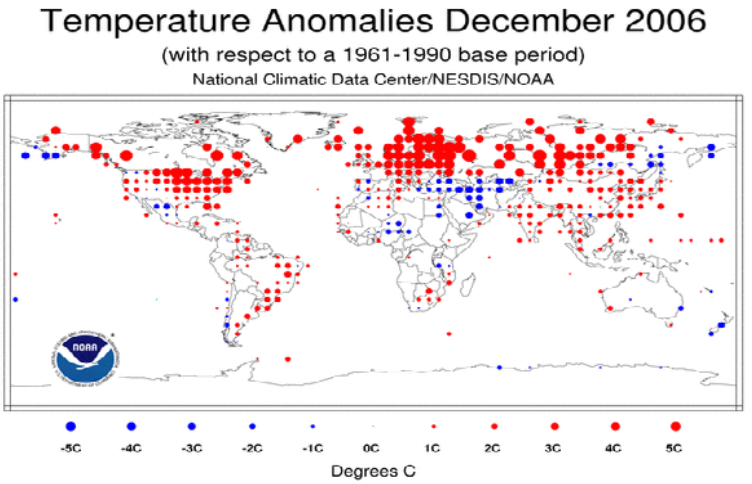
4.5. Ραδόνιο και καιρικά φαινόμενα στην περιοχή της κεντρικής Ευρώπης.

Βλέποντας την εξάρτηση του ραδονίου από την προέλευση των αέριων μαζών και τις μέγιστες μέσες τιμές που δίνονται από τις Β, ΒΑ, ΒΔ διευθύνσεις ανέμου, αποφασίσαμε να συγκρίνουμε τα εποχιακά εκατοστημόρια των μέσων ημερήσιων τιμών που μελετήσαμε στην **ενότητα 2.2** με τις καιρικές συνθήκες στην κεντρική Ευρώπη. Το ενδιαφέρων μας επικεντρώθηκε στην μελέτη της βροχόπτωσης και της επικάλυψης με χιόνι, καθώς και στις υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίστηκαν την περίοδο 2002-2006 στην κεντρική Ευρώπη. Η αιτιολογία της διερεύνησης αυτής είναι η κύρια πηγή του ραδονίου, το έδαφος και οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαφυγή της στην ατμόσφαιρα. Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει όπως είδαμε την διαφυγή του ραδονίου στην ατμόσφαιρα εξαιτίας εγκλωβισμού του στην υγρή φάση (Washington and Rose 1990, Pearson, 1965) άρα οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην κεντρική Ευρώπη επηρεάζουν και την ποσότητα του ραδονίου που μεταφέρουν οι αέριες μάζες.

Με την βοήθεια των εκατοστημορίων παρατηρήθηκαν οι εξής σημαντικές διαφορές μεταξύ των ετών. Αρχικά ο χειμώνας του 2006 παρουσίασε τα μεγαλύτερα εκατοστημόρια από όλα τα έτη (για τα έτη 2002-2003 υπήρχαν πολλά κενά δειγματοληψιών και δεν συμπεριλήφθηκαν στην διεξαγωγή συμπερασμάτων για την χειμερινή περίοδο). Το 2006 ήταν ένα έτος με χαρακτηριστικό τις υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή ήταν ένα από τα θερμότερα έτη των εποχών. Τα υψηλά εκατοστημόρια του ραδονίου επηρεάστηκαν σημαντικά από τον Δεκέμβριο του 2006. Ο Δεκέμβριος του 2006 χαρακτηρίζεται σαν ένας εξαιρετικά θερμός μήνας με λίγες βροχοπτώσεις στην κεντρική Ευρώπη, γενικά το φθινόπωρο του 2006 ήταν πολύ θερμό στην κεντρική Ευρώπη (Luterbacher et al., 2007, G. J. van Oldenborgh, 2007). Η ξηρασία αύτη είχε ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απελευθέρωση ραδονίου και την μεταφορά μέσω των ανέμων που διέρχονται από την κεντρική Ευρώπη στην περιοχή της Κρήτης. Στην **Εικόνα 61** δίνονται οι αποκλίσεις της βροχόπτωσης από την μέση τιμή των ετών 1961-1990, κάνοντας εμφανή την ξηρασία που επικράτησε, ενώ στην **Εικόνα 62,** δίνονται οι αποκλίσεις στην θερμοκρασία.

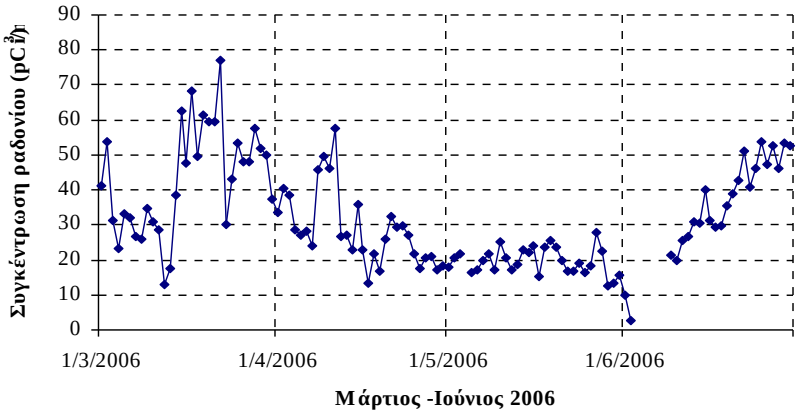


Εικόνα 61. Απόκλιση βροχοπτώσεων για τον Δεκέμβριο του 2006 με βάση τα έτη (1961-1990) (Πηγή: http://www.ncdc.noaa.gov/sotc).

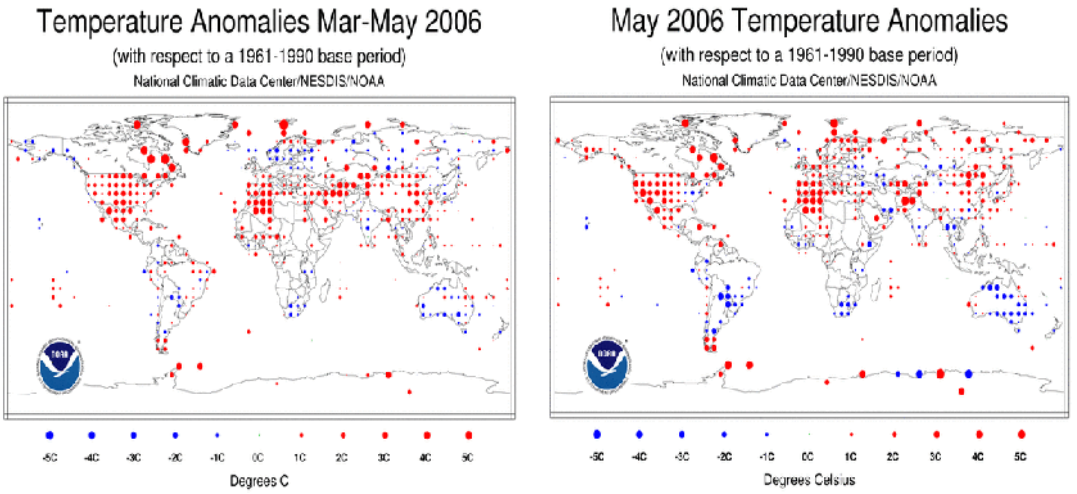


Εικόνα 62. Απόκλιση στην θερμοκρασία για τον Δεκέμβριο του 2006 με βάση τα έτη (1961-1990) (Πηγή: http://www.ncdc.noaa.gov/sotc).

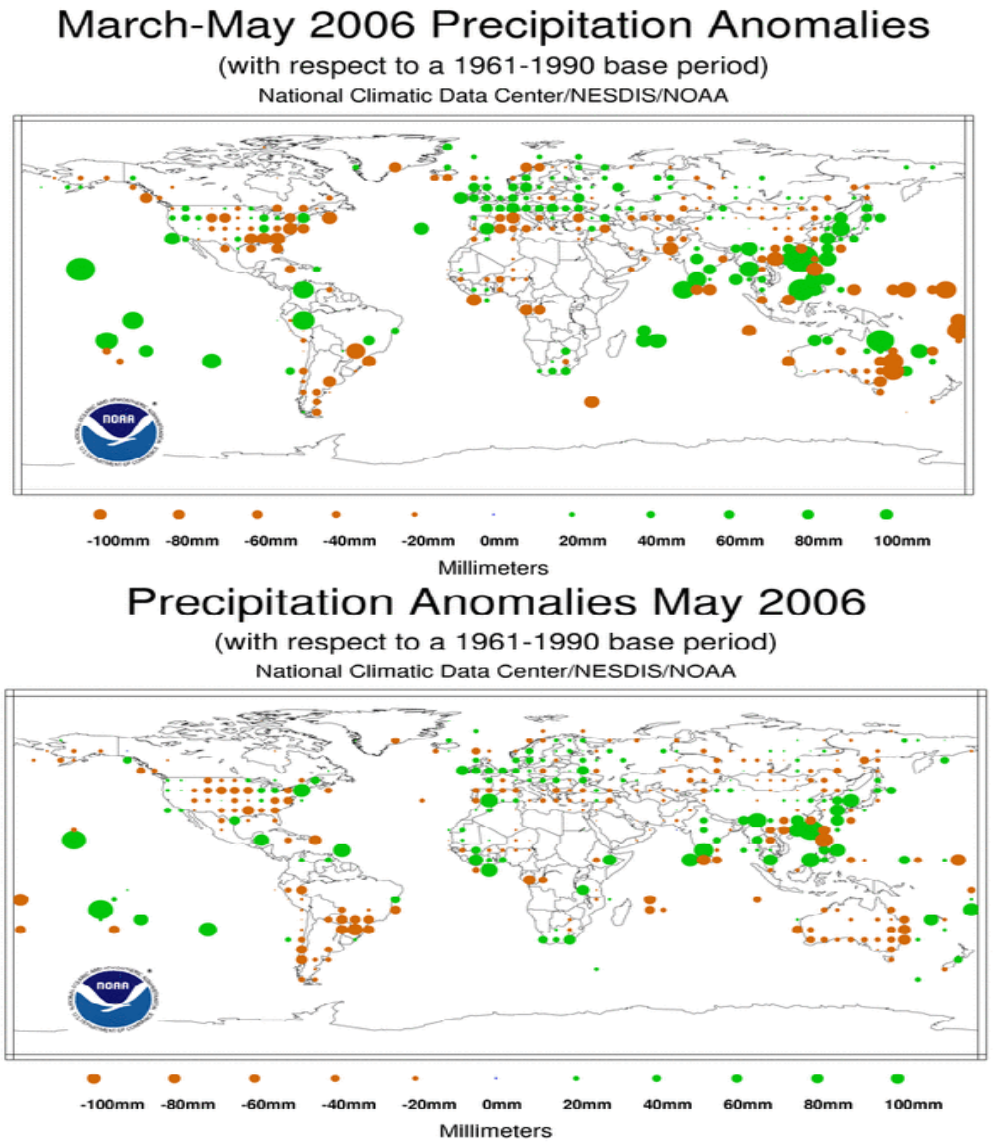
Η άνοιξη του 2006 παρουσίασε τα χαμηλότερα εκατοστημόρια της περιόδου 2004-2006. Η περίοδος αυτή παρουσίασε μια απότομη μείωση της συγκέντρωσης ραδονίου από τα μέσα του Απριλίου που φαίνεται χαρακτηριστικά στην **Εικόνα 63** . Η μέση μηνιαία συγκέντρωση του ραδονίου για τον Μάιο του 2006 ήταν 19,63±3.78 pCi/m^3. Παρόλο που ο Μάιος ήταν ένας πολύ θερμός μήνας η τιμή του ραδονίου ήταν πολύ χαμηλή. Από τις **Εικόνες 64 έως 65** φαίνεται η απόκλιση της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας για την περίοδο Μάρτιος έως το Μάιο του 2006, καθώς και για τον Μάιο του 2006. Στα τέλη της χειμερινής περιόδου του 2006, δηλαδή αρχές του Φεβρουαρίου παρατηρήθηκε πτώση χιονιού **(Εικόνα 66)**. Στην συνέχεια το Μάρτιο και στις αρχές του Απριλίου πλημμύρες παρατηρήθηκαν στην περιοχή της κεντρικής Ευρώπης. Ο Απρίλιος επιπλέον χαρακτηρίστηκε από υψηλές θερμοκρασίας που βοήθησαν στο λιώσιμο του χιονιού. Η υγρασία του εδάφους όταν αυξάνεται από την βροχόπτωση δεσμεύει τους πόρους του εδάφους και κοντά στην επιφάνεια και μειώνει το ρυθμό εκπομπής από το έδαφος του ^{222}Rn (Moses et al., 1963, Pearson and Moses, 1966, Israël et al., 1966). Τα έντονα αυτά φαινόμενα (οι πλημμύρες) σε συνδυασμό της επιρροής της υγρασίας στην συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου είχαν ως αποτέλεσμα εξαιτίας της υγρασίας να μην απελευθερωθούν σημαντικές ποσότητες ραδονίου γεγονός που μείωσε την μέση μηνιαία τιμή του Μαΐου.



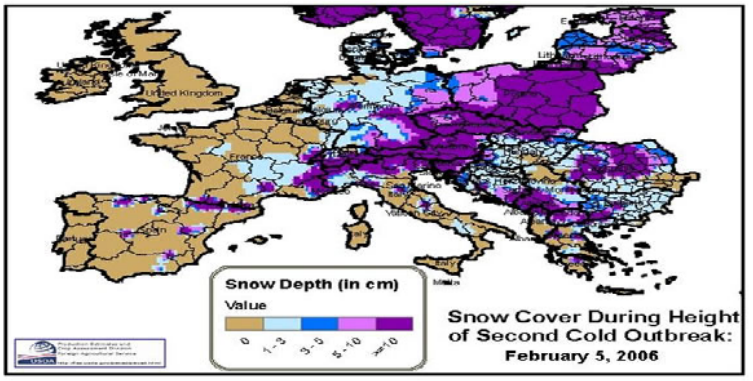
Εικόνα 63. Μέση ημερήσια συγκέντρωση ραδονίου από το Μάρτιο έως τον Απρίλιο του 2006



Εικόνα 64. Απόκλιση στην θερμοκρασία από τον Μάρτιο έως τον Απρίλιο του 2006 με βάση τα έτη 1961-1990 και για τον Μάιο του 2006 (Πηγή: http://www.ncdc.noaa.gov/sotc).



Εικόνα 65. Απόκλιση βροχοπτώσεων για τον Δεκέμβριο του 2006 με βάση τα έτη (1961-1990) (Πηγή: http://www.ncdc.noaa.gov/sotc).



Εικόνα 66. Κάλυψη περιοχών με χιόνι στις 5 Φεβρουαρίου 2006 (Πηγή: http://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2006/03/europe_30mar2006).

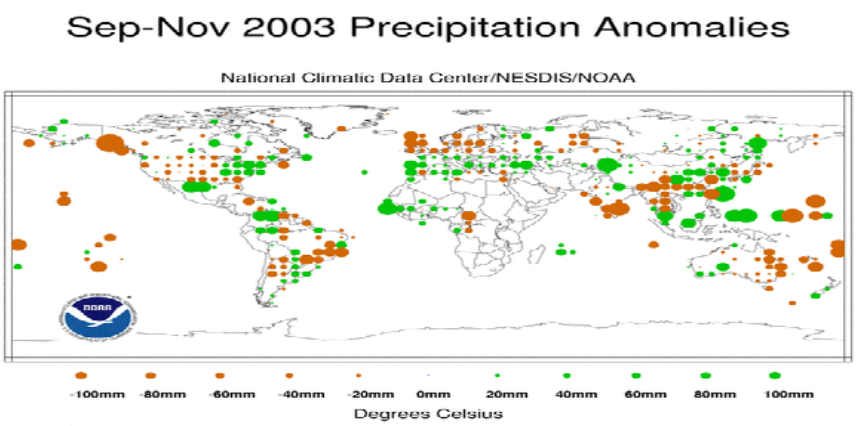
Παρόλο που οι βροχοπτώσεις και το λιώσιμο του χιονιού δεν βοήθησαν στην απελευθέρωση και μεταφορά του ατμοσφαιρικού ραδονίου, το όζον τον Μάιο του 2006 είχε την υψηλότερη μέση μηνιαία τιμή που εμφανίστηκε την περίοδο 2002-2006 (61,72±5,69 pbb_v). Σε αυτό ωφέλησαν οι αυξημένες θερμοκρασίας που λόγο εκτεταμένης ηλιοφάνειας βοήθησαν στην φωτοχημική παραγωγή του όζοντος.

Από τον Μάιο και μετά οι υψηλές θερμοκρασίας και ιδίως των Ιούλιο του 2006 που συγκρίνονται με τις υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού του 2003 (M. Rebetez et al., 2008) βοήθησαν στην αύξηση του ραδονίου σε κανονικά επίπεδα για την εποχή. Το φθινόπωρο του 2006 όπως αναφέρθηκε παραπάνω ήταν πολύ θερμό και ξηρό. Θα περιμέναμε να χαρακτηρίζεται από υψηλότερα εκατοστημόρια. Συγκρίνοντας τις τιμές των εκατοστημορίων του φθινοπώρου με την απόκλιση της βροχόπτωσης για κάθε έτος με βάση τις εικόνες **67α έως 67δ** προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

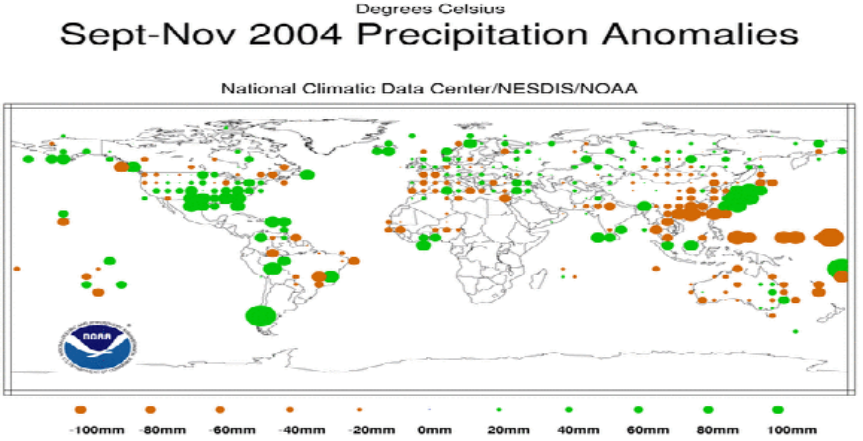
Το φθινόπωρο του 2005 χαρακτηρίζεται από την μεγαλύτερη ξηρασία στις περιοχές της κεντρικής-Ανατολικής Ευρώπης και είναι αυτό που εμφάνισε τα μεγαλύτερα εκατοστημόρια για την φθινοπωρινή περίοδο. Ακόμα την μεγαλύτερη μέση τιμή ανά διεύθυνση ανέμου **(Εικόνα 54)** από τους ανέμους που έχουν προέλευση την κεντρική Ευρώπη την είχαν οι ΒΑ άνεμοι.

Το φθινόπωρο του 2004 η κεντρική Ευρώπη ήταν ουδέτερη ως προς την βροχόπτωση **(Εικόνα 67β)** και ήταν το έτος με τη χαμηλότερη διάμεσο της διακύμανσης. Οι μέσες τιμές ανά διεύθυνση ανέμου είχαν για τον βόρειο τομέα (ΒΑ, ΒΔ, Β) είχαν την ίδια μέση τιμή. Το φθινόπωρο του 2006 **(Εικόνα 68δ)** θα περιμέναμε να είχε δώσει μεγαλύτερες τιμές ραδονίου. Ίσως να επηρεάστηκε από το μεγάλο ποσοστό των ΒΑ και ΒΔ ανέμων καθώς και από το γεγονός ότι υπήρχαν μερικά κενά δειγματοληψίας. Ακόμα το φθινόπωρο του 2006 η υψηλότερη μέση τιμή ανά διεύθυνση ανέμου για τον βόρειο τομέα (ΒΑ, ΒΔ, Β) είχαν οι βόρειοι άνεμοι. Τέλος το φθινόπωρο του 2003 **(Εικόνα 67α)** εμφάνισε παραπλήσια εκατοστημόρια με το 2005 **(Εικόνα 67γ)** (διάμεσος και τρίτο τεταρτημόριο) και μέγιστη τιμή ανά διεύθυνση ανέμου (ΒΑ, ΒΔ, Β) στους ΒΔ και ΒΑ ανέμους.

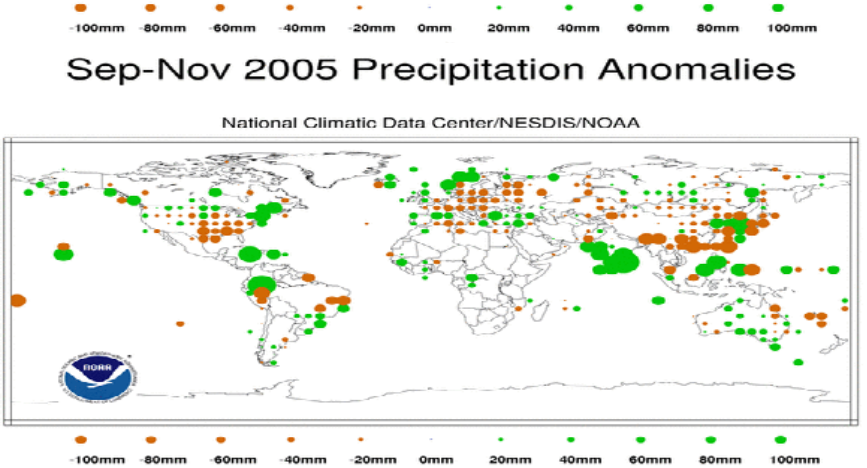
α)



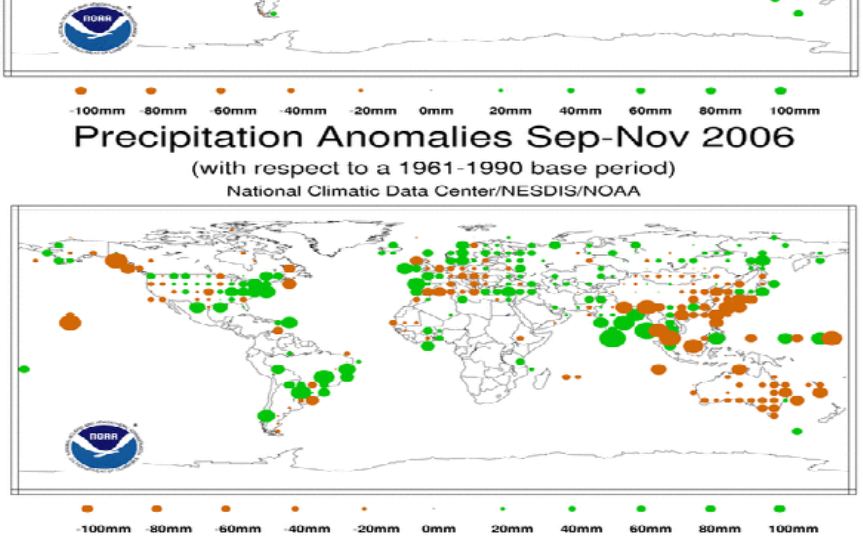
β)



γ)



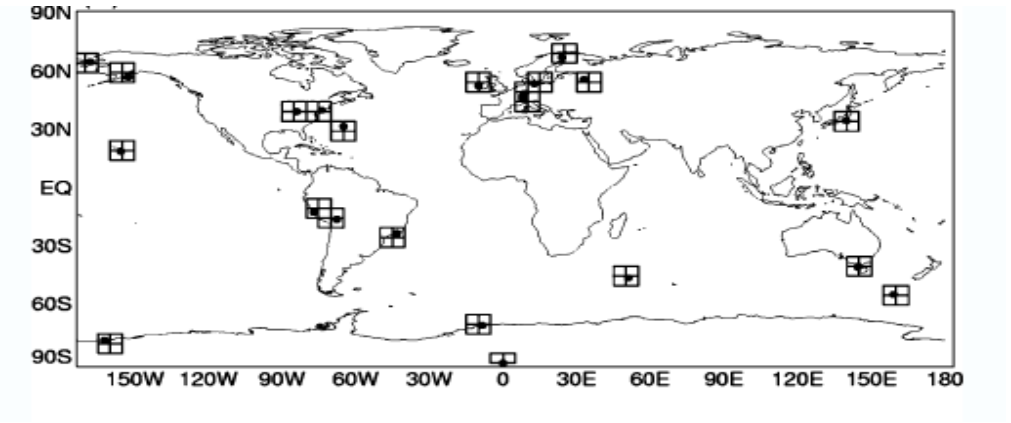
δ)



Εικόνα 67. Απόκλιση βροχοπτώσεων για της φθινοπωρινής περιόδου για τα έτη 2003-2006 με βάση τα έτη (1961-1990) (Πηγή: http://www.ncdc.noaa.gov/sotc).

