

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Επικ. Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΑ
ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ
ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

**DIFFUSIVE SAMPLERS CALIBRATION
FOR AMBIENT RADON CONCENTRATION
MEASUREMENTS AT VARIOUS
HUMIDITY LEVELS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΠΑΣΧΑΛΙΔΗ ΙΩΑΝΝΗ**

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Λέκτορας Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|-------------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | iv |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | vii |
| ABSTRACT | x |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή | |
| 1.1 Γενικά..... | 1-1 |
| 1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση | 1-1 |
| 1.3 Επικινδυνότητα Ραδονίου | 1-2 |
| 1.4 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας..... | 1-4 |
| Διαγράμματα του 1^{ου} Κεφαλαίου | 1-6 |
| Πίνακες του 1^{ου} Κεφαλαίου | 1-7 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εναλλακτικά προσροφητικά υλικά για το Ραδόνιο και ανταγωνιστικές βραχυπρόθεσμες παθητικές τεχνικές | |
| 2.1 Εισαγωγή | 2-1 |
| 2.2 Ο συνθετικός ζεόλιθος ως προσροφητικό υλικό..... | 2-2 |
| 2.2.1 Γενικά..... | 2-2 |
| 2.2.2 Οι συνθετικοί ζεόλιθοι της Merck..... | 2-4 |
| 2.2.3 Επιλογή ζεόλιθου | 2-5 |
| 2.2.4 Τεχνική δοκιμή συνθετικού ζεόλιθου..... | 2-6 |
| 2.3 Το silica gel ως προσροφητικό υλικό | 2-14 |
| 2.3.1 Γενικά..... | 2-14 |
| 2.3.2 Τα silica gel της Merck | 2-15 |
| 2.3.3 Διαθέσιμα silica gel για δοκιμές | 2-16 |
| 2.3.4 Τεχνική δοκιμή των silica gel | 2-17 |
| 2.4 Παρουσίαση της παθητικής τεχνικής E-PERM™ | 2-18 |
| 2.4.1 Γενικά για τους ηλεκτρίτες..... | 2-18 |
| 2.4.2 Οι ηλεκτρίτες ως ανιχνευτές Ραδονίου | 2-20 |
| 2.4.3 Αβεβαιότητα και κατώτερο όριο ανίχνευσης της τεχνικής E-PERM™ | 2-21 |
| 2.5 Ποιοτική σύγκριση κυριότερων βραχυπρόθεσμων τεχνικών..... | 2-22 |
| 2.6 Παρατηρήσεις - σχόλια..... | 2-23 |
| Διαγράμματα του 2^{ου} Κεφαλαίου | 2-26 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βελτιστοποίηση πρωτοκόλλου βαθμονόμησης και οργάνωση πειραμάτων

| | |
|---|------|
| 3.1 Εισαγωγή | 3-1 |
| 3.2 Έλεγχος καταλληλότητας δοχείου βαθμονόμησης | 3-1 |
| 3.3 Αποτελεσματικότερος έλεγχος βαθμού απόδοσης ανιχνευτή | 3-5 |
| 3.3.1 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με ενεργό άνθρακα | 3-5 |
| 3.3.2 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με συνθετικό ζεόλιθο..... | 3-6 |
| 3.3.3 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με silica gel (silica gel blue)..... | 3-7 |
| 3.3.4 Λογιστικά φύλλα υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή | 3-8 |
| 3.4 Βέλτιστη οργάνωση των πειραμάτων έκθεσης..... | 3-10 |
| 3.5 Πειραματικά λογιστικά φύλλα | 3-13 |
| 3.6 Παρατηρήσεις - σχόλια..... | 3-21 |
| Διαγράμματα του 3 ^{ου} Κεφαλαίου | 3-23 |
| Πίνακες του 3 ^{ου} Κεφαλαίου..... | 3-37 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρύθμιση υγρασία θαλάμου έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου

| | |
|--|------|
| 4.1 Εισαγωγή | 4-1 |
| 4.2 Υγρασία στον αέρα του περιβάλλοντος..... | 4-1 |
| 4.3 Μέτρηση της υγρασίας στον αέρα | 4-3 |
| 4.4 Διαθέσιμα υγρόμετρα στο ΕΠΤ - ΕΜΠ | 4-5 |
| 4.5 Ρύθμιση της υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης..... | 4-8 |
| 4.5.1 Γενικά | 4-8 |
| 4.5.2 Ρύθμιση "υψηλής" υγρασίας | 4-9 |
| 4.5.3 Ρύθμιση "μεσαίας" υγρασίας..... | 4-11 |
| 4.5.4 Ρύθμιση "χαμηλής" υγρασίας..... | 4-11 |
| 4.6 Παρατηρήσεις σχόλια..... | 4-15 |
| Διαγράμματα του 4 ^{ου} Κεφαλαίου | 4-16 |
| Πίνακες του 4 ^{ου} Κεφαλαίου..... | 4-38 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

| | |
|--|-----|
| 5.1 Εισαγωγή | 5-1 |
| 5.2 Πειραματική διαδικασία έκθεσης..... | 5-1 |
| 5.2.1 Μεταλλικά δοχεία με προσροφητικά υλικά – αναγέννηση – ζύγιση | 5-1 |

| | |
|--|------|
| 5.2.2 Μηδενισμός πηγής Ραδονίου..... | 5-2 |
| 5.2.3 Παραγωγή Ραδονίου..... | 5-2 |
| 5.2.4 Μετάγχιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "υψηλής" υγρασίας..... | 5-3 |
| 5.2.5 Μετάγχιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "μεσαίας" υγρασίας..... | 5-4 |
| 5.2.6 Μετάγχιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "χαμηλής" υγρασίας..... | 5-5 |
| 5.2.7 Εκθεση σε συγκέντρωση Ραδονίου..... | 5-6 |
| 5.2.8 Προσδιορισμός ρυθμού καταστροφής Ραδονίου (λ')..... | 5-7 |
| 5.3 Διαδικασία μέτρησης..... | 5-10 |
| 5.3.1 Γενικά..... | 5-10 |
| 5.3.2 Μέτρηση υποστρώματος..... | 5-11 |
| 5.3.3 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, βαθμός απόδοσης και MDA..... | 5-12 |
| 5.3.4 Μέτρηση εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων με προσροφητικά υλικά..... | 5-14 |
| 5.4 Πειραματικά αποτελέσματα..... | 5-14 |
| 5.4.1 Πειραματικά λογιστικά φύλλα "Α1"..... | 5-14 |
| 5.4.2 Πειραματικά λογιστικά φύλλα "Α2"..... | 5-15 |
| 5.4.3 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων και συμπεράσματα..... | 5-15 |
| 5.5 Παρατηρήσεις - σχόλια..... | 5-19 |
| Διαγράμματα του 5 ^{ου} Κεφαλαίου..... | 5-21 |
| Πίνακες του 5 ^{ου} Κεφαλαίου..... | 5-37 |
| ΕΠΙΛΟΓΟΣ..... | E-1 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | B-1 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "Α"..... | Π-1 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "Β"..... | Π-2 |

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το Ραδόνιο-222 είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Το Ραδόνιο-222 παράγεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 και ονομάζεται συνήθως απλά Ραδόνιο. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας α σωματίδια. Δεδομένου ότι το Ουράνιο-238 είναι στερεό μέταλλο που συναντάται στο έδαφος, γίνεται αντιληπτό, ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο εδαφικό αέριο. Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών και στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα. Στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα η συγκέντρωση μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$. Στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων η συγκέντρωση του υπόψιν αερίου είναι πολύ πιο αυξημένη διότι όπως είναι φυσικό ο ρυθμός ανανέωσης είναι χαμηλός και το Ραδόνιο εισέρχεται συνεχώς από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλια των χώρων με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Από ραδιενεργή άποψη το Ραδόνιο, διασπώμενο εκπέμπει α σωματίδια σχετικά μεγάλης ενέργειας - περί τα 5.5 MeV και ταυτόχρονα παράγει επίσης ραδιενεργά στερεά θυγατρικά που διασπώνται και αυτά εκπέμποντας α σωματίδια. Αν υπάρχει Ραδόνιο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα τότε τα εκπεμπόμενα α σωματίδια από το εισπνεόμενο Ραδόνιο και τα θυγατρικά του, δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στον εσωτερικό μαλακό ιστό του πνεύμονα, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Δεδομένης της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του για τον άνθρωπο, επιβάλλεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους κατ' αρχήν των κατοικιών και κατά δεύτερο λόγο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων στα οποία συναθροίζονται μαζικά άνθρωποι, είτε για εργασία είτε για άλλους λόγους (π.χ. εκπαίδευση, νοσηλεία κ.α.). Απαιτούνται για αυτό το σκοπό: τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων της συγκέντρωσης του Ραδονίου που να πληροφορούν για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το διάστημα 1965 - 1980, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Οι πιο ακριβείς μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι ήταν οι ενεργητικές, όπως π.χ. οι ανοιχτοί θάλαμοι ιονισμού. Οι ενεργητικές μέθοδοι δεν έχουν αποκλειστικά πεδία εφαρμογής και δίνουν τη συγκέντρωση του Ραδονίου σχεδόν σε

πραγματικό χρόνο δηλ. συνήθως ανά 10 min αλλά απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, πηγές ενέργειας, διαρκή ανθρώπινη επιτήρηση, τακτική συντήρηση και κατά συνέπεια έχουν υψηλότερο κόστος. Το κόστος αυτό κάνει απαγορευτική την εφαρμογή τους σε επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων και γενικά σε έρευνες μεγάλης κλίμακας. Στην πράξη, προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος από το Ραδόνιο δεν χρειάζεται παρά ο προσδιορισμός της μέσης συγκέντρωσής του για διαστήματα ημερών, εβδομάδων ή μηνών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν υπάρχουν παθητικές - ολοκληρωτικές μέθοδοι, οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των πολύπλοκων και χρηματοβόρων ενεργητικών μεθόδων. Μία βραχυ-μεσοπρόθεσμη παθητική – ολοκληρωτική τεχνική, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική μέτρησης με τη χρήση δοχείων με προσροφητικά υλικά. Τέτοια προσροφητικά υλικά μπορεί να είναι ο ενεργός άνθρακας, ο συνθετικός ζεόλιθος με μικρό μέγεθος πόρων ή ακόμα και το silica gel. Σε ό,τι αφορά τον ενεργό άνθρακα, το υλικό αυτό έχει διερευνηθεί διεξοδικά από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα. Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, η διερεύνηση του ενεργού άνθρακα ξεκίνησε το 2007 με την Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007). Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας η διερεύνηση αυτή συνεχίζεται παράλληλα με την εξέταση και των άλλων προσροφητικών υλικών. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στη διερεύνηση της απόδοσης αυτής της τεχνικής μέτρησης συγκέντρωσης Ραδονίου, σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης και την σχετική υγρασία του περιβάλλοντος έκθεσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για τη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικά για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Επίκουρο Καθηγητή κ. Ε.Π. Χίνη για τη διάθεση αναγκαίων μικροποσών για δαπάνες προκειμένου για την πραγματοποίηση των αναγκαίων πειραμάτων και το προσωπικό του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για τη τεχνική βοήθεια και την συμπαράστασή τους, όπου χρειάστηκε. Οι ευχαριστίες επεκτείνονται και στον Υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα κ. Κ. Καρφόπουλο, συνάδελφο Μηχανολόγο Μηχανικό για την πραγματοποίηση ορισμένων αναγκαίων –γ φασματοσκοπικών αναλύσεων καθώς και στον κ. Ε. Γεωργιάδη, ΙΔΑΧ, Προϊστάμενο

Τμήματος Δ': "Γραμματεία Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης", της Γραμματείας ΕΔΕΙΑ ΕΜΠ, για την παροχή μεταλλικών δοχείων κατάλληλων για τα αναγκαία πειράματα. Ειδικές ευχαριστίες οφείλονται επιπλέον, στον Δρ. Ανδρέα Γεωργίου, ο οποίος είχε την ευγενική καλοσύνη να συνδράμει την υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, παρέχοντας επιστημονικά άρθρα, πρωτότυπη και δυσεύρετη βιβλιογραφία, εκθέσεις από αποτελέσματα πειραμάτων καθώς και αποσπάσματα της δικής του πειραματικής εργασίας πάνω στα ερευνητικά θέματα τα οποία διαπραγματεύονται εδώ. Πρέπει να τονισθεί, ότι χωρίς τη συμβολή του Δρ. Γεωργίου, δεν θα ήταν δυνατή η εύκολη υλοποίηση σημαντικού τμήματος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία του Ι. Πασχαλίδη

Μία από τις δύο κυριότερες παθητικές βραχυ-μεσοπρόθεσμες μέθοδους για τη μέτρηση συγκέντρωσης Ραδονίου στην ατμόσφαιρα, η οποία χρησιμοποιείται με επιτυχία από τα τέλη της δεκαετίας του 80 είναι η μέθοδος του ενεργού άνθρακα. Η μέθοδος διερευνήθηκε πειραματικά για πρώτη φορά με επάρκεια από τον George (1984). Η δεύτερη κύρια μέθοδος είναι αυτή που βασίζεται στη χρήση ηλεκτρίτων και είναι γνωστή με το όνομα "E-PERMTM". Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε από τον Kotrappa (1988). Και οι δύο μέθοδοι αποτελούν απλές, χαμηλού κόστους εφαρμογές μέτρησης του Ραδονίου κυρίως σε εσωτερικούς χώρους κατάλληλες για ένα αρκετά μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων Ραδονίου. Ο ενεργός άνθρακας (τοποθετημένος συνήθως σε ανοιχτά μεταλλικά δοχεία) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου για περίοδο λίγων (συνήθως 3-7) ημερών. Οι ανιχνευτές τεχνολογίας E-PERMTM μπορεί να λειτουργήσουν και πιο μακροπρόθεσμα για την εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου για περίοδο βδομάδων ή ακόμα και μηνών. Οι δύο μέθοδοι εξαιτίας του χαμηλού κόστους τους και της ικανοποιητικής τους ακρίβειας έχουν επιτυχημένη πρακτική εφαρμογή για μεγάλης κλίμακας έρευνες, όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται περίπλοκες και ακριβές ενεργητικές τεχνικές συνεχών μετρήσεων υψηλής ακρίβειας. Δεδομένης της επιτυχίας των παθητικών ανιχνευτών Ραδονίου με ενεργό άνθρακα, από όσο φαίνεται να είναι γνωστό από τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία, η έρευνα για εναλλακτικά του ενεργού άνθρακα προσροφητικά υλικά που πιθανόν να είναι κατάλληλα για ανιχνευτές Ραδονίου είναι περιορισμένη. Τέτοια εναλλακτικά προσροφητικά υλικά θα μπορούσαν να είναι αυτά που -όπως και ο ενεργός άνθρακας- χρησιμοποιούνται ως αφυγραντές αερίων εδώ εννοούνται κυρίως οι ζεόλιθοι και τα silica gel. Την υπόθεση αυτή στηρίζουν και πειραματικές ενδείξεις, πως ορισμένοι τύποι silica gel προσροφούν Ραδόνιο. Βεβαίως, είναι κοινά αποδεκτό ότι η ικανότητα προσρόφησης Ραδονίου των silica gel είναι περιορισμένη σε σχέση με την ικανότητα τους για προσρόφηση υδρατμών. Για αυτόν ακριβώς το λόγο τα silica gel χρησιμοποιούνται σήμερα ως αφυγραντές στα δοχεία με ενεργό άνθρακα για την μείωση

της σχετικής υγρασία στη γειτονία των κόκκων του ενεργού άνθρακα, επιτρέποντας έτσι την απρόσκοπτη προσρόφηση του Ραδονίου από τους κόκκους. Στην περίπτωση των ζεόλιθων έχει ήδη εκτιμηθεί από προηγούμενες μελέτες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ότι οι φυσικοί ζεόλιθοι παρουσιάζουν μια υποσχόμενη ικανότητα προσρόφησης Ραδονίου (Karangelos, 2003). Ωστόσο λόγω των τυχαίων χαρακτηριστικών του εξορυσσόμενου φυσικού ζεόλιθου και ειδικότερα λόγω του τυχαίου πορώδους, δεν διαπιστώνεται επαναληψιμότητα στις ιδιότητες προσρόφησης Ραδονίου ακόμα και για ζεόλιθους οι οποίοι εξορύσσονται από το ίδιο ορυχείο. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι όμως δεν παρεκκλίνουν από τις χαρακτηριστικές προδιαγραφές τους και συνεπώς αναμένεται να συμπεριφέρονται με επαναληψιμότητα στα προσροφητικά τους χαρακτηριστικά. Στόχος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ήταν να διερευνηθεί πειραματικά η δυνατότητα συγκρότησης ανιχνευτών Ραδονίου με προσροφητικά υλικά συνθετικό ζεόλιθο ή silica gel, που να λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα. Για το σκοπό αυτό συγκρίθηκαν οι πειραματικά εκτιμώμενοι συντελεστές βαθμονόμησης για αυτά τα υλικά με τον αντίστοιχο για τον ενεργό άνθρακα. Το ίδιο έγινε και για τα πειραματικά εκτιμώμενα κατώτερα όρια ανίχνευσης. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν συνθετικός ζεόλιθος με μέγεθος πόρων 0.5 nm, silica gel blue και χρωματογραφικό silica gel ώστε να καθοριστεί εάν μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά ως ανιχνευτές Ραδονίου. Τα πειράματα έκθεσης έγιναν εντός θαλάμου Ραδονίου, υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για ανιχνευτές ανοιχτά μεταλλικά δοχεία που περιείχαν 250 g συνθετικού ζεόλιθου ή 270 g silica gel blue ή ή 270 g χρωματογραφικού silica gel. Η ποσότητα του Ραδονίου που δεσμεύεται στον όγκο του κάθε προσροφητικού υλικού καθορίστηκε μετρώντας την γ ακτινοβολία που προέρχεται από τις διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου. Το κατώτερο όριο ανίχνευσης υπολογίστηκε σε περίπου 35 Bqm^{-3} για τον συνθετικό ζεόλιθο και σε περίπου 400 Bqm^{-3} για το silica gel blue για έκθεση 72 h και σχετικές υγρασίες κοντά στο 20%. Τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα έδειξαν ότι τέτοιοι ανιχνευτές από αυτά τα δύο υλικά μπορούν να αποτελέσουν μια απλή και χαμηλού κόστους διάταξη παθητικής μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Είναι φανερό ότι με βάση τα παραπάνω, για το silica gel blue πρέπει να σημειωθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής γενικά σε ξηρό περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση Ραδονίου. Αντίθετα, ο συνθετικός ζεόλιθος φαίνεται ότι αποδίδει ως ανιχνευτής με τρόπο παρόμοιο με εκείνον του ενεργού άνθρακα. Η πορεία των πειραμάτων απέδειξε

ότι το χρωματογραφικό silica gel, είναι μάλλον ακατάλληλο για να χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής Ραδονίου, καθόσον η προσροφητικότητα σε αυτό το αέριο είναι πάρα πολύ χαμηλή.

ABSTRACT

DIFFUSIVE SAMPLERS CALIBRATION FOR AMBIENT RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS AT VARIOUS HUMIDITY LEVELS

Diploma Dissertation of J. Paschalidis

The main short-term passive integrating methods for measuring radon in air, that have been in use since the late 80's are the active carbon (or activated charcoal) canisters – experimentally documented by George (1984) and the E-PERMTM electrets – designed for practical application by Kotrappa (1988). These two methods introduced simple cost-effective detectors for the indoors-sampling environment, suitable for a wide range of radon concentration levels. Active carbon canisters can provide measurements of average concentrations of radon over periods of some days, while, it is worthy to mention, E-PERMTM detectors can measure also for weeks or several months. Both methods were efficiently applied in practice, in place of complex and expensive monitors, for large-scale surveys, where passive integration was preferred over high accuracy continuous measurements. To our best knowledge, following the success of the various types of the activated carbon canisters as passive integrating radon detectors, limited research was performed on the radon adsorbing potential of alternative types of adsorbing materials. However, on the basis of measurements regarding water adsorption capacity, such materials may be the zeolites and the silica gels. There exist sporadic indications that some silica gels are radon adsorbers, but it has been widely accepted that their radon adsorption capacity was far less their water one. Therefore, silica gels were adequately used as desiccants in active carbon canisters so that to minimize air humidity in the neighborhood of carbon grain, and subsequently eliminate radon adsorption counter fighting water. For the case of zeolites, it has been preliminary estimated in previous research conducted in our Laboratory, that natural zeolites present promising radon adsorbing properties (Karangelos, 2003). Nevertheless, due to the random nature of natural ores composition and pore size distribution, consistent radon adsorbing properties of natural zeolites could not be guaranteed at all, even for material mined in the very same location. Synthetic zeolites on the other hand do not deviate from prescribed specifications and are expected to perform consistently as adsorbers. In this dissertation

the possibility of using synthetic zeolite for the construction of an efficient radon detector, similar to the active carbon canister, will be illustrated. Experimental results on the calibration factor and the lower limit of detection are going to be compared with respective results for active carbon. During the process, blue silica gel and silica gel for chromatography has been tested in the same manner as well, so as to provide data on some of their radon adsorption properties and their possible use in radon detection. For the experimental procedure synthetic zeolite of 0.5 nm pore size (5A), blue silica gel and chromatography silica gel were tested in comparison to active carbon, in order to determine their capability to be used as radon detectors. Exposure tests were conducted in a radon chamber under controlled conditions of temperature and relative humidity with open face metal canisters containing 250 g of synthetic zeolite or 270 g of blue silica gel or 270 g of chromatography silica gel. The amount of radon adsorbed in such a detector is determined by counting the gamma rays from the radon decay products. Following the experimental procedure the lower limit of detection (LLD) is estimated to $\sim 35 \text{ Bqm}^{-3}$ for the synthetic zeolite and to $\sim 400 \text{ Bqm}^{-3}$ for the blue silica gel, for an exposure of 72 h at a relative humidity of about 20%. These results indicate that simple inexpensive and maintenance-free passive devices based on these two materials can measure radon conveniently and adequately. However, blue silica gel due to its higher LLD seems to be suitable only for dry environments with quite high radon concentrations. On the other hand, synthetic zeolite seems to behave as a radon detector, in a way very similar to active carbon. In the course of the experimental procedure the chromatography silica gel material was proven inadequate to act as radon detector, since its radon adsorbing capacity seems very low.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το Ραδόνιο (Rn) είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Διακρίνονται τέσσερα γνωστά ισότοπα του Ραδονίου: το ^{218}Rn , το ^{219}Rn , το ^{220}Rn και το ^{222}Rn . Από αυτά στη φύση του πλανήτη μας συναντώνται μόνο τα δύο: το Ραδόνιο-220 (^{220}Rn) και το Ραδόνιο-222 (^{222}Rn). Το Ραδόνιο-220 ονομάζεται συνήθως ΘΟΡΟΝΙΟ (thoron) διότι προέρχεται από τη φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Θορίου-232 (^{232}Th). Το Ραδόνιο-222 που προέρχεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 (^{238}U) ονομάζεται συνήθως απλά ΡΑΔΟΝΙΟ (radon). Στη συνέχεια θα μας απασχολήσει πρακτικά μόνο το Ραδόνιο-222, το οποίο θα ονομάζουμε απλά Ραδόνιο. Σημειώνεται ότι το Ραδόνιο ανακαλύφθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα – αρχές του 20^{ου}. Η ανακάλυψή του χρεώνεται στον βρετανό E. Rutherford (1899) ή κατά άλλους, στον γερμανό F.E. Dorn (1900). Το γεγονός ότι το Ραδόνιο (και φυσικά το Θορόνιο) είναι ευγενή αέρια, οδήγησε στην αρχή την επιστημονική κοινότητα να τα αγνοήσουν –εσφαλμένα- ως παράγοντες κινδύνου για τον άνθρωπο, εξαιτίας της χημικής τους αδράνειας. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας –α σωματίδια.

1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση

Το Ραδόνιο παράγεται από το ^{238}U , με διαδοχικές –α διασπάσεις και –β διασπάσεις, οι οποίες χονδρικά αναπαριστώνται στο το Διάγραμμα 1.1. Σημειώνεται ότι τα ισότοπα σε αυτή τη σειρά των διασπάσεων έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

(α) πλην του Ραδονίου είναι στερεά, (β) ο χρόνος ημιζωής τους είναι γενικά πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του ^{238}U και (γ) αν είναι $i = 1$ το ^{238}U και $i = 7$ το ^{222}Rn , τότε γενικά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.1, $T_{1/2}(i) \gg T_{1/2}(i+1)$.

Αυτές οι ιδιότητες ως γνωστές ιδιότητες της φυσικώς ραδιενεργού σειράς του ^{238}U (Αγγελόπουλος, 1983), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, στον πλανήτη μας, τα διαθέσιμα Bq Ραδονίου είναι όσα και τα Bq του ^{238}U . Με μαθηματικό τρόπο αυτή η παρατήρηση γράφεται ως:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_7 \quad (1.1)$$

ή αλλιώς:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_7 N_7 \quad (1.2)$$

όπου:

λ_i η πιθανότητα διασπάσεως του ισοτόπου i ($i = 1-7$), και

N_i ο αριθμός πυρήνων του ισοτόπου i

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (secular equilibrium).

Δεδομένου ότι το ^{238}U είναι ένας από τους πολυπληθέστερους πυρήνες στη φύση του πλανήτη μας, γίνεται αντιληπτό ότι η διαθέσιμη ραδιενέργεια από το Ραδόνιο είναι ποσοτικά εξαιρετικά σημαντική. Το Ραδόνιο παράγεται εμμέσως από το ^{238}U και αμέσως από το ^{226}Ra , τα οποία, όντας στερεά συναντώνται στο έδαφος. Γίνεται αντιληπτό, ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο ΕΔΑΦΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (soil gas), στο αέριο δηλαδή που γεμίζει τους πόρους της στερεάς ύλης του εδάφους. Είναι προφανές, ότι το εδαφικό αέριο δεν έχει τη σύνθεση του ατμοσφαιρικού αέρα, διότι στο εσωτερικό του εδάφους διαχέονται ή / και παράγονται επίσης εκτός από το Ραδόνιο, και άλλα αέρια, όπως π.χ. οργανικά (μεθάνιο και άλλα καύσιμα αέρια), ή ευγενή (Ηλιον, Αργόν και άλλα). Η συγκέντρωση του Ραδονίου στο εδαφικό αέριο κυμαίνεται από 0.5 kBq m^{-3} έως αρκετά MBq m^{-3} . Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών (το οποίο υπενθυμίζεται, ότι είναι δυνατόν να "παρασύρει" Ραδόνιο από τους πόρους του εδάφους). Ως αντιπροσωπευτική τιμή θεωρείται η συγκέντρωση 10 Bq L^{-1} . Στο νερό της θάλασσας αντίθετα –το οποίο δεν είναι, όπως γίνεται κατανοητό, σε άμεση επαφή με το έδαφος- η συγκέντρωση του Ραδονίου είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη και γενικά μικρότερη από 1 Bq L^{-1} . Στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα, επίσης, η συγκέντρωση του Ραδονίου μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$.

1.3 Επικινδυνότητα Ραδονίου

Το Ραδόνιο εισέρχεται στα κτίρια κυρίως από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλιά τους, με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Ως αποτέλεσμα υψηλές συγκεντρώσεις Ραδονίου παρατηρούνται συνήθως στους υπόγειους ημιυπόγειους και ισόγειους χώρους. Από ραδιενεργή άποψη το Ραδόνιο, διασπώμενο εκπέμπει –α σωματίδια σχετικά μεγάλης ενέργειας - περί τα 5.5 MeV . Αν υπάρχει Ραδόνιο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα τότε αυτό εισπνεόμενο μαζί του οδηγείται στον

ανθρώπινο πνεύμονα, όπου τα εκπεμπόμενα –α σωματίδια δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στους εσωτερικούς μαλακούς ιστούς, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Παρόλαυτά, δεδομένου ότι ο χρόνος ημιζωής του Ραδονίου είναι 3.5 ημέρες ($\approx 5000 \text{ min}$), η πιθανότητα διασπάσεως ενός πυρήνα του, υπολογίζεται εύκολα σε $\ln(2)/(5000 \text{ min}) \approx 1.4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$. Με άλλα λόγια, μόλις 0.014% των υπαρχόντων πυρήνων Ραδονίου μέσα σε ένα χώρο θα διασπασθούν μέσα σε ένα λεπτό της ώρας. Εστω τώρα ότι αυτός ο χώρος είναι ο ανθρώπινος πνεύμονας. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, ο μέσος λευκός άνδρας, θα αναπνεύσει περίπου 0.02 m^3 στη διάρκεια του λεπτού (ICRP, 1975). Το πρακτικό συμπέρασμα αυτού του συλλογισμού είναι, ότι ακόμα και αν ο εισπνεόμενος εσωτερικός αέρας περιέχει σημαντικό αριθμό πυρήνων Ραδονίου, αυτοί εισερχόμενοι στον ανθρώπινο πνεύμονα έχουν πολύ μικρή πιθανότητα να διασπασθούν και επομένως δεν αποτελούν ουσιαστική απειλή για το εσωτερικό του πνεύμονα. Ο πραγματικός κίνδυνος από το Ραδόνιο, δεν οφείλεται επομένως στο Ραδόνιο αυτό καθαυτό, αλλά στους (αναποφεύκτως) παραγόμενους στερεούς θυγατρικούς πυρήνες του. Ο λόγος είναι διότι, αν στον εισπνεόμενο ατμοσφαιρικό αέρα, υπάρχει Ραδόνιο, πολύ σύντομα (το πολύ σε 5 ώρες) θα υπάρχουν θεωρητικά, ίσες ποσότητες ραδιενέργειας από τους στερεούς θυγατρικούς του πυρήνες ^{218}Po και ^{214}Po . Τα θυγατρικά αυτά εισπνεόμενα δεν εκπνέονται στο σύνολό τους, όπως θα συνέβαινε αν ήταν αέρια. Σημαντικότερο μέρος τους παραμένει στο εσωτερικό των πνευμόνων, όπου διασπώνται με μεγάλη πιθανότητα στο εσωτερικό του πνεύμονα, δεδομένου ότι ο μεν πυρήνας ^{218}Po έχει χρόνο ημιζωής 3.05 min (δηλ. πιθανότητα διάσπασης περίπου $20\% \text{ min}^{-1}$ σε αντίθεση με την $0.014\% \text{ min}^{-1}$ του Ραδονίου), και ο πυρήνας ^{214}Po έχει χρόνο ημιζωής 19.9 min (δηλ. πιθανότητα διάσπασης περίπου $3.5\% \text{ min}^{-1}$ σε αντίθεση με την $0.014\% \text{ min}^{-1}$ του Ραδονίου). Τα εκπεμπόμενα –α σωματίδια από τους δύο αυτούς θυγατρικούς πυρήνες του Ραδονίου έχουν ικανή ενέργεια ώστε να τραυματίσουν σημαντικά τον πνεύμονα, αν υπάρχουν στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα ικανές ποσότητες Ραδονίου ώστε να τα παράγουν σε αντίστοιχες βλαβερές συγκεντρώσεις. Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην 90/143/EURATOM σύστασή της θεωρεί ότι ο κίνδυνος από τους θυγατρικούς πυρήνες γίνεται σημαντικός όταν η συγκέντρωση του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα φθάσει να είναι μεγαλύτερη από 200 Bq m^{-3} . Αβίαστα προκύπτει ότι υπάρχει ανάγκη διαπίστωσης της συγκέντρωσης Ραδονίου που επικρατεί στην ατμόσφαιρα των εσωτερικών χώρων προκειμένου να βρεθεί αν αυτοί είναι

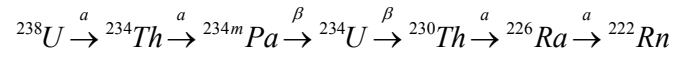
επικίνδυνοι για την ενδιαίτηση του ανθρώπου. Η διαπίστωση αυτή γίνεται με κατάλληλες μετρητικές τεχνικές.