4.6. Εποχιακή διακύμανση και ημερήσιοι κύκλοι σε άλλους σταθμούς.

Παρακάτω αναφέρονται μερικοί σταθμοί όπου μετράτε ατμοσφαιρικό ραδόνιο για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στους μετρηθέντες ημερήσιους και εποχιακούς κύκλους μερικών σταθμών όπου μετράτε το ^{222}Rn



Εικόνα 68. Τοποθεσίες σταθμών όπου μετράτε ατμοσφαιρικό ^{222}Rn για περισσότερο από 2 μήνες μαζί με το πλέγμα του καμβά που χρησιμοποιείται σε μοντέλο για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων ^{222}Rn σε αυτούς τους σταθμούς. (L.B. Robertson et al., 2004)

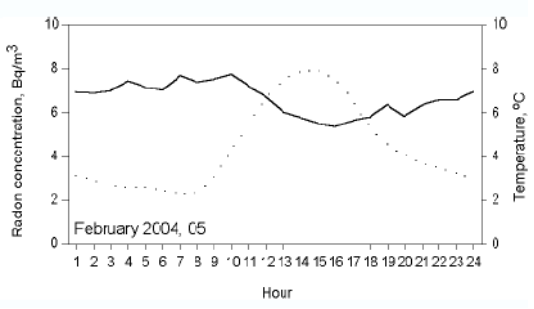
Latitude	Longitude	Station	Type	Period of observation	Data source
68.0°N	24.1°E	Pallas, Finland	Polar	7 yr	Hatakka et al. (2003)
65.6°N	168.0°W	Wales, Alaska	Coastal	7 yr	Lockhart (1962)
57.8°N	152.5°W	Kodiak, Alaska	Marine	11 yr	Lockhart (1962)
56.5°N	32.9°E	Fyodorowskoye, Russia	Continental	Jul, Oct, 1 yr	Chevillard et al. (2002)
54.4°N	12.7°E	Zingst, Germany	Coastal	Mar, Jul, Oct, 1 yr	Chevillard et al. (2002)
53.3°N	9.9°W	Mace Head, Ireland	Coastal	Jun–Aug, 2 yr	Biraud et al. (2002)
49.4°N	8.9°E	Heidelberg, Germany	Continental	Mar, Jul, Oct, 1 yr	Chevillard et al. (2002)
47.9°N	7.9°E	Schauinsland, Germany	Continental	4.5 yr	Schmidt et al. (1996)
46.6°N	8.0°E	Jungfraujoch, Switzerland	Continental	1 yr	Gäggeler et al. (1995)
40.7°N	73.9°W	New York City	Coastal	2 yr	Hosenne and Keller (1996)
40.0°N	84.0°W	Cincinnati, Ohio	Continental	4 yr	Gold et al. (1964)[a]
35.3°N	139.7°E	Yokosuka, Japan	Coastal	4.5 yr	Lockhart (1959)
32.3°N	64.9°W	Tudor Hill, Bermuda	Marine	4 yr	EML (2003)
19.5°N	155.6°W	Mauna Loa, Hawaii	Marine	3 yr	Hutter et al. (1995)
12.0°S	77.0°W	Lima, Peru	Coastal	1 yr	Lockhart (1960)
15.7°S	67.6°W	Chacaltaya, Bolivia	Continental	1.5 yr	Lockhart (1960)
23.0°S	43.2°W	Rio de Janeiro, Brazil	coastal	2 yr	Lockhart (1960)
40.4°S	144.4°E	Cape Grim, Tasmania	Coastal	15 yr	W. Zahorowski (pers. com.)
46.0°S	51.0°E	Crozet Island	Marine	27 yr	Lambert et al. (1999)[a]
54.5°S	159.0°E	Macquarie Island	Marine	Apr–Nov, 2 yr	Whittlestone and Zahorowski (1998)
70.6°S	8.4°W	G. v. Neumayer, Antarctica	Polar	6 yr	Wyputta (1997)
78.2°S	162.2°W	Little America V, Antarctica	Polar	2.5 yr	Lockhart (1960)
90.0°S		South Pole	Polar	1 yr	Lockhart (1960)

[a]In Jacob et al. (1997).

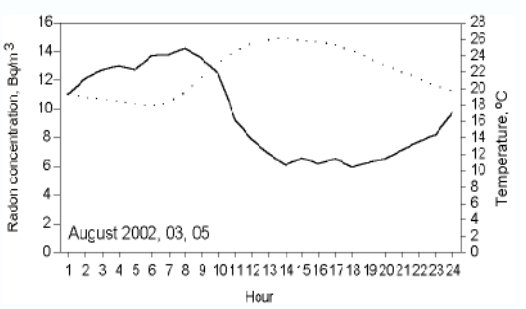
Πίνακας 24. Στοιχεία τοποθεσιών όπου μετράτε ατμοσφαιρικό ^{222}Rn για περισσότερο από δύο μήνες (L.B. Robertson et al., 2004).

4.6.1. Κεντρική Ιταλία (Urbino).

Η τοποθεσία δειγματοληψίας αναφέρεται σε ένα σταθμό 4km κοντά στο Urbino (κεντρική Ιταλία), 450 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η Αδριατική θάλασσα είναι 50Km ανατολικά και στα βόρειο-ανατολικά υπάρχουν σημαντικά τουριστικά κέντρα (Cattolica, Riccione και Rimini). Η περίοδος παρακολούθησης (2002-2005) μας δίνει συγκεκριμένες ενδείξεις στην τάση του ραδονίου και στις συσχετίσεις του με μετεωρολογικές παραμέτρους.



Εικόνα 69. Ημερήσια μεταβολή ραδονίου και θερμοκρασίας από την Κεντρική Ιταλία τον μήνα Φεβρουάριο (D. Dosideri et al., 2006).



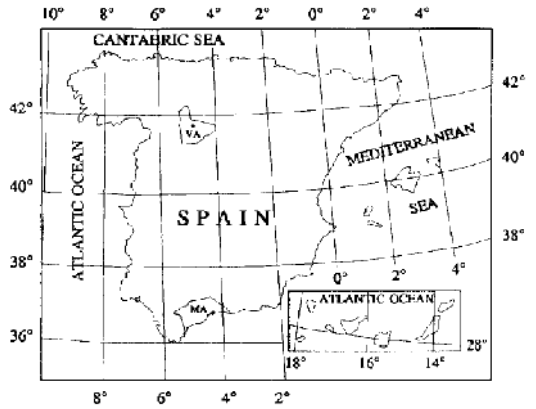
Εικόνα 70. Ημερήσια μεταβολή ραδονίου και θερμοκρασίας από την Κεντρική Ιταλία τον μήνα Αύγουστο (D. Dosideri et al., 2006).

Από τα παραπάνω διαγράμματα το ραδόνιο εμφανίζει μέση τιμή τους χειμερινούς μήνες περίπου 7 Bq/m^3 (~216 pCi/m^3) ενώ του καλοκαιρινούς περίπου στα 10 Bq/m^3 (~270 pCi/m^3). Η συγκέντρωση αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέση συγκέντρωση του ραδονίου που μετρήθηκε στην περιοχή της Κρήτης, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο σταθμός είναι εγκατεστημένος σε μια αγροτική ηπειρωτική περιοχή.

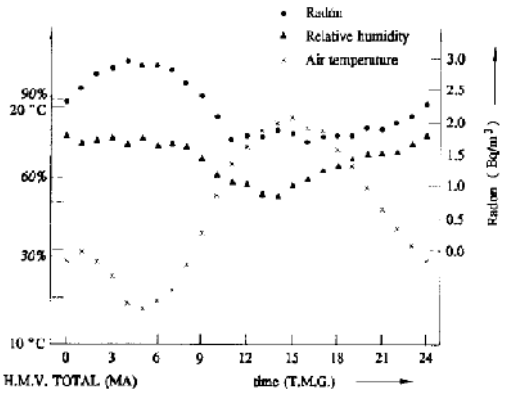
4.6.2. Ισπανία (Μαλάγα, Βαγιαδόλιδ).

Οι μετρήσεις του ατμοσφαιρικού ραδονίου στην Μαλάγα και στο Βαγιαδόλιδ της Ισπανίας έχουν γεωγραφικές συντεταγμένες. Μαλάγα: 4^{o}29΄58΄΄ γεωγραφικό μήκος δυτικά και 36^{o}40΄30΄΄ γεωγραφικό πλάτος βόρεια. Βαγιαδολιδ: 4^{o}44΄36΄΄ γεωγραφικό μήκος δυτικά και 41^{o}38΄40΄΄ γεωγραφικό πλάτος βόρεια. Η πόλη Βαγιαδόλιδ είναι τοποθετημένη σε ύψος 728m.

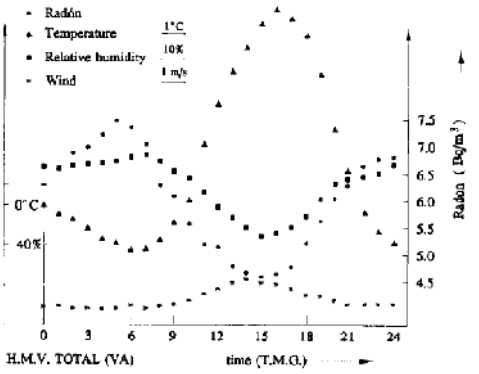
Ο σταθμός στην περιοχή της Μαλάγας εμφανίζει μια μέση τιμή ημέρας περίπου στα 2,5 Bq/m^3 (~67 pCi/m^3) και στο Βαγιαδόλιδ περίπου στα 6 Bq/m^3 (~162 pCi/m^3). Ο θαλάσσιος σταθμός της Μαλάγας πλησιάζει περισσότερο την μέση ημερήσια τιμή του σταθμού της Φινοκαλιάς ενώ ο ηπειρωτικός σταθμός στην περιοχή του Βαγιαδόλιδ παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ραδονίου.



Εικόνα 71. Χάρτης Ισπανίας μαζί με τους σταθμού μέτρησης ραδονίου στις περιοχές της Μαλάγα και Βαγιαδόλιδ (Μαλάγα MA, Βαγιαδόλιδ VA) (C. Dueñas et al., 1994)

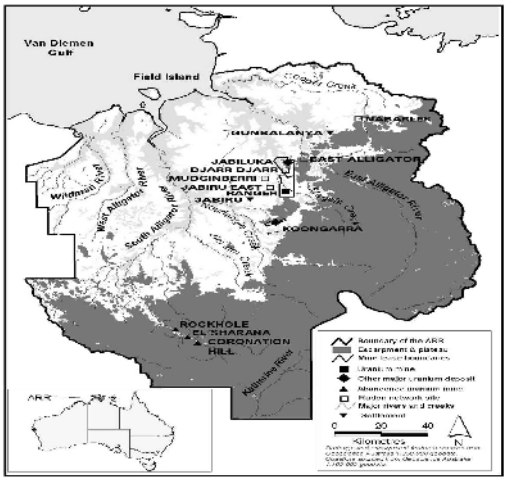


Εικόνα 72. Μεταβολή ωριαίων τιμών του ραδονίου, σχετικής υγρασίας, θερμοκρασίας αέρα στην Μαλάγα.



Εικόνα 73. Μεταβολή ωριαίων τιμών του ραδονίου, σχετικής υγρασίας, θερμοκρασίας αέρα στο Βαγιαδόλιδ.

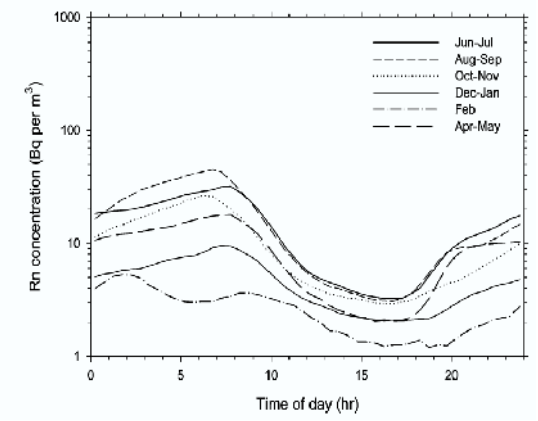
4.6.3. Alligator Rivers Region Αυστραλία.



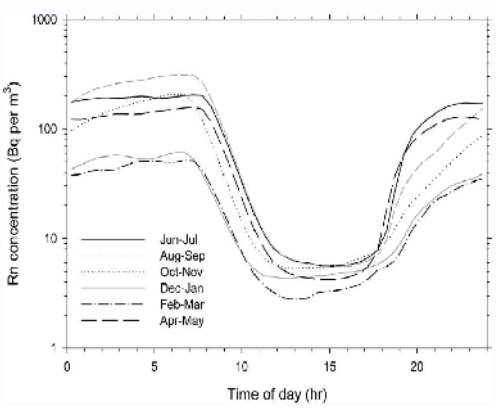
Εικόνα 74. Χάρτης της περιοχής Alligator Rivers στην Αυστραλία που δείχνει τις τοποθεσίες των σταθμών.

Στην περιοχή Alligator Rivers στην Αυστραλία υπάρχουν αρκετά ορυχεία σε λειτουργία και μελλοντικά ορυχεία ουρανίου. Υπάρχουν τέσσερις αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί στο δίκτυο παρακολούθησης ραδονίου της περιοχής Alligator Rivers.Αυτοί οι σταθμοί είναι στο Mudginderri, Djarr Djarr billabong, East Alligator Ranger Station και Nabarlek.

Οι ημερήσιοι κύκλοι που θα δούμε αναφέρονται στους σταθμούς Djarr Djarr και Nabarlek. Οι διαφορές στις μέσες τιμές ραδονίου που εμφανίζονται στις δύο περιοχές είναι εξαιτίας της περιοχής Nabarlek όπου υπάρχουν αναμορφωμένα ορυχεία ενώ η περιοχή Djarr Djarr γεμάτη πηγές και πλημμυρισμένες πεδιάδες. Ακόμα χαρακτηριστικές είναι οι διαφορές των δύο περιοχών ως προς την διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου λόγω διαμόρφωσης της περιοχής και των μετεωρολογικών συνθηκών.



Εικόνα 75. Ημερήσια μεταβολή ραδονίου στην περιοχή Nabarlek από τον Ιούνιο 1998 ως τον Μάη 1999.



Εικόνα 76. Ημερήσια μεταβολή ραδονίου στην περιοχή Djarr Djarr από τον Ιούνιο 1998 ως τον Μάη 1999.

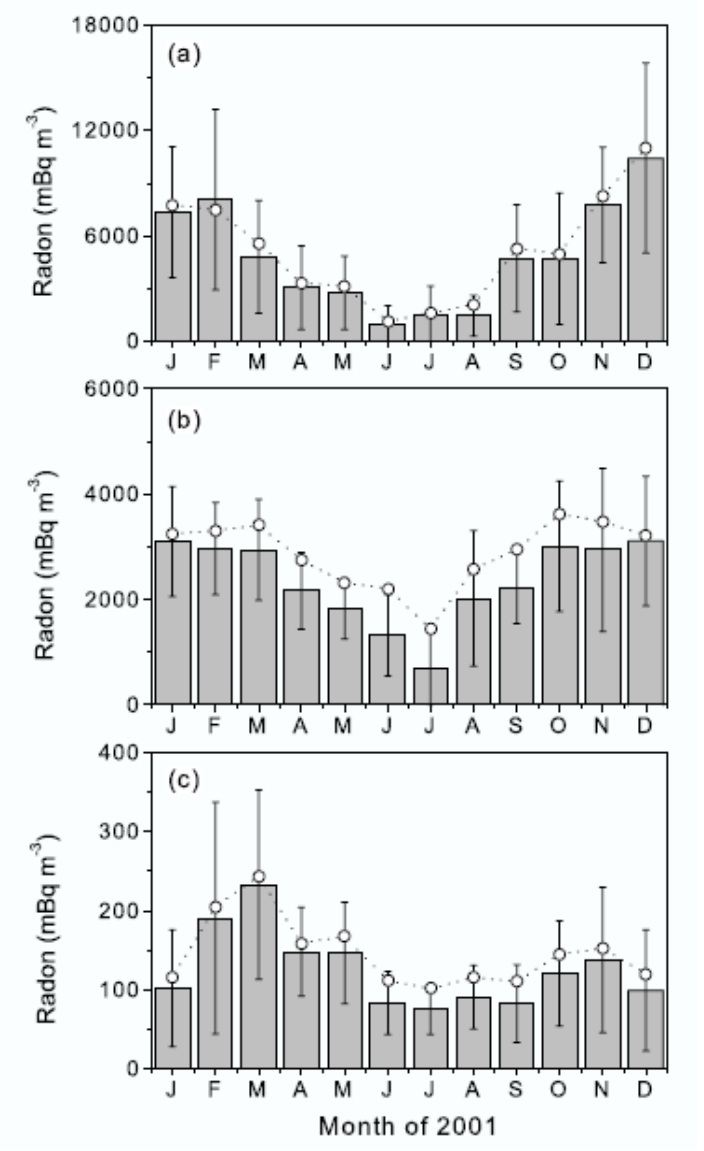
Τόσο η περιοχή Nabarlek όσο και η περιοχή Djarr Djarr παρουσιάζουν πολύ υψηλότερους ημερήσιους κύκλους από τις μετρήσεις στο σταθμό της Φινοκαλιάς. Η ύπαρξη ορυχείων ουρανίου και η ποιότητα των πετρωμάτων καθώς και ο ρυθμός εκπομπής του ραδονίου από τα πετρώματα αυτά είναι σημαντικοί παράγοντες που διαφοροποιούν την συγκέντρωση του ραδονίου από τους σταθμούς στην περιοχή της Αυστραλίας με τον σταθμό της Φινοκαλιάς.

4.6.4. Hok Tsui, Gosan και Mauna Loa.

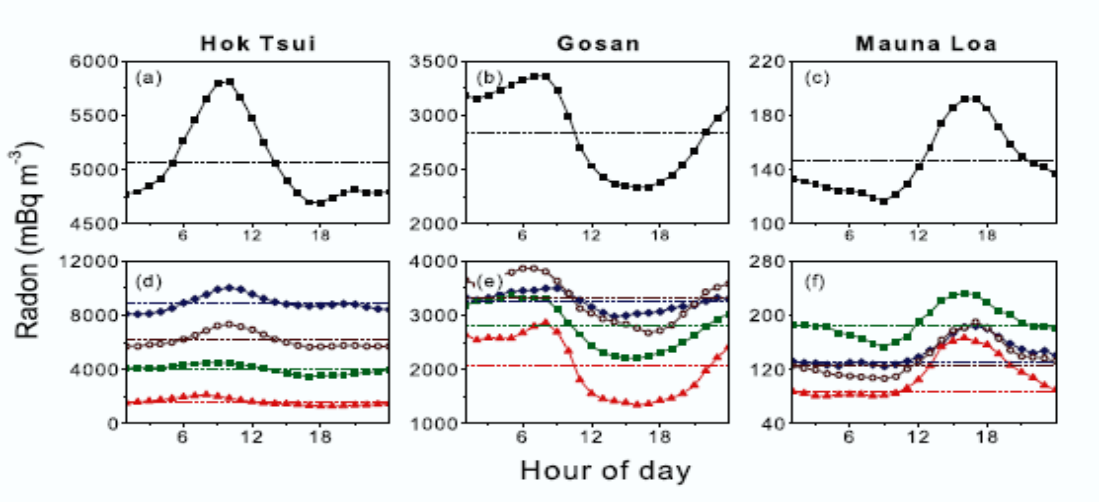
Ο σταθμός Hok Tsui είναι εγκατεστημένος στην νοτιοανατολική γωνία του Hong Kong στην τοποθεσία Cape D' Anguilar (22°12΄N, 114°15΄E). Ο ανιχνευτής ραδονίου είναι τοποθετημένος 60 μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, με διεύθυνση την Νότια θάλασσα της Κίνας. Ο σταθμός Gosan είναι εγκατεστημένος στην δυτική ακτή του νησιού Ζεζού στην Νότια Κορέα (33°18΄N, 126°09΄E), με διεύθυνση προς την Κινέζικη ηπειρωτική εσωχώρα. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε ένα γκρεμό 50 μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Τέλος ο σταθμός Mauna Loa Observatory είναι εγκατεστημένος στο βόρειο σημείο του ηφαιστείου Mauna Loa (19°32,2΄N, 155°34,7΄W) στο νησί Χαβάη σε υψόμετρο 3397 μέτρα από το επίπεδο της θάλασσας, ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε ύψος ~40 μέτρα από το έδαφος.

Οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις ραδονίου από τους παραπάνω σταθμούς είναι 5065±4640 (~136,89± 125,40 pCi/m^3), 2868±1511 (~77,51± 40,84 pCi/m^3), 146±97mBqm^{-3} (~3,94± 2,62 pCi/m^3), στο Hok Tsui, Gosan και Mauna Loa αντίστοιχα. Η μέση μηνιαία μεταβολή καθώς και ο ημερήσιος κύκλος των σταθμών φαίνονται στις **Εικόνες 77 και 78**. Οι διαφορές στην μέση συγκέντρωση ραδονίου μεταξύ των τριών σταθμών εξηγούνται τόσο λόγω των διαφορών στην τοπική συνοπτική μετεωρολογία, στους μηχανισμούς μεταφοράς όσο και στην διαφορετικότητα της τοποθεσίας των σταθμών. Ο σταθμός στο Hok Tsui είναι ένας σταθμός κοντά σε ηπειρωτικές πηγές. Ο σταθμός Gosan είναι ένα νησιωτικό σημείο σχετικά κοντά σε ηπειρωτικές πηγές ενώ ο σταθμός στο Mauna Loa είναι ένα θαλάσσιος σταθμός μακριά από ηπειρωτικές πηγές. Αυτή η ιδιαιτερότητα των σταθμών εξηγεί και την διαφορά στις συγκεντρώσεις από το σταθμό στην Φινοκαλιά. Από τους τρεις σταθμούς, αυτός που πλησιάζει τις ιδιότητες της Φινοκαλιάς είναι ο σταθμός στο Gosan. Σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από την **Εικόνα 77** είναι

τα χειμερινά ή ανοιξιάτικα μέγιστα. Ο ημερήσιος κύκλος που πλησιάζει περισσότερο τον ημερήσιο κύκλο στο σταθμό της Φινοκαλιάς είναι της περιοχής Gosan.