1.4. Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Μία βραχυπρόθεσμη παθητική τεχνική για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα, διαθέσιμη στην αγορά, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική των ανοιχτών μεταλλικών δοχείων με προσροφητικό υλικό ενεργό άνθρακα. Αυτή η τεχνική καθιερώθηκε κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες ήδη από το τέλος της δεκαετίας του 1980. Την αρχική εφαρμογή, ανέπτυξε πλήρως ο George (1984). Στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007), έγιναν για πρώτη φορά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πειράματα βαθμονόμησης τέτοιων μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 αναπτύχθηκε επίσης στις Ηνωμένες Πολιτείες και διατέθηκε στην αγορά μία ανταγωνιστική βραχυ-μεσοπρόθεσμη παθητική τεχνική επίσης μικρού κόστους, βασισμένη στην αρχή του ανοιχτού θαλάμου ιονισμού, στον οποίο η υψηλή τάση συντηρείται από ένα φορτισμένο διηλεκτρικό μέσο. Η δεύτερη αυτή τεχνική παρουσιάζει συγκρίσιμη αβεβαιότητα με την τεχνική του ενεργού άνθρακα. Η έρευνα σχετικά με εναλλακτικά προσροφητικά υλικά για το Ραδόνιο, δεν συνεχίστηκε. Οι αιτίες για αυτό μπορούν να συνοψισθούν ως εξής: (1) Η τεχνική του ενεργού άνθρακα κρίθηκε σχετικά επιτυχής και με ικανοποιητικά χαμηλή αβεβαιότητα, (2) Βρέθηκε ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου οξειδία του Πυριτίου (SiO_2 ή αλλιώς τα γνωστά silica gel) προσροφούν με καλύτερο ρυθμό την υγρασία από ότι το Ραδόνιο και (3) Ήταν διαπιστωμένο ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου ζεόλιθι που υπήρχαν στην φύση δεν είχαν σταθερές και επαναλήψιμες προσροφητικές ιδιότητες. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση εναλλακτικών προσροφητικών υλικών για τη συγκρότηση ανιχνευτών Ραδονίου με τρόπο παρόμοιο όπως οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα. Ως τέτοια εναλλακτικά προσροφητικά υλικά προκρίθηκαν οι συνθετικοί ζεόλιθι και κατά δεύτερο λόγο τα silica gel. Η παρουσίαση των προκρινόμενων προσροφητικών υλικών γίνεται στο 2^ο Κεφάλαιο. Για το σκοπό της πειραματικής διερεύνησης αυτό θα χρησιμοποιηθεί στα βασικά του σημεία το πρωτόκολλο βαθμονόμησης για τον ενεργό άνθρακα που προτείνει στην Διπλωματική του Εργασία ο Μαρινάκης (2007). Αναγκαίες αλλαγές, βελτιστοποιήσεις και γραφειοκρατική

οργάνωση του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στο 3^ο Κεφάλαιο. Ο ρόλος της σχετικής υγρασίας στον αέρα του περιβάλλοντος σε σχέση με τη βαθμονόμηση ενεργού άνθρακα ως ανιχνευτή συγκεντρώσεων Ραδονίου επισημάνθηκε από πολλούς [βλ. π.χ. και George (1984), Gray (1987)] αλλά και από τον Μαρινάκη (2007) σε ό,τι αφορά τη βαθμονόμηση του ενεργού άνθρακα που έγινε στα πλαίσια της Διπλωματικής του Εργασίας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Εκτιμάται ότι αυτός ο ρόλος θα είναι εξίσου σημαντικός και για την βαθμονόμηση εναλλακτικών προσροφητικών υλικών, όπως ο συνθετικός ζεόλιθος και τα silica gel που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Στο 4^ο Κεφάλαιο διευκρινίζεται ποιές από τις τεχνικές μέτρησης σχετικής υγρασίας που διατίθενται προσφέρονται για την μέτρηση της σχετικής υγρασίας σε ένα θάλαμο έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και πώς αυτές εφαρμόζονται στον θάλαμο που χρησιμοποιείται για τις πειραματικές εκθέσεις αυτής της ΔΕ. Παρουσιάζεται επίσης ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατόν να επιτυγχάνονται οι σχετικές υγρασίες που πρέπει να αναπτυχθούν μέσα στον θάλαμο έκθεσης και για τις οποίες πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση των εξεταζόμενων εναλλακτικών προσροφητικών υλικών με βάση αυτά που αναφέρονται από τον Gray (1987). Κατά την πειραματική διαδικασία η οποία αναπτύσσεται στο 5^ο Κεφάλαιο δοκιμάστηκαν τέσσερα προσροφητικά υλικά, προκειμένου να διαπιστωθεί, αν αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές Ραδονίου. Τα υλικά αυτά είναι: (α) Ενεργός άνθρακας εμπορίου, (β) Συνθετικός ζεόλιθος με μέγεθος πόρου 0.5 nm, (γ) Silica gel χρωματογραφίας και (δ) Silica gel blue αφυγραντικό υλικό. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε έναν από τους θαλάμους Ραδονίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, όγκου 1.9 m³, σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν δείχνουν ότι με την εξαίρεση του χρωματογραφικού silica gel, όλα τα υπόλοιπα υλικά μπορούν να συγκροτήσουν ανιχνευτές Ραδονίου, αν ικανή μάζα τους τοποθετηθεί σε κατάλληλα μεταλλικά δοχεία. Σχετικά πιο αυστηρές προϋποθέσεις διατυπώνονται μόνο για τον αφυγραντή silica gel blue, ο οποίος φαίνεται να παρουσιάζει μάλλον υψηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης. Όπως αναμένεται επαληθεύθηκε από τα πειράματα ότι η ποσότητα του Ραδονίου που προσροφάται στα προσροφητικά υλικά είναι ανάλογη με την μέση συγκέντρωση του Ραδονίου που επικρατούσε στο θάλαμο έκθεσης. Ο ρυθμός προσρόφησης του Ραδονίου επηρεάζεται αρνητικά από το χρόνο έκθεσης και την σχετική υγρασία.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 1.1

Ραδιενεργός σειρά του ${}^{238}\text{U}$: Παραγωγή Ραδονίου

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

| i | Ισότοπο | Χρόνος Ημιζωής |
|---|---------------------------|--------------------------|
| 1 | ^{238}U | 4.47×10^9 years |
| 2 | ^{234}Th | 24.1 days |
| 3 | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 1.17 min |
| 4 | ^{234}U | 2.45×10^5 years |
| 5 | ^{230}Th | 7.54×10^4 years |
| 6 | ^{226}Ra | 1600 years |
| 7 | ^{222}Rn | 3.8 days |

Πίνακας 1.1

Ιδιότητες των ισότοπων του Διαγράμματος 1.1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΕΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό, παθητικές – ολοκληρωτικές (ή απλά "παθητικές") ονομάζονται οι τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου, οι οποίες δεν απαιτούν για να λειτουργήσουν ηλεκτρική ενέργεια ή άλλες μορφές ενέργειας και ανθρώπινη επιτήρηση. Οι παθητικές τεχνικές έχουν γενικά μικρό κόστος και χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο υποκατηγορίες: (α) τις βραχυ-μεσοπρόθεσμες (short-midterm) και (β) τις μέσο-μακροπρόθεσμες (mid-long term). Οι βραχυ-μεσοπρόθεσμες παθητικές τεχνικές είναι εκείνες κατά τις οποίες ένας μάλλον απλός μηχανισμός εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα εσωτερικού χώρου για χρονικό διάστημα μίας ημέρας έως και δύο το πολύ μηνών. Μετά την έκθεση ο μηχανισμός αυτός μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο τρόπο και από τη μέτρηση να προκύψει συμπίεσμα για την κατά μέσο όρο συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα του εσωτερικού χώρου. Οι παθητικές τεχνικές χωρίζονται επίσης και σε άλλες δύο υποκατηγορίες: Τις υψηλής αβεβαιότητας και της χαμηλής αβεβαιότητας. Υψηλής αβεβαιότητας θεωρούνται οι παθητικές τεχνικές των οποίων το πιθανό σφάλμα μέτρησης ξεπερνά το 20%. Μία βραχυπρόθεσμη παθητική τεχνική, διαθέσιμη στην αγορά, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική των δοχείων με προσροφητικό υλικό ενεργό άνθρακα. Αυτή η τεχνική καθιερώθηκε κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες ήδη από το τέλος της δεκαετίας του 1980. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 αναπτύχθηκε επίσης στις Ηνωμένες Πολιτείες και διατέθηκε στην αγορά μία ανταγωνιστική βραχυ-μεσοπρόθεσμη παθητική τεχνική επίσης μικρού κόστους, βασισμένη στην αρχή του ανοιχτού θαλάμου ιονισμού, στον οποίο η υψηλή τάση συντηρείται από ένα φορτισμένο διηλεκτρικό μέσο. Η δεύτερη αυτή τεχνική παρουσιάζει συγκρίσιμη αβεβαιότητα με την τεχνική του ενεργού άνθρακα. Η έρευνα σχετικά με εναλλακτικά προσροφητικά υλικά για το Ραδόνιο, δεν συνεχίστηκε. Οι αιτίες για αυτό μπορούν να συνοψισθούν ως εξής: (1) Η τεχνική του ενεργού άνθρακα κρίθηκε σχετικά επιτυχής και με ικανοποιητικά χαμηλή αβεβαιότητα,

(2) Βρέθηκε ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου οξειδία του Πυριτίου (SiO_2 ή αλλιώς τα γνωστά silica gel) προσροφούν με καλύτερο ρυθμό την υγρασία από ότι το Ραδόνιο¹ και (3) Ήταν διαπιστωμένο ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου ζεόλιθοι (Calcium – aluminium silicate ή Sodium – aluminium silicate ή Potassium - aluminium silicate ή συνδυασμός τους), που υπήρχαν στην φύση δεν είχαν σταθερές και επαναλήψιμες προσροφητικές ιδιότητες. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ως εναλλακτικά προσροφητικά υλικά οι συνθετικοί ζεόλιθοι και κατά δεύτερο λόγο τα silica gel. Με βάση την παρουσίαση αυτή θα οργανωθεί και το αντίστοιχο πειραματικό μέρος αυτής της ΔΕ σχετικά με την βαθμονόμηση των υπόψιν υλικών ως βραχυπρόθεσμες παθητικές τεχνικές. Επίσης παρουσιάζεται η ανταγωνιστική παθητική τεχνική μέτρησης συγκέντρωσης Ραδονίου στην ατμόσφαιρα που είναι γνωστή με το όνομα E-PERM™ και βασίζεται στην αρχή του ανοιχτού θαλάμου ιονισμού, στον οποίο η υψηλή τάση συντηρείται από ένα φορτισμένο διηλεκτρικό μέσο. Σε ειδική παράγραφο συγκρίνονται τα βασικά σημεία της τεχνικής που χρησιμοποιεί προσροφητικά υλικά (κυρίως ενεργό άνθρακα) και της τεχνικής E-PERM™.

2.2 Ο συνθετικός ζεόλιθος ως προσροφητικό υλικό

2.2.1 Γενικά

Οι φυσικοί ζεόλιθοι ανήκουν στα λεγόμενα "βιομηχανικά ορυκτά". Τα βιομηχανικά ορυκτά είναι υλικά τα οποία εξορύσσονται για την εμπορική τους αξία και τα οποία δεν είναι καύσιμα ("ορυκτά καύσιμα") ούτε πρώτες ύλες για μέταλλα. Χρησιμοποιούνται στη φυσική τους μορφή, ή μετά από εμπλουτισμό, είτε σαν πρώτες ύλες είτε σαν πρόσθετα σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Σημειώνεται ότι τα βιομηχανικά ορυκτά συνήθως είναι μίγματα ορυκτών και σπάνια είναι καθαρά ορυκτά. Στη φύση βρίσκονται περίπου 40 - 50 τύποι ζεόλιθων οι οποίοι είναι μικρο-πορώδη ένυδρα αργιλοπυριτικά ορυκτά (aluminium silicates). Οι κρύσταλλοι των ζεόλιθων έχουν ανοικτή δομή στην οποία μπορεί να προσδεθεί ένα εύρος από ιόντα όπως Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και άλλα. Το όνομά τους προκύπτει από τα αρχαία Ελληνικά, από τα συνθετικά Ζέω = βράζω και Λίθος = πέτρα. Αυτό διότι όταν θερμαίνεται χάνει άμεσα όλο το νερό του υπό μορφή φυσαλίδων ή ατμών, δίνοντας έτσι την εντύπωση ότι βράζει. Ο όρος εισήχθη για πρώτη

¹ και έτσι χρησιμοποιήθηκαν ως βοηθητικά υλικά σε ανιχνευτές συγκέντρωσης Ραδονίου με ενεργό άνθρακα, ώστε αυτά να προσροφούν την υγρασία από την ατμόσφαιρα και να αφήνουν το Ραδόνιο να προσροφάται από τον ενεργό άνθρακα [βλ. π.χ. και Ortega (1996) και Canoba (1999)]

φορά το 18^ο αιώνα από το Σουηδό μεταλλειολόγο Axel Fredrik Cronstedt [βλ. και Collera (2007)], ο οποίος πρώτος παρατήρησε το φαινόμενο αυτό. Στα Βαλκάνια πλούσια σε κοιτάσματα ζεόλιθου είναι η Βουλγαρία και αρκετές περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και των Κυκλάδων. Δεδομένου ότι τα κατιόντα των ζεόλιθων Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} είναι γενικά προσδεδεμένα σε αυτούς με χαλαρούς δεσμούς και μπορούν εύκολα να αντικαθίστανται από άλλα όταν έρχονται σε επαφή με τα διαλύματα τους, η κύρια ιδιότητα των ζεόλιθων είναι η μεγάλη τους ιοντοανταλλακτική ικανότητα και λόγω αυτής, μπορεί να φιλτράρουν π.χ. το νερό δεσμεύοντας μέταλλα και οργανικές ενώσεις. Παρόλη την πολύ καλή αυτή ιδιότητά τους οι φυσικοί ζεόλιθοι παρουσιάζουν τεχνικά μειονεκτήματα όπως:

(α) σπάνια απαντώνται δίχως προσμίξεις, οι οποίες μάλιστα μεταβάλλονται σε ποσότητα και μπορεί να είναι άλλα στερεά, μέταλλα, και άλλοι διαφορετικοί ζεόλιθοι ή άλλα υλικά.

(β) το μέγεθος των κρυστάλλων των φυσικών ζεόλιθων και το μέγεθος των πόρων τους ποικίλλει σημαντικά.

Τα μειονεκτήματα αυτά αλλοιώνουν το μέτρο των ιοντοανταλλακτικών τους ικανοτήτων ακόμα και σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο ίδιο ορυκτό κοίτασμα. Γι' αυτό το λόγο οι φυσικοί ζεόλιθοι δεν προτιμώνται για πολλές και σημαντικές εφαρμογές που απαιτούν σταθερές ιοντοανταλλακτικές ιδιότητες, σταθερό μέγεθος κρυστάλλου και σταθερό πορώδες. Συμπληρωματικά λοιπόν με τους φυσικούς ζεόλιθους ήδη από τη δεκαετία του 1970 ο άνθρωπος κατασκεύασε μία σειρά από συνθετικούς ζεόλιθους, οι οποίοι σήμερα ανέρχονται σε περίπου 150. Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή συνθετικών ζεόλιθων είναι η πυριτική άμμος, το NaCl και ο βωξίτης. Τα συνθετικά αυτά προϊόντα μπορούν, φυσικά, να κατασκευάζονται σε μια ομοιόμορφη, καθαρή μορφή. Είναι επίσης δυνατό να κατασκευάζονται επιθυμητές κρυσταλλικές δομές που δεν εμφανίζονται στη φύση. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι ονομάζονται και λειτουργούν ως "μοριακά κόσκινα" (ελεύθερη μετάφραση του αγγλικού όρου "molecular sieves"). Ο όρος αναφέρεται σε μια στην ιδιότητα των συνθετικών ζεόλιθων να κατατάσσουν με επιλεκτικότητα μεγέθους τα μόρια ή τα ιόντα ενός αερίου ή υγρού διαλύματος. Αυτό οφείλεται στην πολύ συγκεκριμένη και σχετικά σταθερή δομή των πόρων των συνθετικών ζεόλιθων. Τέλος, οι διαδικασίες παραγωγής που χρησιμοποιούνται απαιτούν το σημαντικά λιγότερο χρόνο από τα 50 έως 50.000 έτη που ορίζονται από τη φύση. Δεδομένου ότι οι κύριες πρώτες

ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ζεόλιθων είναι το πυρίτιο και η αλουμίνα, τα οποία είναι μεταξύ των αφθονότερων ορυκτών συστατικών στη γη, η δυνατότητα να παραχθούν συνθετικοί ζεόλιθοι είναι ουσιαστικά απεριόριστη. Παρόλαυτά το βασικό μειονέκτημα των συνθετικών ζεόλιθων είναι ότι οι ανθρώπινες κατασκευές δεν μπορούν ακόμα να αναπαράγουν όλες τις μικρο-πορώδεις δομές των φυσικών ζεόλιθων.

Οι εφαρμογές των ζεόλιθων, φυσικών και συνθετικών είναι πολλές και σημαντικές. Μία σύνοψη της παραγωγής, της κατανάλωσης και των χρήσεων γίνεται από τον Virta (2006). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι:

- Μπορούν να αντικαταστήσουν με επιτυχία τα φωσφορικά άλατα από τα απορρυπαντικά για τη δέσμευση των κατιόντων Ca, Mn και Fe των λεκέδων, μειώνοντας το πρόβλημα της ρύπανσης και του ευτροφισμού των θαλασσών. Αυτό έχει επιτευχθεί ήδη στις ευρωπαϊκές χώρες.
- Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται στα φίλτρα για την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων βλαβερών ενώσεων. Μπορεί να χρησιμοποιούνται επίσης στο φιλτράρισμα των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, δεσμεύοντας διάφορα τοξικά και ραδιενεργά ιόντα και στην ανακύκλωση των νερών που προέρχονται από την βιομηχανική δραστηριότητα.
- Οι ζεόλιθοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως συλλέκτες της ηλιακής θερμότητας και για απορροφητική ψύξη. Σε αυτές τις χρήσεις εκμεταλλεύεται κανείς την υψηλή θερμοκρασία που παράγεται κατά την εξώθερμη απορρόφηση και τη δυνατότητα προσρόφησης και αποβολής της υγρασίας χωρίς να αλλάζει η δομή και οι φυσικές ιδιότητες του ζεόλιθου.

2.2.2 Οι συνθετικοί ζεόλιθοι της Merck

Η Merck (με έδρα την Ομοσπονδιακή Γερμανία) είναι μία από τις μεγαλύτερες πολυεθνικές εταιρείες παραγωγής χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Η εταιρεία αυτή αντιπροσωπεύεται στην Ελλάδα από την Merck ΑΕ – Τμήμα Χημικών, Παλαιστίνης 8, 17455 Αλιμος, Αθήνα, τηλ. +302 10 9885-300, 49, 50, Fax: +302-10 9885-400. Ανάμεσα στα πάμπολλα προϊόντα της πολυεθνικής αυτής διατίθενται και συνθετικοί ζεόλιθοι σύμφωνα με τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών που περιέχονται στο

Παράρτημα "Α". Συνοψίζοντας τις ιδιότητες των προϊόντων αυτών μπορεί κανείς να γράψει:

- πρόκειται για κρυσταλλικούς συνθετικούς ζεόλιθους με χημική μορφή Calcium – aluminium silicate ή Sodium – aluminium silicate ή Potassium - aluminium silicate
- διατίθενται με μεγέθη πόρων 0.3, 0.4, 0.5 και 1 nm
- διατίθενται σε σκόνη, ή σε μικρά σφαιρίδια με ονομαστικές διαμέτρους 1.6, 2.0 και 3.2 mm
- έχουν απορροφητική ικανότητα υγρασίας μεταξύ 15 και 20% του βάρους τους
- δεν διαλύονται στο νερό και στους οργανικούς διαλύτες
- αναγεννώνται (δηλαδή αποβάλλουν τα προσροφηθέντα υγρά ή αέρια) με θέρμανση μεταξύ 250° και 350° C
- χρησιμοποιούνται κυρίως ως αφυγραντές, και τέλος
- διατίθενται με ή χωρίς αποχρωματιζόμενο δείκτη βαθμού προσρόφησης υγρασίας (indicator).

2.2.3 Επιλογή συνθετικού ζεόλιθου

Ο συνθετικός ζεόλιθος που επιλέχθηκε ως προσροφητικό υλικό δοκιμής για τους σκοπούς της παρούσης ΔΕ ήταν της κατασκευάστριας εταιρείας Merck. Δεν επιλέχθηκαν συνθετικοί ζεόλιθοι άλλων μεγάλων κατασκευαστών, όπως π.χ. η εταιρεία Sigma – Aldrich, δεδομένου ότι:

(α) η Merck αντιπροσωπεύεται παραδοσιακά στην Ελλάδα εδώ και πάρα πολλά χρόνια είτε εμμέσως (από την εταιρεία ΜΠΑΚΑΚΟΣ ΑΕ) είτε αμέσως (από την εταιρεία MERCK ΑΕ) και το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας προτιμά να προμηθεύεται από αυτήν τα αναλώσιμα χημικής ανάλυσης, και

(β) οι διαθέσιμες πληροφορίες για τα επιμέρους προϊόντα της υπόψιν εταιρείας είναι πολλές και επαρκείς με συνέπεια να διευκολύνεται η επιλογή.

Με βάση τα παραπάνω , αλλά έχοντας επίσης υπόψιν ότι:

- το μέγεθος κόκκων του ενεργού άνθρακα με του οποίου τις προσροφητικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά το Ραδόνιο ενδεχομένως να συγκρίνεται ο προς δοκιμή ζεόλιθος, είναι 1 – 3 mm (βλ. και Διάγραμμα 2.1)
- το διαθέσιμο μέγεθος πόρων συνθετικών ζεόλιθων κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 1 nm, και τέλος ότι
- υπάρχει οικονομικό κόστος που συναρτάται με τα μεγέθη πόρων των συνθετικών ζεόλιθων (όσο μικρότεροι οι πόροι, τόσο ακριβότεροι οι ζεόλιθοι)

επιλέχθηκε ο συνθετικός ζεόλιθος της Merck με κωδικό προϊόντος 1.05752.0250. Ο υπόψιν ζεόλιθος είναι σε μορφή μικρών σφαιριδίων διαμέτρου 1.6 mm (βλ. και Διάγραμμα 2.2), έχει μέγεθος πόρων 0.5 nm (δηλ. στο μέσον περίπου του διαθέσιμου διαστήματος πόρων από 0.3 και 1 nm) και δεν διαθέτει αποχρωματιζόμενο δείκτη βαθμού προσρόφησης υγρασίας (indicator) ενώ χαρακτηρίζεται από την Merck ως "Drying agent - Molecular sieve". Ο συνθετικός αυτός ζεόλιθος προμηθεύεται σε υάλινες αεροστεγείς συσκευασίες με καθαρό βάρος 250 g (βλ. και Διάγραμμα 2.3).

2.2.4 Τεχνική δοκιμή συνθετικού ζεόλιθου

Δεδομένου ότι δεν υπήρχε προηγούμενη εμπειρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σχετικά με τη χρήση των ζεόλιθων ως προσροφητικών υλικών αποφασίσθηκε να γίνουν ορισμένες ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές για την επαλήθευση των προσροφητικών ιδιοτήτων του επιλεγθέντος ζεόλιθου και τον έλεγχο της δυνατότητας αφύγρανσής του και αναγέννησής του με θέρμανση.

Κατ' αρχήν παρατηρήθηκε το εξής:

Όταν χρειαζόταν να ανοίξουν οι πρωτότυπες στεγανές συσκευασίες του συνθετικού ζεόλιθου της Merck, αυτό ήταν σχετικά δύσκολο διότι στο εσωτερικό τους είχε δημιουργηθεί υποπίεση εξαιτίας της υψηλής προσροφητικής ικανότητας του ζεόλιθου.

Σε σχέση με τις ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές επαλήθευσης των προσροφητικών ιδιοτήτων του επιλεγθέντος ζεόλιθου, έγιναν ορισμένες παρατηρήσεις και οργανώθηκε ένα πείραμα προσδιορισμού της μέγιστης τιμής προσρόφησης υγρασίας ως εξής:

Πληρώθηκαν δύο μεταλλικά δοχεία με κάλυμμα με ελαστικό παρέμβυσμα (έστω το "Α" και το "Β"), σαν αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην ΔΕ του Μαρινάκη,

τυπικού μικτού βάρους ~80 g, με τον επιλεγθέντα ζεόλιθο. Κάθε ένα από αυτά τα δοχεία γέμισε σχεδόν ακριβώς με το περιεχόμενο μιας συσκευασίας τέτοιου ζεόλιθου (~250 g). Τα δοχεία ζυγίστηκαν και βρέθηκαν με μικτό βάρος, το "A": 332.6 g και το "B": 332.2 g αντίστοιχα και αφέθηκαν κλειστά σε ερμάριο περίπου 4 μήνες. Στο τέλος αυτής της περιόδου τα δοχεία ξαναζυγίστηκαν κλειστά και βρέθηκαν με αυξημένο μικτό βάρος, το "A": 345.5 g και το "B": 346.3 g αντίστοιχα. Αυτό ήταν ισχυρή ένδειξη προσροφητικής ικανότητας υγρασίας ακόμα και μέσα από σχεδόν στεγανά κλειστό δοχείο. Παρατηρήθηκε επίσης ότι υπήρχε δυσκολία να ανοίξουν αυτά τα μεταλλικά δοχεία διότι και σε αυτήν την περίπτωση στο εσωτερικό τους είχε δημιουργηθεί υποπίεση εξαιτίας της υψηλής προσροφητικής ικανότητας του ζεόλιθου. Μάλιστα, αμέσως μετά το άνοιγμα τα μεταλλικά δοχεία ξαναζυγίστηκαν και βρέθηκαν με ακόμα πιο αυξημένο μικτό βάρος, το "A": 346.6 g και το "B": 347.1 g, πράγμα που δείχνει ότι η προσροφητική ικανότητα του ζεόλιθου δεν είχε εξαντληθεί και ότι με το άνοιγμα συνέχισε να προσροφά υγρασία με μεγάλο ρυθμό. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής προσρόφησης υγρασίας, η οποία σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ζεόλιθου αναμένεται να είναι μεταξύ 37.5 και 50 g στα 250 g ξηρής μάζας υλικού, δηλ. μεταξύ 15 και 20%, χρησιμοποιήθηκε η απλή πειραματική διάταξη που διακρίνεται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 2.4. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν ανεμιστήρα H/Y 80 x 80 mm. Ο ανεμιστήρας τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ από ένα τροφοδοτικό για προσωπικό υπολογιστή τύπου IBM συμβατού. Κατά το πείραμα το δοχείο "B" τοποθετήθηκε ανοιχτό κάτω από τον ανεμιστήρα που λειτουργούσε με τρόπο ώστε ο μεταφερόμενος από τον ανεμιστήρα αέρας να προσβάλλει τον περιεχόμενο ζεόλιθο. Κάθε 1 h το δοχείο "B" ζυγίζονταν για να διαπιστωθεί εάν και πόση υγρασία έχει δεσμευθεί. Η πειραματική αυτή διαδικασία επιλέχθηκε για να επιταχυνθεί κατά το δυνατόν η διαδικασία προσρόφησης υγρασίας από τον συνθετικό ζεόλιθο. Το δοχείο "A" κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού παρέμεινε ανοιχτό στο ίδιο περιβάλλον χωρίς όμως να του προσδίδεται μηχανικά ή με κάποιον άλλο μη συμβατικό τρόπο υγρασία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν:

1^η μέτρηση

Μετά την 1^η ώρα, ζυγίστηκε το δοχείο "B" και βρέθηκε με μικτό βάρος 353.6 g,

2^η μέτρηση

Μετά την 2^η ώρα, ζυγίστηκε το δοχείο "B" και βρέθηκε με μικτό βάρος 357.1 g,

3^η μέτρηση

Μετά την 3^η ώρα, ζυγίστηκε το δοχείο "B" και βρέθηκε με μικτό βάρος 359.6 g

4^η μέτρηση

Μετά την 4^η ώρα, ζυγίστηκε το δοχείο "B" και βρέθηκε με μικτό βάρος 361.3 g

Η γραφική παράσταση των πιο πάνω αποτελεσμάτων, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 2.5, δείχνει την πορεία του πειράματος. Μετά την 4^η ώρα ζυγίστηκε και το δοχείο "A" το οποίο βρέθηκε με μικτό βάρος 348.5 g. Το πείραμα διακόπηκε για περίπου 12 ώρες κατά τις οποίες και τα δύο δοχεία παρέμειναν ανοιχτά στο περιβάλλον του Εργαστηρίου (~25° C, ~40% RH). Μετά την πάροδο της περιόδου των 12 ωρών το δοχείο "A" ζυγίστηκε και βρέθηκε με μικτό βάρος 353.1 g ενώ το δοχείο "B" βρέθηκε με μικτό βάρος 363.3 g. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.

(α) Ο συνθετικός ζεόλιθος προσροφά υγρασία.

(β) Ο ρυθμός με τον οποίο προσροφάται η υγρασία εξαρτάται πολύ από τις πειραματικές συνθήκες.

(γ) Η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε επιτάχυνε κατά πολύ την διαδικασία προσρόφησης της υγρασίας από το ζεόλιθο. Αυτό προκύπτει αν συγκριθούν τα βάρη του δοχείου "A" και του δοχείου "B" που βρέθηκαν μετά την 4^η ώρα του πειράματος. Προτείνεται να χρησιμοποιείται η υπόψιν πειραματική διαδικασία αν πρόκειται να γίνονται δοκιμές ικανότητας προσρόφησης υγρασίας για προσροφητικά μέσα.

(δ) Η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε οδήγησε το συνθετικό ζεόλιθο του δοχείου "B" σε αύξηση του βάρους του λόγω προσρόφησης υγρασίας, ίση με περίπου 12%, ποσοστό που είναι κοντά στο αναφερόμενο από τον κατασκευαστή (15%). Προφανώς ο ζεόλιθος του δοχείου "B" μετά την 4^η ώρα του πειράματος είχε πλησιάσει αλλά δεν είχε φθάσει να κορεσθεί από υγρασία. Αυτό διακρίνεται και από την μελέτη του Διαγράμματος 2.5, στο οποίο τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζονται πολύ καλά με β' βάθμιο πολυώνυμο αναδρομής. Επιπλέον απόδειξη

ότι ο ζεόλιθος του δοχείου "B" δεν είχε φθάσει να κορεσθεί από υγρασία μετά την 4^η ώρα του πειράματος, είναι ότι μετά το πέρας των επιπλέον 12 ωρών στο περιβάλλον του Εργαστηρίου προσέλαβε ακόμα 2 g.

(ε) Κατά το 12 ωρο στο περιβάλλον του Εργαστηρίου το δοχείο "A" προσρόφησε 4.6 g ενώ το δοχείο "B" μόνο 2 g. Η διαφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός πως το δοχείο "B" είχε πλησιάσει, όπως σημειώθηκε, το σημείο κορεσμού του με υγρασία και το δοχείο "A" επειδή ήταν ακόμη μακριά από τον κορεσμό μπορούσε να προσροφήσει υγρασία με μεγαλύτερη ευκολία.

Σε σχέση με τις ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές διαπίστωσης του αν ο ζεόλιθος που επιλέχθηκε, έχει ικανότητα προσρόφησης Ραδονίου οργανώθηκε ένα πείραμα ως εξής:

Συνθετικός ζεόλιθος ξηρής μάζας 250 g, ο οποίος δεν είχε ξαναεκτεθεί σε Ραδόνιο ή ατμόσφαιρα με υγρασία (δηλαδή ζεόλιθος του οποίου μόλις είχε ανοιχθεί η εργοστασιακή του συσκευασία), τοποθετήθηκε σε μεταλλικό δοχείο, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Το μεταλλικό δοχείο με τον ζεόλιθο σφραγίστηκε με το κάλυμμά του και μετρήθηκε για ολική γ ακτινοβολία επί 1000 s με ανιχνευτή τύπου NaI εντός θωράκισης από μολύβι και το αποτέλεσμα σημειώθηκε. Στη συνέχεια το δοχείο με το ζεόλιθο εκτέθηκε αφού ανοίχθηκε σε συγκέντρωση Ραδονίου της τάξεως των 2.5 kBq m^{-3} , επί περίπου 48h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας περίπου 50%. Μετά την έκθεση, το δοχείο με το ζεόλιθο σφραγίστηκε πάλι με το κάλυμμά του και αφού πέρασαν 3 ώρες μετρήθηκε εκ νέου για ολική γ ακτινοβολία επί 1000 s με ανιχνευτή τύπου NaI εντός θωράκισης από μολύβι. Το αποτέλεσμα αυτής της μέτρησης ήταν περίπου 3 φορές εκείνο της προηγούμενης, πράγμα το οποίο αποδεικνύει ότι ο ζεόλιθος που επιλέχθηκε προσροφά Ραδόνιο. Φαίνεται μάλιστα ότι συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αντίστοιχα προκαταρκτικά πειράματα προσρόφησης Ραδονίου σε silica gel και σε ενεργό άνθρακα, ο υπόψιν συνθετικός ζεόλιθος προσροφά Ραδόνιο στις ίδιες συνθήκες, με ρυθμό 10 φορές καλύτερο από ορισμένα silica gel και 10 φορές χειρότερο από τον ενεργό άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε και στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Από το πείραμα αυτό προκύπτει το συμπέρασμα:

Ο συνθετικός ζεόλιθος προσροφά Ραδόνιο. Ο τρόπος και ο ρυθμός με τον οποίο προσροφάται το Ραδόνιο εξαρτάται από τις πειραματικές συνθήκες και είναι ερευνητικό αντικείμενο που θα εξετασθεί στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ.

Σε σχέση με τις ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές αποκατάστασης των προσροφητικών ιδιοτήτων του επιλεγθέντος ζεόλιθου, έγιναν οι ακόλουθες πειραματικές παρατηρήσεις:

Όπως σημειώθηκε, η εταιρεία Merck αναφέρει πως η αφύγρανση των συνθετικών ζεόλιθων της γίνεται με θέρμανση σε θερμοκρασία 250° – 350° C. Παρόλαυτά δεν πληροφορεί για την χρονική διάρκεια αυτής της αφύγρανσης. Επειδή τόσο στα πλαίσια της ΔΕ του Μαρινάκη (2007), όσο και στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, προτιμάται η απλότητα και η φορητότητα των μεθόδων μία πρώτη λύση που αποφασίσθηκε να δοκιμασθεί ήταν η χρήση φορητής επίπεδης ηλεκτρικής εστίας μικρής διαμέτρου (ηλεκτρικό ματάκι). Η υπόψιν εστία προθερμάνθηκε σχεδόν μέχρι ερυθροπυρώσεως (~ 400° C). Κατόπιν διεκόπη η ηλεκτρική τροφοδοσία και τοποθετήθηκε στη θερμή επιφάνεια της εστίας το δοχείο "B" ανοιχτό, όπως αυτό είχε προκύψει με προσροφημένη υγρασία από το προηγούμενο πείραμα. Το δοχείο "B" αφέθηκε να θερμανθεί από την εστία που είχε προθερμανθεί. Όταν η θερμοκρασία του δοχείου "B", μετά από ώρα (~30 min) και λόγω συναγωγής με το περιβάλλον, άρχισε να μειώνεται και έγινε τέτοια ώστε το δοχείο να μπορεί να έρθει σε επαφή ανθρώπινο χέρι, μετρήθηκε το μικτό βάρος του και βρέθηκε 362.8 g (από 363.3 g που ήταν πριν τη θέρμανση).

Το προφανές συμπέρασμα είναι ότι η μέθοδος αυτή δεν είχε τα αναμενόμενα αποτελέσματα και ότι θα έπρεπε να αναζητηθεί άλλη λύση για την αφύγρανση του συνθετικού ζεόλιθου.

Μία εναλλακτική λύση για την αφύγρανση ζεόλιθου με θέρμανση είναι και η χρήση οικιακού φούρνου μικροκυμάτων, η οποία αναφέρεται στην βιβλιογραφία [βλ. π.χ. και Ohgushi (2001, 2005)]. Παρόλαυτά, επειδή ο οικιακός φούρνος μικροκυμάτων δεν διαθέτει θερμοστάτη, ο ζεόλιθος που αφυγραίνεται σε τέτοια συσκευή μπορεί πολύ εύκολα να αποκτήσει πάρα πολύ υψηλή θερμοκρασία (πολύ μεγαλύτερη των συνιστώμενων 250 – 350° C) με αποτέλεσμα είτε να καταστρέφεται ο φούρνος είτε να καταστρέφεται ο ζεόλιθος με το φαινόμενο που στα Αγγλικά ονομάζεται thermal runaway [βλ. π.χ. και Ohgushi (2001, 2005)].

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ προκειμένου να αποφασισθεί ποιο είναι ένα προσεγγιστικά αποδοτικό πρωτόκολλο αφύγρανσης συνθετικού ζεόλιθου με οικιακό φούρνο μικροκυμάτων καταστράφηκαν από υπερθέρμανση δύο συσκευασίες (δηλ. 500 g υλικού) και ένας οικιακός φούρνος μικροκυμάτων μικρής αξίας. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι ένα προσεγγιστικά αποδοτικό πρωτόκολλο αφύγρανσης συνθετικού ζεόλιθου με οικιακό φούρνο μικροκυμάτων 800 W, ο οποίος υπάρχει διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (εταιρείας κατασκευής IZZY, 20 L, 800 W) μπορεί να είναι ως εξής:

(α) Κορεσμός μίας συσκευασίας 250 g ζεόλιθου με υγρασία (καθαρό βάρος 250 + 15% x 250 = 287.5 g)

(β) Ρύθμιση του φούρνου μικροκυμάτων στα 650 W (ή 80% της ισχύος μικροκυμάτων)

(γ) Τοποθέτηση του συνθετικού ζεόλιθου σε πυρίμαχο δοχείο τύπου PYREX και όχι σε πλαστικό, προκειμένου αυτό να μην λειώσει από την αυξημένη θερμοκρασία του ζεόλιθου

(δ) Θέρμανση επί 5 min

(ε) Διάλειμμα 5min, ζύγιση

(στ) Επανάληψη των βημάτων (δ) και (ε) μέχρι το καθαρό βάρος να βρεθεί περίπου ίσο με 260 g (δηλαδή περίπου ίσο με 250 + 4% x 250 = 260 g)

Διαπιστώθηκε ότι οι αναγκαίες επαναλήψεις των βημάτων (δ) και (ε) είναι 6 έως 8, και εκτιμήθηκε ότι σε κάθε επανάληψη ο ζεόλιθος χάνει 3 – 4 g υγρασίας. Επίσης, περισσότερες από 8 επαναλήψεις δεν φαίνεται να δρουν αποτελεσματικά για την αποβολή και των τελευταίων 10 g υγρασίας (= 4% x 250 g). Στη συνέχεια ελέγχθηκε μία μοναδική φορά, με την απλή πειραματική διάταξη του Διαγράμματος 2.4, αν ο ζεόλιθος που αφυγράνθηκε με αυτόν τον τρόπο διατηρεί τις προσροφητικές του ικανότητες σε ό,τι αφορά στην υγρασία και βρέθηκε ότι αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά όπως και πριν την αφύγρανση. Από τα ποιοτικά αυτά αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

(α) η αφύγρανση ζεόλιθων με μικροκύματα είναι δυνατή

(β) η αφύγρανση ζεόλιθων με μικροκύματα είναι χρονικά σύντομη

(γ) η αφύγρανση ζεόλιθων με μικροκύματα, πρέπει να γίνεται σε χαμηλή γενικά ισχύ επί μικρά χρονικά διαστήματα που να ακολουθούνται από διαλείμματα, ώστε

να αποφεύγεται η υπερθέρμανση και η καταστροφή του ζεόλιθου ή/και του φούρνου μικροκυμάτων

(δ) εκτιμάται ότι η αφύγρανση ζεόλιθων με μικροκύματα, είναι δυνατόν να γίνεται με συνεχή τρόπο, μόνο όταν υπάρχει θερμοστατικός έλεγχος της θερμοκρασίας του ζεόλιθου, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά τους 350° C, πράγμα που είναι σχετικά δύσκολο για οικιακούς φούρνους μικροκυμάτων.

(ε) δεδομένου ότι η αφύγρανση ζεόλιθων με μικροκύματα είναι δυνατή, πιθανόν να είναι δυνατή και η αφύγρανση ενεργού άνθρακα και άλλων προσροφητικών υλικών με τον ίδιο τρόπο.

(στ) απαιτείται συστηματικότερη πειραματική διερεύνηση αυτού του τρόπου αποκατάστασης των προσροφητικών ιδιοτήτων καθώς υπάρχουν μόνο ενδείξεις και όχι βεβαιότητα ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει επαναληψιμότητα και δεν καταστρέφει τις προσροφητικές ιδιότητες των υλικών που υπόκεινται σε αυτό, του ζεόλιθου συμπεριλαμβανομένου.

Μία τρίτη λύση για την αφύγρανση ζεόλιθου με θέρμανση είναι φυσικά η χρήση συμβατικού εργαστηριακού φούρνου θέρμανσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί από το Μαρινάκη (2007) η διαδικασία που ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την αφύγρανση του ενεργού άνθρακα ώστε να απαλλαγεί από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία, είναι η τοποθέτηση των δοχείων στο φούρνο του Εργαστηρίου (του κατασκευαστή Hellenic LABWARE τύπου KA 120P) και η θέρμανση τους επί περίπου 12 ωρο (κατά προτίμηση κατά τη διάρκεια της νύχτας – ή όπως λέγεται "overnight") στους 120° C. Επειδή διαπιστώνεται η ανάγκη η μέθοδος αποκατάστασης των προσροφητικών ιδιοτήτων του ενεργού άνθρακα που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα προσρόφησης Ραδονίου, να είναι διαδικαστικά παρόμοια με τη μέθοδο αποκατάστασης του συνθετικού ζεόλιθου, ο οποίος επίσης προσροφά Ραδόνιο, δοκιμάστηκε η αφύγρανση ζεόλιθου με το ίδιο πρωτόκολλο όπως γίνεται η αφύγρανση ενεργού άνθρακα. Τα αποτελέσματα μετά από πολλές δοκιμές σε διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας, έδειξαν ότι:

- Συνθετικός ζεόλιθος με καθαρή ξηρή μάζα 250 g, που έχει εκτεθεί ακόμα και σε ελάχιστα επίπεδα σχετικής υγρασίας 10 – 30% επί τουλάχιστον 24 h, και αφυγραίνεται με θέρμανση χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο αφύγρανσης του ενεργού άνθρακα δεν αποβάλλει ποτέ πλήρως την προσροφηθείσα σε αυτόν

υγρασία². Η νέα "ξηρή" μάζα του μετά την όποια τέτοια αφύγρανση διαμορφώνεται σε περίπου 260 g

- Δεδομένων των πολλών δοκιμών που έγιναν διαπιστώθηκε ότι μετά από κάθε τέτοια αφύγρανση, ο συνθετικός ζεόλιθος διατηρεί σταθερές επαναλήψιμες προσροφητικές ιδιότητες.
- Η προσρόφηση υγρασίας στον ζεόλιθο είναι ανάλογη με το επίπεδο της σχετικής υγρασίας στο οποίο εκτίθεται και με το χρόνο που διαρκεί η έκθεση αυτή. Πιο ειδικά:
- Η μάζα της προσροφούμενης υγρασίας βρίσκεται γενικά στην περιοχή του 2 – 3% της "ξηρής" μάζας 260 g εκτιθέμενου συνθετικού ζεόλιθου, για σχετικές υγρασίες έκθεσης στην περιοχή 10 – 70% και χρόνους έκθεσης μεταξύ 24 και 48 h.
- Η μάζα της προσροφούμενης υγρασίας βρίσκεται γενικά στην περιοχή του 4 – 8% της "ξηρής" μάζας 260 g εκτιθέμενου συνθετικού ζεόλιθου, για σχετικές υγρασίες έκθεσης στην περιοχή 70 – 100% και χρόνους έκθεσης 72 h.

Από τα ποιοτικά αυτά αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

(α) η αφύγρανση συνθετικών ζεόλιθων με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τον ενεργό άνθρακα είναι δυνατή και επαναλήψιμη

(β) η αφύγρανση ζεόλιθων με αυτό το πρωτόκολλο είναι χρονοβόρα

(γ) η αφύγρανση ζεόλιθων με αυτό το πρωτόκολλο γίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία και έτσι αποφεύγεται η υπερθέρμανση και η καταστροφή του ζεόλιθου.

Σε σχέση με τις ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές αποκατάστασης των προσροφητικών ιδιοτήτων του επιλεχθέντος ζεόλιθου, απασχολεί επιπλέον και ο έλεγχος του αν οι τεχνικές αποκατάστασης επαναφέρουν τον συνθετικό ζεόλιθο που έχει προσροφήσει Ραδόνιο σε ζεόλιθο χωρίς Ραδόνιο. Για το σκοπό αυτό οργανώθηκε η ακόλουθη πειραματική δοκιμή:

² Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εικάζεται ότι για να αποβληθεί πλήρως αυτή η υγρασία ο συνθετικός ζεόλιθος πρέπει να θερμανθεί στους 120° C επί 24h ή στους 250° C επί 12h.

Συνθετικός ζεόλιθος "ξηρής" μάζας 520 g, ελεύθερος από Ραδόνιο³, τοποθετήθηκε σε δύο μεταλλικά δοχεία, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Ο συνθετικός ζεόλιθος αναγεννήθηκε στην συνέχεια με θέρμανση σύμφωνα με το πρωτόκολλο αφύγρανσης του ενεργού άνθρακα που παρουσιάστηκε πιο πάνω. Μετά το πέρας της αναγέννησης τα δοχεία με το ζεόλιθο σφραγίστηκαν με το κάλυμμά τους και μετρήθηκαν για ολική γ ακτινοβολία επί 1000 s με ανιχνευτή τύπου NaI εντός θωράκισης από μολύβι και τα αποτελέσματα σημειώθηκαν. Στην συνέχεια τα δοχεία με το ζεόλιθο εκτέθηκαν σε συγκέντρωση Ραδονίου της τάξεως των 100 kBq m^{-3} , επί περίπου 48h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας περίπου 50%. Μετά την έκθεση τα δοχεία με το ζεόλιθο αναγεννήθηκαν και πάλι με την ίδια μέθοδο θέρμανσης σφραγίστηκαν με το κάλυμμά τους και ξαναμετρήθηκαν για ολική γ ακτινοβολία. Τα αποτελέσματα της δεύτερης μέτρησης ολικής γ ακτινοβολίας βρέθηκαν να είναι απολύτως συγκρίσιμα με εκείνα της πρώτης μέτρησης πριν την έκθεση. Η δοκιμή αυτή επαναλήφθηκε τουλάχιστον δύο φορές. Από τη δοκιμή αυτή προκύπτει το συμπέρασμα:

Η αναγέννηση συνθετικών ζεόλιθων (απομάκρυνση προσροφηθέντος Ραδονίου) με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τον ενεργό άνθρακα είναι δυνατή και επαναλήψιμη.

2.3 Το silica gel ως προσροφητικό υλικό

2.3.1 Γενικά

Το silica gel είναι μια κοκκώδης, πορώδης κρυσταλλική μορφή οξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Παρά το όνομα "gel" (δηλ. "ζελέ") είναι ένα στερεό, το οποίο παρουσιάζει εξαιτίας της πορώδους μορφής του πολύ υψηλό λόγο επιφάνειας προς μάζα, ο οποίος υπολογίζεται μέχρι και $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Εξαιτίας αυτής της ιδιότητας απορροφάει το νερό εύκολα, και έτσι μπορεί να λειτουργεί ως αφυγραντικό με εξαιρετικές ιδιότητες για την προσρόφηση υγρασίας από τον περιβάλλοντα αέρα. Η ύπαρξη του υλικού αυτού και των ιδιοτήτων του είχε καταγραφεί ήδη από τον 17^ο αιώνα ως επιστημονικό παράδοξο. Χρησιμοποιήθηκε στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο για την απορρόφηση των δηλητηριωδών

³ Εδώ εννοείται συνθετικός ζεόλιθος ο οποίος δεν έχει εκτεθεί ποτέ σε συγκεντρώσεις Ραδονίου ή συνθετικός ζεόλιθος, ο οποίος έχει μεν εκτεθεί αλλά από την έκθεσή του αυτή έχουν περάσει τουλάχιστον 20 ημέρες και το τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο έχει διασπασθεί πλήρως.

ατμών και αερίων στις μάσκες χημικού πολέμου. Η συνθετική του παρασκευή κατοχυρώθηκε από τον καθηγητή Walter A. Patrick στο πανεπιστήμιο Johns Hopkins στη Βαλτιμόρη του Maryland το 1919. Το silica gel παράγεται σήμερα πρακτικά μόνο συνθετικά συνήθως σε μορφή μικρών σφαιριδίων με γενικά ακανόνιστη εξωτερική επιφάνεια. Στην καθημερινή πράξη το silica gel χρησιμοποιείται ως απορροφητής της υγρασίας και για αυτό το σκοπό τοποθετείται στο εσωτερικό της συσκευασίας προϊόντων ή εξαρτημάτων (κυρίως ηλεκτρονικών κυκλωμάτων) ευπαθών σε υγρασία, σε ικανές ποσότητες μέσα σε διαπερατούς από τον αέρα πλαστικούς φακέλους (κατασκευασμένους από συνθετικό ύφασμα). Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, το silica gel ήταν απαραίτητο στην προσπάθεια για τη διατήρηση της πενικιλίνης ξηρής και στην προστασία του στρατιωτικού εξοπλισμού από τη ζημιογόνο υγρασία. Το silica gel χρησιμοποιείται επίσης για να ξηράνει τον αέρα στα βιομηχανικά συστήματα συμπιεσμένου αέρα. Ο αέρας από την έξοδο των συμπιεστών διατρέχει μια πλάκα καλυμμένη με silica gel το οποίο προσροφά την υγρασία από τον αέρα, αποτρέποντας ζημιές στα όργανα που χρησιμοποιούν τον συμπιεσμένο αέρα λόγω της συμπύκνωσης ή της υγρασίας. Επίσης το silica gel χρησιμοποιείται αρκετές φορές για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας στον εσωτερικό χώρο ενός μουσείου ή μιας βιβλιοθήκης. Αφού έχει απορροφήσει υγρασία, το silica gel μπορεί να αναγεννηθεί με θέρμανση σε 120° - 150° C για τουλάχιστον τρεις ώρες. Το silica gel ως υλικό δεν είναι τοξικό, ούτε εύφλεκτο και γενικά είναι χημικά αδρανές. Παρόλαυτά, συνηθίζεται να εμποτίζεται με μάλλον τοξικές χημικές προσμίξεις, οι οποίες λειτουργούν ως δείκτες ποσοστού προσρόφησης υγρασίας. Ένας συνήθης τέτοιος δείκτης σε ποσοστό 2% κ.μ. είναι το χλωριούχο κοβάλτιο (cobalt(II)chloride). Χωρίς προσροφηθείσα υγρασία το silica gel με χλωριούχο κοβάλτιο, έχει το χαρακτηριστικό μπλε χρώμα των αλάτων του κοβαλτίου, με προσροφηθείσα υγρασία το silica gel με χλωριούχο κοβάλτιο, παίρνει ροζ χρώμα.

2.3.2 Τα silica gel της Merck

Συνοψίζοντας τις πληροφορίες για συνθετικά silica gel, όπως παράγονται από την πολυεθνική Merck (<http://www.merck.de>), μπορεί κανείς να γράψει:

- παράγεται μία σειρά από περίπου 143 διαφορετικά τέτοια προϊόντα.

- τα παραγόμενα silica gel είναι κατάλληλα κυρίως για αφυγραντικά υλικά και για υλικά χρωματογραφικής ανάλυσης
- τα παραγόμενα silica gel διατίθενται (α) σε κρυσταλλικούς κόκκους με διαστάσεις που κυμαίνονται από πολύ λεπτές σκόνες τυπικής διαμέτρου 15 μm έως σφαιρίδια ακανόνιστου εξωτερικού σχήματος διαμέτρου τυπικής διαμέτρου 5 mm, και (β) ενσωματωμένα σε (β1) πλακίδια υάλου, (β2) πλακίδια αλουμινίου, (β3) πλακίδια πλαστικού και (β4) φύλλα και ρολά αλουμινίου ή πλαστικού.
- διατίθενται με ή χωρίς αποχρωματιζόμενο δείκτη βαθμού προσρόφησης υγρασίας (indicator). Οι δείκτες είναι προσμίξεις που αλλάζουν χρώμα είτε λόγω δέσμευσης κρυσταλλικού νερού, όπως π.χ. στο χλωριούχο κοβάλτιο και σε κατάλληλες ενώσεις του σιδήρου, είτε λόγω αλλαγής του pH λόγω απορρόφησης νερού, όπως π.χ. στη φαινολοφθαλείνη (phenolphthalein). Αν χρησιμοποιούνται προσμίξεις χλωριούχου κοβαλτίου τότε το silica gel έχει χωρίς προσροφημένη υγρασία χρώμα "μπλε κοβαλτίου" και με προσροφημένη υγρασία χρώμα "ροζ". Τέτοιο silica gel ονομάζεται silica gel blue (ή απλά blue gel). Αν χρησιμοποιούνται προσμίξεις ενώσεων του σιδήρου τότε το silica gel έχει χωρίς προσροφημένη υγρασία χρώμα "καφέ" και με προσροφημένη υγρασία χρώμα "κιτρινωπό". Τέτοιο silica gel ονομάζεται brown gel. Αν χρησιμοποιούνται προσμίξεις φαινολοφθαλείνης τότε το silica gel έχει χωρίς προσροφημένη υγρασία χρώμα "βαθύ πορτοκαλί" και με προσροφημένη υγρασία είναι άχρωμο. Τέτοιο silica gel ονομάζεται orange gel.

2.3.3 Διαθέσιμα silica gel για δοκιμές

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται από παλαιότερες αγορές ικανές ποσότητες silica gel της Merck, των ακόλουθων δύο τύπων: (α) Silica gel 60 σε κοκκώδη μορφή (σκόνη) με διαστάσεις κόκκου 0.2 – 0.5 mm (βλ. και Merck-a Data Sheet Cat. No. 1.07733) και (β) Silica gel blue σε κοκκώδη μορφή (ρύζι) με διαστάσεις κόκκου 1 – 3 mm (βλ. και Merck-b Product Data Sheet Cat. No. 1.01925.1000). Τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών αυτών των silica gel περιέχονται στο Παράρτημα "Α". Το Silica gel 60 (από εδώ και στο εξής Silica gel) είναι κατάλληλο για υγρή χρωματογραφία, έχει μέση διάμετρο πόρων 6 nm, λόγο επιφάνειας προς μάζα 480 – 540 m² g⁻¹ και ειδικό όγκο πόρων 0.74 – 0.84 mLg⁻¹. Το Silica gel blue είναι κατάλληλο για αφύγρανση και δεν διατίθενται για αυτό περισσότερες πληροφορίες εκτός από το ότι η δυνατότητα προσρόφησης υγρασίας μπορεί να φθάσει έως και το 27% της ξηρής μάζας του. Σημειώνεται ότι η αλλαγή

χρώματος του δείκτη χλωριούχο κοβάλτιο γίνεται σχεδόν πλήρως όταν η προσροφούμενη υγρασία φθάσει στο 7 με 10% της ξηρής μάζας του.

Με βάση τα παραπάνω, αλλά έχοντας επίσης υπόψιν ότι το μέγεθος κόκκων του ενεργού άνθρακα με του οποίου τις προσροφητικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά το Ραδόνιο ενδεχομένως να συγκρίνεται το Silica gel blue, είναι 1 – 3 mm (βλ. και Διάγραμμα 2.6) αποφασίστηκε ότι το Silica gel blue μπορεί να δοκιμασθεί ως προς την καταλληλότητά του για υλικό που προσροφά Ραδόνιο. Επίσης κρίθηκε ότι σκόπιμο είναι να δοκιμασθεί και το χρωματογραφικό Silica gel (Silica gel 60) ως προς την καταλληλότητά του για υλικό που προσροφά Ραδόνιο.

2.3.4 Τεχνική δοκιμή των silica gel

Δεδομένου ότι υπήρχε προηγούμενη εμπειρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σχετικά με τη χρήση των silica gel ως προσροφητικών υλικών αποφασίστηκε ότι δεν χρειάζεται να γίνουν πολλές ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές για την επαλήθευση των προσροφητικών ιδιοτήτων τους και τον έλεγχο της δυνατότητας αφύγρανσής του και αναγέννησής του με θέρμανση. Τουλάχιστον ως προς τη δυνατότητα προσρόφησης υγρασίας έχει αποδειχθεί από επανειλημμένες δοκιμές και αναφέρεται και στην βιβλιογραφία, ότι:

(α) Τα silica gel προσροφούν υγρασία, ο ρυθμός με τον οποίο προσροφάται η υγρασία εξαρτάται πολύ από τις πειραματικές συνθήκες.

(β) Τα silica gel γενικά προσροφούν και Ραδόνιο [βλ. π.χ. και Livingston (1933) και Burt (1948)], ο τρόπος και ο ρυθμός με τον οποίο προσροφάται το Ραδόνιο εξαρτάται από τις πειραματικές συνθήκες και είναι ερευνητικό αντικείμενο που θα εξετασθεί στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι για το προς εξέταση Silica gel blue, έχουν γίνει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στο παλελθόν πειράματα για τον προσδιορισμό του συνελεστή προσρόφησης Ραδονίου k (στα αγγλικά Radon adsorption constant- βλ. και Karangelos, 2003). Στα πειράματα αυτά βρέθηκε ότι το k του silica gel blue εκτιμάται σε $0.090 \pm 0.001 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, το οποίο είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το αντίστοιχο μέγεθος του ενεργού άνθρακα, που συνήθως βρίσκεται στην περιοχή 1 - 4 m^3kg^{-1} (βλ. π.χ. και Zikovsky, 1998).

(γ) Η αποκατάσταση των προσροφητικών ιδιοτήτων των silica gel για υγρασία, μπορεί να γίνεται με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται και για την

αποκατάσταση του ενεργού άνθρακα, όπως αυτό παρουσιάστηκε από τον Μαρινάκη (2007).