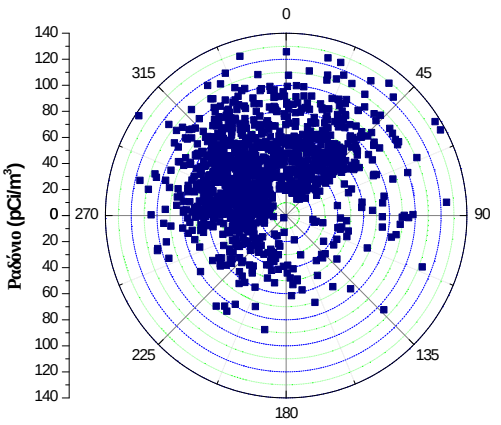
Εικόνα 77. Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις ραδονίου στο α) Hok Tsui, β) Gosan και γ) Mauna Loa. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τους μέσους βασισμένους σε όλα τα ωριαία δεδομένα ενώ οι ράβδοι αντιπροσωπεύουν τους μέσους βασισμένους στις ημερήσιες ελάχιστες συγκεντρώσεις. Οι γραμμές στους ράβδους δίνουν τις ±1 τυπικές αποκλίσεις.



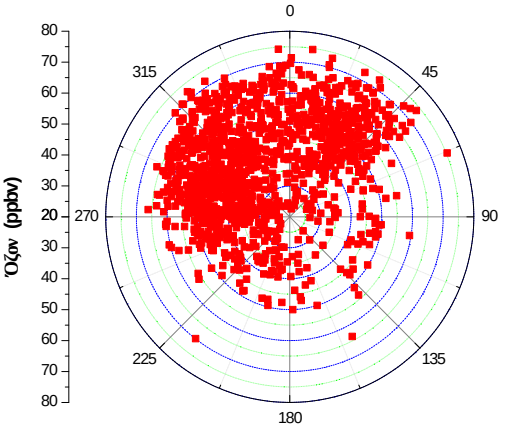
Εικόνα 78. Ετήσιος (a-c) και εποχιακός ημερήσιος κύκλος του ραδονίου (d-f) στο Hok Tsui, Gosan και Mauna Loa για το έτος 2001. Για τα εποχιακά διαγράμματα τα διαμάντια, τετράγωνα, τρίγωνα και κύκλοι αντιστοιχούν στο χειμώνα την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Οι οριζόντιες διακεκομμένες αντιπροσωπεύουν τις μέσες συγκεντρώσεις.

4.7. Ραδόνιο και όζον.

Παρακάτω δίνονται οι **εικόνες 79 και 80** της συγκέντρωσης του ραδονίου και του όζοντος ανά διεύθυνση ανέμου (ροζέτες). Από τα διαγράμματα του ραδονίου είναι εμφανές ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται από τις ΒΑ, Β, και ΒΔ, ενώ οι Δ και ΝΔ διευθύνσεις έχουν μικρότερες συγκεντρώσεις και μικρότερο αριθμό εμφάνισης. Το όζον εμφανίζει υψηλότερες τιμές από τις βόρειες βορειοδυτικές και βορειοανατολικές προελεύσεις με τις υψηλότερες του τιμές να προέρχονται από τον βορειοανατολικό τομέα (μεταξύ 0-45 μοίρες). Από τα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι το όζον και το ραδόνιο έχουν κοινές μορφές μεταφοράς με κύριες επιρροές από διευθύνσεις του βόρειου βορειοανατολικού και βορειοδυτικού τομέα. Η κοινή αυτή μορφή οφείλεται κυρίως στην μεταφορά αέριων μαζών από τις περιοχές αυτές.



Εικόνα 79. Συγκέντρωση ραδονίου ανά διεύθυνση ανέμου για την περίοδο 2002-2006.



Εικόνα 80. Συγκέντρωση όζοντος ανά διεύθυνση ανέμου για την περίοδο 2002-2006.

Κεφάλαιο 5. Απλή και πολλαπλή γραμμική ανάλυση δεδομένων με το στατιστικό πακέτο SPSS.

Μέρος της μελέτης αυτής ήταν η διερεύνηση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με τους μετεωρολογικούς παράγοντες. Για να διερευνήσουμε την αλληλεπίδραση που μπορεί να υπάρχει χρησιμοποιήσαμε την απλή και πολυμεταβλητή γραμμική παλινδρόμηση. Πριν αρχίσουμε να παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα δούμε αρχικά κάποια εισαγωγικά για την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

5.1. Απλή γραμμική παλινδρόμηση (Simple Linear Regression).

Με την βοήθεια της απλή γραμμικής συσχέτισης θα διερευνήσουμε την σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών X, Y. Η μεταβλητή X καλείται ανεξάρτητη (independent) ή ερμηνευτική μεταβλητή (explanatory variable) δε θεωρείται τυχαία και στην περίπτωση μας είναι η μεταβολή των μετεωρολογικών παραγόντων ή του όζοντος ή του μέγιστου ύψους ή της μέγιστης απόστασης. Η μεταβλητή Y η οποία καλείται εξαρτημένη (dependent) ή μεταβλητή απόκρισης (response variable) θεωρείται τυχαία μεταβλητή και στην ανάλυση μας αντιστοιχεί στην συγκέντρωση του ραδονίου. Θεωρούμε ότι το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να διερευνήσει την σχέση της Y μεταβλητής με την κάθε μια από της X είναι το απλό γραμμικό μοντέλο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό θεωρούμε ότι τα X_i, Y_i συνδέονται με τη σχέση:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + \varepsilon_i, \quad i= 1, 2, 3, \ldots..,n \qquad (\varepsilon\xi.\ 1)$$

Όπου b_0, b_1 είναι δύο άγνωστες σταθερές, ενώ οι ε_1, ε_2,…, ε_n είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή $N(0,\sigma^2)$ (σ^2 άγνωστο) και συνήθως καλούνται «σφάλματα» των μετρήσεων.

Το πρόβλημα της παλινδρόμησης είναι η εκτίμηση των παραμέτρων b_0 και b_1 καθώς και της διασποράς σ^2 των σφαλμάτων. Το b_0 είναι η τιμή του Y για X=0 και λέγεται διαφορά ύψους (intercept). Ο συντελεστής του X b_1 είναι η κλίση (slope) της ευθείας ή αλλιώς ο συντελεστής παλινδρόμησης (regression coefficient).

Η εκτίμηση των b_0 και b_1 γίνεται συνήθως με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και είναι $\hat{b} = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$, και $\hat{b_o} = \overline{Y} - \hat{b_1}\,\overline{X}$. (εξ. 2)

Όπου S_{XY} είναι η εκτίμηση της συνδιασποράς των X και Y και S_{XX} είναι η δειγματική διασπορά.

Η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων είναι:

$$y = \hat{b_0} + \hat{b_1}\, x \qquad (\varepsilon\xi.\ 3)$$

Για κάθε δοθείσα τιμή x με την βοήθεια της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων, εκτιμούμε την τιμή y που γενικά είναι διαφορετική από την πραγματική Y_i. Η κατακόρυφη απόσταση της πραγματικής τιμής Y_i. από την ευθεία ελαχίστων

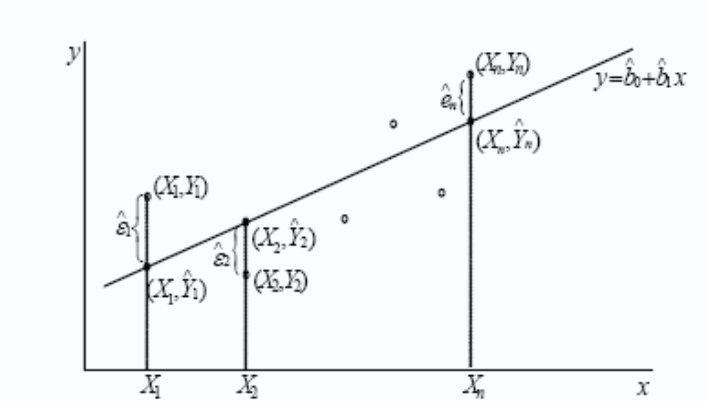
τετραγώνων, $\hat{\varepsilon}_i = Y_i - \hat{Y}_i$, είναι το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων ή απλά υπόλοιπο (residual). Το υπόλοιπο $\hat{\varepsilon}_i$ είναι η εκτίμηση του σφάλματος παλινδρόμησης ε_i. Άρα η εκτίμηση της διασποράς του σφάλματος σ^2 δίνεται από τη δειγματική διασπορά των υπολοίπων $\hat{\varepsilon}_i$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{b}_o - \hat{b}_1 X_i)^2 \quad (\text{εξ. 4})$$

Όταν ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων τότε έχουμε την καλύτερη προσαρμογή. Άρα τελικά παρατηρούμε ότι η συνολική παρατηρούμενη μεταβλητότητα των Y_i (SST) μπορεί να χωριστεί στα δύο, στην μεταβλητότητα που ερμηνεύεται από το μοντέλο (SSR) και στην μεταβλητότητα που οφείλεται σε παράγοντες που δεν έχουν περιληφθεί στο μοντέλο. Συνεπώς, το πηλίκο (συντελεστής προσδιορισμού)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} \quad (\text{εξ.5})$$

μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας των παρατηρήσεων που ερμηνεύεται από το μοντέλο. Όπου SST, SSR, SSE εξηγούνται ως Sum of Squares Total, Sum of Squares Regression, Sum of Squares Error. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο (πιο «κοντά» στην μονάδα) είναι το R^2 τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο που έχουμε θεωρήσει διότι ερμηνεύει μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης μεταβλητότητας.



Εικόνα 81. Εκτιμημένη ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης μαζί με τα εκτιμημένα σφάλματα (Boutsikas M.V., 2004).

Αρκετές φορές συμβαίνει οι μεταβλητές X και Y να μην έχουν γραμμική σχέση, κάτι που μπορεί άμεσα να φανεί από το διάγραμμα διασποράς ή από κάποιο γράφημα καταλοίπων. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε απ' ευθείας το μοντέλο αλλά θα πρέπει να μετασχηματίσουμε τα δεδομένα $X' = f(X)$, και $Y' = g(Y)$ έτσι ώστε X΄, Y΄ να έχουν γραμμική σχέση. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμοί:

$$Y' = \sqrt{Y},\ Y' = \ln Y,\ Y' = 1/Y,\ X' = \sqrt{X},\ X' = \ln X,\ X' = 1/X \quad (\text{εξ. 6})$$

Είναι σημαντικό να βεβαιωθούμε ότι τα δεδομένα μας προσαρμόζονται ικανοποιητικά στο μοντέλο ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να θεωρούνται αξιόπιστα.

Για να ελέγξουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξετάσαμε την ορθότητα του μοντέλου. Συνήθεις αποκλίσεις που παρατηρούνται έχουν να κάνουν με την κανονικότητα των σφαλμάτων, τα σφάλματα δεν έχουν σταθερή διασπορά σ^2 και δεν είναι ανεξάρτητα.

Σημαντικό για την ορθότητα του μοντέλου είναι να εξετάσουμε αν υπάρχουν έκτροπες τιμές. Θεωρούνται «ασυνήθιστες» οι παρατηρήσεις με τυποποιημένα κατάλοιπα μεγαλύτερα του 2 και «έκτροπες» τιμές αυτές με τυποποιημένα κατάλοιπα μεγαλύτερα από 3. Σαν τυποποιημένο κατάλοιπο ορίζεται:

$$\hat{\varepsilon}^{*} = \frac{\hat{\varepsilon}_i}{S\sqrt{1-p_{ii}}},\ i = 1,2,...n \qquad (\text{εξ. } 7)$$

όπου $S = \hat{\sigma}^2 = SSE/(n-2)$ και p_{ii} είναι η μόχλευση (leverage) δηλαδή η απόσταση που έχει το Xi από το $\overline{X}$. Οι παρατηρήσεις που έχουν μεγάλες αποστάσεις επηρεάζουν σημαντικά το μοντέλο.

Οι συντελεστές παλινδρομήσεις είναι εκτιμήσεις για τη σχέση των παραμέτρων. Κάθε εκτίμηση στην στατιστική χαρακτηρίζεται από ένα διάστημα τιμών που περιέχει την αληθινή τιμή της παραμέτρου με κάποια μεγάλη πιθανότητα 1-α, το οποίο λέγεται (1-α)% διάστημα εμπιστοσύνης (confidence interval).Το α λέγεται επίπεδο σημαντικότητας (significance level). Θεωρείται ότι μια εκτίμηση είναι στατιστικά σημαντική αν το επίπεδο σημαντικότητας α είναι 0,05, δηλ είναι σημαντική στο 95% της διακύμανσης (Boutsikas M.V., 2004).

5.2. Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση (Multiple Linear Regression).

Σε πολλές περιπτώσεις η εξαρτημένη μεταβλητή Y μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζεται από περισσότερες μεταβλητές X_1, X_2,…….X_{p-1}. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το γραμμικό μοντέλο για να διερευνήσουμε την εξάρτηση της μεταβλητής Y από τις X_1, X_2,…….X_{p-1}. Το γενικευμένο πλέον γραμμικό μοντέλο έχει την μορφή:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{p-1}X_{p-1} + \varepsilon, \qquad (\text{εξ.8})$$

Για κάποιες παραμέτρους b_0, b_1, ……b_{p-1}. Για να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ Y και X1, X2,…..X_{p-1} λαμβάνεται δείγμα μεγέθους n και για κάθε άτομο του δείγματος καταγράφονται οι τιμές των συγκεκριμένων μεταβλητών. Π.χ. για το i-άτομο του δείγματος καταγράφονται οι τιμές (Y_i, X_{i1}, X_{i1},…..$X_{i,p-1}$), i=1, 2, ….,n. Εφαρμόζουμε λοιπόν το μοντέλο

$$Y_i = b_0 + b_1X_{i1} + b_2X_{i2} + b_{p-1}X_{i,p-1} + \varepsilon_i,\ i = 1, 2, ...,n, \qquad (\text{εξ. } 9)$$

Όπου τα «σφάλματα» ε_1, ε_2, …..,ε_n θεωρούνται ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές από την N(0,1), ενώ οι μεταβλητές X_1, X_2, ……X_{p-1}, όπως και στο απλό γραμμικό μοντέλο, δεν θεωρούνται τυχαίες.

Οι υποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται είναι οι ίδιες με τις υποθέσεις της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Μια προϋπόθεση η οποία είναι απαραίτητη γενικά σε όλα τα μοντέλα με περισσότερες από μια ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η έλλειψη

συγραμμικότητας. Η συγραμμικότητα είναι σοβαρό πρόβλημα για την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.

Εκτός από την συγραμμικότητα σημαντικό για την γραμμική παλινδρόμηση είναι αν το μοντέλο είναι κατάλληλο για τα δεδομένα. Ένας τρόπος για να το διερευνήσουμε αυτό είναι το F-test. Το F-test δοκιμάζει την υπόθεση Ho: $b_1=0$. δηλαδή αν κλίση της ευθείας είναι μηδέν. Αν αυτό συμβαίνει, η ευθεία παλινδρόμησης είναι παράλληλη και η μεταβολή της Y δεν επηρεάζεται από την X.

Το F test δίνεται από τον λόγο $F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{SSR}{SSE/(n-2)}$ (εξ.10)

Όπου SSR : Sum of Squares Regression, SSE: Sum of Squares Error και (n -2) οι βαθμοί ελευθερίας.

Είναι εμφανές ότι όσο μικρότερο είναι το SSE τόσο καλύτερη θα είναι η εφαρμογή του μοντέλου άρα θα μεγαλώνει ο λόγος της **εξίσωσης 10,** σε αυτή την περίπτωση θα απορρίπτεται η υπόθεση H0: $b_1 =0$ (Boutsikas M.V., 2004).

5.3. Απλή γραμμική συσχέτιση ραδονίου με μετεωρολογικούς παράγοντες, όζον, μέγιστος ύψος αέριων μαζών από το έδαφος και μέγιστη απόσταση αέριων μαζών από την περιοχή της Κρήτης.

Με την χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS κάναμε απλή γραμμική και πολλαπλή γραμμική συσχέτιση των μέσων ημερήσιων τιμών του ραδονίου με το όζον, τις μετεωρολογικές παραμέτρους καθώς και με το μέγιστο ύψος που αποκτούν οι αέριες μάζες πριν φτάσουν στο σταθμό της Φινοκαλιάς, και την μέγιστη απόσταση που διανύουν σε μοίρες. Αποδεκτά αποτελέσματα ήταν αυτά που είχαν τιμή τυποποιημένων καταλοίπων μικρότερη του +/- 2. Η διακύμανση ελέγχθηκε για την γραμμικότητα της, την ανεξαρτησία και κανονική κατανομή των τυποποιημένων κατάλοιπων, και δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν μετασχηματισμοί για την βελτίωση του μοντέλου.

	Συνολικά	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Θερμοκρασία (^oC)	**18,70 (+) 99%**	3,70 (-) 95%	2,80 (-) 95%	**15,30 (+) 99%**	5,40 (-) 99%
Σχετική Υγρασία (%)	6,00 (+) 99%	**30,00 (+) 99%**	**13,00 (+) 99%**	-	**12,00 (+) 99%**
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	0,60 (-) 95%	6,60 (-) 99%	**14,50 (-) 99%**	4,20 (-) 99%	1,50 (-) 95%
Ηλιακή ακτινοβολία ($Watt/m^2$)	8,50 (+) 99%	3,80 (+) 95%	-	1,30 (+) 95%	8,10 (+) 99%
Όζον (pbbv)	4,30 (+) 99%	5,10 (+) 95%	-	-	**20,80 (+) 99%**
Μέγιστη απόσταση (μοίρες)	**10,60 (-) 99%**	**12,90 (-) 99%**	**15,30 (-) 99%**	1,70 (-) 95%	**12,70 (-) 99%**
Μέγιστο ύψος. (m)	4,90 (-) 99%	5,10 (-) 95%	7,00 (-) 99%	**10,20 (-) 99%**	3,50 (-) 99%

Πίνακας 25. Συντελεστής παλινδρόμησης μέσων ημερήσιων τιμών ραδονίου με τις μέσες ημερήσιες τιμές του όζοντος, της σχετική υγρασίας, της ταχύτητας ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας, της μέγιστης απόστασης σε μοίρες, το μέγιστο ύψος των αέριων μαζών.

Στον **Πίνακα 25** δίνεται ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) που προέκυψαν από την απλή γραμμική παλινδρόμηση του ραδονίου με τους παραπάνω παράγοντες. Οι συντελεστές του **Πίνακα 25** είναι εκτιμήσεις για την μεταβλητότητα του ραδονίου. Το ποσοστό διπλά στους συντελεστές εκφράζει το διάστημα εμπιστοσύνης των εκτιμήσεων της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ σε κάθε παρένθεση δίνεται το πρόσημο που εκφράζει την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης (το (+) εκφράζει ότι οι μεταβλητές συνδέονται θετικά ενώ το (–) ότι οι μεταβλητές συνδέονται αρνητικά). Δηλαδή κάθε τιμή δίνει το ποσοστό της διακύμανσης του ραδονίου που εξηγείται από την διακύμανση της κάθε παραμέτρου, στην συνέχεια δίνεται το ποσοστό που η εκτίμηση αυτή είναι σημαντική και αν η σχέση του ραδονίου με την κάθε παράμετρο είναι θετική ή αρνητική (δηλαδή το + σημαίνει ότι η αύξηση του ραδονίου συνεπάγεται με αύξηση της συγκέντρωσης της παραμέτρου και το – το αντίθετο).

Από την γραμμική συσχέτιση των ημερήσιων τιμών του ραδόνιου με την θερμοκρασία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Στην συνολική διακύμανση των ετών 2002-2006 η θερμοκρασία, η μέγιστη απόσταση που αποκτούν οι αέριες μάζες, και η ηλιακή ακτινοβολία είναι οι παράγοντες που σε μεγάλο ποσοστό εξηγούν την μεταβολή του ραδονίου.

Το φθινόπωρο οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την συγκέντρωση του ραδονίου είναι η σχετική υγρασία η ηλιακή ακτινοβολία, το όζον και η μέγιστη απόσταση που διανύουν οι αέριες μάζες (ποσοστό 12%, 8,10%, 20,80% 12,70% αντίστοιχα). Σε παλαιότερες μελέτες (Gerasopoulos et al. 2005) είχε αποδειχθεί ότι σε μεγάλο ποσοστό οι πρόδρομοι του όζοντος σε συνδυασμό με το ραδόνιο εξηγούν σε μεγάλο ποσοστό την διακύμανση του όζοντος. Η καλή συσχέτιση του ραδονίου με το όζον σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η προέλευση των ανέμων επηρεάζει την διακύμανση του ραδονίου αισθητά όπως είδαμε το φθινόπωρο είναι μια ένδειξη κοινών μηχανισμών που επηρεάζουν το όζον, σύγχρονος με το ραδόνιο στην περιοχή της Κρήτης.

Το μέγιστο ύψος που αποκτάνε οι αέριες μάζες, δηλαδή πόσο κοντά στο έδαφος κινούνται οι αέριες μάζες, έχει όλες τις εποχές μια αντισυσχέτιση με το ραδόνιο. Το ποσοστό αυτό γίνεται πιο έντονο την εποχή του καλοκαιριού όταν η απελευθέρωση του ραδονίου από το έδαφος είναι πιο μεγάλη έτσι όσο πιο ψηλά είναι οι αέριες μάζες τόσο λιγότερο εμπλουτίζονται σε ραδόνιο.

Η σχετική υγρασία εκφράζει ένα σημαντικό ποσοστό της μεταβολής του ραδονίου όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι όταν δεν υπάρχει καμία συσχέτιση. Εν γένει αύξηση της σχετικής υγρασίας σημαίνει αύξηση του ραδονίου. Η αύξηση της σχετικής υγρασίας μπορεί να οφείλεται σε δυο πράγματα ή ότι είχαμε μείωση της θερμοκρασίας (ψυχρές μάζες ή νυχτερινή μείωση της θερμοκρασίας) ή ότι προσθέσαμε υδρατμούς στην ατμόσφαιρα ενώ η θερμοκρασία δεν άλλαξε. Και οι δυο περιπτώσεις έχουν να κάνουν με την ηλιοφάνεια, την σύγκλιση ψυχρών και θερμών αέριων στην περιοχή.

Την άνοιξη όσο μικρότερη είναι η απόσταση των αέριων μαζών και όσο μικρότερη η ταχύτητα του ανέμου που θα δημιουργηθεί (ενισχυμένη από την ημερήσια ανάμειξη) τόσο μεγαλύτερη μέση ημερήσια συγκέντρωση ραδονίου θα μετρηθεί.

Το καλοκαίρι η αύξηση της θερμοκρασίας με αέριες μάζες που δεν θα αποκτήσουν μεγάλο μέγιστο ύψος θα αυξήσουν την συγκέντρωση του ραδονίου.

Τέλος είναι εμφανές ότι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο μειώνεται η αντίθετη σχέση του ραδονίου με την ταχύτητα (πέφτει στο 4,20% και 1,5% αντίστοιχα σε

σχέση με την άνοιξη που είναι στο 14,50%) ενισχύοντας το γεγονός ότι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο υψηλότερες ταχύτητες ανέμου δίνουν μεγαλύτερες τιμές ραδονίου.

Όμως οι συντελεστές προσδιορισμού των παραγόντων αυτών σε σχέση με ολόκληρο το πλήθος της διακύμανσης είναι μικρά. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να μας βάλει σε σκέψη για περαιτέρω διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ραδόνιο.

5.4. Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση ραδονίου με τους μετεωρολογικούς παράγοντες, το όζον, το μέγιστος ύψος αέριων μαζών από το έδαφος και μέγιστη απόσταση αέριων μαζών από την περιοχή.

Στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση δύο ομάδες δεδομένων δημιουργήθηκαν: α) συσχέτισης του ραδονίου με μετεωρολογικούς παράγοντες (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία) β) συσχέτισης του ραδονίου με το όζον την μέγιστη απόσταση των αέριων μαζών από το έδαφός καθώς και την μέγιστη απόσταση σε μοίρες.

α) συσχέτιση του ραδονίου με μετεωρολογικούς παράγοντες (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία).

Στον **Πίνακα 26** δίνονται τα αποτελέσματα της πολυμεταβλητής ανάλυσης παλινδρόμησης της πρώτης ομάδας. Σύμφωνα με αυτό τον πίνακα το διάστημα εμπιστοσύνης είναι μικρότερο του 0,05 και το F test έχει υψηλή τιμή άρα η εφαρμογή του μοντέλου είναι καλή.

Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο της απλής γραμμική παλινδρόμησης εφαρμόστηκε για να συσχετίσει το ραδόνιο με την θερμοκρασία την σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία. Από το μοντέλο απορρίφθηκε η ηλιακή ακτινοβολία, διότι το διάστημα εμπιστοσύνης ξεπερνούσε το 95% (στάθμη σημαντικότητας α = 0,05). Το μοντέλο που προσαρμόστηκε στα δεδομένα αυτά είναι το εξής:

$$^{222}Rn = (2{,}31 \pm 0{,}125) \cdot \text{Θερμοκρασία} + (0{,}65 \pm 0{,}04) \cdot \text{Σχετική υγρασία} + (-1{,}00 \pm 0{,}22) \cdot \text{Ταχύτητα ανέμου} + (-23{,}41 \pm 4{,}63). \qquad (\text{εξ. } 11)$$

Η θερμοκρασία επηρεάζει την συγκέντρωση του ραδονίου με την ελάττωση της υγρασίας του εδάφους με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απελευθέρωση του ραδονίου από αυτό. Έτσι έχουμε τοπική απελευθέρωση ραδονίου αλλά και μεταφορά από άλλες περιοχές μεγαλύτερων ποσοτήτων ραδονίου λόγω της αυξημένης εκπομπής.

Η θετική συσχέτιση με την σχετική υγρασία ισχύει:
α) τόσο λόγω αύξησης της σχετικής υγρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας (μείωση της θερμοκρασίας, αλλά και σταθερότητα του οριακού στρώματος) που είναι το χρονικό διάστημα της ημέρας που το ραδόνιο συσσωρεύεται.
β) όσο και λόγω της φύσης των αέριων μαζών που πολλές φορές φτάνοντας στην περιοχή της Μεσογείου προκαλούν τον κορεσμό των υδρατμών και αύξηση της σχετικής υγρασίας.

Η αντίθεση με την ταχύτητα του ανέμου έχει να κάνει με την συσσώρευση του ραδονίου σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, άρα την αύξηση του και με τον διασκορπισμό του ραδονίου σε περίπτωση υψηλών ταχυτήτων.

Εξαρτημένη μεταβλητή Ραδόνιο.					
	Τυποποιημένοι συντελεστές ή συντελεστές βήτα	**Μερικοί συντελεστές συσχέτισης**	**Προσαρμοσμένο R^2**	**F**	**Sig.**
Θερμοκρασία	0,593	0,534	0.315	131.66	4.61088E-70
Σχετική Υγρασία	0,477	0,453			
Ταχύτητα ανέμου	-0,129	-0,154		Nobs.: 855	

Πίνακας 26. Βασικές στατιστικές πληροφορίες για την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

β) συσχέτισης του ραδονίου με το όζον την μέγιστη απόσταση των αέριων μαζών από το έδαφός καθώς και την μέγιστη απόσταση σε μοίρες.

Στον **Πίνακα 27** δίνονται τα αποτελέσματα της πολυμεταβλητής ανάλυσης παλινδρόμησης για την δεύτερη ομάδα. Και σε αυτή την περίπτωση το διάστημα εμπιστοσύνης είναι μικρότερο του 0,05 και το F test έχει μια καλή τιμή άρα η εφαρμογή του μοντέλου είναι καλή.

Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε για να συσχετίσει το ραδόνιο με το όζον, το μέγιστο ύψος των αέριων μαζών από το έδαφός, καθώς και την μέγιστη απόσταση της προέλευσης των αέριων μαζών από την περιοχή της Κρήτης σε μοίρες. Το μοντέλο που προσαρμόστηκε στα δεδομένα αυτά είναι το εξής:

^{222}Rn = (-0,23±0,031) · Μέγιστη απόσταση + (0,33±0,06) · Όζον + (-0,002±0,0005) · μέγιστο ύψος + (52,68±3,22). (εξ.12)

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερο ύψος αποκτήσουν οι αέριες μάζες τόσο λιγότερο εμπλουτισμένες σε ραδόνιο θα είναι. Επιπρόσθετα όσο πιο μακρινή είναι η προέλευση τους από την περιοχή της Κρήτης τόσο ελαττώνεται η ποσότητα ραδονίου που μεταφέρουν. Μόνο η μεταβολή του όζοντος ακολουθεί την μεταβολή του ραδονίου δείχνοντας μας την κοινή μεταφορά του στην περιοχή.

Εξαρτημένη μεταβλητή Ραδόνιο.					
	Τυποποιημένοι συντελεστές ή συντελεστές βήτα	**Μερικοί συντελεστές συσχέτισης**	**Προσαρμοσμένο R^2**	**F**	**Sig.**
Μέγιστη απόσταση	-0,265	-0,252	0,139	45,32	4,23825E-27
Όζον	0,182	0,189			
Μέγιστο ύψος	-0,125	-0,121		Nobs.:822	

Πίνακας 27. Βασικές στατιστικές πληροφορίες για την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Κεφάλαιο 6. Αιωρούμενα σωματίδια και ραδόνιο.

6.1. Αιωρούμενα σωματίδια.

Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι μείγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα είτε σαν υγρά είτε σαν στερεά, και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος διαμέτρου από μερικά nm διάμετρο σε 100 ή περισσότερα μm. Ποικίλουν επίσης σε σχήμα χημική σύσταση, και οπτικές ιδιότητες. Το μέγεθος των σωματιδίων είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει την μεταφορά και απομάκρυνση των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Τα αερολύματα μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα απ ευθείας (πρωτογενή) από φυσικές πηγές ή ανθρώπινες δραστηριότητες είτε έμμεσα όταν σχηματιστούν έπειτα από αντιδράσεις συστατικών της ατμόσφαιρας (δευτερογενή) και παίζουν ένα σημαντικό ρόλο επιρροής στο κλίμα.

Τα αιωρούμενα σωματίδια, διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες: τα λεπτά (fine <2,5μm) και στα αδρά (coarse 2,5-10μm). Τα λεπτά σωματίδια έχουν διάμετρο μικρότερη από των 2,5 μm, ($PM_{2,5}$) και διαφέρουν από τα αδρά στην προέλευση και στην χημεία. Η μικρόκοκκη ή συσσωρευτική τάση είναι η αιτία της αύξησης σωματιδίων στην αέρια φάση και την επακόλουθη συσσώρευση. Αυτό το κλάσμα σωματιδίων αποτελείται από μεταβλητές ποσότητες θειικών, αμμωνιακών και νιτρικών ιόντων, στοιχειακό άνθρακα, οργανικό άνθρακα, νερό, μικρές ποσότητες σκόνης εδάφους και ίχνη στοιχείων (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe κ.λ.π.). Τα λεπτά σωματίδια είναι κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης, έχουν χρόνο ζωής από μερικές ημέρες σε μερικές εβδομάδες, εύρος απόστασης που μπορούν να μεταφερθούν >1000s km και συσχετίζονται με την μειωμένη ορατότητα.

Τα αδρά σωματίδια σχηματίζονται κυρίως από μηχανικές δυνάμεις όπως διαδικασίες γεωχημικής διάβρωσης εδάφους. Η γύρη και οι σπόροι επίσης συμπεριλαμβάνονται στα αδρά σωματίδια. Συνήθως τα αδρά σωματίδια αποτελούνται από αλουμινοπιρυτικά και άλλα οξείδια στοιχείων. Οι κυριότερες πηγές τους είναι σκόνη προερχόμενη από αυτοκινητόδρομους, την βιομηχανία, την κατασκευή και κατεδάφιση κτηρίων και τέλος την καύση φυσικών καυσίμων. Ο χρόνος ζωής τους είναι από μερικά λεπτά μέχρι μερικές ώρες και η απόσταση που μπορούν να ταξιδέψουν είναι <1km έως 10km.

Οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων που μετρήθηκαν την περίοδο Ιουλίου 2004 έως Ιούλιο 2006 μαζί με την συγκέντρωση του ραδονίου συσχετίσθηκαν με την βοήθεια της απλής γραμμικής συσχέτισης για να δούμε την σχέση του ραδονίου με καθένα από τα ιόντα, ανιόντα ή στοιχεία. Στην συνεχεία με την βοήθεια της παραγοντικής ανάλυσης προσπαθήσαμε να δούμε με ποια από αυτά το ραδόνιο έχει κοινή προέλευση.

6.2. Παραγοντική ανάλυση.

Αντικείμενο της παραγοντικής ανάλυσης είναι αφενός η αντιπροσώπευση μεταβλητών με μη παρατηρούμενες μεταβλητές-παράγοντες (ψευδομεταβλητές) κατά την μαθηματική σχέση:

$$F_i = \sum_{j=1}^{p} W_{ij} Z_j = W_{i1} Z_1 + W_{i2} Z_2 + ... + W_{ip} Z_p \quad \text{(i=1, 2, …, m και j=1, 2, …p)} \quad \text{(εξ. 13)}$$

όπου W είναι οι συντελεστές των παραγοντικών βαθμών και p ο αριθμός των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται, και αφετέρου η απόδοση καθεμιάς μεταβλητής ως έκφραση γραμμικού συνδυασμού των (κοινών) παραγόντων αυτών, κατά το γενικό μαθηματικό υπόδειγμα:

$$z_j = \alpha_{j1} F_1 + \alpha_{j2} F_2 + ... + \alpha_{jm} F_m + U_j \qquad \text{(j=1, 2, …..,n)} \quad \text{(εξ. 14)}$$

όπου F_m είναι οι κοινοί παράγοντες, U_j ο χαρακτηριστικός για τη συγκεκριμένη μεταβλητή z_j παράγοντας, m ο αριθμός των παραγόντων των κοινών σε όλες τις μεταβλητές και α_{jm} ειδικοί συντελεστές – φορτία των παραγόντων. Οι χαρακτηριστικοί παράγοντες των μεταβλητών υποτίθεται ότι είναι ασυσχέτιστοι μεταξύ τους αλλά και με τους κοινούς παράγοντες.

6.2.1. Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες.

Αναφέρεται στον ορθογωνικό μετασχηματισμό των αξόνων συντεταγμένων, όπου καθεμία από τις αρχικές (παρατηρούμενες) n μεταβλητές z_j περιγράφεται γραμμικά σε σχέση προς P υποθετικές (μη παρατηρούμενες) ασυσχέτιστες κύριες συνιστώσες, κατά την σχέση:

$$z_j = \alpha_{j1} P_1 + \alpha_{j2} P_2 + ... + \alpha_{jn} P_n \qquad \text{(j=1, 2, …..,n)} \quad \text{(εξ. 15)}$$

όπου α_{ji} είναι η τιμή του παραγοντικού φορτίου της μεταβλητής j στην κύρια συνιστώσα i.

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της μεθόδου αυτής είναι ότι λαμβάνει υπόψη το ολικό ποσόν της διακύμανσης (κοινής, χαρακτηριστικής και σφάλματος) των μεταβλητών κατά φθίνουσα ακολουθία. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη κύρια συνιστώσα είναι ο γραμμικός συνδυασμός των αρχικών μεταβλητών που εξηγεί στο μέγιστο την ολική διακύμανση των τιμών τους, η δεύτερη κύρια συνιστώσα – ασυσχέτιστη με την πρώτη- εξηγεί στο μέγιστο την υπόλοιπη διακύμανση, κ.ο.κ. το άθροισμα των διακυμάνσεων όλων των P κύριων συνιστωσών ισούται με το άθροισμα των διακυμάνσεων των αρχικών μεταβλητών. Όλες οι μεταβλητές μετρούνται με τις ίδιες μονάδες, τις τυπικές μονάδες, έτσι που η διακύμανση των τιμών της μιας μεταβλητής να αναφέρεται στη μονάδα, η δε ολική διακύμανση να ισούται με τον αριθμό των παρατηρήσεων n. Αυτός είναι ο λόγος που η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες χρησιμοποιεί μήτρα συντελεστών συσχέτισης με μονάδες τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου. Τέτοια μήτρα είναι συμμετρική και θετική, με όλα τα κύρια στοιχεία της πραγματικά και θετικά.

Για μια συγκεκριμένη μεταβλητή z_j, η διακύμανση των τιμών της, που αθροιστικά ισούται με τη μονάδα, μπορεί να εκφραστεί με την αθροιστική συμμετοχή των φορτίων των κύριων συνιστωσών, όπως:

$$1 = \alpha_{j1}^2 + \alpha_{j2}^2 + ... + \alpha_{jn}^2, \quad \text{(εξ.16)}$$

δηλαδή τα τετράγωνα των παραγοντικών φορτίων υποδηλώνουν το ποσοστό της διακύμανσης της μεταβλητής που εξηγείται από καθεμία κύρια συνιστώσα.

Τέλος, το άθροισμα των τετραγώνων των παραγοντικών φορτίων της ίδιας κύριας συνιστώσας υποδηλώνει τη συμμετοχή της συνιστώσας στην ολική διακύμανση των μεταβλητών. Η τιμή αυτή του αθροίσματος για καθεμιά κύρια συνιστώσα καλείται χαρακτηριστική ρίζα και συμβολίζεται με λ_i. Καθεμία κύρια συνιστώσα P_i μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως γραμμικός συνδυασμός των μεταβλητών z_j, κατά την σχέση:

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\alpha_{ji}}{\lambda_t} \right) z_j \quad (\text{εξ.17})$$

και η ποσοστιαία συμμετοχή της στην ολική διακύμανση δίνεται από τη σχέση:

$$\%\ \text{συμμετοχή του P στην ολική διακύμανση} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji}^2}{n} \cdot 100 \quad (\text{εξ.18})$$

η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε σημαντικής κύριας συνιστώσας P_i στην κοινή διακύμανση δίνεται από την σχέση:

$$\%\ \text{συμμετοχή του Pi στην κοινή διακύμανση} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji}^2}{\sum_{j=1}^{n} h_j^2} \cdot 100 \quad (\text{εξ.19})$$

(όπου $\sum_{j=1}^{n} h_j^2$ είναι το άθροισμα των τετραγώνων των φορτίων της αναγόμενης μήτρας των κύριων συνιστωσών).

Οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών με τους αντίστοιχους παράγοντες καλούνται παραγοντικά φορτία, οι τιμές των οποίων μπορεί να είναι στατιστικά σημαντικές ή για ορισμένο επίπεδο σημαντικότητας. Κριτήρια για τη σημαντικότητα των παραγοντικών φορτίων υπάρχουν διάφορα (Child 1970, Philip et al. 1975) ο Guilford (1975) χαρακτηρίζει ένα παραγοντικό φορτίο «αξιόλογο» με τιμή μεγαλύτερη του ±0,30-0,40.

Αφού σκοπός της παραγοντικής ανάλυσης είναι η απόκτηση παραγόντων που θα βοηθήσουν στην εξήγηση της συσχέτισης των μεταβλητών, προϋπόθεση σημαντική είναι οι μεταβλητές να συσχετίζονται προκειμένου το υπόδειγμα της παραγοντικής ανάλυσης να θεωρείται κατάλληλο. Εάν οι συσχετίσεις είναι χαμηλές (με βάση τα επίπεδα σημαντικότητας), είναι σχεδόν αδύνατο οι μεταβλητές να μοιράζονται κοινούς παράγοντες.

Τα κριτήρια τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του ενδεδειγμένου αριθμού των κύριων συνιστωσών είναι:

α) το κριτήριο των Guttman και Kaiser (Cattell, 1978) όπου η λήψη των κύριων συνιστωσών καθορίζεται από τιμές χαρακτηριστικών ριζών μεγαλύτερες ή ίσες της μονάδας.

β) Ο Cattell (1978) συνιστά και τη χρησιμοποίηση του ελέγχου της ομαλής μεταβολής της κλίσης, σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός των απαιτούμενων κύριων συνιστωσών είναι αυτός μετά τον οποίο παρατηρείται τάση ευθυγράμμισης της

γραμμής που ενώνει τις τιμές των χαρακτηριστικών ριζών της αρχικής μήτρας των κύριων συνιστωσών.

6.2.2. Έλεγχοι για την καταλληλότητα χρήσης του υποδείγματος της παραγοντικής ανάλυσης.

Για τον έλεγχο ότι η μήτρα συσχετίσεων δεν είναι ταυτοτική, δηλαδή ότι τα διαγώνια στοιχεία της δεν είναι μονάδες και τα εκτός της διαγωνίου μηδενικά, χρησιμοποιείται ο έλεγχος σφαιρικότητας του Bartlett.

Μέτρο της καταλληλότητας της δειγματοληψίας είναι ο δείκτης των Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), δείκτης σύγκρισης των μεγεθών των παρατηρούμενων συντελεστών συσχέτισης προς τους συντέλεσες μερικής συσχέτισης. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως:

$$KMO = \frac{\sum\sum_{i=j} r_{ij}^2}{\sum\sum_{i=j} r_{ij}^2 + \sum\sum_{i=j} \alpha_{ij}^2} \quad \text{(εξ. 20)}$$

(όπου r_{ij} είναι ο συντελεστής απλής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών i και j και α_{ij} ο συντελεστής μερικής συσχέτισης μεταξύ των ίδιων μεταβλητών).

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, εάν το άθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών μερικής συσχέτισης μεταξύ όλων των ζευγών των μεταβλητών είναι μικρό σε σχέση με το άθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών συσχέτισης, ο δείκτης KMO είναι σχεδόν 1. Συνεπώς, μικρές τιμές του KMO υποδηλώνουν ότι η παραγοντική ανάλυση των μεταβλητών δεν είναι η σωστή τεχνική, αφού οι συσχετίσεις μεταξύ ζευγών μεταβλητών δεν μπορούν να εξηγηθούν από τις άλλες μεταβλητές. Ο Kaiser (1974) χαρακτηρίζει ένα μέτρο KMO ως «εξαιρετικό» με τιμή 0,90, «αξιόλογο» με τιμή 0,80, «μέτριας αξίας» με τιμή 0,70, «πολύ μέτριο» με τιμή 0,60, «ευτελές» με τιμή 0,50 και ως μη «αποδεκτό» με τιμή κατώτερη του 0,50. Συνεπώς τα αποτελέσματα της παραγοντικής ανάλυσης πιθανόν να μην είναι πολύ χρήσιμα με τιμές KMO μικρότερες του 0,50.

Μέτρο καταλληλότητας δειγματοληψίας (MSA) μπορεί να υπολογιστεί επίσης, για καθεμία από τις μεταβλητές. Σύμφωνα με αυτό, αντί να ληφθούν όλα τα ζεύγη των μεταβλητών στα αθροίσματα, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι συντελεστές οι σχετικοί με την καθεμία μεταβλητή. Τα μέτρα καταλληλότητας δειγματοληψίας όλων των μεταβλητών εμφανίζονται ως τα στοιχεία της μήτρας των αντιαπεικονισμένων συντελεστών συσχέτισης. Μεταβλητές με στοιχεία που έχουν τιμές χαμηλές MSA πρέπει να απομακρυνθούν, έτσι ώστε το υπόδειγμα της παραγοντικής ανάλυσης να είναι κατάλληλο.

Μέτρο καλής γραμμικής σχέσης (συσχέτισης) μεταξύ των μεταβλητών αποτελεί ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού R^2 (το τετράγωνο του συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης) μεταξύ μιας μεταβλητής με άλλες. Μεταβλητές με χαμηλές τιμές R^2 πρέπει να απομακρυνθούν από την ομάδα των μεταβλητών για ανάλυση, ως μη έχουσες ή έχουσες ασήμαντη σύνδεση με αυτές (Γεωργιος Κ. Σιάρδος, 2004).

6.3. Συσχέτιση εποχικότητας ραδονίου με εποχικότητα αδρών και λεπτών σωματιδίων.

Δείγματα αερολυμάτων συλλέχθηκαν για την περίοδο από τον Ιούλιο 2004 έως τον Ιούλιο του 2006. Τα δείγματα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν για την περιεκτικότητα τους σε ανιόντα, κατιόντα, στοιχεία, οργανικό και στοιχειακό άνθρακα τόσο για τα λεπτά όσο και για τα αδρά σωματίδια. Τα δεδομένα από τα δείγματα αυτά με την βοήθεια της παραγοντικής ανάλυσης συσχετίστηκαν με την συγκέντρωση του ραδονίου που παρατηρήθηκε για την αντίστοιχη περίοδο. Σαν τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου θεωρήθηκε η μέση τιμή της περιόδου από την έναρξη της δειγματοληψίας μέχρι την λήξη. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες με την μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστο και ελάχιστο για τα λεπτά και αδρά σωματίδια.