Σε σχέση με τις ενδεικτικές τεχνικές δοκιμές αποκατάστασης των προσροφητικών ιδιοτήτων των silica gel, απασχολεί επιπλέον και ο έλεγχος του αν οι τεχνικές αποκατάστασης επαναφέρουν τα silica gel που έχουν προσροφήσει Ραδόνιο σε silica gel χωρίς Ραδόνιο. Για το σκοπό αυτό οργανώθηκε η ακόλουθη πειραματική δοκιμή, που είναι εντελώς ανάλογη με εκείνη που οργανώθηκε για τον συνθετικό ζεόλιθο:

Silica gel blue "ξηρής" μάζας ~ 500 g, ελεύθερο από Ραδόνιο⁴, τοποθετήθηκε σε δύο μεταλλικά δοχεία, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Ο συνθετικός ζεόλιθος αναγεννήθηκε στην συνέχεια με θέρμανση σύμφωνα με το πρωτόκολλο αφύγρανσης του ενεργού άνθρακα που έχει παρουσιασθεί. Μετά το πέρας της αναγέννησης τα δοχεία με το silica gel blue σφραγίσθηκαν με το κάλυμμά τους και μετρήθηκαν για ολική γ ακτινοβολία επί 1000 s με ανιχνευτή τύπου NaI εντός θωράκισης από μολύβι και τα αποτελέσματα σημειώθηκαν. Στην συνέχεια τα δοχεία εκτέθηκαν σε συγκέντρωση Ραδονίου της τάξεως των 100 kBq m^{-3} , επί περίπου 48h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας περίπου 50%. Μετά την έκθεση τα δοχεία με το silica gel blue αναγεννήθηκαν και πάλι με την ίδια μέθοδο θέρμανσης σφραγίσθηκαν με το κάλυμμά τους και ξαναμετρήθηκαν για ολική γ ακτινοβολία. Τα αποτελέσματα της δεύτερης μέτρησης ολικής γ ακτινοβολίας βρέθηκαν να είναι απολύτως συγκρίσιμα με εκείνα της πρώτης μέτρησης πριν την έκθεση. Η δοκιμή αυτή επαναλήφθηκε τουλάχιστον δύο φορές. Από τη δοκιμή αυτή προκύπτει το συμπέρασμα:

Η αναγέννηση του silica gel blue (απομάκρυνση προσροφηθέντος Ραδονίου) με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τον ενεργό άνθρακα είναι δυνατή και επαναλήψιμη.

2.4. Παρουσίαση της παθητικής τεχνικής E-PERM™

2.4.1 Γενικά για τους ηλεκτρίτες

⁴ Εδώ εννοείται silica gel blue, το οποίο δεν έχει εκτεθεί ποτέ σε συγκεντρώσεις Ραδονίου ή silica gel blue, το οποίο έχει μεν εκτεθεί αλλά από την έκθεσή του αυτή έχουν περάσει τουλάχιστον 20 ημέρες και το τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο έχει διασπασθεί πλήρως.

Τα διηλεκτρικά στερεά υλικά τα οποία μπορεί να παραμένουν ασταθώς (στα αγγλικά quasi-permanently) φορτισμένα με στατικό ηλεκτρικό φορτίο ονομάζονται "ηλεκτρίτες" (στα αγγλικά electret, από την σύνθεση των όρων ELECTRICity και magnET – ο όρος εισήχθη το 1885 από τον Oliver Heaviside), κατ' αναλογία με τα υλικά μαγνήτες που διαθέτουν και συντηρούν ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Κατά τη διάρκεια του χρόνου που διατηρείται αυτό το ηλεκτρικό πεδίο, ο ηλεκτρίτης συμπεριφέρεται ως ένα πολωμένο δίπολο, στο οποίο υπάρχει ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (βλ. και Διάγραμμα 2.7). Από αυτήν την άποψη ο ηλεκτρίτης είναι το ηλεκτροστατικό ισοδύναμο ενός μόνιμου μαγνήτη. Η διαφορά του ηλεκτρίτη από τον πυκνωτή βρίσκεται στο ότι, το ηλεκτρικό πεδίο στον πυκνωτή, συντηρείται προσωρινά από εξωτερικά ηλεκτρικά αίτια και γενικά παύει να υπάρχει όταν αυτά εκλείψουν, λόγω των εμφανιζόμενων διαρροών. Αντίθετα το ηλεκτρικό πεδίο στον ηλεκτρίτη, μπορεί μεν να δημιουργείται από εξωτερικά αίτια αλλά συνεχίζει να υπάρχει μειούμενο εκθετικά με πολύ αργό ρυθμό ακόμα και όταν αυτά εκλείψουν διότι η φύση του υλικού είναι τέτοια που δεν παρουσιάζει έντονες διαρροές. Το ηλεκτρικό πεδίο ενός ηλεκτρίτη εκτιμάται με κατάλληλο βολτόμετρο. Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρίτων:

- "Ηλεκτρίτες πραγματικού φορτίου", οι οποίοι περιέχουν περίσσειες μόνο αρνητικών ή μόνο θετικών ή αρνητικών και θετικών φορτίων, σε διάφορες θέσεις του υλικού τους. Αυτοί οι ηλεκτρίτες διακρίνονται σε "επιφανειακά φορτισμένους" (οι περίσσειες φορτίων βρίσκονται στις εξωτερικές επιφάνειες) και σε "χωρικά φορτισμένους" (οι περίσσειες φορτίων βρίσκονται στο εσωτερικό του υλικού).
- "Ηλεκτρίτες προσανατολισμένου δίπολου", οι οποίοι περιέχουν προσανατολισμένα (ευθυγραμμισμένα) δίπολα.

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι ηλεκτρίτες είναι ευρέως διαδεδομένα στη φύση. Quartz και άλλες μορφές οξειδίων του πυριτίου είναι κάποια από αυτά. Σήμερα οι περισσότεροι ηλεκτρίτες κατασκευάζονται από συνθετικά πολυμερή με συνηθέστερο από όλα τα φθοροπολυμερή (στα αγγλικά fluoropolymers) με πιο γνωστό σήμερα το Teflon™. Η διηλεκτρική σταθερά μάλιστα του Teflon™ έχει τέτοιες τιμές που η αποφόρτιση του αντίστοιχου ηλεκτρίτη μπορεί να γίνει μόνο αν περάσουν πολλά χρόνια. Στο παρελθόν οι συνηθέστεροι ηλεκτρίτες είχαν βάση το κερί, τις φυσικές ρητίνες ή άλλα φυσικά πολυμερή. Οι τρόποι κατασκευής ποικίλουν. Ένας συνήθης τρόπος είναι η θέρμανση κατάλληλου διηλεκτρικού υλικού σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας

τήξης. Στη συνέχεια το υλικό αυτό ψύχεται μέσα σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό επαναδιατάσσει τους φορείς φορτίων ή ευθυγραμμίζει τα δίπολα μέσα στο υλικό. Όταν το υλικό ψύχεται η στερεοποίηση του "παγώνει" τα δίπολα ή τα φορτία στις διαταχθείσες θέσεις. Άλλος τρόπος παραγωγής είναι η ενσωμάτωση πολλών αρνητικών φορτίων μέσα στο διηλεκτρικό χρησιμοποιώντας έναν επιταχυντή σωματιδίων. Το φορτίο ενός ηλεκτρίτη είναι δυνατόν να επάγει ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο που μπορεί να έλκει ιόντα αντίθετου φορτίου.

2.4.2 Οι ηλεκτρίτες ως ανιχνευτές Ραδονίου

Είναι γνωστό ότι ο βασικός λόγος εκφόρτισης ενός ηλεκτρίτη είναι η συλλογή στην επιφάνεια του, ιόντων αντίθετου από αυτήν φορτίου, από τον αέρα που το περιβάλλει. Η ποσότητα των ιόντων που συλλέγονται και ο ρυθμός της εκφόρτισης εξαρτάται και από την επιφάνεια του ηλεκτρίτη που εκτίθεται στον περιβάλλοντα αέρα. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις ο Marvin (1955) πρότεινε να χρησιμοποιούνται ηλεκτρίτες στο εσωτερικό ενός κλειστού θαλάμου με αέρα ως δοσίμετρα γ ακτινοβολίας. Η γ ακτινοβολία όταν αλληλεπιδρά με τον αέρα του θαλάμου, ιονίζει την ατμόσφαιρα του θαλάμου (αρχή λειτουργίας του λεγόμενου "θαλάμου ιονισμού") και τα παραγόμενα ιόντα εκφορτίζουν τον περιεχόμενο ηλεκτρίτη. Ο Bauser (1978), και αργότερα ο Kotrappa (1982) και ο Pretsch (1983), κάνοντας χρήση electrets από Teflon™ με κατάλληλο σχήμα, κατάφεραν να μετρήσουν τα ιόντα, τα οποία παράγονται σε ένα τέτοιο θάλαμο ιονισμού, και επιβεβαίωσαν ότι οι μετρήσεις τους συνδέονται με την προσπίπτουσα γ ακτινοβολία, όντας μάλιστα ανεξάρτητες από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Δεδομένου ότι διαπιστώθηκε επίσης ότι αυτή η τεχνική μπορεί να μετρήσει και το πλήθος των ιόντων που παράγονται από τον ιονισμό του αέρα του θαλάμου από διασπώμενα ισότοπα που εκπέμπουν α ακτινοβολία και βρίσκονται μέσα στην ατμόσφαιρα του θαλάμου, ο Kotrappa (1988) τροποποίησε κατάλληλα τον θάλαμο ιονισμού ώστε το Ραδόνιο του περιβάλλοντος να μπορεί να διαχέεται προς το εσωτερικό του θαλάμου και η συγκέντρωσή του να μετράται από τα θυγατρικά του που εκπέμπουν α ακτινοβολία. Η μέθοδος ονομάστηκε παθητική τεχνική E-PERM™ (Electret - Passive Environmental Radon Monitor – Kotrappa, 1990). Μια τυπική μορφή εμπορικά χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή Ραδονίου τύπου E-PERM™ παρατίθεται στο Διάγραμμα 2.8. Ο ανιχνευτής αυτός αποτελείται από έναν μικρό κυλινδρικό θάλαμο, τυπικού όγκου περί τα 200 mL αν πρόκειται να χρησιμοποιείται για βραχυ-μεσοπρόθεσμες μετρήσεις

διαρκείας 2 – 60 ημερών και τυπικού όγκου περί τα 50 mL αν πρόκειται να χρησιμοποιείται για μεσο-μακροπρόθεσμες μετρήσεις διαρκείας 30 – 365 ημερών. Σε κάθε περίπτωση ο θάλαμος περιέχει ένα φορτισμένο electret από Teflon™ τοποθετημένο στον πυθμένα. Η φόρτιση του electret μετρούμενη με κατάλληλο βολτόμετρο μπορεί να φθάνει και τα 750 V. Στο άνω άκρο του κυλίνδρου βρίσκεται τοποθετημένο ένα είδος φίλτρου που επιτρέπει τη διάχυση του αέρα της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας στο εσωτερικό του θαλάμου. Το Ραδόνιο του περιβάλλοντος εισέρχεται στο θάλαμο μαζί με τον διαχεόμενο αέρα ενώ το φίλτρο εμποδίζει να εισέρθουν στο θάλαμο τα στερεά θυγατρικά του Ραδονίου και τυχόν άλλοι στερεοί ρύποι. Καθώς νέα θυγατρικά του Ραδονίου παράγονται μέσα στον θάλαμο εκλύεται α ακτινοβολία, η οποία ιονίζει τα μόρια του αέρα εντός του θαλάμου. Τα ιόντα αυτά όπως αναφέρθηκε συλλέγονται από το electret, εκφορτίζοντάς το σε ποσοστό ανάλογο με την επικρατούσα συγκέντρωση του Ραδονίου στο θάλαμο επί το χρόνο που αυτή διαρκεί. Όσο η φόρτιση του electret παραμένει πάνω από 200 V, το ποσοστό εκφόρτισης συνδέεται γραμμικά με την επικρατούσα συγκέντρωση του Ραδονίου στο θάλαμο επί το χρόνο που αυτή διαρκεί. Το ποσοστό εκφόρτισης του electret μετράται με το κατάλληλο βολτόμετρο. Κατά συνέπεια ο ανιχνευτής E-PERM™ λειτουργεί ως ένας ολοκληρωτικός (integrating) θάλαμος ιονισμού, όπου τα electrets χρησιμοποιούνται όχι μόνο ως η πηγή της υψηλής τάσης (του ηλεκτροστατικού πεδίου) αλλά και ως καταμετρητής των παραγόμενων ιόντων. Ο θάλαμος του ανιχνευτή E-PERM™ δεν είναι ευαίσθητος προφανώς μόνο στους ιονισμούς που προκαλούνται από τις α διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου. Είναι επίσης ευαίσθητος και στην γ ακτινοβολία του περιβάλλοντος, όπως εξάλλου κάθε θάλαμος ιονισμού με ηλεκτρίτη. Ο θάλαμος του ανιχνευτή E-PERM™ είναι κατασκευασμένος από υλικό με μικρό ατομικό αριθμό και μάλιστα αγώγιμο, ώστε (α) να είναι ελάχιστος ο ιονισμός του υλικού και η συνακόλουθη εκφόρτιση του ηλεκτρίτη από τη γ ακτινοβολία του φυσικού περιβάλλοντος που αλληλεπιδρά με αυτό και (β) να είναι ελάχιστη η ηλεκτροστατική φόρτιση του υλικού από τη γ ακτινοβολία του φυσικού περιβάλλοντος και να μην παρουσιάζονται μέσα στο θάλαμο ανταγωνιστικοί ηλεκτρίτες. Έτσι για το σκοπό αυτό προτιμώνται ηλεκτρικά αγώγιμα πλαστικά.

2.4.3 Αβεβαιότητα και κατώτερο όριο ανίχνευσης της τεχνικής E-PERM™

Για βαθμονομήσεις της μεθόδου που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεντρώσεις Ραδονίου περί τα 3000 Bqm⁻³ διαπιστώθηκε από τον Kotrappa (1990) τόσο για βραχυ-μέσο όσο

και για μεσο-μακροπρόθεσμες μετρήσεις πιθανό σφάλμα περί το 6%. Φαίνεται ότι το σφάλμα αυτό παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα για συγκεντρώσεις Ραδονίου μέχρι και 500 Bqm^{-3} αλλά φυσικά αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερο για μικρότερες συγκεντρώσεις [βλ. π.χ. και Denman (2005), και Sun (2006)]. Το κατώτερο όριο ανίχνευσης εκτιμάται από τον Kotrappa (1990) σε $10 - 30 \text{ Bqm}^{-3}$ για όλα τα είδη διάρκειας των μετρήσεων και φυσικά όσο μεγαλύτερης διάρκειας είναι η μέτρηση τόσο χαμηλότερο είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης. Έχει επίσης υπολογισθεί ότι ένας θάλαμος E-PERM™ όγκου 200 mL εξαντλεί την φόρτισή του (έχει δηλαδή φθάσει σε τάση κάτω από το όριο των 200 V και πρέπει να αλλάξει electret) όταν εκτεθεί σε $9000 \text{ Bqm}^{-3} \text{ days}$, ενώ ένας θάλαμος electret όγκου 50 mL εξαντλεί την φόρτισή του όταν εκτεθεί σε $100000 \text{ Bqm}^{-3} \text{ days}$.

2.5. Ποιοτική σύγκριση κυριότερων βραχυπρόθεσμων τεχνικών

Γίνονται δεκτές σε αυτό το σημείο ως κυριότερες βραχυπρόθεσμες παθητικές τεχνικές μέτρησης συγκέντρωσης Ραδονίου στον αέρα του περιβάλλοντος οι δύο εμπορικά διαθέσιμες:

- (α) Η τεχνική των μεταλλικών δοχείων με προσροφητικό υλικό ενεργό άνθρακα, και
- (β) Η τεχνική E-PERM™

Μία ικανοποιητική πειραματική σύγκριση των δύο αυτών τεχνικών γίνεται από τον Sun (2006). Κατά τα σχετικά πειράματα έγιναν εκθέσεις πολλών ανιχνευτών σε ονομαστική συγκέντρωση Ραδονίου περί τα 300 Bqm^{-3} , σε συνθήκες θερμοκρασίας περί τους 16° C και σχετικής υγρασίας περί το 80%, στο υπόγειο ενός αγροκτήματος κοντά στο Πανεπιστήμιο της Iowa. Οι ανιχνευτές με ενεργό άνθρακα παρουσίασαν επαναληψιμότητα με πιθανό σφάλμα από 12 έως 30%. Η μέση απόκλιση από την ονομαστική συγκέντρωση Ραδονίου των ανιχνευτών με ενεργό άνθρακα βρέθηκε να είναι από 10 έως 30%. Οι ανιχνευτές E-PERM™ παρουσίασαν επαναληψιμότητα με πιθανό σφάλμα από 8 έως 15%. Η μέση απόκλιση από την ονομαστική συγκέντρωση Ραδονίου των ανιχνευτών E-PERM™ βρέθηκε να είναι περί το 4 – 5%.

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα για την επαναληψιμότητα των ανιχνευτών ενεργού άνθρακα, αυτά φαίνονται να επαληθεύουν τις εκτιμήσεις του Μαρινάκη (2007), οποίος υπολόγισε κατά προσέγγιση μία τιμή πιθανής αβεβαιότητας περί το 20%. Εύλογα

αναμένεται ότι η ίδια αβεβαιότητα θα διαπιστωθεί στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ και για άλλα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά, όπως π.χ. ο συνθετικός ζεόλιθος.

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα για την μέση απόκλιση από την ονομαστική συγκέντρωση Ραδονίου των ανιχνευτών με ενεργό άνθρακα, δεν μπορεί να εκφρασθεί γνώμη διότι οι ανιχνευτές που βαθμονομήθηκαν στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007) δεν συμμετείχαν σε κάποια διαβαθμονόμηση (intercomparison) άγνωστης συγκέντρωσης αναφοράς προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα. Το ίδιο ισχύει και για τους ανιχνευτές με άλλα προσροφητικά υλικά που θα βαθμονομηθούν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ.

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα για την τεχνική E-PERM™, τόσο για την επαναληψιμότητα, όσο και για την ακρίβεια, αυτά κρίνονται σαφώς καλύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα για τους ανιχνευτές ενεργού άνθρακα. Παρόλα αυτά, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν υπάρχει σχετική εμπειρία με τους ανιχνευτές E-PERM™. Ελπίζεται ότι σύντομα θα αποκτηθεί. Οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με αυτήν την τεχνική, συμφωνούν ότι δεν φαίνεται να υπάρχει επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην απόδοση των σχετικών ανιχνευτών. Από την άλλη μεριά φαίνεται να υπάρχει επίδραση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Το μέτρο της επίδρασης αυτής δεν έχει ακόμα πειραματικά διαπιστωθεί με σαφήνεια [δες και Denman (2005)].

Σε περιπτώσεις πάντως ακραίων, συνεχώς και γενικά ταχέως μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών και συγκεντρώσεων Ραδονίου, όπως π.χ. σε οπές σε έδαφος αγρού βάθους 50 cm και διαμέτρου 15 cm ή σε παρόμοιες οπές στην κορυφή του ενεργού ηφαιστείου Stromboli [βλ. και Gervino (2004)], η αβεβαιότητα των μετρήσεων με ενεργό άνθρακα και ανιχνευτές E-PERM™ αυξάνει πολύ σημαντικά. Στην περίπτωση μάλιστα του εδάφους του ηφαιστείου, η μέτρηση με τον ενεργό άνθρακα δεν είναι δυνατή λόγω της ύπαρξης πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας και άλλων προσροφούμενων αερίων στο αέριο του εδάφους, στο εσωτερικό του εδάφους.

2.6 Παρατηρήσεις – σχόλια

Σύμφωνα με τη διαπραγμάτευση που προηγήθηκε φαίνεται ότι υπάρχει ερευνητικό έδαφος για τη διαπίστωση του πόσο καλά αποδίδουν ως ανιχνευτές Ραδονίου διάφορα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά όπως τα silica gel και οι συνθετικοί ζεόλιθοι. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν να δοκιμασθούν και να βαθμονομηθούν ως βραχυπρόθεσμες

παθητικές τεχνικές ανίχνευσης Ραδονίου συγκεκριμένοι τύποι τέτοιων εναλλακτικών υλικών, όπως αυτά διατίθενται από την εταιρεία χημικών προϊόντων Merck. Οι κυριότεροι λόγοι που μας οδήγησαν στο να οργανώσουμε μια τέτοια πειραματική διαδικασία είναι:

- (α) *Οι συνθετικοί ζεόλιθοι και τα silica gel έχουν έντονες προσροφητικές ιδιότητες.*
- (β) *Οι συνθετικοί ζεόλιθοι και τα silica gel προσροφούν Ραδόνιο.*
- (γ) *Τόσο οι συνθετικοί ζεόλιθοι όσο και τα silica gel αποβάλλουν τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο, υγρασία και άλλα αέρια του περιβάλλοντος όταν θερμανθούν με κατάλληλο τρόπο, υπό κατάλληλη θερμοκρασία για κατάλληλο χρονικό διάστημα. Με την θέρμανση αυτή αποκαθιστώνται οι προσροφητικές τους ιδιότητες.*

Με την πειραματική διαδικασία θα διαπιστωθούν κυρίως:

- (1) *Ο βαθμός απόδοσης αυτών των εναλλακτικών προσροφητικών υλικών σε συνάρτηση και με την σχετική υγρασία του περιβάλλοντος*
- (2) *Ο βαθμός απόδοσης των υλικών αυτών σε σύγκριση με εκείνο του ενεργού άνθρακα, και*
- (3) *Το κατώτερο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου, όλων των εδώ διαθέσιμων προσροφητικών υλικών.*

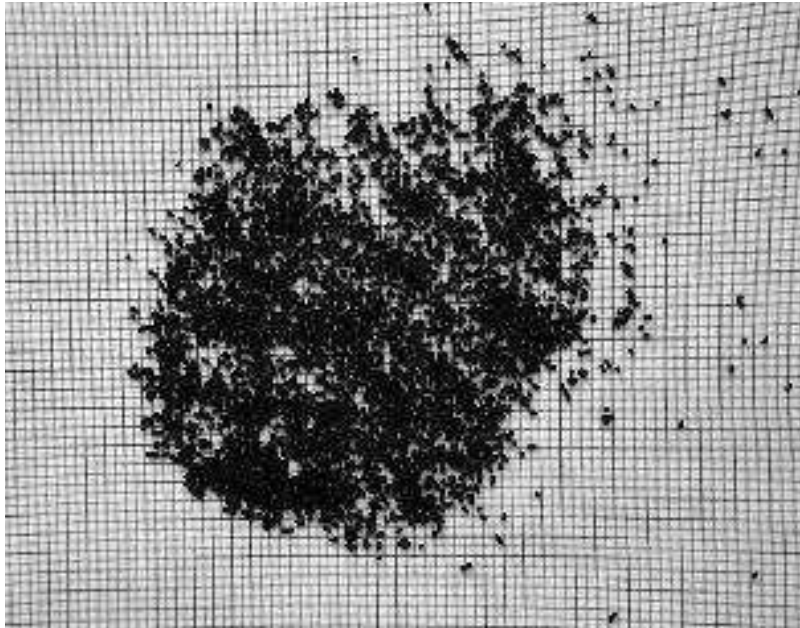
Σε σχέση με την τεχνική E-PERM™, η προηγούμενη ανάλυση (§ 2.4.3) έδειξε ότι τα κατώτερα όρια ανίχνευσής της, είναι απόλυτα συγκρίσιμα με εκείνα της τεχνικής του ενεργού άνθρακα [για τα κατώτερα όρια ανίχνευσης του ενεργού άνθρακα βλ. π.χ. και George (1984), Μαρινάκης (2007)]. Επομένως, το πιθανό κριτήριο για την επιλογή ποιας από τις δύο μεθόδους μπορεί να χρησιμοποιείται είναι προφανώς το κόστος της μέτρησης. Η τεχνική E-PERM™ διαφημίζεται από αυτήν την άποψη ως πολύ οικονομική κυρίως διότι:

"Οι ανιχνευτές μπορούν να μετρώνται κοντά στον τόπο της έκθεσης από εξοπλισμό σχετικά χαμηλού κόστους, και δεν χρειάζεται να αποστέλλονται μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε Εργαστήρια που διαθέτουν ανιχνευτές NaI, όπως αυτό κατά κανόνα συμβαίνει για μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα".

Παρόλαυτά, όπως έδειξε ο Μαρινάκης (2007), το ίδιο καλά μπορούν να μετρώνται κοντά στον τόπο της έκθεσης και μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα από φορητούς ανιχνευτές NaI σχετικά χαμηλού κόστους μέσα σε φορητές θωρακίσεις. Μάλιστα η

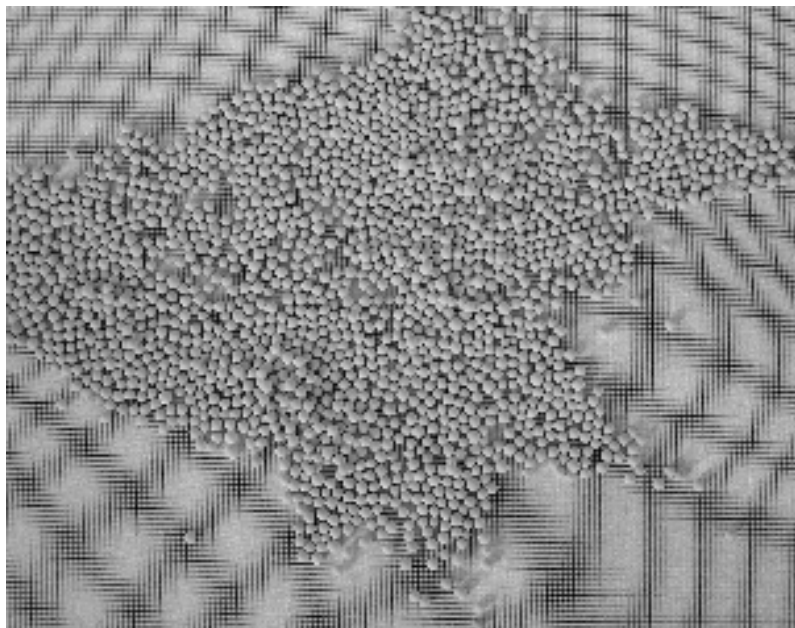
αναγέννηση του ενεργού άνθρακα μπορεί να γίνεται και κοντά στον τόπο της έκθεσης ακόμα και σε απλούς μικρούς φούρνους με θερμοστατικό έλεγχο. Αναμένεται ότι η προγραμματιζόμενη πειραματική διαδικασία θα δείξει αν μπορεί να ισχύει το ίδιο οικονομοτεχνικό συμπέρασμα για εναλλακτικά προσροφητικά υλικά.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 2.1

Ο ενεργός άνθρακας πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: εκτίμηση διαστάσεων και μορφής κόκκου.

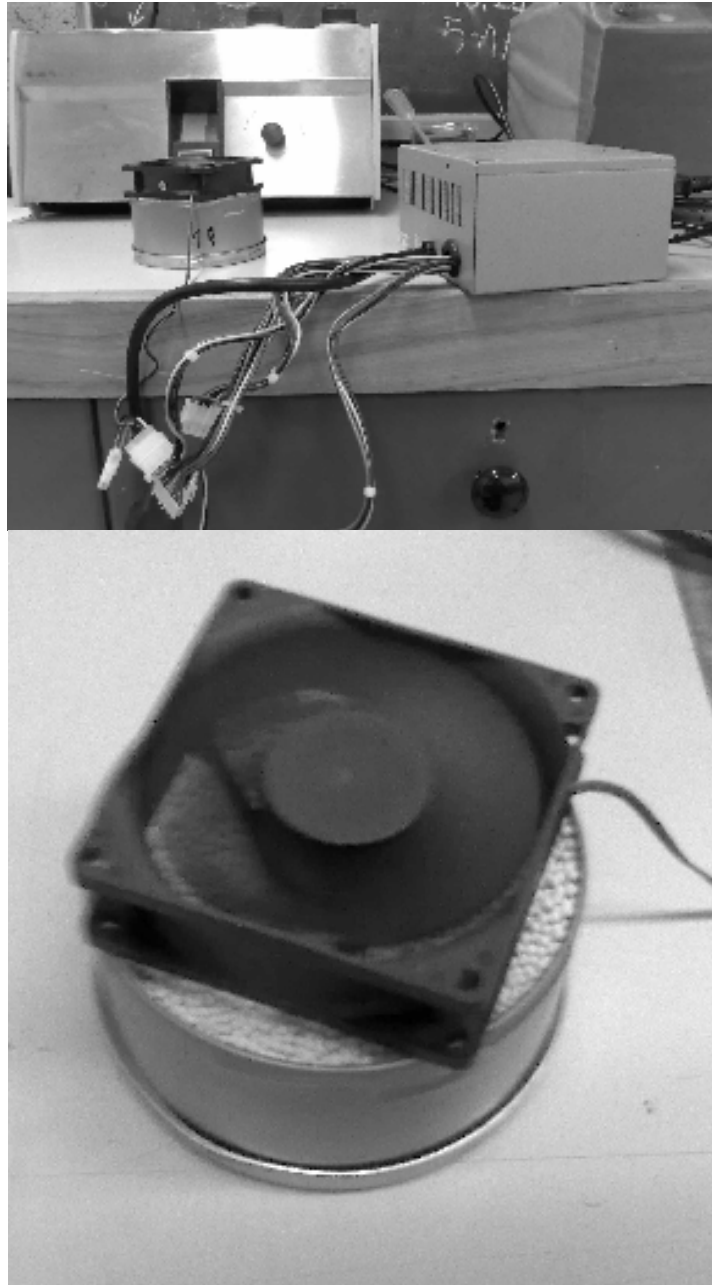


Διάγραμμα 2.2

Ο συνθετικός ζεόλιθος πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: αναγνώριση διαστάσεων και μορφής κόκκου.