Αδρά ($\mu g \cdot m^{-3}$, n=85)				
	Μέση τιμή	**Τυπική απόκλιση**	**Ελάχιστο**	**Μέγιστο**
Acetate	0,033	0,023	0,000	0,111
Propionate	0,007	0,006	0,001	0,039
Formate	0,021	0,017	0,000	0,099
MSA	0,006	0,006	0,000	0,027
Pyruvate	0,002	0,002	0,000	0,007
Cl^-	1,434	1,179	0,000	4,770
NO_3^-	1,627	0,712	0,128	3,200
SO_4^{2-}	1,081	0,875	0,118	8,000
Oxalate	0,078	0,058	0,008	0,301
$HPO4^-$	0,049	0,036	0,000	0,184
Na^+	1,325	0,717	0,142	3,369
NH_4^+	0,171	0,085	0,035	0,441
K+	0,071	0,057	0,000	0,290
Mg^{2+}	0,181	0,115	0,000	0,538
Ca^{2+}	1,224	1,558	0,000	8,964
OC	1,110	1,415	0,015	8,288
EC	0,134	0,128	0,000	0,801
Al	0,393	0,782	0,029	5,059
Ca	1,290	2,843	0,000	18,615
Ti	0,025	0,048	0,001	0,290
V	0,003	0,005	0,000	0,023
Cr	0,006	0,016	0,001	0,126
Mn	0,010	0,019	0,000	0,125
Fe	0,535	1,212	0,002	8,509
Ni	0,002	0,002	0,000	0,011
Cu	0,001	0,002	0,000	0,017
Zn	0,017	0,018	0,000	0,126
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000
Pb	0,003	0,003	0,000	0,019
Rn	56,567	23,075	17,809	117,581

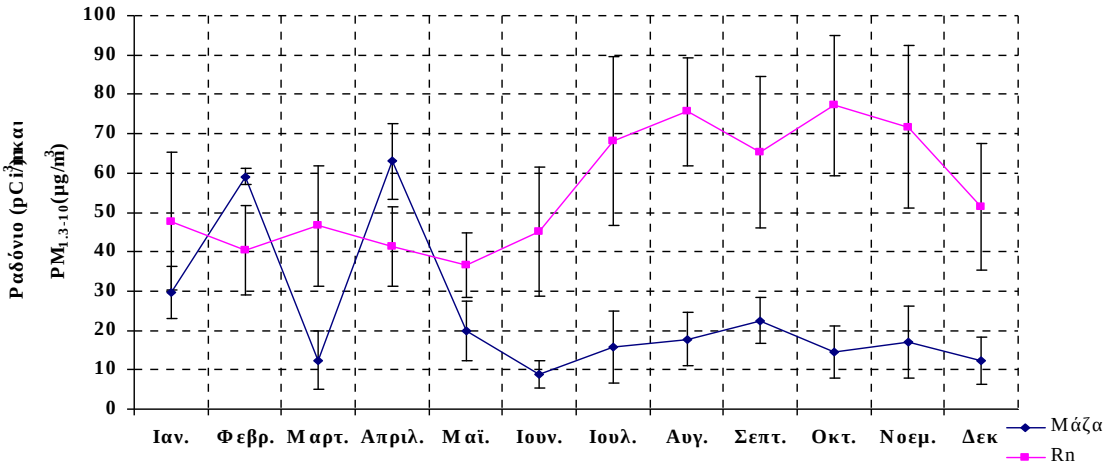
Πίνακας 28. Στατιστικά στοιχεία των αδρών σωματιδίων για τα ιόντα και στοιχεία και για το ραδόνιο.

Λεπτά (μg·m^{-3}, n=85)				
	Μέση τιμή	**Τυπική απόκλιση**	**Ελάχιστο**	**Μέγιστο**
Acetate	0,045	0,039	0,000	0,286
Propionate	0,010	0,011	0,000	0,063
Formate	0,040	0,039	0,000	0,226
MSA	0,035	0,027	0,003	0,145
Pyruvate	0,009	0,006	0,000	0,026
Cl^-	0,075	0,063	0,000	0,344
Br^-	0,005	0,011	0,000	0,063
$NO3^-$	0,104	0,081	0,000	0,394
SO_4^{2-}	4,397	2,298	0,304	10,383
Oxalate	0,113	0,057	0,029	0,258
$HPO4^-$	0,051	0,040	0,008	0,220
Na^+	0,050	0,102	0,000	0,812
$NH4^+$	1,446	0,737	0,293	3,142
K^+	0,118	0,093	0,000	0,475
Mg^{2+}	0,005	0,017	0,000	0,094
Ca^{2+}	0,074	0,220	0,000	1,590
OC	1,839	1,419	0,109	9,456
EC	0,268	0,175	0,000	0,717
Al	0,089	0,095	0,000	0,504
Ca	0,258	0,312	0,000	1,811
Ti	0,018	0,018	0,000	0,122
V	0,005	0,004	0,001	0,017
Cr	0,003	0,002	0,000	0,012
Mn	0,002	0,002	0,000	0,015
Fe	0,063	0,143	0,000	1,018
Ni	0,002	0,001	0,000	0,006
Cu	0,002	0,002	0,000	0,009
Zn	0,012	0,014	0,000	0,091
Cd	0,000	0,000	0,000	0,002
Pb	0,006	0,007	0,000	0,047
Rn	56,567	23,075	17,809	117,581

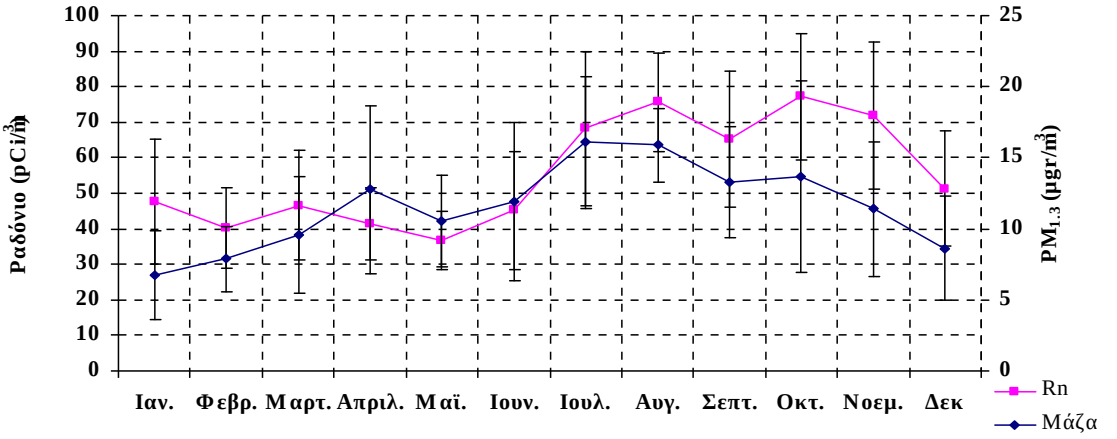
Πίνακας 29. Στατιστικά στοιχεία των λεπτών σωματιδίων για τα ιόντα και στοιχεία και για το ραδόνιο.

Πριν ασχοληθούμε όμως με την συσχέτιση του ραδονίου με τα μετρηθέντα ιόντα και τα στοιχεία καθώς και την εξαγωγή παραγόντων κοινής προέλευσης, κάναμε μια διερεύνηση για να δούμε ποια από τα στοιχεία και ιόντα τόσο για τα λεπτά όσο και για τα αδρά σωματίδια παρουσιάζουν ίδια ετήσια μεταβολή με την συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου.

Από τις **Εικόνες 82, 83** φαίνεται ότι η εποχιακή αλλαγή της συγκέντρωσης του ραδονίου σχετίζεται περισσότερο με τις αλλαγές των συγκεντρώσεων των λεπτών σωματιδίων. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι κυρίως η προέλευση των σωματιδίων και του ραδονίου. Τα λεπτά σωματίδια όπως είδαμε έχουν ανθρωπογενή προέλευση και έχουν την δυνατότητα να μετακινούνται σε μεγάλες αποστάσεις.

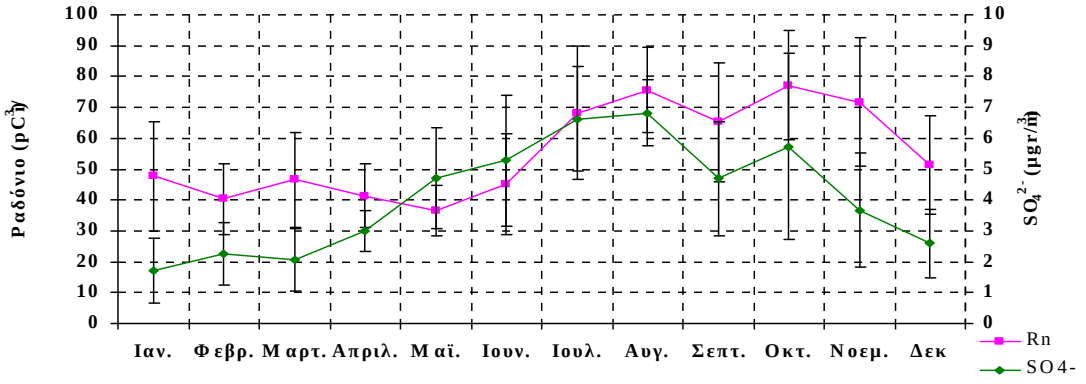


Εικόνα 82. Εποχιακή μεταβολή της μάζας των αδρών σωματιδίων και του ραδονίου.

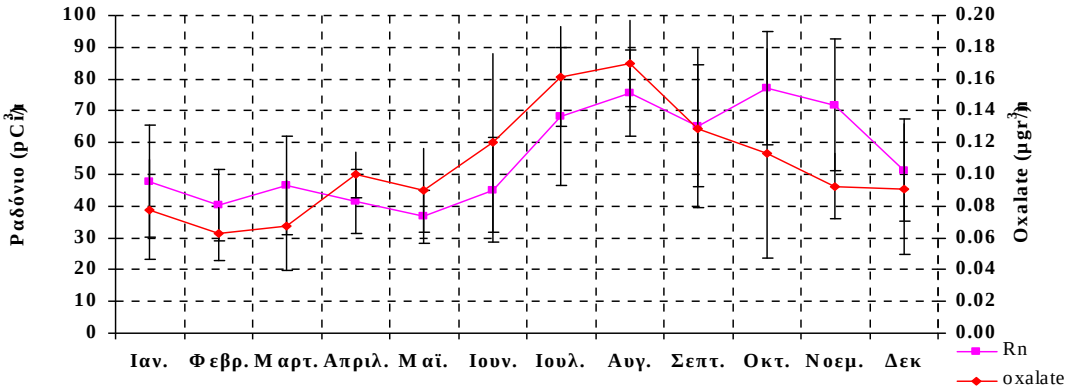


Εικόνα 83. Εποχιακή μεταβολή της μάζας των λεπτών σωματιδίων και του ραδονίου.

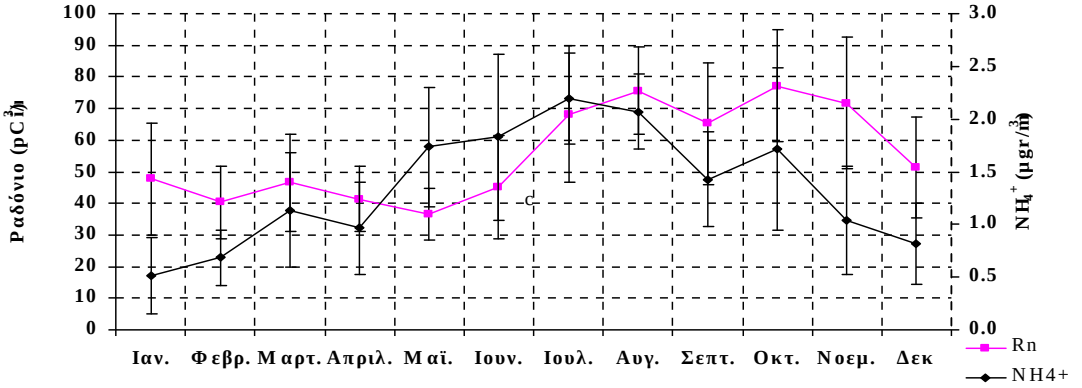
Μελετώντας την εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου με την συγκέντρωση των ιόντων και των στοιχείων για τα λεπτά και αδρά σωματίδια είδαμε ότι: α) για τα μεν αδρά σωματίδια η αλλαγή στην συγκέντρωση του ραδονίου ακολουθεί την αλλαγή της συγκέντρωσης κυρίως του NH_4^+ και λίγο των NO_3^- και MSA β) για τα λεπτά σωματίδια το ραδόνιο έχει κοινή εποχιακή μεταβολή με τα SO_4^{2-} , NH_4^+, $C_2O_4^{2-}$. Οι **Εικόνες 84 έως 88** δίνουν την εποχιακή μεταβολή του ραδονίου και των ιόντων για τα αδρά και λεπτά σωματίδια.



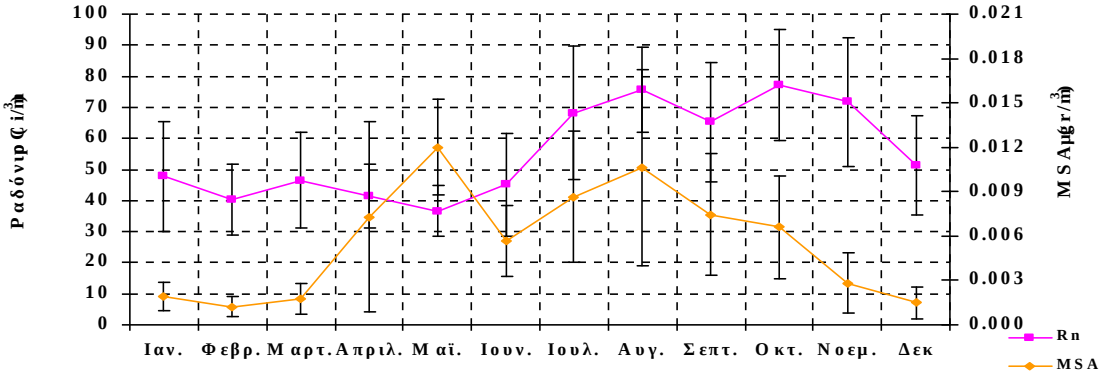
Εικόνα 84. Εποχιακή μεταβολή ραδονίου και SO_4^{2-} για τα λεπτά σωματίδια.



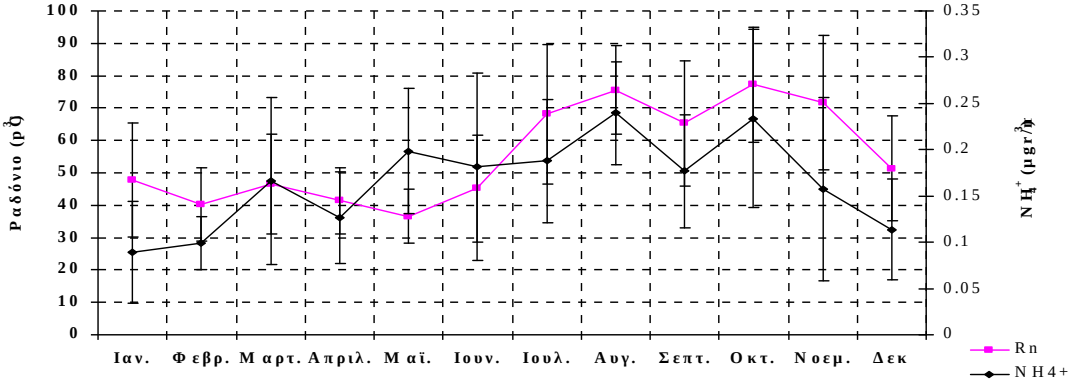
Εικόνα 85. Εποχιακή μεταβολή ραδονίου και $C_2O_4^{2-}$ για τα λεπτά σωματίδια.



Εικόνα 86.Εποχιακή μεταβολή ραδονίου και NH_4^+ για τα λεπτά σωματίδια.



Εικόνα 87. Εποχιακή μεταβολή ραδονίου και MSA για τα αδρά σωματίδια.



Εικόνα 88. Εποχιακή μεταβολή ραδονίου και NH_4^+ για τα αδρά σωματίδια.

6.4. Απλή γραμμική παλινδρόμηση ραδονίου με ιόντα και στοιχεία.

Παρακάτω δίνετε ο **Πίνακας 30** με τα αποτελέσματα της απλής γραμμικής συσχέτισης του ραδονίου με καθένα από τα στοιχεία και ιόντα τόσο για τα αδρά όσο και για τα λεπτά σωματίδια. Παρατηρούμε λοιπόν ότι για πολλά στοιχεία και ιόντα το ραδόνιο έχει χαμηλά ποσοστά συσχέτισης τόσα για τα λεπτά όσο και για τα αδρά. Επίσης αυτά τα μικρά ποσοστά συσχέτισης δεν είναι στατιστικά αποδεκτά διότι έχουν διάστημα εμπιστοσύνης μικρότερο του 95%.

	Αδρά (Coarse)		Λεπτά (Fine)		Αδρά+ Λεπτά (Coarse + Fine)	
	R square (%)	Διαστ. Εμπισ.	R square (%)	Διαστ. Εμπισ.	R square (%)	Διαστ. Εμπισ.
MSA	6,7	95% (+)	**16,7**	99% (+)	**13,5**	99% (+)
Cl^-	7,2	95% (-)	0,8	50% (+)	3,3	90% (-)
NO_3^-	6,7	95% (+)	0,5	50% (-)	**8,3**	99% (+)
SO_4^{2-}	2,2	80% (+)	**49,9**	99% (+)	**60,9**	99% (+)
Oxalate	5,0	95% (+)	**38,9**	99% (+)	**38,9**	99% (+)
Na^+	1,3	65% (-)	0,6	40% (-)	0,6	50% (-)
$NH4^+$	**66,2**	99% (+)	**42,2**	99% (+)	**49,4**	99% (+)
K^+	2,9	85% (-)	**28,2**	99% (+)	**14,5**	99% (+)
Mg^{2+}	1,7	73% (-)	0,3	18% (+)	0,6	50% (-)
Ca^{2+}	5,9	95% (-)	0,7	38% (-)	5,2	95% (-)
OC	3,3	86% (-)	6,4	95% (+)	0,4	**43% (+)**
EC	**12,8**	99% (+)	8,9	99% (+)	**10,7**	99% (+)
Al	2,7	82% (-)	1,3	70% (+)	2,4	82% (-)
Ca	3,3	87% (-)	1,4	70% (-)	3,0	87% (-)
Ti	1,8	73% (-)	2,1	80% (+)	1,2	65% (-)
V	0,9	53% (+)	**27,2**	99% (+)	**13,8**	99% (+)
Cr	9,3	99% (+)	7,6	95% (+)	**10,3**	99% (+)
Mn	2,3	80% (-)	1,1	65% (-)	2,0	75% (-)
Fe	2,5	82% (-)	2,5	80% (-)	2,3	80% (-)
Ni	6,7	95% (+)	**24,1**	99% (+)	**20,0**	99%(+)

Πίνακας 30. Συντελεστές παλινδρόμησης ραδονίου με ιόντα και στοιχεία.

Για τα αδρά σωματίδια βλέπουμε ότι το ραδόνιο έχει μεγαλύτερα ποσοστά γραμμικής συσχέτισης με το μεθυλοσουλφονικό ιόν (6,7%), το ανιόν χλωρίου (7,2%), τα αμμωνιακά ιόντα (66,2%) και τον στοιχειακό άνθρακα (12,8%). Για τα λεπτά σωματίδια το ραδόνιο συσχετίζεται γραμμικά περισσότερο με το μεθυλοσουλφονικό ιόν (16,7%), θεϊκά ιόντα (49,9%), το οξαλικό ανιόν (38,9%), τα αμμωνιακά ιόντα (42,2%), το κατιόν του καλίου (28,2%), τον οργανικό άνθρακά (6,4%), τον στοιχειακό άνθρακα (8,9%), το βανάδιο (27,2%), το χρώμιο (7,6%), και το νικέλιο (24,1%).

Αθροίζοντας τις συγκεντρώσεις των αδρών και λεπτών σωματιδίων συσχετίσαμε το ραδόνιο με τα συνολικά PM_{10}, Η γραμμική παλινδρόμηση έδωσε συσχέτιση του ραδονίου με το μεθυλοσουλφονικό ιόν (13,5%), νιτρικά ανιόντα (8,3%) θειικά ιόντα (60,9%),οξαλικό ανιόν (38,9%), αμμωνιακά ιόντα (49,4%), ιόν του καλίου (14,5%), ιόν του ασβεστίου (5,2%), στοιχειακός άνθρακας (10,7%), το βανάδιο (13,8%), το χρώμιο (10,3%), και το νικέλιο (20,0%).

6.5. Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες.

Η παραγοντική ανάλυση των δεδομένων χωρίστηκε σε τρεις ομάδες αερολυμάτων και ραδονίου, Οι ομάδες αυτές χωρίζονται με βάση την διάμετρο των σωματιδίων σε: α) αδρά (PM $_{2,5\text{-}10,0\mu m}$) σωματίδια και ραδόνιο, β) λεπτά (<2,5μm) σωματίδια και ραδόνιο γ) άθροισμα αδρά και λεπτά (PM_{10}) με ραδόνιο. Τα αποτελέσματα του έλεγχου σφαιρικότητας του Bartlett και ο δείκτης Kaisser-Meyer-Oklin, για τις τρεις αυτές ομάδες φαίνεται παρακάτω.

Αδρά σωματίδια		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,730
Bartlett's Test of Sphericity	Approx, Chi-Square	1791,027
	df	105,000
	Sig.	1,2E-304

Πίνακας 31. Δείκτης των Kaiser-Meyer-Olkin και έλεγχος σφαιρικότητας για τα αδρά σωματίδια.

Λεπτά σωματίδια		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,659
Bartlett's Test of Sphericity	Approx, Chi-Square	688,355
	df	136,000
	Sig.	1,051E-074

Πίνακας 32. Δείκτης των Kaiser-Meyer-Olkin και έλεγχος σφαιρικότητας για τα λεπτά σωματίδια.

Συνολικά PM_{10}		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,779
Bartlett's Test of Sphericity	Approx, Chi-Square	1801,434
	df	136,000
	Sig.	1,789E-288

Πίνακας 33. Δείκτης των Kaiser-Meyer-Olkin και έλεγχος σφαιρικότητας για τα συνολικά PM_{10}.

Από τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις ο έλεγχος σφαιρικότητας του Bartlett έχει υψηλές τιμές του στατιστικού χ^2 υποδηλώνοντας ότι η μήτρα συσχετίσεων δεν είναι ταυτοτική και συνεπώς το υπόδειγμα της παραγοντικής ανάλυσης είναι κατάλληλο.

Οι τιμές των δεικτών Kaiser-Meyer-Olkin ως δείκτη σύγκρισης των μεγεθών των παρατηρούμενων συντελεστών συσχέτισης προς τους συντελεστές μερικής συσχέτισης είναι μεγαλύτερες του 0,65 και υποδηλώνουν ότι η παραγοντική ανάλυση είναι αποδεκτή τεχνική και στις τρεις περιπτώσεις.

Οι συντελεστές μερικής συσχέτισης ως εκτιμητές των συσχετίσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών παραγόντων είναι χαμηλοί, αυτό φάνηκε από τις χαμηλές τιμές των αντιαπεικονισμένων συντελεστών της μήτρας συσχετίσεων, και ενίσχυσε την χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής.

Ακόμα τα μέτρα καταλληλότητας της δειγματοληψίας (MSA) για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται και που εμφανίζονται στην μήτρα των αντιαπεικονισμένων

συντελεστών συσχέτισης έχουν υψηλές τιμές που υποστηρίζουν ότι το υπόδειγμα της παραγοντικής ανάλυσης είναι αποδεκτό.

Παρακάτω δίνονται οι μήτρες συσχέτισης για τις τρεις περιπτώσεις. Από τους συντελεστές συσχέτισης των ιόντων και στοιχείων αλλά και του ραδονίου παρατηρούμε ότι υπάρχει καλό ποσοστό υψηλών συντελεστών μεταξύ των μεταβλητών γεγονός που υποστηρίζουν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω για την καταλληλότητα της παραγοντικής ανάλυσης.

Από τους πίνακες αυτούς παρατηρούμε για τα αδρά σωματίδια **(Πίνακας 34)** ότι μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης μεταξύ τους έχουν τα α) Ca^{2+}, Al, Ca, Mn, CO_3^{2-}, Fe, Ti, β) Na, Mg^{2+}, Cl^-, γ) MSA, NO_3^-, δ) ^{222}Rn, NH_4^+. Χαρακτηριστικό είναι ότι παρά το γεγονός ότι η κύρια πηγή ραδονίου είναι το έδαφος το ραδόνιο δεν έχει υψηλούς συντελεστές συσχέτισης με εδαφικής προέλευσης στοιχεία (π,χ, Al, Ca, Fe).