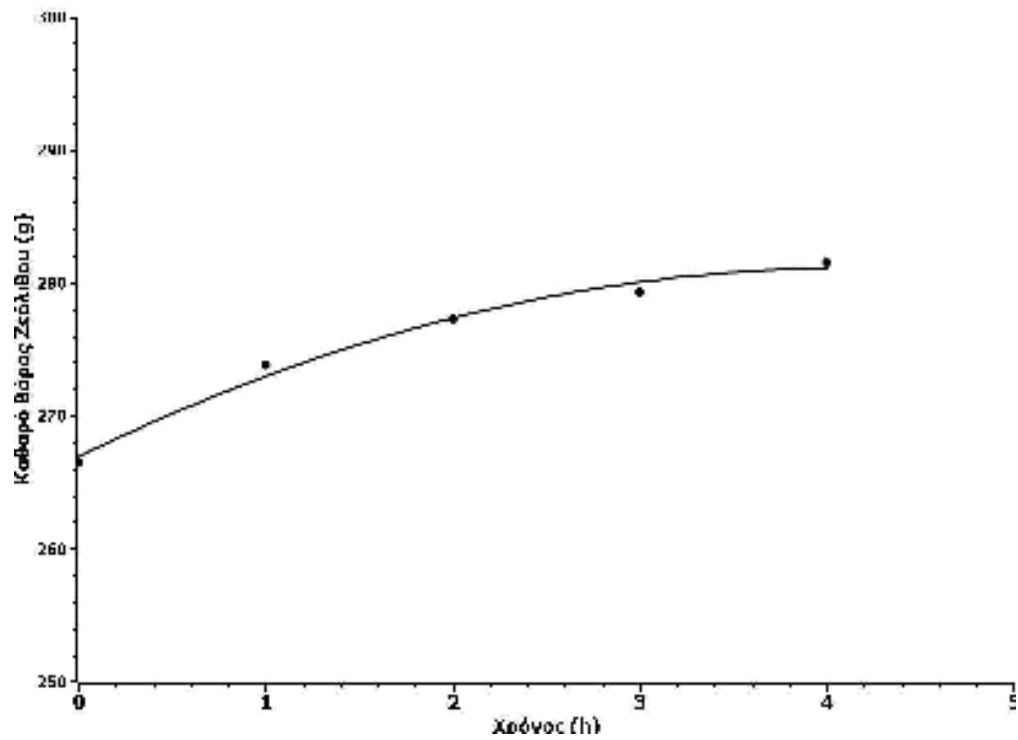


Διάγραμμα 2.3
Υάλινη συσκευασία συνθετικού ζεολίθου.



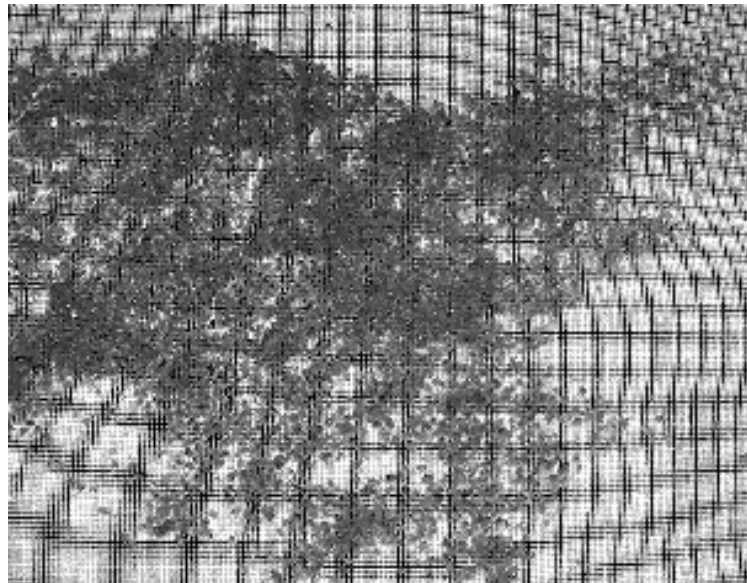
Διάγραμμα 2.4

Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής προσρόφησης υγρασίας στον συνθετικό ζεόλιθο.



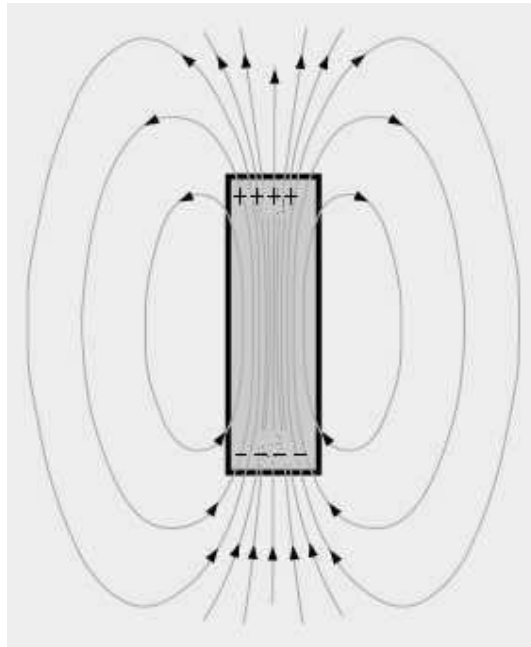
Διάγραμμα 2.5

Γραφική παράσταση ρυθμού προσρόφησης υγρασίας στον ζεόλιθο, με τη χρήση της πειραματικής διάταξης του Διαγράμματος 2.4.



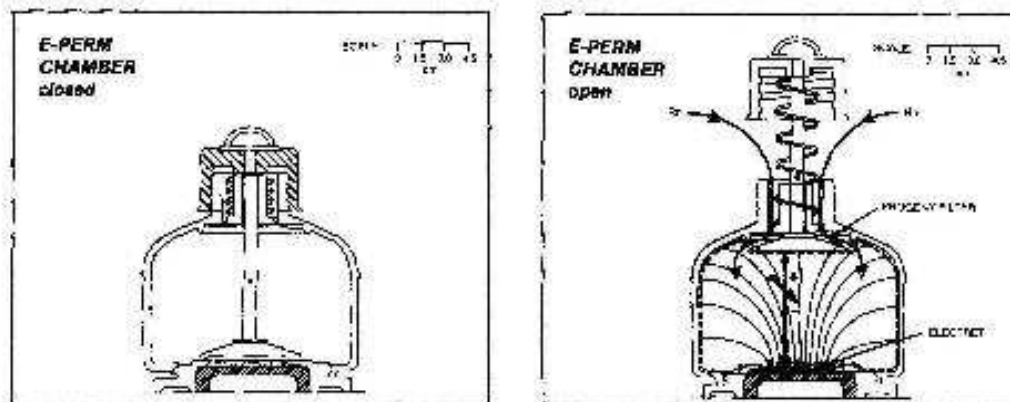
Διάγραμμα 2.6

Το Silica gel blue πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: αναγνώριση διαστάσεων και μορφής κόκκου.



Διάγραμμα 2.7

Γραφική απεικόνιση ηλεκτροστατικού πεδίου ηλεκτρική.



Διάγραμμα 2.8

Ανιχνευτής Ραδονίου τύπου E-PERM™. Όταν ο θάλαμος είναι κλειστός (closed, σχήμα αριστερά) δεν μετράται Ραδόνιο. Όταν ο θάλαμος είναι ανοιχτός (open, σχήμα δεξιά) μετράται Ραδόνιο (Kotrappa, 1990).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Όπως σημειώθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, την αρχική ιδέα των μεταλλικών κυλινδρικών δοχείων, τα οποία πληρώνονται με κατάλληλο υλικό που έχει προσροφητικές ιδιότητες και μπορεί να κατακρατά στην μάζα του Ραδόνιο, προκειμένου, να χρησιμοποιηθούν για ολοκληρωτικές μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων, ανέπτυξε πλήρως ο George (1984). Ως προσροφητικό υλικό χρησιμοποιήθηκε από τον George (1984) ο ενεργός άνθρακας. Στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007), έγιναν για πρώτη φορά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πειράματα βαθμονόμησης τέτοιων μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα. Οι πηγές της αβεβαιότητας του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε, οδήγησαν σε προτάσεις βελτιστοποίησης των αντίστοιχων πειραμάτων με στόχο τη μείωση της αβεβαιότητας. Οι προτάσεις αυτές, συνοψίζονται από τον Μαρινάκη (2007) στο 5^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής του Εργασίας. Στο παρόν 3^ο Κεφάλαιο, θα αναλυθούν ορισμένες από αυτές τις προτάσεις βελτιστοποίησης και θα εξετασθεί πώς θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Πιο συγκεκριμένα κατ' αρχήν θα σχολιασθεί η καταλληλότητα του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης και θα παρουσιασθούν τεχνικές ποιοτικού ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο του βαθμού απόδοσης του ανιχνευτή. Στη συνέχεια θα εξετασθούν θέματα που αφορούν στην βελτιστοποίηση των πειραμάτων έκθεσης. Τέλος θα παρουσιασθεί το λογιστικό φύλλο συγκέντρωσης και αξιοποίησης πειραματικών αποτελεσμάτων.

3.2 Έλεγχος καταλληλότητας δοχείου βαθμονόμησης

Όπως επισημαίνεται από τον Μαρινάκη (2007), το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης καλό είναι να μην περιέχει –κατά το δυνατόν– ισότοπα εκτός από το ^{226}Ra και τα θυγατρικά του (όπως π.χ. το ^{40}K και τα ισότοπα του φυσικού Ουρανίου και του φυσικού Θορίου), ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα στον συντελεστή απόδοσης των Ιωδιούχων Νατρίων ή όποιων άλλων ανιχνευτικών διατάξεων φωτονίων από οποιαδήποτε τυχόν επιπλέον ισότοπα που παράγουν φωτόνια. Μάλιστα προτείνεται από

τον Μαρινάκη το ΕΠΤ-ΕΜΠ να προχωρήσει σε κατασκευή μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, σύμφωνα με τον τρόπο που ακολουθήθηκε από την EPA-US και αναφέρεται από τον Gray (1987).

Συγκεκριμένα το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης της EPA – US έχει κατασκευασθεί ως εξής:

- 70 g ενεργού άνθρακα τοποθετήθηκαν μέσα στο μεταλλικό δοχείο που χρησιμοποιεί η EPA-US, και διαποτίσθηκαν με υγρό διάλυμα ^{226}Ra που περιείχε 20.5 nCi (740 Bq). Στη συνέχεια το μεταλλικό δοχείο θερμάνθηκε ήπια ώστε να εξατμισθεί όλο το υγρό από τον ενεργό άνθρακα.
- μετά από αυτή τη διαδικασία το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης στεγανοποιήθηκε και αφέθηκε σε ασφαλές μέρος επί 30 ημέρες, ώστε να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του περιεχόμενου Ραδίου, του Ραδονίου και των θυγατρικών του.

Αντίθετα το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει κατασκευασθεί ως εξής:

- μεταλλικό δοχείο σαν αυτό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, πληρώθηκε "μέχρι επάνω" με 286.5 g από το δείγμα ιπτάμενης τέφρας από τον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό Μεγαλόπολεως με κωδικό αριθμό MS271. Σύμφωνα με αναλύσεις που έχουν γίνει στους ανιχνευτές Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, έχει διαπιστωθεί ότι η υπ' όψιν τέφρα περιέχει 988.5 Bqkg^{-1} (βλ. και Πίνακα 3.1), με πιθανό σφάλμα 6%¹. Κατά συνέπεια το μεταλλικό δοχείο με αυτήν την τέφρα περιέχει 284.2 Bq.
- μετά από αυτή τη διαδικασία το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης στεγανοποιήθηκε και αφέθηκε σε ασφαλές μέρος επί 30 ημέρες, ώστε να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του περιεχόμενου Ραδίου, του Ραδονίου και των θυγατρικών του.

Το πρόβλημα με το δοχείο βαθμονόμησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε σχέση με το αντίστοιχο δοχείο βαθμονόμησης της EPA-US, είναι ότι το πρώτο περιέχει και ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια και τα οποία δεν είναι θυγατρικά του Ραδονίου, με πιθανή συνέπεια τα φωτόνια αυτά κατ' αρχήν να επηρεάζουν την βαθμονόμηση απόδοσης της μεθόδου, η οποία γίνεται με αυτό το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης. Τα κυριότερα από αυτά τα ισότοπα είναι κατά μαζικό αριθμό (βλ. και Πίνακα 3.2):

¹ βλ. και Αναγνωστάκης (2007)

Το Κάλιο-40, το Θάλιο-208, ο Μόλυβδος-212, το Ράδιο-226, το Ακτίνιο-228, το Ράδιο-228, το Θόριο-228, το Θόριο-232, το Θόριο-234 και το Ουράνιο-238.

Με βάση τους Πίνακες 3.1, και 3.2 μπορεί να γίνει η ακόλουθη παρατήρηση:

Όλα τα πιοπάνω ισότοπα παρουσιάζουν τουλάχιστον μία από τις παρακάτω τέσσερις ιδιότητες:

α) μεγάλο χρόνο ημιζωής ή/και

β) πολύ μικρή ενέργεια εκπεμπόμενων φωτονίων (< 200 keV) ή πολύ μεγάλη ενέργεια φωτονίων (> 1 MeV) ή/και

γ) πολύ μικρό ποσοστό εκπομπής φωτονίων ή/και

δ) βρίσκονται σε μικρή γενικά συγκέντρωση στην χρησιμοποιούμενη ιπτάμενη τέφρα

Οι ιδιότητες (α), (γ) και (δ) δηλώνουν ότι η εκπομπή φωτονίων από τα ισότοπα αυτά είναι μάλλον σπάνια, ενώ η ιδιότητα (β) δηλώνει ότι τα εκπεμπόμενα φωτόνια είναι πολύ χαμηλής ενέργειας για να μπορέσουν να διαπεράσουν το μεταλλικό κέλυφος ενός ανιχνευτή Ιωδιούχου Νατρίου (NaI) ή πολύ υψηλής ενέργειας ώστε να αλληλεπιδράσει με αυτόν (τον διαπερνούν χωρίς να ανιχνεύονται). Με βάση τις ιδιότητες (α), (β), (γ) και (δ) είναι δυνατόν να απομονωθούν από τον Πίνακα 3.1 ως πλέον σημαντικά τα ισότοπα που συγκεντρώνουν λιγότερες από τρεις τέτοιες ιδιότητες, δηλ. τα:

K-40, Tl-208, Pb-212, Ra-226 και Ac-228

Μπορεί επιπλέον να υποτεθεί ότι όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια από αυτά τα ισότοπα δεν επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό απόδοσης που εκτιμάται με τη βοήθεια μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης που περιέχει ιπτάμενη τέφρα.

Προκειμένου να ελεγχθεί η υπόθεση αυτή πραγματοποιήθηκε το ακόλουθο πείραμα:

1. Λήφθηκε ολοκληρωτική μέτρηση διάρκειας 1000 s με τον φορητό ανιχνευτή NaI της VICTOREEN εντός θωράκισης από υγρό διάλυμα Ραδίου-226 με γνωστή συγκέντρωση (101.8 kBqkg^{-1} , βλ. και Πίνακα 3.3) και κωδικό MERA6872 (βλ. και φωτογραφίες του Διαγράμματος 3.1), το οποίο διατίθεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ως πρότυπο υλικό από την συμμετοχή του Εργαστηρίου σε διαβαθμονομήσεις που διοργανώθηκαν μεταξύ 1993 – 1995 υπό την αιγίδα της EUROMET (<http://www.euromet.org>), (βλ. και Dean, 1994; 1996). Η μία μοναδική μέτρηση έδειξε 3.1×10^6 counts.

2. Λήφθηκε ολοκληρωτική μέτρηση διάρκειας 1000 s με τον φορητό ανιχνευτή NaI της VICTOREEN εντός θωράκισης από δείγμα ιπτάμενης τέφρας γνωστής συγκέντρωσης Ραδίου (1.02 kBqkg^{-1} , βλ. και Πίνακα 3.4) και κωδικό PMP4P181 (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 3.2), το οποίο διατίθεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ως υλικό από δειγματοληψίες ιπτάμενης τέφρας στον Λιγνιτικό ΑΗΣ Μεγαλόπολη –B (Μονάδα IV) που διοργανώθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1990 (1997) (βλ. και Karangelos, 2004). Η μία μοναδική μέτρηση έδειξε 3.9×10^4 counts.
3. Λήφθηκε ολοκληρωτική μέτρηση υποστρώματος διάρκειας 1000 s με τον φορητό ανιχνευτή NaI της VICTOREEN εντός θωράκισης. Η μία μοναδική μέτρηση έδειξε 4072 counts (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 3.3).
4. Δεδομένου ότι: και τα δύο δείγματα ήταν τοποθετημένα σε όμοιες συσκευασίες όγκου και μετρήθηκαν με την ίδια γεωμετρία, στην οποία επιπλέον μετρήθηκε και το υπόστρωμα (βλ. και φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 3.1, 3.2 και 3.3) και ότι: η μάζα των δειγμάτων μπορεί να θεωρηθεί όση σημειώνεται στην βάση δεδομένων που τηρείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (δηλ. για το δείγμα με κωδικό MERA6872 ίση με 0.265 kg και για το δείγμα PM4P181 ίση με 0.275 kg) οι δύο μετρήσεις συγκρίνονται με την σύγκριση των εξής ποσοτήτων:

$$\text{μέτρηση "1": } \frac{3.1 \times 10^6}{101.8 \times 0.265} = 0.115 \times 10^6$$

$$\text{μέτρηση "2": } \frac{3.9 \times 10^4 - 0.4 \times 10^4}{1.02 \times 0.275} = 0.125 \times 10^6$$

Η ποσοστιαία διαφορά αυτών των ποσοτήτων εκτιμάται ("εκτιμάται" επειδή προέκυψε από μία μοναδική μέτρηση) σε περίπου 8%. Η διαφορά αυτή δεν είναι σημαντική αν συγκριθεί με το πιθανό σφάλμα 6% του υπολογισμού της συγκέντρωσης του Ραδίου-226, στο μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης, όπως παρουσιάζεται από τον Μαρινάκη (2007).

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό, ότι δεν είναι απαραίτητο, να αλλάξει η συγκρότηση του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, σύμφωνα με την προτυποποίηση που προτείνεται από την EPA-US. Σε αυτό το συμπέρασμα, συνηγορεί και ένας επιπλέον λόγος: Ακόμα και αν ακολουθηθεί η προτυποποίηση της EPA-US, το μεταλλικό δοχείο

βαθμονόμησης που θα προκύψει, θα είναι απαλλαγμένο από τα K-40, Tl-208, και Pb-212 αλλά θα περιέχει ικανές ποσότητες από Ra-226.

3.3 Αποτελεσματικότερος έλεγχος βαθμού απόδοσης ανιχνευτή

Η εμπειρία με τους ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου που χρησιμοποιούνται έχει δείξει ότι δεν υπάρχει ουσιαστική κύμανση της απόδοσής τους με το χρόνο. Είναι προφανές όμως ότι για μία ποιοτικά ασφαλή διαδικασία βαθμονόμησης, η απόδοση των ανιχνευτών αυτών πρέπει να ελέγχεται συχνά. Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ αποφασίσθηκε ο έλεγχος του βαθμού απόδοσης του ανιχνευτή NaI VICTOREEN να γίνεται κάθε φορά που πρέπει να μετρηθεί ένα εκτεθέν μεταλλικό δοχείο διότι πρέπει να υπάρχει βεβαιότητα για την ακρίβεια των μεθόδων. Για το σκοπό αυτό έγιναν οι ακόλουθες ενέργειες:

α) πέρα από το διαθέσιμο μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης κατασκευάσθηκαν τα ακόλουθα μόνιμα μεταλλικά δοχεία υποστρώματος:

- ενεργού άνθρακα,
- συνθετικού ζεόλιθου,
- silica gel, και
- silica gel blue

Επιπλέον:

β) συγκροτήθηκαν λογιστικά φύλλα MS Excel[®], τα οποία προβαίνουν αυτόματα στον υπολογισμό της απόδοσης του ανιχνευτή VICTOREEN, κάθε φορά που χρειάζεται να μετρηθεί ένα εκτεθέν μεταλλικό δοχείο.

3.3.1 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με ενεργό άνθρακα

Για την κατασκευή ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Τοποθετήθηκε στο φούρνο το κάλυμμα του δοχείου και παρέμεινε για 10-12 h ώστε να καταστραφεί (καεί) το παρέμβυσμα στεγανότητας. Την επόμενη αφαιρέθηκαν πλήρως τα υπολείμματα του παρεμβύσματος.
- Ζυγίστηκε το μεταλλικό δοχείο μαζί με το τροποποιημένο κάλυμμά του, και βρέθηκε να έχει απόβαρο 77.3 g.

- Τοποθετήθηκε στο φούρνο ο ενεργός άνθρακας που θα πληρώσει το δοχείο υποστρώματος. Θερμάνθηκε ήπια στους 120 °C για 10-12 h ώστε να αφυγρανθεί [George (1984), Μαρινάκης (2007)].
- Το μεταλλικό δοχείο πληρώθηκε "μέχρι επάνω" με τον ενεργό άνθρακα, που είχε ήδη αφυγρανθεί. Το γεμάτο δοχείο σφραγίστηκε με το κάλυμμα του. Το μικτό βάρος μετρήθηκε σε 236.5 g.
- Τοποθετήθηκε στην περιφέρεια του καλύμματος, στο σημείο μεταξύ καλύμματος και δοχείου, για λόγους στεγανότητας στρώμα σιλικόνης. Αυτό το βήμα αναφέρθηκε και από τον Μαρινάκη (2007) ως η ορθότερη μέθοδος σφραγίσματος του δοχείου. Το μικτό βάρος του δοχείου μετά την εφαρμογή της σιλικόνης βρέθηκε ίσο 239.5 g. Η κατά μεταγενέστερα διαστήματα επανάληψη της τελευταίας ζύγισης, κατά το επόμενο της σφράγισης εξάμηνο, δίνει ίδιο αποτέλεσμα και αποδεικνύει ότι το μεταλλικό δοχείο με τον ενεργό άνθρακα είναι αρκούντως στεγανό διότι το μη μεταβαλλόμενο βάρος σημαίνει ότι το εγκλεισμένο υλικό δεν προσροφά ή αποβάλλει ύλη από και προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος ενεργού άνθρακα που προέκυψε φαίνεται στο Διάγραμμα 3.4

3.3.2 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με συνθετικό ζεόλιθο

Για την κατασκευή ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Τοποθετήθηκε στο φούρνο το κάλυμμα του δοχείου και παρέμεινε για 10-12 h ώστε να καταστραφεί (καεί) το παρέμβυσμα στεγανότητας. Την επόμενη αφαιρέθηκαν πλήρως τα υπολείμματα του παρεμβύσματος.
- Ζυγίστηκε το μεταλλικό δοχείο μαζί με το τροποποιημένο κάλυμμά του, και βρέθηκε να έχει απόβαρο 77.3 g.
- Αποσφραγίστηκε μία αεροστεγής συσκευασία συνθετικού ζεόλιθου των 250 g. Ο ζεόλιθος αυτός δεν έχει εκτεθεί στο περιβάλλον και επομένως δεν έχει προσροφήσει υγρασία ή Ραδόνιο. Το μεταλλικό δοχείο πληρώθηκε "μέχρι επάνω" με τον ζεόλιθο αυτόν. Το γεμάτο δοχείο σφραγίστηκε με το κάλυμμα του. Το μικτό βάρος μετρήθηκε σε 329.2 g.

- Τοποθετήθηκε στην περιφέρεια του καλύμματος, στο σημείο μεταξύ καλύμματος και δοχείου, για λόγους στεγανότητας στρώμα σιλικόνης. Το μικτό βάρος του δοχείου μετά την εφαρμογή της σιλικόνης βρέθηκε ίσο 332.2 g. Η κατά μεταγενέστερα διαστήματα επανάληψη της τελευταίας ζύγισης, κατά το επόμενο της σφράγισης εξάμηνο, δίνει ίδιο αποτέλεσμα και αποδεικνύει ότι το μεταλλικό δοχείο με τον συνθετικό ζεόλιθο είναι αρκούντως στεγανό διότι το μη μεταβαλλόμενο βάρος σημαίνει ότι το εγκλεισμένο υλικό δεν προσροφά ή αποβάλλει ύλη από και προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος συνθετικού ζεόλιθου που προέκυψε φαίνεται στο Διάγραμμα 3.5

3.3.3 Μόνιμο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος με silica gel (silica gel blue)

Για την κατασκευή ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία, η οποία είναι όμοια τόσο για το δοχείο υποστρώματος με silica gel, όσο και για το δοχείο υποστρώματος με silica gel blue²:

- Τοποθετήθηκε στο φούρνο το κάλυμμα του δοχείου και παρέμεινε για 10-12 h ώστε να καταστραφεί (καεί) το παρέμβυσμα στεγανότητας. Την επόμενη αφαιρέθηκαν πλήρως τα υπολείμματα του παρεμβύσματος.
- Ζυγίστηκε το μεταλλικό δοχείο μαζί με το τροποποιημένο κάλυμμά του, και βρέθηκε να έχει απόβαρο 77.4 g (78.4 g).
- Τοποθετήθηκε στο φούρνο το silica gel (silica gel blue) που θα πληρώσει το δοχείο υποστρώματος. Θερμάνθηκε ήπια στους 120 °C για 10-12 h ώστε να αφυγρανθεί [βλ. π.χ. και Merck-a Data Sheet Cat. No. 1.07733 (Merck-b Product Data Sheet Cat. No. 1.01925.1000)].
- Το μεταλλικό δοχείο πληρώθηκε "μέχρι επάνω" με το silica gel (silica gel blue), που είχε ήδη αφυγρανθεί. Το γεμάτο δοχείο σφραγίστηκε με το κάλυμμα του. Το μικτό βάρος μετρήθηκε σε 248.0 g (353.2 g).
- Τοποθετήθηκε στην περιφέρεια του καλύμματος, στο σημείο μεταξύ καλύμματος και δοχείου, για λόγους στεγανότητας στρώμα σιλικόνης. Το μικτό βάρος του δοχείου

² Οι μάξες που αφορούν στο silica gel blue παρουσιάζονται σε παρένθεση.

μετά την εφαρμογή της σιλικόνης βρέθηκε ίσο 250.8 g (356.4 g). Η κατά μεταγενέστερα διαστήματα επανάληψη της τελευταίας ζύγισης, κατά το επόμενο της σφράγισης εξάμηνο, δίνει ίδιο αποτέλεσμα και αποδεικνύει ότι το μεταλλικό δοχείο με το silica gel (silica gel blue) είναι αρκούντως στεγανό διότι το μη μεταβαλλόμενο βάρος σημαίνει ότι το εγκλεισμένο υλικό δεν προσροφά ή αποβάλλει ύλη από και προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος silica gel (silica gel blue) που προέκυψε φαίνεται στο Διάγραμμα 3.6 (3.7)

3.3.4 Λογιστικά φύλλα υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή

Το τυπικό λογιστικό φύλλο MS Excel® (στο εξής φύλλο τύπου "Λ1"), το οποίο προβαίνει αυτόματα στον υπολογισμό της απόδοσης του ανιχνευτή VICTOREEN, κάθε φορά που χρειάζεται να μετρηθεί ένα εκτεθέν μεταλλικό δοχείο διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.8 (οι συμπληρωμένες τιμές που διακρίνονται είναι πλασματικές – ενδεικτικές). Για κάθε ένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά χρησιμοποιείται διαφορετικό φύλλο μέσα στο ίδιο αρχείο. Στα τέσσερα διαφορετικά φύλλα δόθηκαν τα ακόλουθα αντίστοιχα ονόματα:

"Ενεργός Άνθρακας", "Συνθετικός Ζεόλιθος", "Silica Gel" και "Silica Gel Blue".

Η **πρώτη** στήλη του τυπικού λογιστικού φύλλου αφορά προφανώς στην ημερομηνία της μέτρησης.

Η **δεύτερη** στήλη αφορά στην αντίστοιχη της ημερομηνίας μέτρηση υποστρώματος από το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος που αφορά στο προσροφητικό υλικό του αντίστοιχου φύλλου. Η μέτρηση διαρκεί 1000 s ("BKG σε Counts/1000s").

Η **τρίτη** στήλη μετατρέπει τη μέτρηση της δεύτερης σε CPM_{BKG} , με εφαρμογή της σχέσης:

$$CPM_{BKG} = \frac{Counts/1000s}{1000} \times 60 \quad (3.1)$$

Η **τέταρτη** στήλη υπολογίζει το % πιθανό σφάλμα $e_{BKG}(\%)$ της μέτρησης του υποστρώματος (δεύτερη στήλη) με βάση τη σχέση [Λεωνίδου (1990), Σιμόπουλος (1989)]:

$$e_{\text{BKG}}(\%) = 2 \times 100 \times \frac{\sqrt{\text{BKG in Counts}/1000s}}{\text{BKG in Counts}/1000s} \quad (3.2)$$

Η **πέμπτη** στήλη αφορά στην αντίστοιχη της ημερομηνίας μέτρηση του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης με την ιπτάμενη τέφρα. Η μέτρηση διαρκεί 1000 s ("Counts/1000s").

Η **έκτη** στήλη μετατρέπει τη μέτρηση της πέμπτης σε $\text{CPM}_{\text{TEΦΡΑΣ}}$, με εφαρμογή της σχέσης:

$$\text{CPM}_{\text{TEΦΡΑΣ}} = \frac{\text{Counts}/1000s}{1000} \times 60 \quad (3.3)$$

Η **έβδομη** στήλη υπολογίζει το % πιθανό σφάλμα $e(\%)$ της μέτρησης (πέμπτη στήλη) με βάση τη σχέση (Gray, 1987):

$$e(\%) = 2 \times 100 \times \frac{\sqrt{\text{Counts}/1000s + \text{BKG in Counts}/1000s}}{\text{Counts}/1000s - \text{BKG in Counts}/1000s} \quad (3.4)$$

Η **όγδοη** στήλη υπολογίζει το βαθμό απόδοσης E του ανιχνευτή για την τρέχουσα μέτρηση σε $\text{CPM}/(\text{Bqkg}^{-1})$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = \frac{\text{CPM}_{\text{TEΦΡΑΣ}} - \text{CPM}_{\text{BKG}}}{988.5 \text{ Bqkg}^{-1}} \quad (3.5)$$

Η **ένατη** στήλη υπολογίζει το % πιθανό σφάλμα $e_E(\%)$ του βαθμού απόδοσης (όγδοη στήλη) με βάση τη σχέση (Μαρινάκης, 2007):

$$e_E(\%) = \sqrt{e_{\text{BKG}}^2 + e^2 + 6^2} \quad (3.6)$$

Η **δέκατη** στήλη υπολογίζει το απόλυτο σφάλμα e_E του βαθμού απόδοσης (όγδοη στήλη) με βάση τη σχέση:

$$e_E = \frac{E \times e_E(\%)}{100} \quad (3.7)$$

Το λογιστικό φύλλο συμπληρώνεται, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8 με γραφική παράσταση των τιμών του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ημερομηνίας μέτρησης. Η γραφική παράσταση βοηθάει στο να παρατηρούνται τυχόν σημαντικές αποκλίσεις του βαθμού απόδοσης του ανιχνευτή από τη συνήθη συμπεριφορά, οι οποίες και πρέπει να διερευνώνται όπως σαφώς συστήνεται και από τον Gray (1987).

3.4 Βέλτιστη οργάνωση των πειραμάτων έκθεσης

Στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) σημειώνονται διάφορα πειραματικά προβλήματα που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα της πειραματικής διαδικασίας, τα οποία μπορούν να συνοψίζονται κυρίως ως εξής:

(α) προβλήματα και αβεβαιότητα που προκύπτουν από την στεγάνωση των μεταλλικών δοχείων

(β) προβλήματα και αβεβαιότητα που προκύπτουν από τον εκτεταμένο χρόνο ωρίμανσης των δοχείων, και

(γ) προβλήματα και αβεβαιότητα που προκύπτουν από τη χρήση ή όχι της θωράκισης

Για το πρόβλημα (α) διαπιστώθηκε από τον Μαρινάκη (2007) ότι γενικά τα μεταλλικά δοχεία με προσροφητικό υλικό που έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και έχουν στη συνέχεια καλυφθεί με κάλυμμα που έχει παρέμβυσμα φαίνεται να αποβάλλουν Ραδόνιο από το εσωτερικό τους προς το περιβάλλον κατά τη χρονική περίοδο μετά την έκθεση. Χαρακτηριστικά μπορεί κανείς να δει το Διάγραμμα 3.9, όπου το Ραδόνιο στο εσωτερικό του δοχείου φαίνεται να καταστρέφεται με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που επιβάλλεται από το νόμο της ραδιενεργού διάσπασης. Σύμφωνα με την εργασία του Μαρινάκη (2007) σημειώνεται:

"Φαίνεται ότι είναι κατ' αρχήν παράδοξο ότι μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα χάνουν Ραδόνιο, δεδομένου ότι το παρέμβυσμα είναι ελαστικό και ως εκ τούτου αεροστεγές. Παρόλαυτά, είναι πολύ γνωστό από την βιβλιογραφία ότι τα ελαστικά οργανικά υλικά και γενικά τα πολυμερή έχουν έντονες προσροφητικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά το Ραδόνιο. Έτσι, αυτό που φαίνεται ότι συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι: Ραδόνιο αποβαλλόμενο από τον ενεργό άνθρακα προσροφάται στο ελαστικό παρέμβυσμα χωρίς στην ουσία να χάνεται μέσα από το μεταλλικό δοχείο, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της γεωμετρίας μέτρησης και της τεχνητής διαπίστωσης ότι $\lambda_{exp} > \lambda$. Το φαινόμενο χρειάζεται επιπλέον πειραματική διερεύνηση..."

Στην παρούσα ΔΕ έγινε πειραματική διερεύνηση αυτού του ισχυρισμού ως εξής:

Λήφθηκαν τρία καλύμματα μεταλλικών δοχείων με ελαστικό παρέμβυσμα (βλ. και Διάγραμμα 3.10) τα οποία μετρήθηκαν με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης. Οι μετρήσεις σημειώθηκαν και βρέθηκαν στην περιοχή των 5000

Counts/1000s. Στην συνέχεια τα τρία αυτά καλύμματα εκτέθηκαν επί 24 h σε συγκέντρωση Ραδονίου περίπου ίση με 135 kBq m^{-3} και έπειτα –μετά την παρέλευση 3h ώστε να δοθεί χρόνος για την ανάπτυξη θυγατρικών Ραδονίου- μετρήθηκαν με τον ίδιο όπως πριν τρόπο. Οι μετρήσεις σημειώθηκαν και βρέθηκαν στην περιοχή των 5100 Counts/1000s, η οποία φυσικά δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την μέτρηση πριν την έκθεση των καλυμμάτων. Το υπ' όψιν πείραμα έδειξε ότι ο ισχυρισμός περί εντόνων προσροφητικών ιδιοτήτων Ραδονίου του ελαστικού παρεμβύσματος δεν ισχύει και επομένως φαίνεται ότι τα μεταλλικά δοχεία με προσροφητικό υλικό που έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και έχουν στη συνέχεια καλυφθεί με κάλυμμα που έχει παρέμβυσμα, δεν είναι κλεισμένα στεγανά και αποβάλλουν Ραδόνιο προς το περιβάλλον.

Για το ίδιο πρόβλημα (α) διαπιστώθηκε από τον Μαρινάκη (2007) ότι γενικά τα μεταλλικά δοχεία με προσροφητικό υλικό που έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και έχουν στη συνέχεια καλυφθεί με κάλυμμα που δεν έχει παρέμβυσμα φαίνεται να προσλαμβάνουν Ραδόνιο από το περιβάλλον προς το εσωτερικό τους κατά τη χρονική περίοδο μετά την έκθεση. Χαρακτηριστικά μπορεί κανείς να δει το Διάγραμμα 3.11, όπου το Ραδόνιο στο εσωτερικό του δοχείου φαίνεται να καταστρέφεται με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που επιβάλλεται από το νόμο της ραδιενεργού διάσπασης.

Σύμφωνα με την εργασία του Μαρινάκη (2007) σημειώνεται:

"... στα δοχεία χωρίς παρέμβυσμα, το άνοιγμα μεταξύ του καλύμματος και του δοχείου είναι ικανό να επιτρέπει τη συναλλαγή αερίων μεταξύ του δοχείου και του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα το Ραδόνιο του περιβάλλοντος που προσροφάται στον ενεργό άνθρακα του δοχείου να είναι πολύ περισσότερο από το Ραδόνιο που ενδεχόμενα αποβάλλεται από τον ενεργό άνθρακα του δοχείου."

Στην παρούσα ΔΕ δεν έγινε πειραματική διερεύνηση αυτού του ισχυρισμού, παρόλαυτά και σε συνδυασμό με την προηγούμενη πειραματική διερεύνηση από τον Μαρινάκη (2007) για τα καλύμματα με παρέμβυσμα, μπορεί κανείς να πει με σχετική ασφάλεια ότι, τα μεταλλικά δοχεία που έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και έχουν στη συνέχεια καλυφθεί με κάλυμμα που έχει παρέμβυσμα, αποβάλλουν Ραδόνιο προς το περιβάλλον, ενώ τα αντίστοιχα μεταλλικά δοχεία με κάλυμμα που δεν έχει παρέμβυσμα προσλαμβάνουν Ραδόνιο από το περιβάλλον. Τα συμπεράσματα αυτά τα οποία κατ' αρχήν φαίνεται να αντικρούουν το ένα το άλλο ερμηνεύονται αν υποθεθεί ότι το

παρέμβυσμα λειτουργεί με τρόπο που να επιτρέπει την έξοδο και να αποτρέπει την είσοδο αερίων από τα μεταλλικά δοχεία. ως εξής:

Το φαινόμενο χρειάζεται επιπλέον πειραματική διερεύνηση, η οποία δεν είναι αντικείμενο της παρούσης ΔΕ.

Σχετικά τελικά με το πρόβλημα (α) αποφασίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, και κυρίως για την απλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας να χρησιμοποιούνται μόνο δοχεία χωρίς παρέμβυσμα. Η στεγάνωση των δοχείων, που περιέχουν προσροφητικό υλικό που εκτίθεται και επανεκτίθεται σε συγκεντρώσεις Ραδονίου³, όπου και όταν αυτή είναι αναγκαία αποφασίσθηκε να γίνεται με ηλεκτρολογική ταινία βινυλίου, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.12.

Για το πρόβλημα (β) ο Μαρινάκης (2007) σημειώνει:

"Ο κυριότερος πρακτικός τρόπος με τον οποίο μπορεί να περιορισθεί αυτή η αβεβαιότητα, είναι ασφαλώς, η μέτρηση του δοχείου να γίνεται περί τις 3 h μετά το τέλος της έκθεσής του και την κάλυψή του με το κάλυμμα. Οι χρόνοι ωρίμανσης τάξεως 18 – 20 h που επιβλήθηκε να χρησιμοποιηθούν – για πρακτικούς λόγους - στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας δεν φαίνεται να εξυπηρετούν από την άποψη του ελέγχου αυτής της αβεβαιότητας."

Σχετικά τελικά με το πρόβλημα (β) αποφασίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, η τυπική πειραματική ημέρα να οργανωθεί ως εξής:

Περί τις 9.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία μηδενισμού της πηγής, περί τις 10.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής Ραδονίου, και περί τις 11.00 ή 13.00 ή ακόμα αργότερα, ανάλογα με τα επίπεδα βαθμονομημένης συγκέντρωσης Ραδονίου που είναι επιθυμητό να δημιουργηθούν, μπορεί να ξεκινήσει η έκθεση των μεταλλικών δοχείων με το προσροφητικό υλικό. Το χρονικό διάστημα από τις 9.00 έως και τις 11.00 – 13.00 χρησιμοποιείται παράλληλα για την ακριβή ρύθμιση των συνθηκών υγρασίας μέσα στο θάλαμο όπου θα γίνει η έκθεση των δοχείων. Δεδομένου ότι ο χρόνος έκθεσης των δοχείων τυπικά προσδιορίζεται σε πολλαπλάσιο των 24 h, γίνεται αντιληπτό ότι η λήξη της έκθεσης θα γίνει ένα επόμενο πολλαπλάσιο του 24ώρου μετά, δηλαδή έστω στις 13.00 μιας επόμενης πειραματικής ημέρας. Επομένως περί τις 16.00 (=

³ τέτοια δεν είναι τα μεταλλικά δοχεία υποστρώματος που αναφέρονται στη παράγραφο 3.3

13.00 + 3 h) εκείνης της επόμενης πειραματικής μέρας μπορεί να ξεκινήσει η μέτρηση, με έναν ανιχνευτή εντός θωράκισης, η οποία κατά χονδρικούς εύλογους υπολογισμούς, θα διαρκέσει για οκτώ (8) μεταλλικά δοχεία, περίπου τρεις ώρες φθάνοντας στις 19.00, ώρα που το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας δεν έχει γενικά κλείσει ακόμα. Το διάστημα μεταξύ 13.00 και 16.00 γίνονται όλες οι αναγκαίες μετρήσεις για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή και συμπληρώνονται τα αντίστοιχα λογιστικά φύλλα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.3.4. Επομένως με αυτή την οργάνωση της πειραματικής μέρας, η μέτρηση κατά κανόνα μπορεί να ξεκινήσει το ίδιο το απόγευμα της πειραματικής ημέρας τέλους της έκθεσης των δοχείων, δηλαδή σε περίπου 3 h μετά το τέλος της έκθεσης, εξασφαλίζοντας πάντοτε όμοιο και μικρό τυπικό χρόνο ωρίμανσης των εκτεθέντων .

Για το πρόβλημα (γ) ο Μαρινάκης (2007) σημειώνει:

"Οι μετρήσεις εντός θωράκισης φαίνεται να είναι οι πλέον αξιόπιστες, διότι γίνονται σε περιβάλλον μειωμένου υποστρώματος, με αποτέλεσμα την καλή διάκριση του σήματος από τον θόρυβο, μέσω της σημαντικής ελάττωσης του αντίστοιχου πιθανού σφάλματος, ..."

Δεδομένης της πιο πάνω σαφούς παρατήρησης, σχετικά με το πρόβλημα (γ) αποφασίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, όλες οι μετρήσεις των μεταλλικών δοχείων να γίνονται εντός θωράκισης.

3.5 Πειραματικά λογιστικά φύλλα

Η εμπειρία από τα πειράματα του Μαρινάκη (2007) οδήγησε στην ανάγκη συγκρότησης λογιστικών φύλλων MS Excel[®], τα οποία να προβαίνουν αυτόματα στους υπολογισμούς που απαιτούνται κατά την πειραματική διαδικασία. Αναλυτικότερα σε συνέχεια των λογιστικών φύλλων υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή (τα φύλλα τύπου "Λ1") που καταστρώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 3.3.4 , δημιουργούνται τα εξής τέσσερα (στο εξής φύλλα τύπου "Λ2"):

**"Ενεργός Άνθρακας π⁴", "Συνθετικός Ζεόλιθος π", "Silica Gel π" και
"Silica Gel Blue π".**

⁴ "π" ≡πειραματικό

Η **πρώτη** στήλη ενός από αυτά τα φύλλα (έστω το "**Ενεργός Άνθρακας π**", το οποίο διακρίνεται στα διαδοχικά Διαγράμματα 3.13, 3.14, 3.15 και 3.16, και το οποίο έχει πληρωθεί με ενδεικτικές – πλασματικές τιμές και υπολογισμούς) αφορά προφανώς στην ημερομηνία της μέτρησης, η οποία εξάγεται απ' ευθείας από το αντίστοιχο προηγούμενο λογιστικό φύλλο τύπου Λ1 (π.χ. αν γίνεται πείραμα με το προσροφητικό υλικό ενεργός άνθρακας, τότε τα αποτελέσματα καταχωρούνται στο φύλλο "**Ενεργός Άνθρακας π**" και η ημερομηνία του πειράματος παρέχεται από το φύλλο "**Ενεργός Άνθρακας**").

Η **δεύτερη** στήλη αφορά στον αντίστοιχο της ημερομηνίας μέτρησης, βαθμό απόδοσης του ανιχνευτή VICTOREEN, ο οποίος βαθμός εξάγεται από το αντίστοιχο προηγούμενο λογικό φύλλο τύπου Λ1, όπου και υπολογίζεται.

Η **τρίτη** στήλη είναι το μέγεθος CPM_{BKG} , το οποίο μετρήθηκε και καταγράφηκε στο αντίστοιχο προηγούμενο λογιστικό φύλλο τύπου Λ1.

Η **τέταρτη** στήλη καταγράφει την ονομαστική διάρκεια της έκθεσης των δοχείων σε ώρες, στο Ραδόνιο του θαλάμου Ραδονίου.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι διακρίνονται τρεις ονομαστικές διάρκειες έκθεσης: (α) 24 h, (β) 48 h και (γ) 72 h.

Η **πέμπτη** στήλη καταγράφει την ονομαστική σχετική υγρασία στην οποία διεξήχθη το πείραμα έκθεσης.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι διακρίνονται τρεις ονομαστικές σχετικές υγρασίες: (α) 20%, (β) 50% και (γ) 80%, οι οποίες αντιστοιχούν ενδεικτικά στις εξής περιοχές σχετικών υγρασιών: τη "χαμηλή" 10 – 30%, τη "μεσαία" 30 – 70%, και την "υψηλή" 70 – 100%.

Η **έκτη** στήλη αφορά την χρονική στιγμή έναρξης της παραγωγής Ραδονίου από την πηγή σε μορφή ΩΩ.λλ, όπου το ΩΩ παίρνει τιμές από 00 έως 24 και το λλ παίρνει τιμές από 00 έως 59. Η χρονική στιγμή αυτή δεν αναφέρεται στην ημερομηνία που αναγράφεται στην πρώτη στήλη αλλά στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης, η οποία μπορεί να είναι 1 ημέρα (24 h), 2 ημέρες (48 h), ή 3 ημέρες (72 h) μικρότερη. Υπενθυμίζεται ότι η ημερομηνία της πρώτης στήλης αφορά την ημέρα της μέτρησης των δοχείων αφού αυτά έχουν εκτεθεί.

Η **έβδομη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου στο θάλαμο έκθεσης, με την ίδια μορφή μονάδων. Αυτή η χρονική στιγμή ανήκει επίσης στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **όγδοη** στήλη υπολογίζει την διαφορά των δύο παραπάνω στηλών σε λεπτά της ώρας (min) και μετρά το χρονικό διάστημα T στο οποίο γίνεται η παραγωγή του Ραδονίου. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\text{ABS}[AM(\Sigma T7)-AM(\Sigma T6)]*60\text{min}+ \\ +100*\text{ABS}\{\text{MOD}[\Sigma T7,AM(\Sigma T7)]-\text{MOD}[\Sigma T6,AM(\Sigma T6)]\}$$

η οποία επιτρέπει να μην χρησιμοποιούνται πράξεις συμμιγών που υπάρχουν στο MS Excel[®]. Στη σχέση αυτή είναι:

"ABS"= Απόλυτη Τιμή

"AM" = Ακέραιο Μέρος

"ΣTi" = ΣΤήλη i

MOD(A,B) = το υπόλοιπο της διαίρεσης του αριθμού A, με τον ακέραιο αριθμό B

Η **ένατη** στήλη υπολογίζει τη συγκέντρωση του Ραδονίου στην αρχή της έκθεσης των δοχείων στο περιβάλλον Ραδονίου που δημιουργείται εντός του θαλάμου. Η συγκέντρωση αυτή υπολογίζεται ως Rn_o σε Bqm^{-3} από τον τύπο:

$$Rn_o = A_o(1 - e^{-\lambda T})/V \quad (3.8)$$

όπου:

A_o είναι η ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδίου-226 της χρησιμοποιούμενης πηγής σε Bq ($A_o=274300$ Bq),

λ είναι η σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου σε min^{-1} ($\lambda=1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)

V είναι ο όγκος του θαλάμου Ραδονίου σε m^3 ($V=1.9 \text{ m}^3$), και

T είναι η διάρκεια παραγωγής Ραδονίου σε min, όπως αυτή υπολογίστηκε στην όγδοη στήλη.

Η **δέκατη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή έναρξης της έκθεσης του δοχείου στο Ραδόνιο εντός του θαλάμου Ραδονίου με την ίδια μορφή μονάδων, όπως της έκτης και της έβδομης στήλης. Η τιμή αυτή πρέπει να ταυτίζεται με την τιμή που καταγράφεται

στην έβδομη στήλη. Και αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **ενδέκατη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή λήξης της έκθεσης με την ίδια μορφή μονάδων, όπως της δέκατης στήλης. Τονίζεται ότι αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην ημερομηνία της μέτρησης του δοχείου (όπως παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη).

Η **δωδέκατη** στήλη υπολογίζει την διαφορά των δύο παραπάνω στηλών σε λεπτά της ώρας (min) και μετρά το χρονικό διάστημα T_s , στο οποίο διαρκεί η έκθεση του δοχείου στο Ραδόνιο. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση:

$$ABS[AM(\Sigma T11)-AM(\Sigma T10)+\Sigma T4]*60min+ \\ +100*ABS\{MOD[\Sigma T11,AM(\Sigma T11)]-MOD[\Sigma T10,AM(\Sigma T10)]\}$$

Στη σχέση αυτή είναι: " $\Sigma T4$ " = τιμή από τη ΣΤήλη 4

Η **δέκατη τρίτη** στήλη υπολογίζει τη μέση συγκέντρωση του Ραδονίου ως Rn σε $Bq\text{m}^{-3}$ κατά το διάστημα T_s^5 :

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda' t} dt}{T_s} = \frac{Rn_o}{T_s} \left[-\frac{e^{-\lambda' t}}{\lambda'} \right]_0^{T_s} \quad (3.9)$$

όπου:

λ' είναι ο ρυθμός καταστροφής του Ραδονίου σε min^{-1}

Σημειώνεται ότι ο ρυθμός καταστροφής λ' του Ραδονίου μέσα στον πειραματικό θάλαμο είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό διασπάσεως του λ , διότι αντιπροσωπεύει τη συνισταμένη κυρίως τριών συνιστωσών καταστροφής ως εξής: (α) της διάσπασης, (β) τυχόν διαρροών και τέλος (γ) της απορρόφησης από τα προσροφητικά υλικά που εκτίθενται στον θάλαμο. Εκτιμάται ότι ο λ' μπορεί να φθάσει να είναι έως και διπλάσιος του λ . Επίσης εκτιμάται ότι ο λ' θα είναι τόσο μεγαλύτερος του λ , όσο ξηρότερη είναι η ατμόσφαιρα έκθεσης των προσροφητικών υλικών. Αυτό θα συμβαίνει διότι αν δεν υπάρχει υγρασία στην ατμόσφαιρα του θαλάμου, δεν θα υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ υγρασίας - Ραδονίου στην διαδικασία προσρόφησης τους στα προσροφητικά υλικά. Το αποτέλεσμα θα είναι, τα προσροφητικά υλικά να απορροφούν (δηλ. στην ουσία να καταστρέφουν) πολύ

⁵ πρόκειται για τη σχέση (4.4) που παρουσιάζεται από τον Μαρινάκη (2007) και η οποία όμως όπως γράφεται εκεί έχει προφανή λάθη και εδώ αποδίδεται στην ορθή της μορφή

περισσότερο Ραδόνιο του θαλάμου σε ξηρές ατμόσφαιρες έκθεσης από ότι σε υγρότερες. Για τον προσδιορισμό του λ' πρέπει κατά το πειραματικό μέρος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, να γίνουν τα εξής τρία πειράματα:

- Πείραμα 1: Έκθεση των προσροφητικών υλικών (μετά από αναγέννηση με θέρμανση για την αφαίρεση τυχόν υγρασίας και Ραδονίου που έχουν απορροφηθεί) σε αρχική συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 επί 72 h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 80%
- Πείραμα 2: Έκθεση των προσροφητικών υλικών (μετά από αναγέννηση με θέρμανση για την αφαίρεση τυχόν υγρασίας και Ραδονίου που έχουν απορροφηθεί) σε αρχική συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 επί 72 h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 50%
- Πείραμα 3: Έκθεση των προσροφητικών υλικών (μετά από αναγέννηση με θέρμανση για την αφαίρεση τυχόν υγρασίας και Ραδονίου που έχουν απορροφηθεί) σε αρχική συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 επί 72 h σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 20%

Όλα τα πειράματα 1,2 και 3 θα ξεκινήσουν προφανώς κατά το δυνατόν με τις ίδιες αρχικές συνθήκες (πλην υγρασίας). Η μεταβολή της συγκέντρωσης Rn του Ραδονίου στο θάλαμο θα παρακολουθείται από ενεργητικό ανιχνευτή τύπου ALPHAGUARD P2000 της εταιρείας κατασκευής Genitron GmbH ανά δεκάλεπτο. Με το πέρας των 72 h κάθε πειράματος θα παραλαμβάνονται τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων μεταβολής συγκέντρωσης Ραδονίου συναρτήσει του χρόνου, ως ζεύγη (t, Rn) περίπου 430 το πλήθος, από τον ενεργητικό ανιχνευτή και μετά από διαδικασία προσαρμογής τους σε συνάρτηση αναδρομής εκθετικής απομείωσης της μορφής:

$$Rn = Rn_0 e^{-\lambda' t} \quad (3.10)$$

θα προκύψουν:

- από το Πείραμα 1, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 80\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.
- από το Πείραμα 2, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 50\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.
- από το Πείραμα 3, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 20\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.

Εκτιμάται ότι η επίδραση του λ' στην μέση τιμή της συγκέντρωσης Ραδονίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης, όπως αυτή δίνεται από τη σχέση (3.9), δεν θα είναι μεγαλύτερη από ~10% ακόμα και όταν $\lambda' \approx 2\lambda$. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εκθετικής μορφής του ολοκληρώματος του αριθμητή. Με άλλα λόγια η πραγματική διαφορά των ποσοτήτων $\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda' t} dt$ και $\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda t} dt$, βρίσκεται μέσα στα εκτιμηθέντα από τον Μαρινάκη (2007)

όρια της αβεβαιότητας της πειραματικής διαδικασίας βαθμονόμησης των υπόψιν προσροφητικών υλικών. Σημειώνεται ότι στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) λήφθηκε πάντα $\lambda' = \lambda$.

Η **δέκατη τέταρτη** στήλη υπολογίζει το χρόνο $T_s/2$ σε min που αντιστοιχεί στο μεσοδιάστημα της έκθεσης, ή όπως αναφέρεται από τον Gray (1987) στο "exposure midpoint".

Η **δέκατη πέμπτη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης του δοχείου που έχει εκτεθεί, με τον ανιχνευτή VICTOREEN, με την ίδια μορφή μονάδων, όπως της ενδέκατης στήλης. Αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **δέκατη έκτη** στήλη υπολογίζει το χρόνο t σε min που έχει παρέλθει από το μεσοδιάστημα έκθεσης ως την αρχή της μέτρησης του δοχείου προσθέτοντας απλά στη διαφορά των στηλών δεκαπέντε και έντεκα, την τιμή της δέκατης τέταρτης στήλης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$[AM(\Sigma T15) - AM(\Sigma T11)] * 60 \text{min} + 100 * \text{ABS}\{\text{MOD}[\Sigma T15, AM(\Sigma T15)] - \text{MOD}[\Sigma T11, AM(\Sigma T11)]\} + \Sigma T14$$

Η **δέκατη έβδομη** στήλη υπολογίζει ένα συντελεστή διόρθωσης DF (George, 1984), ο οποίος είναι ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο t σε min, από το μεσοδιάστημα έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης. Δίνεται από τη σχέση:

$$DF = e^{-\lambda t} \quad (3.11)$$

Η **δέκατη όγδοη** στήλη καταγράφει το μικτό βάρος του δοχείου n (εδώ $n=1$) σε g (προσροφητικό υλικό + απόβαρο δοχείου με κάλυμμα) μετά την έκθεση.

Η **δέκατη ένατη** στήλη καταγράφει το μικτό βάρος του δοχείου $n+1$ σε g μετά την έκθεση.

Η **εικοστή στήλη** υπολογίζει το καθαρό βάρος m_n του δοχείου n σε kg, μετά την έκθεση, αφαιρώντας απόβαρο που υπάρχει καταχωρημένο στο λογιστικό φύλλο.

Η **εικοστή πρώτη** στήλη υπολογίζει το καθαρό βάρος m_{n+1} του δοχείου $n+1$ σε kg, μετά την έκθεση, αφαιρώντας απόβαρο που υπάρχει καταχωρημένο στο λογιστικό φύλλο.

Η **εικοστή δεύτερη** στήλη καταγράφει τη μέτρηση που λαμβάνεται από το δοχείο n με το εκτεθέν προσροφητικό υλικό με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης. Η μέτρηση διαρκεί 1000 s ("Counts/1000s").

Η **εικοστή τρίτη** στήλη μετατρέπει τη μέτρηση της προηγούμενης στήλης σε CPM, με εφαρμογή της σχέσης (3.1).

Η **εικοστή τέταρτη** στήλη καταγράφει τη μέτρηση που λαμβάνεται από το δοχείο $n+1$ με το εκτεθέν προσροφητικό υλικό με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης. Η μέτρηση διαρκεί 1000 s ("Counts/1000s")

Η **εικοστή πέμπτη** στήλη μετατρέπει τη μέτρηση της προηγούμενης στήλης σε CPM, με εφαρμογή της σχέσης (3.1).

Η **εικοστή έκτη** στήλη υπολογίζει το συντελεστή βαθμονόμησης για το δοχείο n , AF_n , σε Lmin^{-1} , ο οποίος όπως έχει σημειώσει ο Μαρινάκης (2007), πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$AF_n = 1000 \times \frac{(CPM_{\Delta OX E I O Y n} - CPM_{BKG}) / (m_{\Delta OX E I O Y n})}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot Rn} \quad (3.12)$$

Η **εικοστή έβδομη** στήλη υπολογίζει το συντελεστή βαθμονόμησης για το δοχείο $n+1$, AF_{n+1} , σε Lmin^{-1} , με τον ίδιο τρόπο

Η **εικοστή όγδοη** στήλη υπολογίζει τον μέσο όρο των AF_n και AF_{n+1} .

Η **εικοστή ένατη** στήλη υπολογίζει την ποσότητα MDA (Minimum Detectable Activity) σε CPM, όπως παρουσιάστηκε από τον Μαρινάκη (2007), που αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο ανιχνεύσιμο καθαρό ρυθμό κρούσεων που οφείλεται στα θυγατρικά του Ραδονίου που υπάρχουν στο προσροφητικό υλικό και όχι στο υπόστρωμα. Είναι:

$$MDA = 3 \times \frac{\sqrt{CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}}}{\text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}} \quad (3.13)$$

όπου ο "χρόνος μέτρησης υποστρώματος (min)" είναι πάντα 16.667 min.

Η **τριακοστή στήλη** υπολογίζει την ποσότητα *LLD* (Lower Limit of Detection) για το δοχείο *n*, σε $Bq\,m^{-3}$, που αντιπροσωπεύει το κατώτερο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99.87%, ως εξής:

$$LLD_n = 1000 \times \frac{MDA / (m \Delta OX E I O Y_n)}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot AF_n} \quad (3.14)$$

Η **τριακοστή πρώτη** στήλη υπολογίζει την ποσότητα *LLD* (Lower Limit of Detection) για το δοχείο *n+1*, με τον ίδιο τρόπο.

Η **τριακοστή δεύτερη** στήλη υπολογίζει το μέσο όρο των *LLD_n* και *LLD_{n+1}*.

Η **τριακοστή τρίτη** στήλη καταγράφει το μικτό βάρος του δοχείου *n* σε g (προσροφητικό υλικό + απόβαρο δοχείου με κάλυμμα) πριν την έκθεση (αμέσως μετά την αναγέννηση).

Η **τριακοστή τέταρτη** στήλη καταγράφει το μικτό βάρος του δοχείου *n+1* σε g πριν την έκθεση (αμέσως μετά την αναγέννηση).

Η **τριακοστή πέμπτη** στήλη υπολογίζει το καθαρό βάρος *m'_n* του δοχείου *n* σε kg, πριν από την έκθεση, αφαιρώντας απόβαρο που υπάρχει καταχωρημένο στο λογιστικό φύλλο.

Η **τριακοστή έκτη** στήλη υπολογίζει το καθαρό βάρος *m'_{n+1}* του δοχείου *n+1* σε kg, πριν από την έκθεση, αφαιρώντας απόβαρο που υπάρχει καταχωρημένο στο λογιστικό φύλλο.

Η **τριακοστή έβδομη** στήλη υπολογίζει την προσρόφηση υγρασίας από το προσροφητικό υλικό του δοχείου *n* ως διαφορά των στηλών "35" και "20".

Η **τριακοστή όγδοη** στήλη υπολογίζει την προσρόφηση υγρασίας από το προσροφητικό υλικό του δοχείου *n+1* ως διαφορά των στηλών "36" και "21".

Η **τριακοστή ένατη** στήλη υπολογίζει τον μέσο όρο των στηλών "37" και "38".

Οι τιμές που συγκεντρώνονται σε κάθε τέτοιο λογιστικό φύλλο χρησιμεύουν για τη δημιουργία των ακόλουθων δύο Διαγραμμάτων για κάθε προσροφητικό υλικό, όπως προτείνεται από τον Gray (1987):

1. Διάγραμμα συντελεστών βαθμονόμησης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για "χαμηλή", "μεσαία" και "υψηλή" σχετική υγρασία (βλ. και το σχετικό παραδειγματικό Διάγραμμα 3.17 με ενδεικτικές – πλασματικές τιμές).
2. Διάγραμμα συντελεστών βαθμονόμησης συναρτήσει της προσροφηθείσας υγρασίας για σαρανταοκτάωρη έκθεση (βλ. και το σχετικό παραδειγματικό Διάγραμμα 3.18 με ενδεικτικές – πλασματικές τιμές).