Η μήτρα συντελεστών συσχέτισης για τα λεπτά σωματίδια **(Πίνακας 35)** έδειξε μεγαλύτερες συσχετίσεις μεταξύ α) Oxalate, SO_4^{2-}, NH_4^+, MSA, ^{222}Rn, K^+, Ni, V β) Ca, Cr, Fe, Mn, γ) Al, V, Ni,. Και στην περίπτωση των λεπτών σωματιδίων το ραδόνιο δεν έχει υψηλούς συντελεστές συσχέτισης με στοιχεία εδαφικής προέλευσης.

Η μήτρα των συντελεστών συσχέτισης της συνολικής συγκέντρωσης των PM_{10} έδειξε μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των α) MSA, NH_4^+, SO_4^{2-}, ^{222}Rn , Oxalate, β) Ca, Mn, Fe, CO_3^{2-}, Ca^{2+}, Ti, Al, Mg^{2+}, γ) Na^+, Cl^-, Mg^{2+}, δ) Ni, Cr.

	Cl^-	SO_4^{-2}	Na	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Al	Ca	Mn	CO_3^{2-}	^{222}Rn	NO_3^-	MSA	Fe	Ti
Cl^-	1,000														
SO_4^{-2}	**0,467**	1,000													
Na	**0,853**	**0,313**	1,000												
NH_4^+	-0,390	0,031	-0,263	1,000											
Mg^{2+}	**0,830**	**0,400**	**0,847**	-0,295	1,000										
Ca^{2+}	**0,387**	**0,472**	0,207	**-0,333**	**0,519**	1,000									
Al	**0,465**	**0,644**	0,320	-0,254	**0,575**	**0,830**	1,000								
Ca	**0,397**	**0,395**	0,278	**-0,307**	**0,566**	**0,905**	**0,861**	1,000							
Mn	**0,450**	**0,777**	0,305	-0,241	**0,544**	**0,849**	**0,926**	**0,861**	1,000						
CO_3^{2-}	0,151	0,093	0,138	-0,187	**0,398**	**0,784**	**0,645**	**0,825**	**0,595**	1,000					
^{222}Rn	-0,245	0,051	-0,103	**0,704**	-0,130	-0,230	-0,152	-0,184	-0,134	-0,112	1,000				
NO_3^-	**0,352**	0,283	**0,357**	0,210	**0,375**	0,108	0,075	0,086	0,110	-0,001	0,291	1,000			
MSA	0,182	0,109	0,180	0,184	0,271	0,123	0,063	0,147	0,099	0,050	0,225	**0,707**	1,000		
Fe	**0,439**	**0,793**	0,290	-0,258	**0,525**	**0,832**	**0,918**	**0,841**	**0,997**	**0,569**	-0,157	0,077	0,066	1,000	
Ti	**0,387**	**0,670**	0,298	-0,249	**0,509**	**0,808**	**0,783**	**0,860**	**0,937**	**0,633**	-0,150	0,072	0,114	**0,936**	1,000

Πίνακας 34. Μήτρα συσχετίσεων των μεταβλητών για τα αδρά σωματίδια.

	MSA	NO_3^-	SO_4^{2-}	Oxalate	$NH4^+$	K^+	OC	EC	Ca	V	Mn	Ni	^{222}Rn	Na^+	Cr	Al	Fe
MSA	1,000																
NO_3^-	0,264	1,000															
SO_4^{2-}	**0,559**	-0,116	1,000														
Oxalate	**0,560**	0,078	**0,736**	1,000													
$NH4^+$	**0,519**	-0,176	**0,888**	**0,679**	1,000												
K^+	0,101	-0,205	**0,442**	**0,547**	**0,490**	1,000											
OC	0,105	0,061	**0,322**	**0,398**	**0,398**	0,285	1,000										
EC	0,062	0,036	0,111	**0,335**	0,105	**0,323**	**0,411**	1,000									
Ca	-0,035	**0,477**	-0,244	-0,216	-0,257	-0,190	0,032	0,116	1,000								
V	**0,590**	0,061	**0,533**	**0,523**	**0,502**	0,166	0,169	0,136	0,004	1,000							
Mn	0,003	**0,436**	-0,081	0,019	-0,089	0,070	0,115	0,103	**0,828**	0,082	1,000						
Ni	**0,582**	0,081	**0,508**	**0,510**	**0,471**	0,147	0,151	0,143	0,028	**0,990**	0,082	1,000					
^{222}Rn	**0,326**	-0,140	**0,643**	**0,599**	**0,565**	**0,487**	0,264	0,293	-0,141	**0,452**	-0,059	**0,425**	1,000				
Na^+	**0,383**	**0,615**	0,210	**0,321**	0,121	0,012	0,038	-0,040	0,098	0,013	0,236	0,009	-0,080	1,000			
Cr	-0,133	**0,475**	-0,230	-0,133	-0,288	-0,117	-0,029	0,014	**0,828**	-0,006	**0,926**	0,006	-0,169	0,117	1,000		
Al	**0,415**	0,228	0,234	0,353	0,195	-0,028	0,280	0,285	0,219	**0,627**	0,162	**0,628**	0,189	0,018	0,116	1,000	
Fe	0,079	**0,609**	-0,235	-0,103	-0,242	-0,141	0,050	0,161	**0,827**	0,111	**0,791**	0,128	-0,127	0,115	**0,790**	0,275	1,000

Πίνακας 35. Μήτρα συσχετίσεων των μεταβλητών για τα λεπτά σωματίδια.

	MSA	SO_4^{2-}	NH4+	Ca	Mn	Fe	$CO3^{2-}$	^{222}Rn	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	Cr	Ti	Oxalate	Ni	Al
MSA	1,000																
SO_4^{2-}	**0,526**	1,000															
NH4+	**0,520**	**0,805**	1,000														
Ca	-0,069	-0,087	**-0,321**	1,000													
Mn	-0,065	0,106	-0,252	**0,872**	1,000												
Fe	-0,098	0,079	-0,291	**0,857**	**0,995**	1,000											
$CO3^{2-}$	-0,008	-0,113	-0,155	**0,812**	**0,586**	**0,562**	1,000										
^{222}Rn	0,316	**0,629**	**0,586**	-0,177	-0,118	-0,149	-0,099	1,000									
Na^+	0,092	-0,056	-0,219	0,261	0,288	0,269	0,150	-0,081	1,000								
Mg^{2+}	0,041	-0,072	-0,277	**0,572**	**0,560**	**0,546**	**0,423**	-0,093	**0,833**	1,000							
Ca^{2+}	-0,093	-0,095	**-0,336**	**0,918**	**0,889**	**0,880**	**0,742**	-0,220	0,215	**0,546**	1,000						
Cl^-	-0,026	-0,120	**-0,329**	**0,373**	**0,419**	**0,405**	0,166	-0,181	**0,865**	**0,838**	**0,396**	1,000					
Cr	0,189	0,197	0,097	0,051	0,099	0,107	0,069	0,238	0,209	0,154	0,020	0,112	1,000				
Ti	0,014	0,057	-0,241	**0,860**	**0,919**	**0,916**	**0,637**	-0,108	**0,306**	**0,527**	**0,849**	**0,374**	0,174	1,000			
Oxalate	**0,564**	**0,703**	**0,521**	0,260	**0,376**	**0,334**	0,234	**0,537**	0,206	0,289	0,270	0,170	**0,358**	**0,350**	1,000		
Ni	**0,409**	**0,438**	**0,300**	**0,345**	**0,405**	**0,385**	**0,313**	**0,393**	0,174	0,289	**0,309**	0,082	**0,647**	**0,464**	**0,613**	1,000	
Al	-0,059	0,036	-0,269	**0,878**	**0,935**	**0,926**	**0,646**	-0,145	0,314	**0,592**	**0,874**	**0,456**	0,115	**0,809**	**0,377**	**0,384**	1,000

Πίνακας 36. Μήτρα συσχετίσεων των μεταβλητών για τα συνολικά σωματίδια PM_{10},(αδρά και λεπτά).

Η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες με περιστροφή κατά Varimax ήταν η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για την διερεύνηση των μετρήσεων. Αρχικά υπολογίστηκαν οι κύριες συνιστώσες, που στην ουσία είναι διανύσματα που εκφράζουν τους γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών μεταβλητών, και είναι κάθετα μεταξύ τους. Οι αρχικές συνιστώσες παρουσίαζαν υψηλά φορτία για όλες τις μεταβλητές γεγονός που δεν βοηθάει στην ταυτοποίηση τους. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η περιστροφή κατά Varimax. Η οποία είχε κύριο στόχο να μειώσει την πολυπλοκότητα των συνιστωσών, κάνοντας τα υψηλά φορτία κάθε μεταβλητής υψηλότερα και τα χαμηλά φορτία χαμηλότερα (σε κάθε συνιστώσα). Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες με Varimax περιστροφή και για τα αδρά, λεπτά και τα συνολικά PM_{10}.

Οι ιδιοτιμές που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα είναι στην ουσία το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης που συμμετέχει στην ανάλυση για την κάθε συνιστώσα, ενώ ακριβώς κάτω αναφέρεται το ποσοστό αυτό. Τέλος αθροίζοντας την διακύμανση που εκφράζει η κάθε συνιστώσα βρίσκουμε την ολική διακύμανση που εξηγεί η ανάλυση, και είναι ίση με 86,53% , 81,58%, 83,57% αντίστοιχα για τα αδρά, λεπτά και συνολικά PM_{10}.

	Συνιστώσες			
	1	**2**	**3**	**4**
Cl^-		0,913		
SO_4^{2-}				0,795
Na		0,909		
NH_4^+			0,678	
Mg^{2+}		0,823		
Ca^{2+}	0,932			
Al	0,862			
Ca	0,953			
Mn	0,883			
CO_3^{2-}	0,859			
^{222}Rn			0,729	
NO_3^-			0,761	
MSA			0,754	
Fe	0,868			
Ti	0,872			
Ιδιοτιμή	**6,07**	**3,25**	**2,18**	**1,48**
% Διακύμανση	**40,48**	**21,64**	**14,54**	**9,88**
Αθροιστική Διακύμανση	**40,48**	**62,11**	**76,65**	**86,53**
	Έδαφος	Θάλασσα	Φωτοχημεία	Καύση

Πίνακας 37. Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες με Varimax περιστροφή για τα αδρά σωματίδια και το ραδόνιο.

	Συνιστώσες				
	1	2	3	4	5
MSA		0,343	0,617	0,488	
NO_3^-	0,463			0,732	
SO_4^{2-}		0,827	0,340		
Oxalate ($C_2O_4^{2-}$)		0,722	0,335		
NH_4^+		0,821			
K^+		0,767			
OC					0,720
EC					0,850
Ca	0,905				
V		0,343	0,895		
Mn	0,956				
Ni		0,311	0,901		
^{222}Rn		0,715			
Na^+				0,925	
Cr			0,792		
Al	0,874				
Fe	0,953				
Ιδιοτιμή	**3,75**	**3,57**	**3,10**	**1,85**	**1,60**
% Διακύμανση	**22,07**	**21,02**	**18,23**	**10,86**	**9,39**
Αθροιστική Διακύμανση	**22,07**	**43,09**	**61,32**	**72,18**	**81,58**
	Έδαφος	**Δευτερογενή**	**Καύση πετρελαίου, θαλάσσια.**	**Θαλασσινό αλάτι**	**Καύση**

Πίνακας 38. Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες με Varimax περιστροφή για τα λεπτά σωματίδια και το ραδόνιο.

	Συνιστώσες			
	1	2	3	4
MSA		0,710		
SO_4^{2-}		0,917		
NH_4^+		0,859		
Ca	0,941			
Mn	0,943			
Fe	0,935			
CO_3^{2-}	0,765			
^{222}Rn		0,719		
Na^+			0,952	
Mg^{2+}			0,835	
Ca^{2+}	0,942			
Cl^-			0,924	
Cr				0,940
Ti	0,902			
Oxalate ($C_2O_4^{2-}$)		0,808		
Ni				0,692
Al	0,913			
Ιδιοτιμή	**6,37**	**3,53**	**2,80**	**1,51**
% Διακύμανση	**37,44**	**20,78**	**16,46**	**8,89**
Αθροιστική Διακύμανση	**37,44**	**58,22**	**74,68**	**83,57**
	Έδαφος	**Καύσης βιομάζας ή θαλάσσια δευτερογενή**	**Θαλασσινό αλάτι**	**Καύση πετρελαίου**

Πίνακας 39. Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες με Varimax περιστροφή για τα συνολικά PM_{10} και το ραδόνιο.

Πριν αναλύσουμε τα αποτελέσματα της παραγοντικής ανάλυσης που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες θα δούμε τις βασικές πηγές που έχουν τα διάφορα στοιχεία και ιόντα. Τα αδρά σωματίδια, εν γένει χαρακτηρίζονται από στοιχεία που έχουν σαν κύρια προέλευση τον στερεό φλοιό της γης γι' αυτό συνήθως έχουν μεγαλύτερα ποσοστά περιεκτικότητας σε Al, Ca, Fe και Mn, Τα ιόντα NO_3^-, $C_2O_4^-$, SO_4^{2-} και NH_4^+ είναι δευτερογενή σωματίδια ανθρώπινης προέλευσης και κατανέμονται στην περιοχή των λεπτών σωματιδίων. Πολλές φορές όμως υπάρχουν σε σημαντικές ποσότητες και στα αδρά σωματίδια λόγω προσκόλλησης ιόντων όπως NO_3^-, $C_2O_4^{2-}$, SO_4^{2-} (ετερογενείς αντιδράσεις) πάνω σε αυτά. Τα θεϊκά ιόντα στην περιοχή μας προκύπτουν κύρια από την οξείδωση του αέριου SO_2. Οι διαδικασίες οξείδωσης γίνονται με πολύ αργούς ρυθμούς με αποτέλεσμα τα θεϊκά ιόντα να παρουσιάζουν σημαντικές συγκεντρώσεις σε μακρινές αποστάσεις από την πηγή. Τα νιτρικά ιόντα προέρχονται από την οξείδωση οξειδίων του αζώτου NO, NO_2 ενώ τα αμμωνιακά ιόντα από την εξουδετέρωση της αέριας αμμωνίας από το θεϊκό και νιτρικό οξύ. Ο στοιχειακός (elemental carbon) και οργανικός άνθρακας (organic carbon) προκύπτουν κυρίως από διαδικασίες όπως καύση βιομάζας και καυσίμων. Γενικά ο στοιχειακός άνθρακας εισέρχεται στην ατμόσφαιρα αποκλειστικά σαν μια πρωτογενή (άμεσο σωματίδιο) εκπομπή με προέλευση σχεδόν απόλυτα από την πυρόλυση κατά την διάρκεια ατελούς καύσης οφειλόμενη π.χ. στην κίνηση οχημάτων

βιομηχανική αποτέφρωση, ή καύση βιομάζας (Bond et al, 2007). Το κλάσμα του οργανικού άνθρακα περιλαμβάνει πρωτογενή σωματίδια και δευτερογενή οργανικά αερολύματα (SOA), όπου τα τελευταία σχηματίζονται από αέριους πρόδρομους μέσω ατμοσφαιρικής οξείδωσης ή ολιγομερισμού (Jacobson et al,, 2000; Kanakidou et al,, 2005; Tsigaridis et al,, 2006). Ο οργανικός άνθρακας προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές π,χ, από διαδικασίες καύσης σε συμφωνία με τις εκπομπές στοιχειακού άνθρακα. Το MSA είναι γνωστό ότι σχηματίζετε αποκλειστικά από την φωτοοξείδωση του DMS (YIN et al., 1990). (βιογενής δραστηριότητα) και η συγκέντρωση του επηρεάζεται από την συγκέντρωση του DMS και από τις συγκεντρώσεις των οξειδωτικών.

Τα σωματίδια μπορούν να προέλθουν τόσο από ανθρώπινες δραστηριότητες όσο και από φυσικές πηγές. Κύριες φυσικές πηγές προέλευσης είναι η θάλασσα, η επαναιώρηση σκόνης από τον άνεμο και την ατμοσφαιρική κίνηση, σκόνη της Σαχάρας και οι ηφαιστειακές δραστηριότητες. Η ανθρώπινης προέλευσης αστική σκόνη δημιουργείται κυρίως από την κίνηση οχημάτων, τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, πηγές καύσης, βιομηχανική σκόνη, από εργασίες σε ορυχεία, πυρκαγιές, και από κατασκευές κτηρίων και τέλος από λατομεία.

Από την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες των αδρών σωματιδίων, **Πίνακας 37** προέκυψαν τέσσερις κύριες συνιστώσες εξηγώντας το 86,56% της συνολικής διακύμανσης. Σε αυτούς τους παράγοντες κοινές προελεύσεις διακρίθηκαν μεταξύ των Ca^{2+}, Al, Ca, Mn, CO_3^{2-}, Ti, Fe στοιχεία που χαρακτηρίζουν την προέλευση από το στερεό φλοιό της γης. Η συνιστώσα αυτή εξηγεί το 40,47% της διακύμανσης γεγονός που είναι λογικό διότι τα αδρά σωματίδια εμπεριέχουν μεγάλα ποσοστά σκόνης. Η δεύτερη συνιστώσα εξηγεί το 21,64% και εμπεριέχει κυρίως συστατικά που χαρακτηρίζουν ιόντα όπως το Cl^-, Na^+, Mg^{2+} και αντικατοπτρίζουν τα θαλάσσια αερολύματα και σε αυτή την περίπτωση τα φορτία συσχέτισης είναι υψηλά δείχνοντας την έντονη σχέση των ιόντων. Η τρίτη συνιστώσα εξηγεί το 16,46% της διακύμανσης και δείχνει την κοινή προέλευση στοιχείων και ιόντων όπως NH_4^+, ^{222}Rn, NO_3^-, MSA. Το μεγάλο φορτίο σε MSA, η παραγωγή του οποίου είναι θαλάσσια είναι ένδειξη της θαλάσσιας φωτοχημικής παραγωγής (DMS). Όμως η κοινή συνιστώσα του ραδονίου με τα στοιχεία αυτά είναι ένδειξη ότι τα παραπάνω ιόντα έχουν κοινές πηγές και προέρχονται από μεταφορά αέριων μαζών. Τα στοιχεία αυτά λόγω της προέλευσης τους από ανθρώπινες δραστηριότητες, δευτερογενή και λεπτά σωματίδια, η ύπαρξη τους και συσχέτιση τους στα αδρά σωματίδια εκφράζει την ύπαρξη ετερογενών αντιδράσεων και ενσωμάτωση των παραπάνω ιόντων σε μεγαλύτερα σωματίδια σκόνης και θαλασσινών αλάτων. Η τέταρτη συνιστώσα εξηγεί το 9,88% της διακύμανσης και είναι τα θεϊκά ιόντα και εκφράζουν την συνιστώσα της καύσης που όμως από μόνα τους δεν μπορούν να ενισχύσουν την υπόθεση αυτή.

Τα λεπτά σωματίδια με την βοήθεια της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες. **(Πίνακας 38)** έδωσαν πέντε κύριες συνιστώσες που εξηγούν το 81,58% της συνολικής διακύμανσης. Και στην περίπτωση των λεπτών σωματιδίων είναι εμφανής η συνεισφορά των στοιχειών εδαφικής προέλευσης (συνιστώσα 1) όπου εξηγεί το 22,07% της συνολικής διακύμανσης. Η δεύτερη κύρια συνιστώσα δίνει ισχυρά φορτία μεταξύ των $C_2O_4^{2-}$, SO_4^{2-}, NH_4^+, K^+, ^{222}Rn, και μικρότερα φορτία μεταξύ MSA, V, Ni. Η κοινή συνιστώσα των δευτερογενών σωματιδίων με το ραδόνιο είναι ένδειξη της μεταφοράς τους από απομακρυσμένες περιοχές και η μικρή συσχέτιση με το V και Ni δείχνει ότι μικρές ποσότητες από διαδικασίες καύσης μεταφέρονται μαζί με αυτά τα σωματίδια ενισχύοντας το φορτίο του $C_2O_4^{2-}$ στην συνιστώσα αυτή. Η τρίτη συνιστώσα εξηγεί το 18,23% της διακύμανσης και χαρακτηρίζεται από υψηλά σε V, Ni, Cr και μικρότερα φορτία σε $C_2O_4^{2-}$, SO_4^{2-}, και MSA και δείχνει την συνιστώσα

της καύσης πετρελαίου. Η τέταρτη συνιστώσα δείχνει τον παράγοντα του θαλασσινού αλατιού αφού παρουσιάζει υψηλά φορτία μεταξύ Na^+, NO_3^- και μικρότερα φορτία στο MSA. Η συσχέτιση των NO_3^-, & Na^+ ενισχύει το γεγονός ότι τα νιτρικά ιόντα έχουν την τάση να προσκολλούνται πάνω σε σωματίδια από θαλασσινό αλάτι. Η πέμπτη κύρια συνιστώσα εξηγεί ένα 9,39% ακόμα της διακύμανσης και αποτελείται από υψηλά φορτία σε οργανικό και στοιχειακό άνθρακα που είναι μια ένδειξη της ανθρωπογενής καύσης.

Αθροίζοντας το κλάσμα των λεπτών και αδρών σωματιδίων επαναλάβαμε την διαδικασία ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες και προέκυψε ο **Πίνακας 39**. Η ανάλυση έδωσε τέσσερις κύριες συνιστώσες εξηγώντας το 83,57% της διακύμανσης. Όπως στις αναλύσεις για τα αδρά και λεπτά σωματίδια έτσι και στην ανάλυση για τα συνολικά PM_{10} έχουμε ισχυρή παρουσία της εδαφικής προέλευσης εξηγώντας το 37,44% της διακύμανσης και αποτελούμενο από ισχυρά φορτία μεταξύ Ca^{2+}, Al, Ca, Mn, CO_3^{2-}, Ti, Fe. Η δεύτερη συνιστώσα αποτελείτε από τα δευτερογενή σωματίδια και το ραδόνιο. Δείχνοντας έτσι την μεταφορά μαζί με το ραδόνιο, στοιχείων και ιόντων από άλλες περιοχές (πολλά δευτερογενή σωματίδια έχουν κυρίως Β, ΒΑ και ΒΔ προελεύσεις σε συμφωνία με την προέλευση του ραδονίου). Το σχετικά υψηλό φορτίο του MSA στην συνιστώσα αυτή οφείλεται κυρίως στο $C_2O_4^{2-}$, και τα SO_4^{2-} ενδεικνύοντας ότι ένα κλάσμα της συγκέντρωσης του $C_2O_4^{2-}$, και SO_4^{2-} έχει προέλευση από την θαλάσσια βιογενή δραστηριότητα. Η τρίτη κύρια συνιστώσα εξηγεί ένα 16,46% ακόμα της διακύμανσης και περιέχει υψηλά φορτία ιόντων Cl^-, Na^+, Mg^{2+} κάνοντας αισθητή την ύπαρξη των θαλασσινών αλάτων σαν μια βασική προέλευση αερολυμάτων. Τέλος η τελευταία συνιστώσα αντιστοιχεί σε ένα 8,89% και αποτελείται από το Cr και Ni που είναι δείκτες της καύσης πετρελαίου.

Στην διεξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων βοήθησε και η εργασία των E. Koulouri, et al., 2008 «Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean» όπου έχει γίνει ανάλυση των λεπτών και αδρών σωματιδίων. Οι μετρήσεις που αναλύονται στην συγκεκριμένη μελέτη είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Οι παράγοντες που προέκυψαν είναι ίδιοι με αυτούς που γίνεται αναφορά εδώ δείχνοντας ότι η ανάλυση του σωματιδίων δεν επηρεάστηκε καθόλου από την παρουσία του ραδονίου, απλά μας έδειξε με ποια σωματίδια περισσότερο το ραδόνιο έχει κοινή προέλευση.

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα της διερεύνησης του ραδονίου. Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Στην προσπάθεια μας να διερευνήσουμε την διακύμανση της συγκέντρωση του ραδονίου και τους παράγοντες που μπορεί να την επηρεάζουν, επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα των μετρήσεων από το σταθμό της Φινοκαλιάς χρησιμοποιώντας διάφορες μεθοδολογίες. Ασχοληθήκαμε τόσο με την επιρροή της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού ραδονίου από μετεωρολογικούς παράγοντες όσο και από την προέλευση των αέριων μαζών. Τέλος προσπαθήσαμε μέσω στατιστικών μεθόδων, να ερευνήσουμε την κοινή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου με τα αέρια σωματίδια. Τώρα θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω έρευνα.

7.1. Συμπεράσματα.

Σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 5ετών μετρήσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου από το σταθμό της Φινοκαλιάς, αναλύθηκαν μαζί με μετρήσεις των μετεωρολογικών παράμερων και του όζοντος. Βασικός σκοπός της μελέτης ήταν να μελετήσουμε την επιρροή της μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων στην συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου. Ακόμα έγινε μια σημαντική προσπάθεια να διερευνήσουμε την μεταφορά του ραδονίου με βάση την προέλευση των αέριων μαζών και να μελετήσουμε με την χρήση των ιόντων και των στοιχείων με ποια από αυτά έχει κοινή προέλευση.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούν τόσο την κάθετη κίνηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος όσο και την μεταφορά αέριων μαζών από απομακρυσμένες περιοχές.

Η κίνηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και η ανάπτυξη του στρώματος ανάμειξη κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει την ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου. Η έντονη ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος διασκορπίζει την συγκέντρωση του ραδονίου και δεν το αφήνει να συσσωρευτεί, αλλά το ανεβάζει σε υψηλότερα στρώματα (Kataoka et al., 1998,2001, J. F Vinuesa and S. Galarini, Piero Di Carlo et al., 2008). Η ελάττωση των συγκεντρώσεων του ραδονίου κατά την διάρκεια της ημέρας είναι χαρακτηριστικό των ηλιόλουστων μερών διότι ενισχύουν το στρώμα ανάμειξης.

Μερικές φορές η σταθερότητα κατά την διάρκεια της ημέρας με πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου δίνει μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου και κατά την διάρκεια της ημέρας. Είναι χαρακτηριστικό ότι τις ηλιόλουστες ημέρες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, το ραδόνιο συσσωρεύεται σε υψηλά επίπεδα (L. Sesana et al., 1998, D.Dosideri et al., 2006) και είναι χαρακτηριστικό των ψυχρότερων μηνών (μικρότερα τα επίπεδα ανάμειξης κατά την διάρκεια της ημέρας).

Παρατηρώντας την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου είδαμε, και μέσω της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, ότι παρουσιάζει μια αντίθεση με την ταχύτητα του ανέμου. Είναι εμφανέστατο ότι η συσσώρευση του ραδονίου δεν είναι δυνατή με την ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων ανέμου και ασταθών καταστάσεων στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η αύξηση της ταχύτητας μειώνει την συγκέντρωση του ραδονίου

διασκορπίζοντας το. Τέτοιες περιπτώσεις 24ωρης διακύμανσης του ραδονίου παρατηρούνται τόσο ηλιόλουστες όσο και συννεφιασμένες ημέρες με υψηλές ταχύτητες ανέμου. Όμως τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες μειώνεται η αντίθετη σχέση του ραδονίου με την ταχύτητα (πέφτει στο 4,20% και 1,5% αντίστοιχα σε σχέση με την άνοιξη που είναι στο 14,50%) ενισχύοντας το γεγονός ότι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο υψηλότερες ταχύτητες ανέμου δίνουν μεγαλύτερες τιμές ραδονίου.

Ο ημερήσιος κύκλος του ραδονίου είναι ασταθείς και απρόβλεπτος, κάτι που έγινε εμφανές από τον υπολογισμός των τυπικών αποκλίσεων που τον χαρακτηρίζουν. Η αστάθεια αυτή έχει ως κύρια αίτια την ταχύτητα του άνεμου, την προέλευση των αέριων μαζών και την περιεκτικότατα τους σε ραδόνιο.

Το όζον εμφανίζει μια αντίθεση των μεγίστων με το ραδόνιο. Αυτό είναι χαρακτηριστικό διότι το όζον αυξάνεται κατά την διάρκεια της ημέρας από την φωτοχημική παραγωγή όσο και λόγω μεταφοράς του από υψηλότερα στρώματα σε χαμηλότερα (αργά το απόγευμα). Η είσοδος όζοντος από την ελεύθερη τροπόσφαιρα είναι μια διαδικασία που συμβαίνει όταν η έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα να σταματάει ή έντονη ανάμειξη και να αρχίσει να δημιουργείται ένα σταθερά διαστρωματομένο στρώμα λόγω ψύξης του εδάφους. Την ώρα δηλαδή που καταρρέει το στρώμα ανάμειξης, μάζες από την ελεύθερη τροπόσφαιρα εισχωρούν στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η διαδικασία αυτή είναι αντίθετη με τους μηχανισμούς που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου, που κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω μεγαλύτερης ανάμειξης διασκορπίζεται προς υψηλότερα στρώματα και ενισχύεται ο διασκορπισμός του την ώρα κατάρρευσης του στρώματος ανάμειξης λόγω έντονων τυρβώδων καταστάσεων. Αναφορές για την αντίθεση του ραδονίου και του όζοντος υπάρχουν στις έρευνες των E. Gerasopoulos et.al.,2006, 2005, D. Desideri at al., 2006, L.Sesana et al.,1998).

Από την γραμμική συσχέτιση των ημερήσιων τιμών του ραδόνιου με την θερμοκρασία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: α) Στην συνολική διακύμανση των ετών 2002-2006 η θερμοκρασία, η μέγιστη απόσταση που αποκτούν οι αέριες μάζες, και η ηλιακή ακτινοβολία είναι οι παράγοντες που σε μεγάλο ποσοστό εξηγούν την μεταβολή του ραδονίου. β) Το μέγιστο ύψος που αποκτάνε οι αέριες μάζες, δηλαδή πόσο κοντά στο έδαφος κινούνται οι αέριες μάζες, έχει όλες τις εποχές μια αντισυσχέτιση με το ραδόνιο. Το ποσοστό αυτό γίνεται πιο έντονο την εποχή του καλοκαιριού όταν η απελευθέρωση του ραδονίου από το έδαφος είναι πιο μεγάλη έτσι όσο πιο ψηλά είναι οι αέριες μάζες τόσο λιγότερο εμπλουτίζονται σε ραδόνιο. γ) Η σχετική υγρασία εκφράζει ένα σημαντικό ποσοστό της μεταβολής του ραδονίου όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι όταν δεν υπάρχει καμία συσχέτιση. Εν γένει αύξηση της σχετικής υγρασίας σημαίνει αύξηση του ραδονίου. ε)Η εξήγηση της διακύμανσης του ραδονίου από τους μετεωρολογικούς παράγοντες εξηγεί μόνο το 31,5% γεγονός που μας βάζει σε σκέψη για το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν το ραδόνιο για το υπόλοιπο της διακύμανσης του.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης ως προς την διεύθυνση ανέμου σε κάθε έτος δίνουν οι ΒΑ, ΒΔ και Β άνεμοι με μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου μεγαλύτερες των 60 pCi/m^3. Οι μικρότερες μέσες τιμές ραδονίου είναι χαρακτηριστικό των Δ και Ν/ΝΔ ανέμων. Οι δυτικής προέλευσης άνεμοι λόγω της θαλάσσιας επιφάνειας που διανύουν οι αέριες μάζες είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε ραδόνιο. Ακόμα παρατηρήσαμε περιπτώσεις αέριων μαζών με ηπειρωτική προέλευση αλλά δεν έδωσαν μεγάλες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου. Αυτό οφειλόταν σε δύο χαρακτηριστικά: α) οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου που διασκόρπιζαν το ραδόνιο και β) δεν υπήρχαν μεγάλες ποσότητες ραδονίου σε αυτές.

Η υγρασία του εδάφους, όταν αυξάνεται από την βροχόπτωση δεσμεύει τους πόρους του εδάφους κοντά στην επιφάνεια και μειώνει το ρυθμό εκπομπής από το έδαφος του ^{222}Rn (Moses et al., 1963, Pearson and Moses, 1966, Israël et al., 1966). Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν την περιοχή της ανατολική κεντρική και δυτικής Ευρώπης επηρεάζουν σημαντικά την συγκέντρωση του ραδονίου που φτάνει μέσω της μεταφοράς αέριων μαζών στην περιοχή της Κρήτης. Καιρικά φαινόμενα όπως έντονες πλημμύρες χιονοπτώσεις και απότομο λιώσιμο του χιονιού λόγω έντονης και απότομης αύξησης της θερμοκρασίας αυξάνουν την υγρασία του εδάφους και μειώνουν την ποσότητα ραδονίου που απελευθερώνεται άρα και την μεταφορά του.

Κατά την διερεύνηση του ραδονίου σε σχέση με τα αέρια σωματίδια προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

α) Η εποχιακή αλλαγή της συγκέντρωσης του ραδονίου σχετίζεται περισσότερο με τις αλλαγές των συγκεντρώσεων των λεπτών σωματιδίων. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι κυρίως η προέλευση των σωματιδίων και του ραδονίου, Τα λεπτά σωματίδια όπως είδαμε έχουν ανθρωπογενή προέλευση και έχουν την δυνατότητα να μετακινούνται σε μεγάλες αποστάσεις.

β) Μελετώντας την εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου με την συγκέντρωση των ιόντων και των στοιχείων για τα λεπτά και αδρά σωματίδια είδαμε ότι: α) για τα μεν αδρά σωματίδια η αλλαγή στην συγκέντρωση του ραδονίου ακολουθεί την αλλαγή της συγκέντρωσης κυρίως του NH_4^+ και λίγο των NO_3^- και MSA β) για τα λεπτά σωματίδια το ραδόνιο έχει κοινή εποχιακή μεταβολή με τα SO_4^{2-} , NH_4^+, $C_2O_4^{2-}$.

γ) Με την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες είδαμε για τα αδρά σωματίδια ότι η τρίτη συνιστώσα που εξηγεί το 16,46% της διακύμανσης, δείχνει την κοινή προέλευση στοιχείων και ιόντων όπως NH_4^+, ^{222}Rn, NO_3^-, MSA. Το μεγάλο φορτίο σε MSA, η παραγωγή του οποίου είναι θαλάσσια είναι ένδειξη θαλάσσιας φωτοχημικής παραγωγής. Μέρος των στοιχείων αυτών παράγονται από μικροοργανισμούς της θάλασσας. Όμως η κοινή συνιστώσα του ραδονίου με τα στοιχεία αυτά είναι ένδειξη ότι τα παραπάνω ιόντα έχουν κοινές πηγές και προέρχονται από μεταφορά αέριων μαζών. Τα στοιχεία αυτά επειδή η προέλευση τους οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, δευτερογενή και λεπτά σωματίδια, η ύπαρξη τους και συσχέτιση τους στα αδρά σωματίδια εκφράζει την ύπαρξη ετερογενών αντιδράσεων και ενσωμάτωση των παραπάνω ιόντων σε μεγαλύτερα σωματίδια σκόνης και θαλασσινών αλάτων.

δ) Με την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες για τα λεπτά σωματίδια διαπιστώθηκαν μέσω της δεύτερης κύριας συνιστώσας τα ισχυρά φορτία μεταξύ των $C_2O_4^{2-}$, SO_4^{2-}, NH_4^+, K^+, ^{222}Rn, και μικρότερα φορτία μεταξύ MSA, V, Ni. Η κοινή συνιστώσα των δευτερογενών σωματιδίων με το ραδόνιο είναι ένδειξη της μεταφοράς τους από απομακρυσμένες περιοχές και η μικρή συσχέτιση με το V και Ni δείχνει ότι μικρές ποσότητες από διαδικασίες καύσης μεταφέρονται μαζί με αυτά τα σωματίδια και ενισχύουν και την συγκέντρωση του $C_2O_4^2$. Ακόμα η μικρή συσχέτιση (χαμηλό φορτίο 0,343) με το MSA (πηγή του είναι η οξείδωση του DMS) δείχνει ότι μέρος των ιόντων (τα SO_4^{2-}, K^+, ένα μέρος τους έχει και θαλασσινή προέλευση) έχουν και θαλασσινή προέλευση.

ε) Για τα συνολικά σωματίδια (αδρά και λεπτά) η δεύτερη συνιστώσα εξηγώντας το 20,78% της συνολικής διακύμανσης αποτελείτε από τα δευτερογενή σωματίδια και το ραδόνιο. Δείχνοντας έτσι την μεταφορά μαζί με το ραδόνιο, στοιχείων και

ιόντων από άλλες περιοχές. Πολλά δευτερογενή σωματίδια έχουν κυρίως Β, ΒΑ και ΒΔ προελεύσεις σε συμφωνία με την προέλευση του ραδονίου (Κουβαράκης 2002).Το σχετικά υψηλό φορτίο του MSA στην συνιστώσα αυτή οφείλεται κυρίως στο $C_2O_4^{2-}$, και τα SO_4^{2-} ενδεικνύοντας ότι ένα κλάσμα της συγκέντρωσης του $C_2O_4^{2-}$, και SO_4^{2-} έχει προέλευση από την θαλάσσια βιογενή δραστηριότητα.

7.2. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του ραδονίου.

Τελειώνοντας την έρευνα μας πάνω στο ραδόνιο και του παράγοντες που το επηρεάζουν αναρωτηθήκαμε πώς θα μπορούσαμε να συνεχίσουμε την έρευνα πάνω στο ραδόνιο. Οι κύριοι τομείς που θα μπορούσε κανείς να ασχοληθεί στηρίζονται κυρίως:

i. Στην χρήση ενός μοντέλου όπως το TM5 για να προσομοιώσουμε την μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου και να δούμε κατά πόσο οι παράμετροι που έχουμε ορίσει στο μοντέλο, αντιστοιχούν στις πραγματικές μεταβολές του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.
ii. Η χρήση πολλυμεταβλητών τεχνικών όπως η θετική παραγοντική ανάλυση (Positive Matrix Factorization) θα βοηθούσε στην αναγνώριση των κύριων πηγών (κάτι ανάλογο με την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες) και σε συνδυασμό με τεχνικές προσδιορισμού των πιθανών πηγών (Ptential Sourse Contribution Function) θα μπορούσαν να αναγνωριστούν γεωγραφικές περιοχές που είχαν συνεισφέρει περισσότερο σε αυτές τις μετρήσεις.
iii. Τέλος σημαντικό θα ήταν να προσδιοριστεί η υγρασία του εδάφους με την βοήθεια μετρήσεων στην περιοχή της Φινοκαλιάς. Μετρήσεις που θα μας έδιναν μια εικόνα για την τοπική παραγωγή ραδονίου καθώς και για την συνεισφορά στην μεταβολή του ημερήσιου κύκλου του ραδονίου.

Βιβλιογραφία.

A. El-Hussein, A. Mohammed and A. A. Ahmed A, Study on radon and radon progeny in surface air of El Minia, Egypt, 1998.

Alexander V. Polissar and Philip K. Hopke, Richard L. Poirot Atmospheric Aerosol over Vermont: Chemical Composition and Sources, 2001.

Arrigo A. Cigna, Radon in Caves, International Journal of Speleology, 2005.

Barbara Hennemuth and Andrea Lammert , Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter, 2006

Boutsikas M.V., Σημειώσεις μαθήματος «Στατιστικά προγράμματα» Τμήμα Στατ. & Ασφ. Επιστήμης, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2004.

C. Dueñas, M. Pèrez, M.C. Fernández & j. Carretero, Radon Concentrations in Surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere, 1994.

C. Richard Cothern and Janes E. Smith, Jr., Environmental Radon, Plenum Press New York, 1987.

Cally Oldershaw, The Geological Society of London, The earth is in our hands, 2001.

Charles R.Hosler, Natural Radioactivity (Radon-222) and Air pollution Measurements in Wasington, D.C. 1966

C. Matti, A. Pauling, M. K€uttel, H. Wanner; Winter precipitation trends for two selected European regions, over the last 500 years and their possible dynamical background, 2008.

C. Papastefanou et al., Radon measurements along active faults in the Langadas Basin, northern Greece, 2001.

D. Desideri, C. Roselli, M. A. Meli, L. Feduzi, Comparison between the diurnal trends of ozone and radon gas concentrations measured at ground in the semi-rural site of Central Italy, 2006.

D. Morelli, S. Di Martino, G. Immè, S. La Delfa, S. Lo Nigro, G. Patanè Evidence of soil radon as tracer of magma uprising in Mt. Etna, 2006.

Davud K. Lasch, On Radon Virginia Minerals, 1988

E. Gerasopoulos, G. Kouvarakis, M. Vrekoussis, M. Kanakidou, and N. Mihalopoulos, Ozone variability in the marine boundary layer of the eastern Mediterranean based on 7-year observations, 2005

E. Koulouri, S. Saarikoski, C. Theodosi, Z. Markaki, E. Gerasopoulos, G. Kouvarakis, T. Mäkelä, R. Hillamo N. Mihalopoulos, Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean, 2008.

E. M. Fischer and S.I. Seneviratne, P.L. Vidale, D. Lüthi and C. Schär, Soil Moisture–Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave, 2007.

Evangelos Gerasopoulos, Giorgos Kouvarakis, Mihalis Vrekoussis, Christos Donoussis, Nikolaos Mihalopoulos, Maria Kanakidou, Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean, 2005.

F. Conen and L. B. Robertson, Latitudinal distribution of radon-222 flux from continents, 2001.

Fernando P. Carvalho, Origins and concentrations of 222Rn, 210Pb, 210Bi and 210Po in the surface air at Lisbon Portugal, at the Atlantic edge of the European continental landmass,1995.

Frank Dentener, Johann Feichter and Ad Jeuken, Simulation of the transport of Rn222 using on-line and off-line global models at different horizontal resolutions: a detailed comparison with measurements, 1998.

G. J. van Oldenborgh, How unusual was autumn 2006 in Europe?, 2007.

H. Bardouki et al.: Gaseous (DMS, MSA, SO_2, H_2SO_4 and DMSO) and particulate (sulfate and methanesulfonate) sulfur species over the northeastern coast of Crete, 2003.

H. Wollenberg, S. Flexser, G. Brimhall, and C. Lewis, Radon Sources and Emanation in Granitic Soil and Saprolite, 1993.

H.Zafrir, The Evolution, Transportation and Variation in Time of Rn-222 Within Rocks in a Desert Region, 2008.

Hajime Akimoto, Prabir Patra, Kentaro Ishijima, Masayuki Takigawa, Shamil Maksyutov , Takashi Maki, Atmospheric Composition Change and its Climate Effect Studied by Chemical Transport Models, 2006.

J C H Miles and R A Algar, Variations in radon-222 concentrations, 1988.

J. Kysely and R. Huth, Relationships of surface air temperature anomalies over Europe to persistence of atmospheric circulation patterns conducive to heat waves, 2008.

J. Sciare, H. Bardouki, C. Moulin, and N. Mihalopoulos, Aerosol sources and their contribution to the chemical composition of aerosols in the Eastern Mediterranean Sea during summertime, 2003.

J. Sciare, K. Oikonomou1, O. Favez1, E. Liakakou, Z. Markaki, H. Cachier, and N. Mihalopoulos, Long-term measurements of carbonaceous aerosols in the Eastern Mediterranean: evidence of long-range transport of biomass burning

J.-F. Vinuesa and S. Galmarini, Characterization of the 222Rn family turbulent transport in the convective atmospheric boundary layer, 2007

J.-F. Vinuesa, S. Basu, and S. Galmarin, The diurnal evolution of 222Rn and its progeny in the atmospheric boundary layer during the Wangara experiment, 2006

Jiyoung Kim, Soon-Chang Yoon, Anne Jefferson, Wlodek Zahorowski, Chang-Hee Kang, Air mass characterization and source region analysis for the Gosan super-site, Korea, during the ACE-Asia 2001field campaign, 2005.

John E. Pearson and Harry Moses, Atmospheric Variation with Height and time. Argonne national Laboratory, 1965.

K. Wattananikorn, M. Kanaree and S. Wiboolsake, Soil gas Radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement, 1998.

K. Zhang, H. Wan, M. Zhang, and B.Wang, Evaluation of the atmospheric transport in a GCM using radon measurements: sensitivity to cumulus convection parameterization, 2008.

Karl K. Turekian, Y. Nozaki, and Larry K. Benniger, Geochemistry of atmospheric radon and products, 1977.

Kaushik Majumdar, A study of fluctuation in radon concentration behaviour as an earthquake precursor, 2004

L. Sesana, L.Barbieri, U. Facchini and G. Marcazzan, ^{222}Rn as a tracer of atmospheric Motions: A study in Milan, 1998.

L. Zhang et al., Atmospheric radon levels in Beijing, China, 2004.

Lynette B. Robertson, David S. Stevenson and Franz Conen, Test of a northwards-decreasing ^{222}Rn source term by comparison of modelled and observed atmospheric ^{222}Rn concentrations, 2004.

Mohan L. Cupta, Anne R. Douglass, S. Randolph Kawa, Steven Pawsan, Use of radon for evaluation of atmospheric transport models: sensitivity to emissions, 2004.

Nikolaos Mihalopoulos, Long – range transport of pollutants above the eastern Mediterranean: Implications for air quality and regional climate, 2007.

P. Martin, S. Tims, B. Ryan, A. Bollhöfer, A radon and meteorological measurement network for the Alligator RiversRegion, Australia, 2003.

Piero Di Carlo, Giovanni Pitari, Natalia De Luca, Domenico Battisti, Observations of surface radon in Central Italy, 2008

R. Randall Schumann and Linda C.S. Gundersen, Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient, 1996.

S. E. Gryning, the height of the atmospheric boundary layer during unstable conditions, 2005.

S. Whittlestone and E. Robinson and S. Ryan, Radon at the Mauna Loa Observatory transport from distant continents, 1991.

S. Whittlestone, Radon measurements as an aid to the interpretation of atmospheric montiyoring,1985.

Stanley S. Johnson, Natural radiation, Virginia minerals, 1991.

Tao Wangb, Wlodek Zahorowski, Receptor modelling using Positive Matrix Factorisation, back trajectories and Radon-222, 2007

Ta-Yung Li, Diurnal variations of radon and meteorological variables near the ground, 1974.

Κουβαράκης Γιώργος. Όζον και αιωρούμενα σωματίδια στην ανατολική Μεσόγειο, 2002.