3.6 Παρατηρήσεις - σχόλια

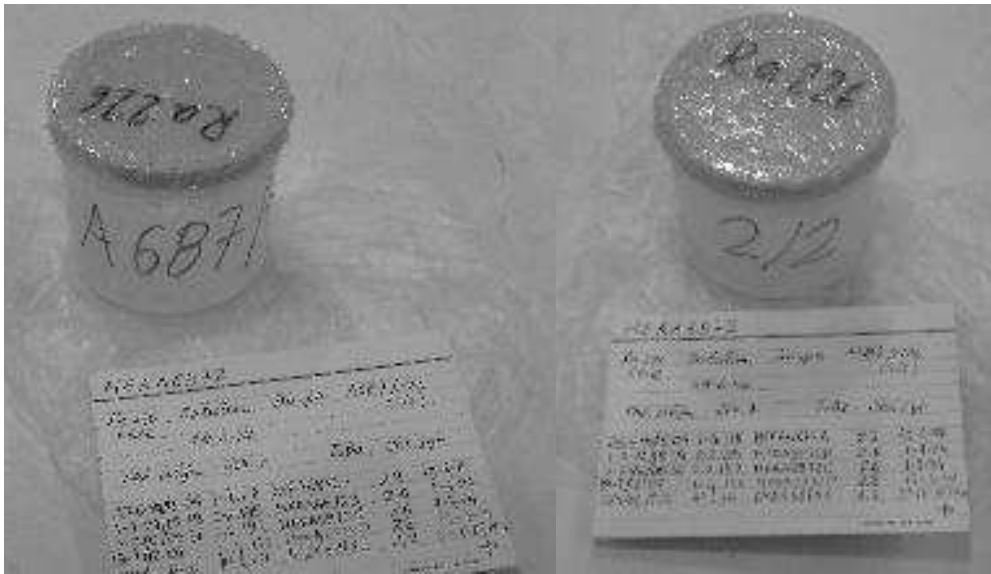
Στο 3^ο αυτό Κεφάλαιο αναλύθηκαν ορισμένες διαδικασίες βελτιστοποίησης πειραμάτων βαθμονόμησης προσροφητικών υλικών προκειμένου αυτά να χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα των εσωτερικών χώρων. Σχετικές προτάσεις είχε κάνει στην Διπλωματική του Εργασία και ο Μαρινάκης (2007). Εξετάσθηκε ο τρόπος που αυτές οι διαδικασίες μπορούν να υλοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Πιο συγκεκριμένα:

- επιβεβαιώθηκε η καταλληλότητα του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης,
- παρουσιάσθηκαν και οργανώθηκαν τεχνικές ποιοτικού ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο του βαθμού απόδοσης του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή,
- κατασκευάσθηκαν δοχεία υποστρώματος για κάθε ένα από τα προσροφητικά υλικά που προτείνεται να μελετηθούν, δηλαδή για τον ενεργό άνθρακα, το συνθετικό ζεόλιθο, το silica gel και το silica gel blue,
- αποφασίσθηκε ποια πρέπει να είναι η βέλτιστη οργάνωση των πειραμάτων έκθεσης, και
- αναπτύχθηκε η αναγκαία γραφειοκρατική υποστήριξη της όλης πειραματικής διαδικασίας μέσω λογιστικών φύλλων MS Excel[®].

Στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κυρίως οι τεχνικές ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα στον χρησιμοποιούμενο θάλαμο έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου. Από τις περιβαλλοντικές αυτές συνθήκες κυρίως ενδιαφέρει η ρύθμιση της υγρασίας. Επιπλέον θα παρουσιασθούν οι πειραματικοί στόχοι των πειραμάτων έκθεσης, τα οποία υπενθυμίζεται ότι θα είναι

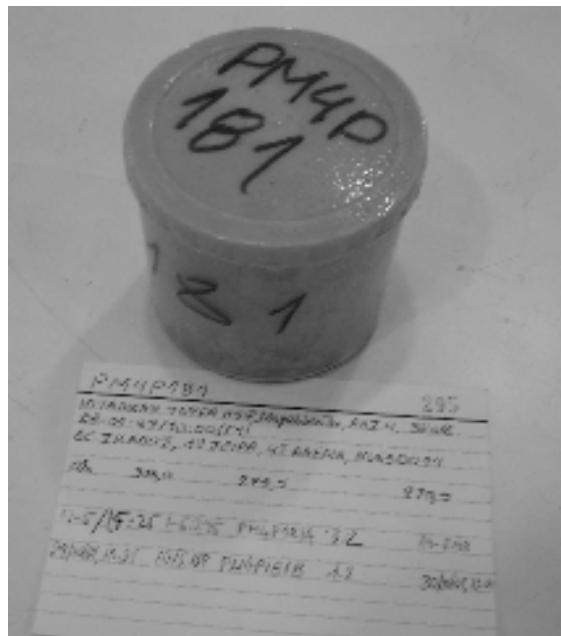
συνολικά εννέα (9) καθώς θα πραγματοποιηθούν για χρόνους έκθεσης 24, 48 και 72 h και για σχετικές υγρασίες περιβάλλοντος 20, 50 και 80%.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 3.1

Φωτογραφίες συσκευασμένου δείγματος από βαθμονομημένο από την EUROMET υγρό διάλυμα Ραδίου-226 με κωδικό αριθμό MERA6872



Διάγραμμα 3.2

Φωτογραφία συσκευασμένου δείγματος ιπτάμενης τέφρας του Λιγνιτικού ΑΗΣ Μεγαλόπολη με κωδικό αριθμό PMP4P181



Διάγραμμα 3.3

Φωτογραφία τεχνικής μέτρησης υποστρώματος με φορητό ανιχνευτή NaI, εντός λύομενης θωράκισης. Ο αριστερά διακρινόμενος δακτύλιος της θωράκισης έχει αφαιρεθεί και στη θέση του έχει τοποθετηθεί τρίποδο για τις ανάγκες της φωτογράφισης προκειμένου να φαίνεται η σχετική θέση του ανιχνευτή μέσα στη θωράκιση πάνω από κενό δοχείο συσκευασίας.



Διάγραμμα 3.4

Φωτογραφία μεταλλικού δοχείου υποστρώματος με ενεργό άνθρακα (ανοικτό)



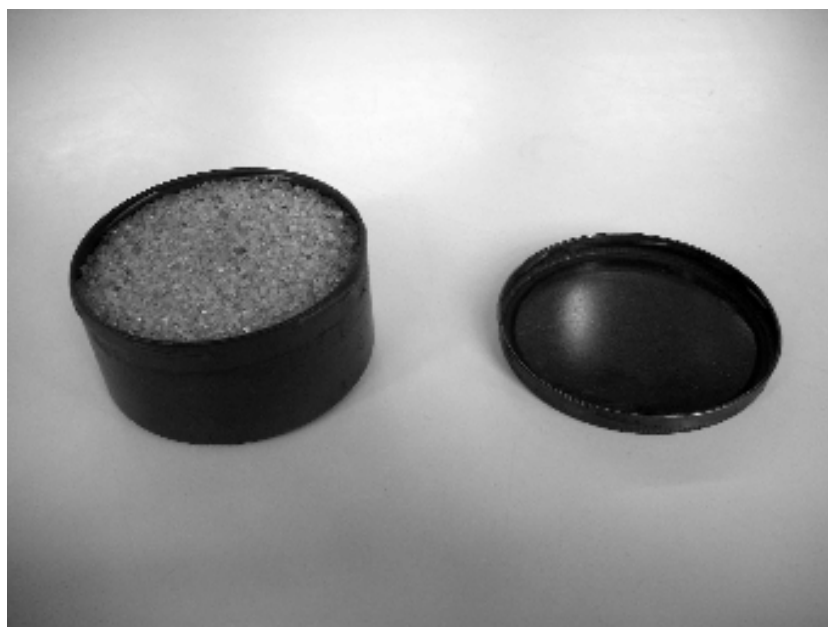
Διάγραμμα 3.5

Φωτογραφία μεταλλικού δοχείου υποστρώματος με συνθετικό ζεόλιθο (ανοικτό)



Διάγραμμα 3.6

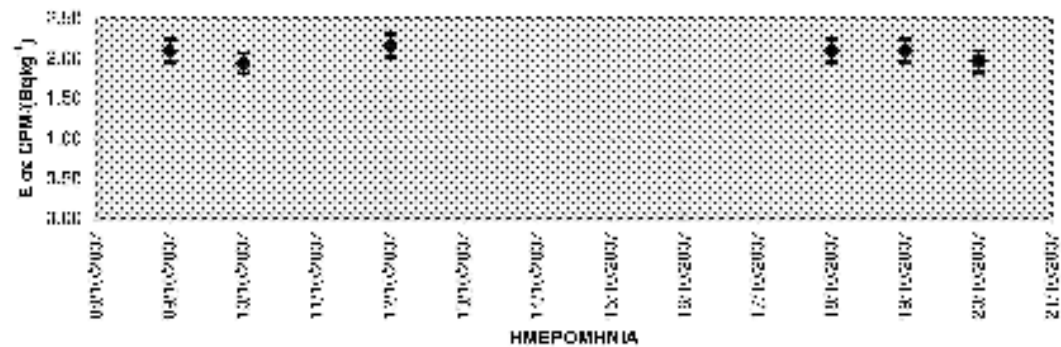
Φωτογραφία μεταλλικού δοχείου υποστρώματος με silica gel (ανοικτό)



Διάγραμμα 3.7

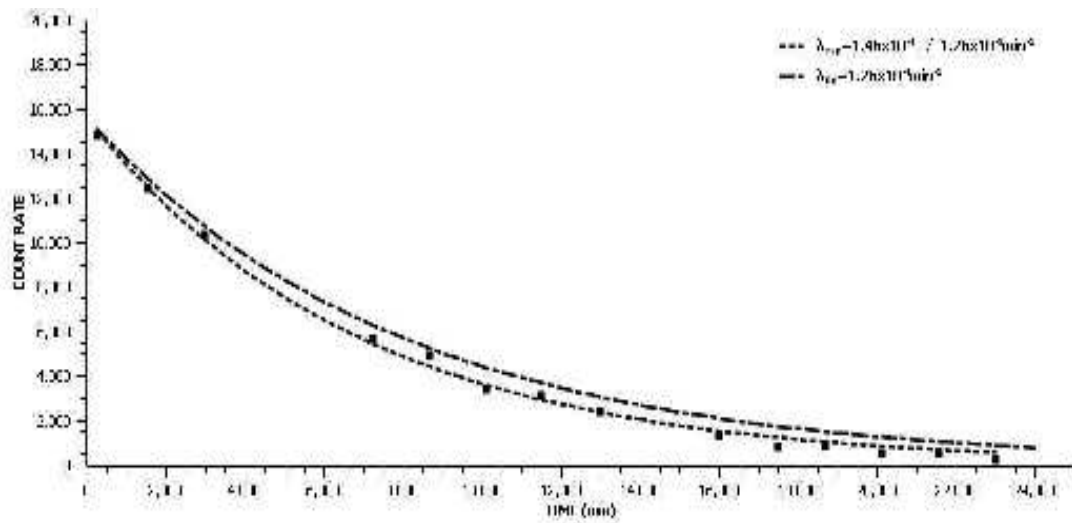
Φωτογραφία μεταλλικού δοχείου υποστρώματος με silica gel blue (ανοικτό)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----------------------------|---------|---------------------------------|--|---------|------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΕΦΡΑΣ σε Βαθμ ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ | 346.50 | | | | | | | | |
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΕΦΡΑΣ σε % | 3.00 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΒΚΣ σε Counts /1000g | CPM/εγκ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΒΚΣ σε % | ΤΕΦΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ σε Counts /1000g | CPM/εγκ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΕΦΡΑΣ σε % | ΒΑΘΜΟΣ ΛΙΠΟΔΩΣΗΣ L σε CPM (αΒα/κg ⁻¹) | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ L σε % | ΠΙΘΑΝΟ ΑΠΟΛΥΤΟ ΣΦΑΛΜΑ του E |
| 09/10/2007 | 4500 | 270.00 | 2.38 | 36000 | 2160.00 | 1.21 | 2.08 | 6.91 | 0.14 |
| 10/10/2007 | 4739 | 287.34 | 2.59 | 37.00 | 2225.00 | 1.27 | 1.94 | 6.79 | 0.12 |
| 17/10/2007 | 5142 | 309.25 | 2.74 | 41250 | 2475.00 | 1.19 | 2.17 | 6.77 | 0.10 |
| 18/10/2007 | 4668 | 283.26 | 2.35 | 40000 | 2400.00 | 1.21 | 2.11 | 6.75 | 0.14 |
| 19/10/2007 | 4625 | 281.10 | 2.32 | 39000 | 2340.00 | 1.20 | 2.11 | 6.79 | 0.14 |
| 20/10/2007 | 564 | 338.46 | 2.55 | 36450 | 2187.00 | 1.26 | 1.97 | 6.60 | 0.12 |



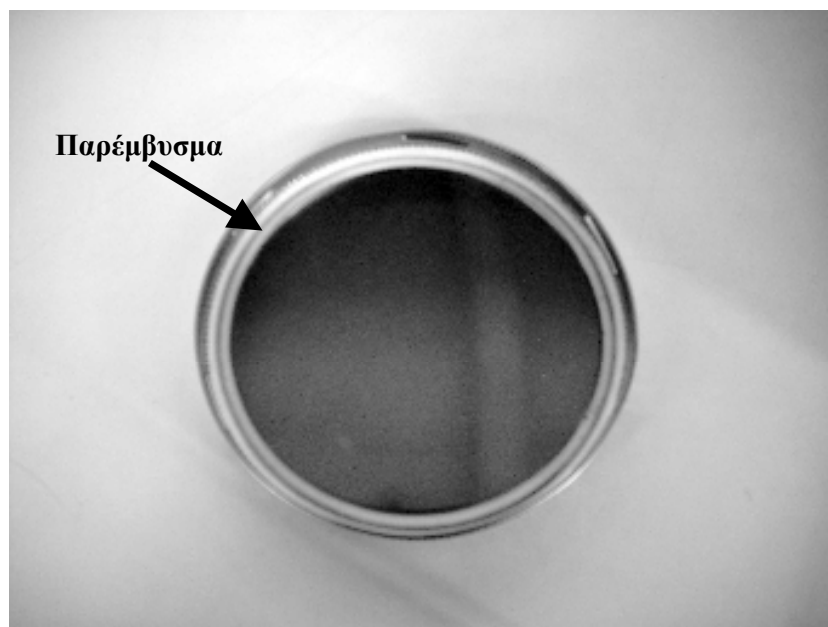
Διάγραμμα 3.8

Λογιστικό φύλλο τύπου "Δ1" υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή



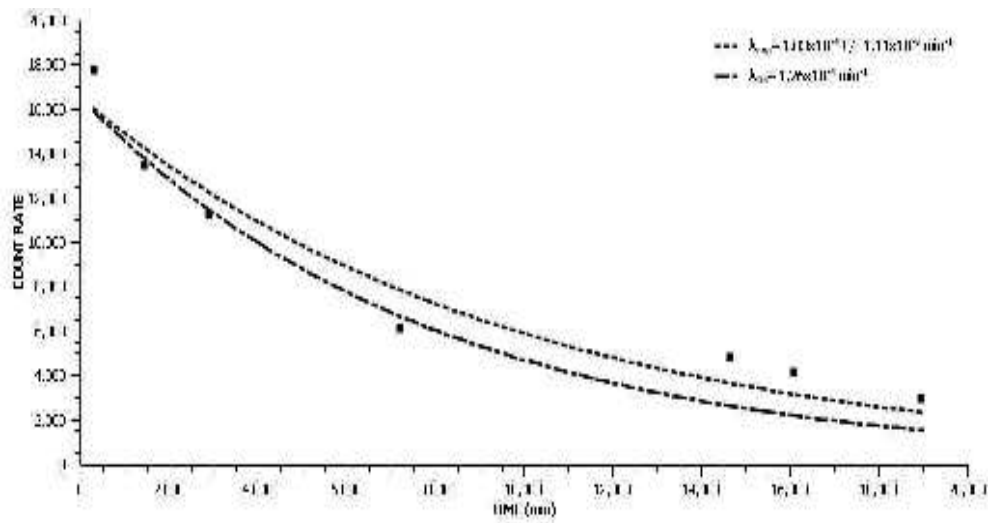
Διάγραμμα 3.9

Παράδειγμα διαδοχικών μετρήσεων δοχείου με παρέμβυσμα, με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης (Μαρινάκης, 2007 – Διάγραμμα 5.46). Ο ρυθμός καταστροφής του προσροφηθέντος Ραδονίου είναι λίγο μεγαλύτερος από το ρυθμό απομείωσης λόγω ραδιενεργών διασπάσεων.



Διάγραμμα 3.10

Κάλυμμα μεταλλικού δοχείου με παρέμβυσμα (άσπρος ελαστικός δακτύλιος στην εσωτερική γωνία του καλύμματος).



Διάγραμμα 3.11

Παράδειγμα διαδοχικών μετρήσεων δοχείου χωρίς παρέμβαση, με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης (Μαρινάκης, 2007 – Διάγραμμα 5.48). Ο ρυθμός καταστροφής του προσροφηθέντος Ραδονίου είναι λίγο μικρότερος από το ρυθμό απομείωσης λόγω ραδιενεργών διασπάσεων.



Διάγραμμα 3.12

Παράδειγμα μεταλλικού δοχείου με κάλυμμα. Η επαφή καλύμματος – σώματος δοχείου στεγανοποιείται με ελαστική ταινία βινυλίου.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|----------------------|------------------|----------------------------|--|---|---|---|---|
| Απόβραση δοχείου 1 Απόβραση δοχείου 2 | Ν ₂ 75 | Ν ₂ 75 | | | | | | | |
| ΗΚΛΡΟΜΙΝΙΑ | ΒΛΩΜΟΣ ΑΠΟΒΡΑΣΗΣ F _{av} CRM (μsec ⁻¹) | CRM _{av} | ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΠΕΡΒΑΣΗ (%) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΙΟΝΙΟΥ (HH:mm) | ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΛΙΣΤΗΣ ΡΑΔΙΟΝΙΟΥ (HH:mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΙΟΝΙΟΥ (min) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΙΟΝΙΟΥ (Bq·m ⁻³) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH:mm) |
| 05-112007 | 2,09 | 270,00 | 24 | 20 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 10-112007 | 1,85 | 287,84 | 24 | 20 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 12-112007 | 2,19 | 305,02 | 24 | 20 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 14-112007 | 2,13 | 293,28 | 24 | 50 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 15-112007 | 2,10 | 291,10 | 24 | 50 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 16-112007 | 1,94 | 315,48 | 24 | 50 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 25-112007 | 2,08 | 310,98 | 24 | 80 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 26-112007 | 2,31 | 325,64 | 24 | 90 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 28-112007 | 2,13 | 293,74 | 24 | 80 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 30-112007 | 2,09 | 314,08 | 40 | 20 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 01-112007 | 2,33 | 299,56 | 40 | 20 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 02-112007 | 2,32 | 293,08 | 40 | 20 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 03-112007 | 2,10 | 293,70 | 40 | 50 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 04-112007 | 2,31 | 287,40 | 40 | 50 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 05-112007 | 1,91 | 307,92 | 40 | 50 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 06-112007 | 2,34 | 305,68 | 40 | 80 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 07-112007 | 2,19 | 312,00 | 40 | 90 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 08-112007 | 2,54 | 294,18 | 40 | 90 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 09-112007 | 1,89 | 307,58 | 72 | 20 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 10-112007 | 1,77 | 311,02 | 72 | 20 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 11-112007 | 2,24 | 305,70 | 72 | 20 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 12-112007 | 2,32 | 318,00 | 72 | 50 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 13-112007 | 2,22 | 309,56 | 72 | 50 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 14-112007 | 2,04 | 358,02 | 72 | 50 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 15-112007 | 2,37 | 311,04 | 72 | 90 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |
| 16-112007 | 2,21 | 347,68 | 72 | 80 | 0:30 | 1:30 | 110 | 1987,74 | 11:50 |
| 17-112007 | 2,25 | 350,02 | 72 | 90 | 0:30 | 1:00 | 110 | 1907,74 | 11:50 |

Διάγραμμα 3.13

Πειραματικό λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" (στήλες 1-10)

| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|---|--|-------------------------|--|-------------------|------|---|---|--|
| ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΟΧΗΣ ΛΟΧΩΣΗ (HH:mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T ₁ (min) | MLLII ΣΥΓΚΡΗΤΙΣΤΩΝ ΡΑΔΙΟΙΩΝ (μg m ⁻³) | ΕΚΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ (min) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH:mm) | ΧΡΟΝΟΣ 1 (min) | DI | ΒΙΟΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (kg) |
| 11:59 | 1440 | 017.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 300.00 | 300.00 | 0.2470 |
| 11:59 | 1440 | 217.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 300.00 | 300.00 | 0.2470 |
| 11:59 | 1440 | 017.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 300.00 | 300.00 | 0.2470 |
| 11:59 | 1440 | 217.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 305.00 | 305.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 1440 | 017.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 295.00 | 300.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 1440 | 217.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 305.00 | 305.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 1440 | 017.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 310.00 | 310.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 1440 | 217.50 | 720 | 11:30 | 600 | 0.90 | 310.00 | 310.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 2550 | 009.52 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 295.00 | 300.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 2550 | 009.50 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 305.00 | 305.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 2550 | 009.52 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 295.00 | 305.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 2550 | 009.52 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 310.00 | 310.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 2550 | 009.50 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 315.00 | 315.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 2550 | 009.52 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 295.00 | 315.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 2550 | 009.50 | 1440 | 11:30 | 1570 | 0.92 | 315.00 | 315.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 210.00 | 310.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 210.00 | 310.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 215.00 | 310.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 215.00 | 315.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 215.00 | 315.00 | 0.2520 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 220.00 | 320.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 220.00 | 320.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 220.00 | 320.00 | 0.2570 |
| 11:59 | 4320 | 032.43 | 2160 | 11:30 | 2250 | 0.75 | 220.00 | 320.00 | 0.2570 |

Διάγραμμα 3.14

Πειραματικό λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" (στήλες 11-20)

| | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|------------------------------------|---------------------|------------------|---------------------------------|------------------|--------------|--------------|------------------------|-------|--|----|
| ΚΑΘΑΡΗ ΚΑΖΑ | ΔΟΧΕΙΟ 1 στ | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 1 | ΔΟΧΕΙΟ 2 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 2 | AI 1 (L/min) | AI 2 (L/min) | (AF1+AF2)S2 (L/min) | MDL | LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (Bqm ⁻²) | |
| ΔΥΚΛΙΟΥ 2 μετρ διαόραση (μg) | Cells/ml (1000s) | | | | | | | | | |
| 0.2170 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 12.07 | 1.24 | |
| 0.2470 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 12.46 | 1.57 | |
| 0.2470 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 12.51 | 13.39 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 25000 | 50000 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 12.58 | 8.35 | |
| 0.2520 | 25000 | 50000 | 25000 | 50000 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 12.22 | 9.37 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 12.52 | 21.15 | |
| 0.2370 | 25000 | 50000 | 25000 | 50000 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 13.14 | 23.24 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 12.20 | 23.57 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 25000 | 50000 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 12.21 | 1.35 | |
| 0.2520 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 12.02 | 14.32 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 12.56 | 13.90 | |
| 0.2520 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 11.84 | 12.81 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 12.00 | 11.31 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 12.46 | 13.73 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 20000 | 50000 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 12.89 | 11.20 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 12.28 | 11.30 | |
| 0.2520 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.66 | 0.66 | 0.66 | 12.88 | 14.34 | |
| 0.2570 | 25000 | 50000 | 30000 | 50000 | 0.58 | 0.58 | 0.58 | 11.11 | 11.11 | |
| 0.2370 | 25000 | 210000 | 30000 | 210000 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 12.88 | 11.01 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 20000 | 210000 | 0.79 | 0.79 | 0.79 | 12.91 | 11.11 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 30000 | 210000 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 12.65 | 11.37 | |
| 0.2520 | 25000 | 210000 | 20000 | 210000 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 12.11 | 11.99 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 30000 | 210000 | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 12.22 | 11.57 | |
| 0.2520 | 25000 | 210000 | 30000 | 210000 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 13.58 | 12.23 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 20000 | 210000 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 12.11 | 11.90 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 30000 | 210000 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 13.71 | 11.70 | |
| 0.2570 | 25000 | 210000 | 20000 | 210000 | 0.59 | 0.59 | 0.59 | 12.82 | 12.12 | |

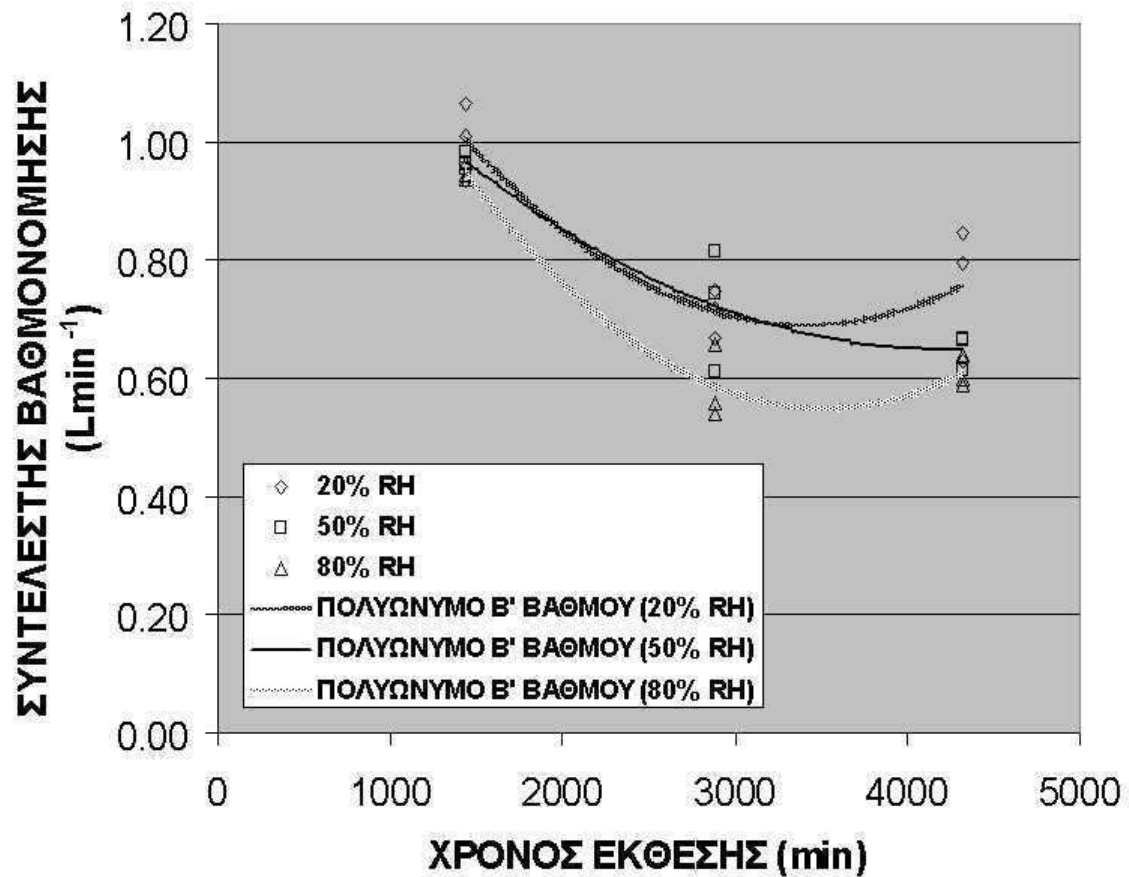
Διάγραμμα 3.15

Πειραματικό λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" (στήλες 21-30)

| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|---|---------------------------------------|---|---|--|--|---|---|--|
| ΤΙΘ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kgm ³) | ILLD1+LLD2y2 (Bqmi ⁻²) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΤΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΤΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kg) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΜΑΖΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΤΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (kg) |
| 17.84 | 17.84 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 18.37 | 18.67 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 18.89 | 19.08 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 18.35 | 18.66 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 18.07 | 18.37 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 21.15 | 21.15 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 20.24 | 20.24 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 20.57 | 20.57 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 18.00 | 18.30 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 14.82 | 14.82 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.90 | 12.90 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.81 | 12.81 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.04 | 12.04 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.15 | 12.15 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 14.40 | 14.40 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 14.34 | 14.34 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 14.54 | 14.54 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 14.11 | 14.11 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.21 | 11.21 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.11 | 11.11 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 10.97 | 10.97 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.34 | 11.34 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.52 | 11.52 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.25 | 12.25 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.90 | 11.90 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 11.34 | 11.34 | 249.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.12 | 12.12 | 250.00 | 250.00 | 0.2570 | 0.2570 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0150 |

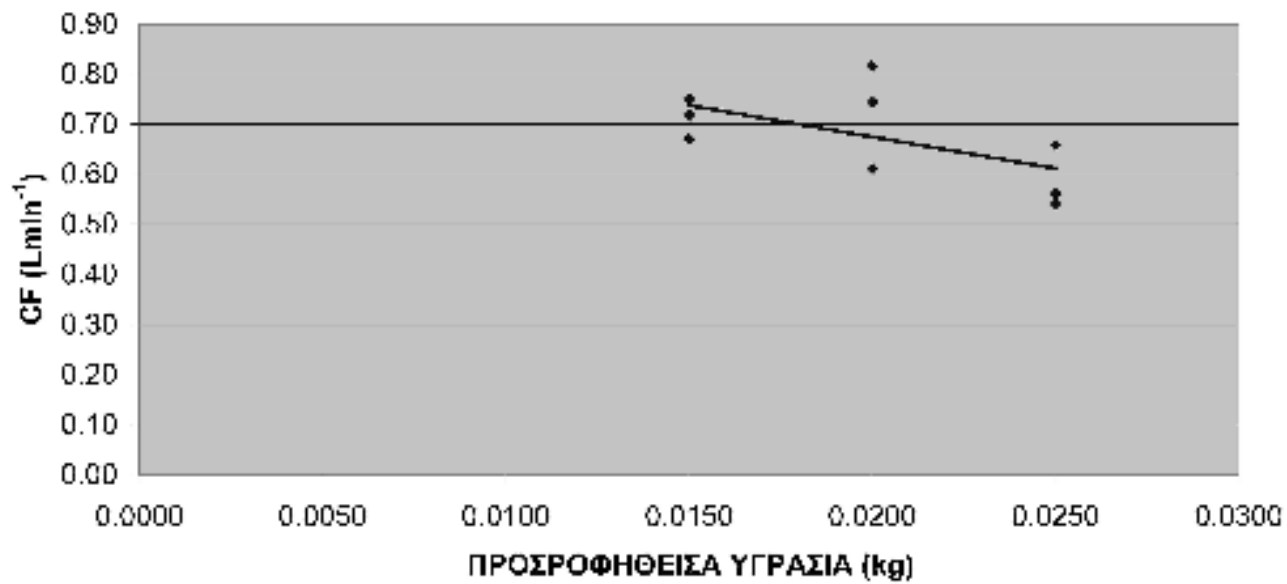
Διάγραμμα 3.16

Πειραματικό λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" (στήλες 31-39)



Διάγραμμα 3.17

Συντελεστές βαθμονόμησης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για "χαμηλή" (20% RH), "μεσαία" (50% RH) και "υψηλή" σχετική υγρασία (παραδειγματικό διάγραμμα με ενδεικτικές –πλασματικές τιμές).