W. Zahorowski, S.D. Chambers, A. Henderson-Sellers Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies, 2003.

Wen – Jie Zhang et.al. Characteristics and seasonal variation of $PM_{2,5}$, PM_{10} TSP aerosol in Beijing., 2006.

William W. Nazaroff, Radon Transport from Soil to Air, 1992.

Wlodek Zahorowski, Scott Chambers, Tao wang, Chang-Hee Kang, Itsushi Uno, Steven Poon, Sung-Nam Oh, Sylvester Werczynski, Jiyoung Kim and Ann Henderson – Sellers, Radon in boundary layer and free tropospheric continental outflow events ai three ACE- Asia sites, 2004.

Yves j. Balkanski and Daniel J. Jacob, Transport of continental air to the subantarctic Indian Ocean, 1989.

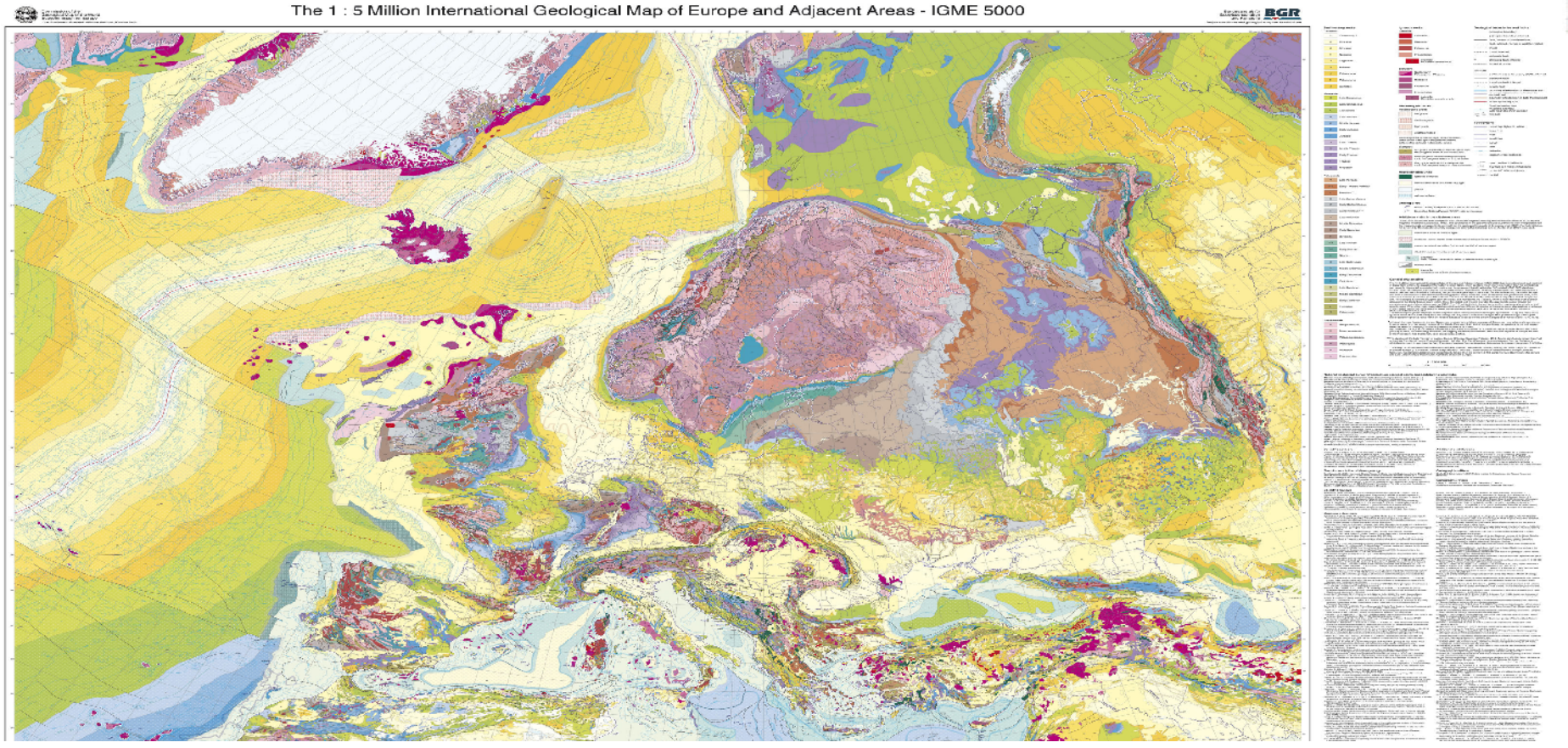
Αγγελική Καρανάσιου, Μελέτη μεταλλικών ιχνηθετών για την εκτίμηση των πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης, 2007.

Γεώργιος Κ. Σιάρδος, Μέθοδοι πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης , Με την επίλυση ασκήσεων μέσω του στατιστικού προγράμματος SPSS.

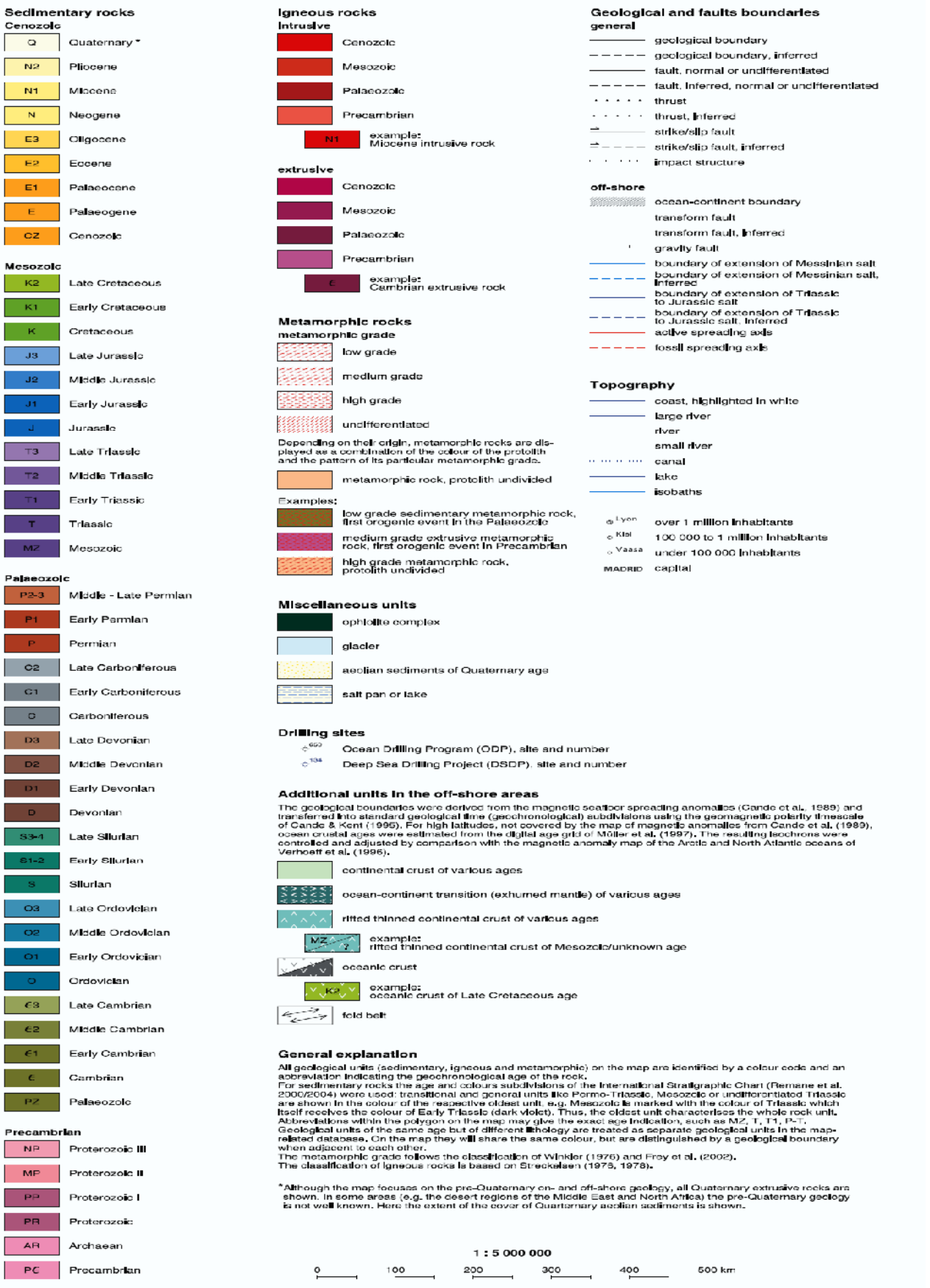
Δημήτρης Ζιακόπουλος, Καιρός. Ο γιος της γης και του Ηλίου. 2008

Ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας, Ραδόνιο, 2005.

Παράρτημα Ι: Διεθνής γεωλογικός χάρτης της Ευρώπης.



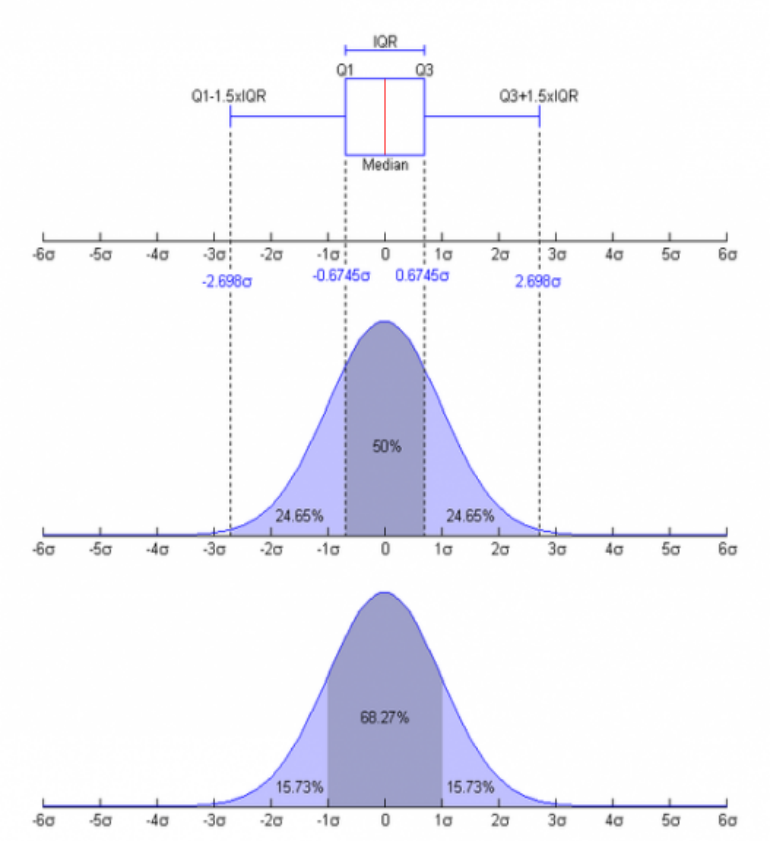
Εικόνα 89. Διεθνής γεωλογικός χάρτης της Ευρώπης και παρακείμενων περιοχών. Κλίμακα 1:5 Εκατομμύρια. (CCGM CGMW Commission of the Geological map of the World, Sub commission for Europe).



Εικόνα 90. Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη. (CCGM CGMW Commission of the Geological map of the World, Sub commission for Europe)

Παράρτημά ΙΙ: Ανάλυση των Εκατοστημόριων.

Το πλήθος των μετρήσεων μιας μεταβλητής μπορεί να περιέχει δείγματα που έχουν το ίδιο μέτρο κεντρικής τάσης αλλά κατανέμονται περισσότερο ή λιγότερο γύρω από το κέντρο. Στην στατιστική υπάρχουν διάφορα μέτρα με τα οποία μπορούμε να διερευνήσουμε την μεταβλητότητα μιας παραμέτρου. Τα εκατοστημόρια είναι ένας μέσο που προσφέρει η στατιστική για να περιγράψουμε ένα δείγμα μετρήσεων. Σαν εκατοστημόριο ορίζουμε την τιμή για μία μεταβλητή όπου ένα συγκεκριμένο ποσοστό των παρατηρήσεων είναι μικρότερο από αυτή την τιμή. Τα εκατοστημόρια χρησιμοποιούνται συχνά στην περιγραφική στατιστική. Η διάμεσος (median) είναι το 50 εκατοστημόριο. Το 25 εκατοστημόριο είναι το πρώτο η κατώτερο τεταρτημόριο (first or lower quartile) Q1 και το 75 εκατοστημόριο, το τρίτο ή ανώτερο τεταρτημόριο (third or upper quartile) Q3. Η διαφορά μεταξύ πρώτου και τρίτου τεταρτημόριου ορίζεται ως ενδοτεταρτομοριακό εύρος. Σχηματική απεικόνιση της καμπύλης κανονικής κατανομής και των εκατοστημορίων φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 91. Συσχέτιση καμπύλης κανονική κατανομής με τα εκατοστημόρια (Πηγή: http://rchsbowman.wordpress.com/2009/09/11/statistics-notes-measures-of-positions-quartiles-box-and-whisker-plot/).

Παράρτημα ΙΙΙ: Γενικές πυρηνικές ιδιότητες.

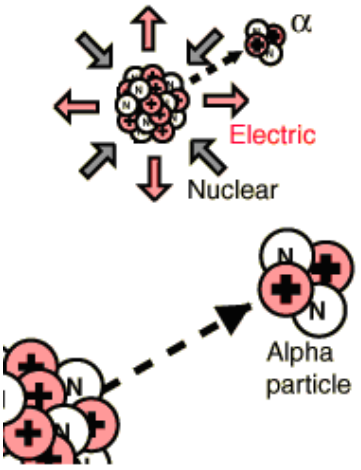
Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την ραδιενεργή διάσπαση προκύπτει από τις διαφορές στις πραγματικές μάζες των ατόμων του προγόνου και του απογόνου, προσδιοριζόμενη από την γνωστή εξίσωση του Einstein, $E = m \cdot c^2$. Σε αυτή την εξίσωση, το E είναι ή ενέργεια, το m η μάζα, και το c η ταχύτητα του φωτός.

Είναι γενικός κανόνας της φύσης ότι το σύστημα θα κινείται προς καταστάσεις χαμηλότερης ενέργειας ή προς την πιο πιθανή σταθερή κατάσταση, Τα φορτία προσελκύουν το ένα το άλλο δημιουργώντας την «πτώση» σε ένα τροχιακό κοντινότερα στο πυρήνα. Με την ίδια έννοια, αν ένας πυρήνας μπορεί να κινηθεί σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας (μια κατάσταση όπου τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι πιο δυνατά δεμένα με τον πυρήνα) εκπέμποντας ραδιενέργεια , θα το κάνει, Ένας τέτοιος πυρήνας είναι ραδιενεργός ή ασταθής. Σταθεροί πυρήνες είναι ανίκανοι να χάσουν ενέργεια εκπέμποντας ραδιενέργεια.

Γενικά, κάποιος μπορεί να αναμένει ένας πυρήνας να είναι ικανός να εκπέμπει όλους τους τύπους και συνδυασμούς ραδιενέργειας. Όμως επειδή το σύστημα τείνει να αναζητά την σταθερότητα και εξαιτίας της φύσης των πυρηνικών δυνάμεων, η πιο κατάλληλη (ή περισσότερο σταθερή) ραδιενέργεια που εκπέμπεται είναι οι πυρήνες ηλίου (δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια), που ονομάζεται εκπομπή άλφα, ένα ηλεκτρόνιο που ονομάζεται εκπομπή βήτα, και μια εκπομπή υψηλές ενεργείας ακτίνων Χ που αποκαλείται εκπομπή γάμμα.

Αναλυτικότερα.

1. **Εκπομπή άλφα (εν συντομία α):** αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, το σωματίδιο άλφα είναι η εκπομπή ενός πυρήνα του στοιχείου ηλίου. Εξαιτίας της μεγάλης μάζας του (περισσότερο από 7000 φορές την μάζα ενός σωματιδίου βήτα) και του φορτίου του, έχει πολύ μικρή ακτίνα.

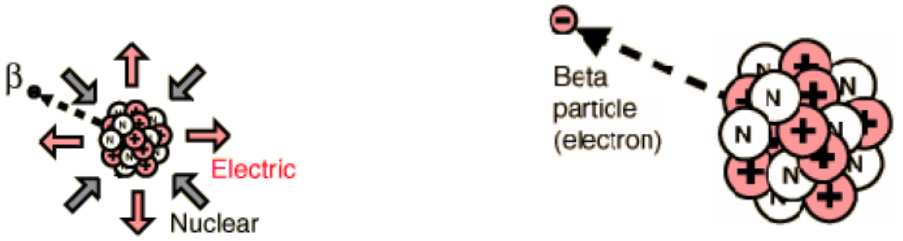


Εικόνα 92. Εκπομπή άλφα.

2. **Εκπομπή βήτα (εν συντομία β ή β^-):** η εκπομπή ενός ηλεκτρονίου υψηλής ταχύτητας από έναν ασταθή πυρήνα. Η εκπομπή βήτα ισοδυναμεί με τη μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο.

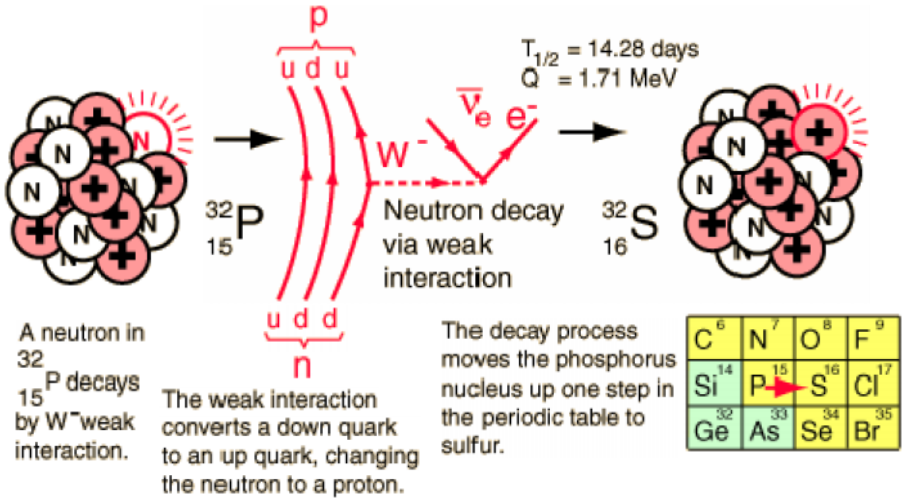
$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e $$

Η εκπομπή ενός ποζιτρονίου ενός σωματιδίου που έχει την ίδια μάζα με το ηλεκτρόνιο φέρει όμως θετικό φορτίο και όχι αρνητικό επίσης αποκαλείται εκπομπή βήτα.



Εικόνα 93. Εκπομπή βήτα.

Η μετατροπή ενός νετρονίου σε ένα πρωτόνιο μέσω ασθενής αλληλεπίδρασης (weak interaction) μπορεί να διευκρινιστεί μέσω ενός διαγράμματος Feynman.

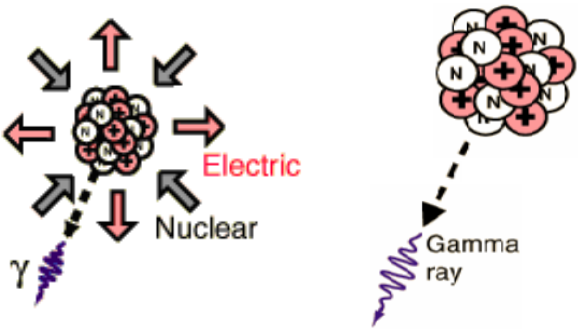


Εικόνα 94. Διάγραμμα Feynman.

3. **Εκπομπή γάμμα (εν συντομία γ):** εκπομπή από έναν διεγερμένο πυρήνα ενός φωτονίου γάμμα, το οποίο αντιστοιχεί σε ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου 10^{-12} m, Σε πολλές περιπτώσεις, η ραδιενεργός διάσπαση καταλήγει σε έναν παράγωγο πυρήνα, ο οποίος είναι σε διεγερμένη κατάσταση είναι ασταθής και μεταπίπτει σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, Για πυρήνες, η ακτινοβολία αυτή είναι στην περιοχή των ακτίνων γάμμα του φάσματος,

Συνήθως η εκπομπή γάμμα ξεκινά πολύ γρήγορα μετά από την ραδιενεργό διάσπαση. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, μια διεγερμένη κατάσταση έχει σημαντική διάρκεια ζωής πριν εκπέμψει ένα φωτόνιο γάμμα. Μετασταθής πυρήνας είναι ένας πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση με διάρκεια ζωής

τουλάχιστον ένα νανοδευτερόλεπτο (10^{-9}s). Με την πάροδο του χρόνου, ο μετασταθής πυρήνας διασπάται υπό εκπομπή γάμμα.



Εικόνα 95. Εκπομπή γάμμα.

4. Άλλοι τύποι ραδιενεργούς διάσπασης. Υπάρχουν και άλλοι τύποι ραδιενεργών διαδικασιών. Αυτοί είναι: η σύλληψη ηλεκτρονίου, η εκπομπή ποζιτρονίου (αναφέρθηκε παραπάνω σαν την θετική εκπομπή βήτα) και η αυθόρμητη σχάση.
Σύλληψη ηλεκτρονίου (εν συντομία EC): η διάσπαση ενός ασταθούς πυρήνα ατόμου με σύλληψη ενός ηλεκτρονίου από κάποιο εσωτερικό τροχιακό ατόμου, Στην πραγματικότητα ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο, όπως στην εκπομπή ποζιτρονίου.

$$ {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n $$

Ο παράγωγος πυρήνας έχει ατομικό αριθμό κατά μια μονάδα μικρότερο από αυτόν του αρχικού πυρήνα. Ο μαζικός αριθμός παραμένει ο ίδιος. Όταν ένα ηλεκτρόνιο από άλλο τροχιακό συμπληρώνει το κενό που δημιουργήθηκε σε τροχιακό εσωτερικού φλοιού σύλληψης ηλεκτρονίου, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ακτίνων Χ.
Αυθόρμητη σχάση: η αυθόρμητη διάσπαση ενός ασταθούς πυρήνα, κατά την οποία ένας βαρύς πυρήνας μαζικού αριθμού μεγαλύτερου του 89 διαιρείται σε ελαφρύτερους πυρήνες και ελευθερώνεται ενέργεια.

Η διαδικασία της άλφα και βήτα ραδιενεργούς διάσπασης οδηγεί στον σχηματισμό ενός διαφορετικού στοιχείου, κάτι που η εκπομπή γάμμα δεν κάνει. Το ισότοπο που αποσυντίθεται αποκαλείται πρόγονος ενώ το ισότοπο που δημιουργείται, αν είναι διαφορετικό στοιχείο αποκαλείται απόγονος. Για παράδειγμα το ^{222}Rn διασπάται στον απόγονο ^{218}Po εκπέμποντας ένα σωματίδιο άλφα.
Αυτή η αντίδραση γράφεται:

$$ {}^{222}Rn \rightarrow {}^{218}Po + {}^{4}He $$

Ένα παράδειγμα ραδιενεργούς διάσπασης βήτα είναι:

$$ {}^{228}Ra \rightarrow {}^{228}Ac + beta\ \ particle \}$$

Παρατηρούμε ότι στην ραδιενεργή εκπομπή βήτα ο αριθμός ατομικής μάζας δεν αλλάζει ενώ το στοιχείο αλλάζει.