Διάγραμμα 3.18

Συντελεστής βαθμονόμησης συναρτήσει της προσροφηθείσας υγρασίας για σαρανταοκτάωρη έκθεση (παραδειγματικό διάγραμμα με ενδεικτικές –πλασματικές τιμές).

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

| NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|------------|--------|--------|--|--|
| of sample MS271B | | | | | | |
| Remarks : | | | | | | |
| Isotope | Energy (keV) | Activity | Bq/kg | pCi/gr | | |
| Pb-210 | 46.52 | | | | | |
| Pb-214A | 295.22 | 966.13 +- | .46 % | 26.112 | | |
| Pb-214B | 351.99 | 987.77 +- | .14 % | 26.696 | | |
| Pb-214 | (W.Mean) : | 985.79 +- | .14 % | 26.643 | | |
| Bi-214A | 609.32 | 881.12 +- | .51 % | 23.814 | | |
| Bi-214B | 1120.28 | 947.95 +- | .83 % | 25.620 | | |
| Bi-214C | 1764.51 | 1102.81 +- | .35 % | 29.806 | | |
| Bi-214 | (W.Mean) : | 1000.43 +- | .28 % | 27.039 | | |
| Ra-226 | (W.Mean) : | 988.5 +- | .12 % | 26.717 | | |
| Ra-226 | 186.25 | | | | | |
| Th-234 | 63.29 | | | | | |
| U-238 E | 185.99 | 1215.39 +- | .85 % | 32.848 | | |
| U-238 C | 185.99 | 992.75 +- | .85 % | 26.831 | | |
| U-235 | 185.72 | | | | | |
| U-238 L | | | | | | |
| Ac-228A | 338.40 | 58.17 +- | 7.77 % | 1.572 | | |
| Ac-228B | 911.07 | 53.19 +- | 5.74 % | 1.438 | | |
| Ra-228 | (W.Mean) : | 54.75 +- | 4.62 % | 1.480 | | |
| Pb-212B | 238.63 | 57.99 +- | 3.13 % | 1.567 | | |
| Tl-208A | 583.14 | 47.96 +- | 2.40 % | 1.296 | | |
| Th-228 | (W.Mean) : | 50.84 +- | 1.91 % | 1.374 | | |
| Th-232 | (W.Mean) : | 51.3 +- | 1.77 % | 1.388 | | |
| K-40 | 1460.75 | 485.53 +- | .95 % | 13.122 | | |

Πίνακας 3.1

Ανάλυση συγκέντρωσης Ραδίου-226 και άλλων φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στην ιπτάμενη τέφρα MS271.

| ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΚΑΤΑ ΜΑΖΙΚΟ ΑΡΙΘΜΟ) | ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΖΩΗΣ | ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΥ ΦΩΤΟΝΙΟΥ | ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (%) |
|--|---------------------------|---|-------------------------------------|
| K-40 | 1277x10 ⁶ y | ~1.46MeV | 10.7 |
| Tl-208 | 3.0 min | ~2.6MeV | 99.8 |
| Pb-212 | 10.6 h | ~239keV | 44.6 |
| Ra-226 | 1600 y | ~186keV | 3.3 |
| Ac-228 | 6.13 h | ~13keV | 39.1 |
| Ra-228 | 5.75 y | ~6keV | 0.0 |
| Th-228 | 1.9 y | ~12keV | 9.5 |
| Th-232 | 1.4x10 ¹⁰ y | ~12keV | 8.4 |
| Th-234 | 24.1 d | ~13keV | 9.5 |
| U-238 | 4468x10 ⁶ y | ~13keV | 8.8 |

Πίνακας 3.2

Κυριότερα ισότοπα τέφρας MS271 (εκτός των θυγατρικών του Ραδονίου) κατά μαζικό αριθμό.

| NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|------------|----------|--|--|
| of sample MERA6872E | | | | | | |
| Remarks : | | | | | | |
| Isotope | Energy (keV) | Activity | Bq/kg | pCi/gr | | |
| Pb-210 | 46.52 | 105891.69 | + - 3.32 % | 2861.938 | | |
| Pb-214A | 295.22 | 101636.09 | + - .22 % | 2746.921 | | |
| Pb-214B | 351.99 | 101587.21 | + - .15 % | 2745.600 | | |
| Pb-214 | (W.Mean) | : 101602.23 | + - .12 % | 2746.006 | | |
| Bi-214A | 609.32 | 97291.48 | + - .22 % | 2629.499 | | |
| Bi-214B | 1120.28 | 103785.66 | + - .81 % | 2805.018 | | |
| Bi-214C | 1764.51 | 121873.81 | + - .35 % | 3293.887 | | |
| Bi-214 | (W.Mean) | : 102248.08 | + - .18 % | 2763.462 | | |
| Ra-226 | (W.Mean) | : 101799.1 | + - .10 % | 2751.327 | | |
| Ra-226 | 186.25 | | | | | |
| Th-234 | 63.29 | | | | | |
| U-238 E | 185.99 | 138020.66 | + - .83 % | 3730.288 | | |
| U-238 C | 185.99 | 115092.80 | + - .83 % | 3110.616 | | |
| U-235 | 185.72 | | | | | |
| U-238 L | | | | | | |
| Ac-228A | 338.40 | | | | | |
| Ac-228B | 911.07 | | | | | |
| Ra-228 | (W.Mean) | : | | | | |
| Pb-212B | 238.63 | | | | | |
| Tl-208A | 583.14 | | | | | |
| Th-228 | (W.Mean) | : | | | | |
| Th-232 | (W.Mean) | : | | | | |
| K-40 | 1460.75 | | | | | |

Πίνακας 3.3

Ανάλυση συγκέντρωσης Ραδίου-226 και άλλων φυσικώς ραδιενεργών ισοτόπων στο υγρό διάλυμα Ραδίου-226 MERA6872 (βλ. και Διάγραμμα 3.1)

| NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|--------|--------|--|--|
| of sample PMP4P181B | | | | | | |
| Remarks : HSF megalopoli AHS 4 | | | | | | |
| Isotope | Energy (keV) | Activity | Bq/kg | pCi/gr | | |
| Pb-210 | 46.52 | 926.40 +- 6.19 % | 25.038 | | | |
| Pb-214A | 295.22 | 1046.52 +- .81 % | 28.284 | | | |
| Pb-214B | 351.99 | 1068.37 +- .43 % | 28.875 | | | |
| Pb-214 | (W.Mean) : | 1063.35 +- .38 % | 28.739 | | | |
| Bi-214A | 609.32 | 972.04 +- .38 % | 26.271 | | | |
| Bi-214B | 1120.28 | 1033.99 +- 1.83 % | 27.946 | | | |
| Bi-214C | 1764.51 | 1198.93 +- .89 % | 32.403 | | | |
| Bi-214 | (W.Mean) : | 997.60 +- .35 % | 26.962 | | | |
| Ra-226 | (W.Mean) : | 1025.0 +- .26 % | 27.704 | | | |
| Ra-226 | 186.25 | | | | | |
| Th-234 | 63.29 | 972.79 +- 4.25 % | 26.292 | | | |
| U-238 E | 185.99 | 1112.87 +- 1.40 % | 30.078 | | | |
| U-238 C | 185.99 | 882.00 +- 1.40 % | 23.838 | | | |
| U-235 | 185.72 | | | | | |
| U-238 L | | | | | | |
| Ac-228A | 338.40 | 54.57 +- 26.26 % | 1.475 | | | |
| Ac-228B | 911.07 | 52.40 +- 11.32 % | 1.416 | | | |
| Ra-228 | (W.Mean) : | 52.71 +- 10.40 % | 1.425 | | | |
| Pb-212B | 238.63 | 55.63 +- 3.12 % | 1.504 | | | |
| Tl-208A | 583.14 | 45.05 +- 6.58 % | 1.218 | | | |
| Th-228 | (W.Mean) : | 52.93 +- 2.83 % | 1.431 | | | |
| Th-232 | (W.Mean) : | 52.9 +- 2.73 % | 1.430 | | | |
| K-40 | 1460.75 | 461.37 +- 2.70 % | 12.469 | | | |

Πίνακας 3.4

Ανάλυση συγκέντρωσης Ραδίου-226 και άλλων φυσικώς ραδιενεργών ισοτόπων στο δείγμα ιπτάμενης τέφρας PMP4P181 (βλ. και Διάγραμμα 3.2)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΚΘΕΣΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος της σχετικής υγρασίας στον αέρα του περιβάλλοντος σε σχέση με τη βαθμονόμηση ενεργού άνθρακα ως ανιχνευτή συγκεντρώσεων Ραδονίου επισημάνθηκε από πολλούς [βλ. π.χ. και George (1984), Gray (1987)] αλλά και από τον Μαρινάκη (2007) σε ό,τι αφορά τη βαθμονόμηση του ενεργού άνθρακα που έγινε στα πλαίσια της Διπλωματικής του Εργασίας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Εκτιμάται ότι αυτός ο ρόλος θα είναι εξίσου σημαντικός και για την βαθμονόμηση εναλλακτικών προσροφητικών υλικών, όπως ο συνθετικός ζεόλιθος και τα silica gel που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Στο παρόν Κεφάλαιο, αφού πρώτα δοθεί ο ορισμός της σχετικής υγρασίας στον αέρα του περιβάλλοντος, θα γίνει μία σχετικά σύντομη ανασκόπηση των κύριων τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την μέτρησή της. Στη συνέχεια, θα παρουσιασθεί ποιές από τις τεχνικές αυτές προσφέρονται για την μέτρηση της σχετικής υγρασίας σε ένα θάλαμο έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και πώς αυτές εφαρμόζονται στον θάλαμο που διατίθεται για τα πειράματα αυτής της ΔΕ. Τέλος, θα παρουσιασθεί ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατόν να επιτυγχάνονται οι σχετικές υγρασίες που πρέπει να αναπτυχθούν μέσα στον θάλαμο έκθεσης για τις οποίες πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση των εξεταζόμενων εναλλακτικών προσροφητικών υλικών με βάση αυτά που αναφέρονται από τον Gray (1987) αλλά και στο προηγούμενο 3^ο Κεφάλαιο.

4.2 Υγρασία στον αέρα του περιβάλλοντος

Με τον όρο υγρασία στον αέρα του περιβάλλοντος στην καθημερινή γλώσσα εννοείται συνήθως η σχετική υγρασία (στα αγγλικά Relative Humidity ή RH). Ως σχετική υγρασία ορίζεται η ποσότητα νερού (στη μορφή υδρατμού), που υπάρχει σε έναν δεδομένο όγκο αέρα σε μία θερμοκρασία σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα νερού (κορεσμός), που θα μπορούσε να υπάρξει στον ίδιο όγκο στην ίδια θερμοκρασία. Από τη στιγμή που ξεπερνάται ο κορεσμός τότε στον υπόψιν αέρα ο υδρατμός αρχίζει να υγροποιείται και εμφανίζεται πλέον ως σταγονίδια νερού σε στερεές επιφάνειες. Η σχετική υγρασία παίρνει τιμές από 0 έως 100%. Άλλος τρόπος ορισμού της περιεχόμενης υγρασίας στον

αέρα είναι η λεγόμενη απόλυτη υγρασία. Ως απόλυτη υγρασία (στα αγγλικά Absolute Humidity ή AH) ορίζεται η μάζα νερού (στη μορφή υδρατμού), που υπάρχει σε έναν δεδομένο όγκο αέρα. Οι συνηθέστερες μονάδες είναι gm^{-3} . Η απόλυτη υγρασία κυμαίνεται από 0 gm^{-3} (εντελώς ξηρός αέρας) έως τιμές που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αέρα (π.χ έως 30 gm^{-3} στους $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Άλλες συνήθειες μονάδες χρήσιμες για ισολογισμούς μαζών είναι (g υδρατμού) / (kg ξηρού αέρα). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η σχετική υγρασία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$RH = \frac{p(H_2O)}{p^*(H_2O)} \times 100\% \quad (4.1)$$

όπου:

$p(H_2O)$ είναι η μερική πίεση του υδρατμού στο μίγμα υδρατμού – αέρα

$p^*(H_2O)$ είναι πίεση κορεσμού του νερού στην θερμοκρασία του μίγματος υδρατμού – αέρα.

Επιπλέον η απόλυτη υγρασία υπολογίζεται από την σχέση:

$$AH = \frac{m_w}{V_a} \quad (4.2)$$

όπου:

m_w είναι η μάζα του νερού (στη μορφή υδρατμού)

V_a είναι ο όγκος του αέρα

Μια μεταβολή στη σχετική υγρασία μπορεί να προκληθεί με ένα από τους δυο παρακάτω τρόπους:

(α) Αν υπάρχει μια ελεύθερη επιφάνεια νερού, η σχετική υγρασία μπορεί να αυξηθεί με την εξάτμιση. Αυτή η διεργασία είναι βαθμιαία και προϋποθέτει τη διάχυση των υδρατμών μέσα στην ατμόσφαιρα.

(β) Όταν αυξάνει η θερμοκρασία του αέρα, παράλληλα αυξάνει και η ικανότητα του να συγκρατεί περισσότερη υγρασία. Σε μια τέτοια περίπτωση εφόσον δεν προστίθενται καινούρια ποσά υδρατμών η σχετική υγρασία θα ελαττωθεί, αντίθετα με τη μείωση της θερμοκρασίας η σχετική υγρασία αυξάνεται γιατί μειώνεται η ικανότητα κατακράτησης υδρατμών από τον αέρα.

4.3 Μέτρηση της υγρασίας στον αέρα

Η σχετική υγρασία (στο εξής απλώς υγρασία) στον αέρα μετρείται με ειδικά όργανα, τα οποία ονομάζονται υγρόμετρα. Η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης της υγρασίας σε όλο το εύρος τιμών της από 0 έως 100% είναι η λεγόμενη ψυχομετρική. Τα αντίστοιχα όργανα ονομάζονται και ψυχρόμετρα και μετρούν έμμεσα την υγρασία ως εξής: Τα ψυχρόμετρα αποτελούνται από δύο αισθητήρες θερμοκρασίας (δηλ. από δύο θερμομέτρα ή εναλλακτικά δύο θερμοστοιχεία, δύο thermistor, δύο μεταλλάκτες RTD¹ κ.ο.κ.). Ο πρώτος αισθητήρας (γνωστός και ως "ξηρός" βολβός²) μετράει την θερμοκρασία του αέρα. Ο δεύτερος αισθητήρας (γνωστός και ως "υγρός" βολβός) είναι τυλιγμένος με φυτίλι κορεσμένο με απεσταγμένο νερό. Ρεύμα αέρος οδηγείται πάνω από το "βρεμμένο" φυτίλι με αποτέλεσμα το περιεχόμενο νερό να εξατμίζεται και έτσι η θερμοκρασία του υγρού βολβού να πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία του ξηρού βολβού. Το πόσο μεγάλη θα είναι αυτή η πτώση εξαρτάται από την μερική πίεση $p(H_2O)$ του υδρατμού στο μίγμα υδρατμού – αέρα των υδρατμών στον ατμοσφαιρικό αέρα. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των θερμοκρασιών ξηρού και υγρού βολβού και ανατρέχοντας σε ειδικό διάγραμμα, που ονομάζεται ψυχομετρικός χάρτης (βλ. και Διάγραμμα 4.1) ή σε ειδικό ψυχομετρικό πίνακα (βλ. και Πίνακα 4.1), υπολογίζεται η σχετική υγρασία του αέρα. Για τους υπολογισμούς με τον ψυχομετρικό πίνακα χρειάζεται να είναι γνωστή η θερμοκρασία ξηρού βολβού και η διαφορά της θερμοκρασίας ξηρού βολβού από τη θερμοκρασία υγρού βολβού (αυτή η διαφορά στα αγγλικά λέγεται "depression of wet bulb"). Η ψυχομετρική μέθοδος δεν χρειάζεται βαθμονόμηση αρκεί οι αισθητήρες θερμοκρασίας να είναι επαρκώς ακριβείς (τουλάχιστον $\pm 0.5^\circ \text{C}$).

Η πιο κοινή μέθοδος μέτρησης της υγρασίας είναι η λεγόμενη υγρομετρική. Τα όργανα που βασίζονται στην υγρομετρική μέθοδο μετρούν άμεσα την υγρασία και είναι γενικά μικρά, σχετικά αξιόπιστα και φθηνά και βασίζονται σε απλά μηχανισμούς που λειτουργούν με βάση την αρχή

*Οι φυσικές διαστάσεις διαφόρων υλικών μπορούν να μεταβάλλονται
με την προσρόφηση υγρασίας.*

¹ Δηλαδή μεταλλάκτες των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας (θερμομέτρα αντίστασης ή στα αγγλικά Resistance Temperature Detector – RTD)

² Από τον βολβό των τυπικών υδραργυρικών θερμομέτρων

Τέτοια υλικά είναι οι τρίχες (από μαλλί), οι ζωικές μεμβράνες και κάποια πλαστικά. Για να κατασκευασθεί ένα υγρόμετρο από τέτοια υλικά αρκεί τμήμα τρίχας ή μεμβράνης ή πλαστικού, να διατηρείται τεταμένο με τη βοήθεια ενός ελατηρίου. Κατάλληλος μετρητικός μηχανισμός μετατόπισης μετρά την αλλαγή του μεγέθους του υλικού που οφείλεται στους υδρατμούς που περιέχονται στον αέρα (βλ. και Διάγραμμα 4.2). Η μετρούμενη μετατόπιση είναι απευθείας ανάλογη με τη σχετική υγρασία. Η μέτρηση με τέτοια όργανα χάνει σε ακρίβεια με το γήρας της συσκευής καθώς και με την επικάλυψη σκόνης. Η υγρομετρική μέθοδος χρειάζεται συχνή βαθμονόμηση. Συνήθως η βαθμονόμηση αυτή γίνεται με την έκθεση των υγρομέτρων αυτών σε περιβάλλον 100% σχετικής υγρασίας.

Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των πολύ λεπτών φιλμ και η ανάπτυξη των τεχνολογιών μικροκατεργασιών επέτρεψε την παραγωγή υψηλής ποιότητας μεταλλακτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη θέση των πιο πάνω απλών, φθινών υλικών, στα σύγχρονα υγρόμετρα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Οι μεταλλάκτες αυτοί λειτουργούν με βάση την αρχή:

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων υλικών μπορούν να μεταβάλλονται με την προσρόφηση υγρασίας.

Οι μεταλλάκτες αυτοί είναι δύο τύπων, τύπου πυκνωτή και τύπου αντίστασης και έχουν το πλεονέκτημα πως είναι ακριβείς, μικροί και επαναλήψιμοι στις μετρήσεις τους. Ειδικότερα, τα υγρόμετρα με αισθητήρα τύπου πυκνωτή αποτελούνται από δύο παράλληλες πλάκες τοποθετημένες έτσι ώστε να προσομοιάζουν τη λειτουργία ενός πυκνωτή. Ανάμεσα στις πλάκες τοποθετείται κατάλληλο διηλεκτρικό μέσο που αντιλαμβάνεται τις μεταβολές της υγρασίας (βλ. και Διάγραμμα 4.3). Τέτοιο διηλεκτρικό μέσο μπορεί να είναι ηλεκτρολυτικά διαλύματα ή κεραμικά υλικά ή πολυμερή, με τα τελευταία να έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται μόλις πρόσφατα. Καθώς η υγρασία στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται το διηλεκτρικό μέσο αλλάζει ιδιότητες μεταβάλλοντας τελικά την διηλεκτρική σταθερά του. Η διηλεκτρική σταθερά του είναι ανάλογη με τη χωρητικότητα και αντιστρόφως ανάλογη με την μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Τα υγρόμετρα με αισθητήρα τύπου αντίστασης αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται στα άκρα ενός λεπτού φιλμ από πολυμερές (βλ. και Διάγραμμα 4.4). Καθώς η υγρασία στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται, το πολυμερές φιλμ απορροφά νερό και η αντίστασή του αλλάζει ανάλογα με τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Το

βασικό πρόβλημα των μεταλλακτών αυτών των τύπων στην πρώτη τους μορφή ήταν το μικρό εύρος σχετικής υγρασίας για το οποίο μετρούσαν αξιόπιστα. Συγκεκριμένα κάθε τέτοιος μεταλλάκτης ανάλογα με την κατασκευή του μπορούσε να λειτουργεί καλά μόνο σε ένα εύρος σχετικών υγρασιών της τάξης του 10 – 20%. Το μειονέκτημα αυτό έχει σήμερα (2008) ξεπεραστεί, και γενικά διατίθενται υγρόμετρα τύπου πυκνωτή ή αντίστασης με μεταλλάκτη από πολυμερές που μπορούν να μετρούν σχετικές υγρασίες από 0 – 100%. Παρόλαυτά, συχνά τίθενται ερωτήματα σχετικά με την ακρίβεια αυτών των μετρήσεων, η οποία μπορεί σε απόλυτες τιμές να φθάνει μέχρι και $\pm 7\%$ RH. Τα υγρόμετρα με μεταλλάκτη χρειάζονται συχνή βαθμονόμηση. Συνήθως η βαθμονόμηση αυτή γίνεται με την έκθεση των υγρομέτρων αυτών σε περιβάλλον βαθμονομημένης σχετικής υγρασίας. Τέτοια περιβάλλοντα δημιουργούνται πάνω από τη μάζα πολύ πυκνών υπερκορεσμένων υδατικών διαλυμάτων (απεσταγμένου νερού) με καθαρά αλάτα, όπως π.χ. το χλωριούχο λίθιο, το χλωριούχο μαγνήσιο, το χλωριούχο νάτριο κ.ά. Η σχετική υγρασία που δημιουργείται εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. (βλ. και τον πίνακα που υπάρχει στο Παράρτημα "B"). Το ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν διαθέτει τέτοια διαλύματα βαθμονόμησης.

4.4 Διαθέσιμα υγρόμετρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας απλά υγρόμετρα τριχός, καθώς και υγρόμετρα με μεταλλάκτες (μάλλον από πολυμερές υλικό) (α) εταιρείας κατασκευής OMEGA, τύπου HHM25 (πρόκειται για ψηφιακό πολυόργανο του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά διακρίνονται στο Παράρτημα "B"), (β) εταιρείας κατασκευής CAREL, τύπου SHWOOP απευθείας συνδεδεμένο με αναλογοψηφιακό μετατροπέα και H/Y (τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διακρίνονται στο Παράρτημα "B"), και (γ) εταιρείας κατασκευής OMEGA, τύπου HX13C απευθείας συνδεδεμένο με αναλογοψηφιακό μετατροπέα και H/Y (τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διακρίνονται στο Παράρτημα "B"). Είναι φανερό από τα προηγούμενα ότι όλα αυτά τα υγρόμετρα χρειάζονται βαθμονόμηση, αλλά δεδομένης της ελλείψεως σχετικών διαλυμάτων αλάτων, η βαθμονόμηση και ο έλεγχός τους δεν ήταν δυνατός. Έτσι, για τη μέτρηση της υγρασίας που απαιτείται για την πειραματική διαδικασία στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ψυχομετρική μέθοδος. Για το σκοπό αυτό αγοράστηκαν δύο απλά ψυχρόμετρα ξηρού – υγρού βολβού με υδραργυρικά θερμομέτρα (βλ. και τη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.5).

Τα ψυχρόμετρα αυτού του τύπου λειτουργούν ως εξής: Ο βολβός του ενός από τα δύο θερμομέτρα του ψυχομέτρου είναι καλυμμένος με απορροφητικό φυτίλι, το οποίο είναι συνδεδεμένο με μικρό θαλαμίσκο, ο οποίος γεμίζει με νερό (κατά προτίμηση απεσταγμένο). Έτσι το φυτίλι εμποτίζεται με το νερό και μάλιστα λόγω του επαρκούς όγκου του θαλαμίσκου διατηρείται συνεχώς υγρό. Ο βολβός του άλλου από τα δύο θερμομέτρα του ψυχομέτρου βρίσκεται εκτεθειμένος στον αέρα του περιβάλλοντος και λειτουργεί όπως ο βολβός ενός απλού θερμομέτρου. Χρησιμοποιώντας τη χειρολαβή του σώματος του ψυχομέτρου το περιστρέφουμε με μεγάλη γωνιακή ταχύτητα για 15-20 s (βλ. και φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.6). Μετά την περιστροφή διαβάζονται οι ενδείξεις των δύο θερμομέτρων. Η ένδειξη του θερμομέτρου με το φυτίλι είναι η λεγόμενη θερμοκρασία υγρού βολβού ή υγρής σφαίρας (wet bulb) T_{WB} , ενώ η ένδειξη του άλλου θερμομέτρου είναι η λεγόμενη θερμοκρασία ξηρού βολβού ή ξηρής σφαίρας (dry bulb) T_{DB} . Στη συνέχεια με τη χρήση του ψυχομετρικού πίνακα, ο οποίος δίνει τη σχετική υγρασία συναρτήσει της T_{DB} και της διαφοράς $T_{DB} - T_{WB}$ εκτιμάται η σχετική υγρασία του αέρα μέσα στον οποίο περιστράφηκε το ψυχρόμετρο (Πίνακας 4.1). Για την κατανόηση της λειτουργίας του πίνακα παρουσιάζεται το επόμενο παράδειγμα:

Έστω ότι χρησιμοποιείται το ψυχρόμετρο όπως αναφέρουν οι πιο πάνω οδηγίες χρήσεως του και οι τιμές που καταγράφονται είναι: για το θερμομέτρο δίχως απορροφητικό φυτίλι, η θερμοκρασία ξηρού βολβού $T_{DB} = 24^{\circ}\text{C}$ και για το θερμομέτρο με υγρό απορροφητικό φυτίλι η θερμοκρασία υγρού βολβού $T_{WB} = 20^{\circ}\text{C}$. Η διαφορά των δύο τιμών είναι $T_{DB} - T_{WB} = 4^{\circ}\text{C}$. Στη στήλη DRY BULB επιλέγεται η γραμμή που ξεκινά με "24". Από τις στήλες "DEPRESSION OF WET BULB" επιλέγεται εκείνη που ξεκινά με "4". Το σημείο που συναντώνται η επιλεγμένη γραμμή με την επιλεγμένη στήλη δίνει τη σχετική υγρασία 69% (βλ. και την υλοποίηση του παραδείγματος στο Διάγραμμα 4.7).

Σημειώνεται ότι στον ψυχομετρικό πίνακα δεν δίνονται τιμές της υγρασίας για ακρίβεια του T_{DB} ίση με 0.5°C ενώ τα θερμομέτρα του ψυχομέτρου έχουν αυτή τη διακριτική ικανότητα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, στην περίπτωση που το T_{DB} βρίσκεται με δεκαδικό μέρος (το οποίο δεν μπορεί να είναι διάφορο του 0.5°C) η σχετική υγρασία εκτιμάται ως ο μέσος όρος των σχετικών υγρασιών που προκύπτουν από το T_{WB} που μετρήθηκε με το $T_{DB} + 0.5^{\circ}\text{C}$, και από το T_{WB} με το $T_{DB} - 0.5^{\circ}\text{C}$.

Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει προφανώς την παρουσία του ανθρώπου για τη λειτουργία του ψυχομέτρου στο προς μέτρηση περιβάλλον, κάτι το οποίο δεν μπορεί φυσικά να γίνεται σε κλειστό θάλαμο περιορισμένου όγκου, στον οποίο εκτίθενται σε συγκεντρώσεις Ραδονίου μεταλλικά δοχεία με προσροφητικά υλικά. Επομένως για να επιτευχθεί η λειτουργία του ψυχομέτρου χωρίς τη μεσολάβηση ανθρώπου έπρεπε να γίνει τεχνική τροποποίηση ώστε αυτό να λειτουργεί αυτόματα.. Η βασική απαίτηση για την επιτυχημένη τροποποίηση ήταν η εξασφάλιση επαρκούς ρεύματος αέρα με αυτόματο τρόπο. Για το σκοπό αυτό αποφασίστηκε να δοκιμασθεί (α) ένας ανεμιστήρας 5 x 5 cm, 12V, από επεξεργαστή Intel, Pentium III, socket I, ο οποίος αφαιρέθηκε από την αντίστοιχη ψύκτρα και (β) ένας ανεμιστήρας 8 x 8 cm, 12V, από θήκη (κουτί) H/Y τύπου PC συμβατού (βλ. και φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.8). Για την τροφοδοσία των ανεμιστήρων με ισχύ χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό non-ATX. Οι δοκιμές έγιναν με τη βοήθεια μιας πρόχειρης συγκρότησης σύμφωνα με την οποία το άκρο του φυτιλιού του υγρού βολβού του ψυχομέτρου (το οποίο είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του θαλαμίσκου) τραβήχτηκε με προσοχή έξω και βυθίστηκε σε πλαστικό δοχείο με νερό για να εξασφαλίζεται η συνεχής υγρανσή του. Η συγκρότηση αυτή διακρίνεται στις φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 4.9 και 4.10. Ο ανεμιστήρας (α) ή (β) συγκρατείται στο επίπεδο που βρίσκεται το φυτίλι από ανθρώπινο χέρι. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές όταν οι ανεμιστήρες λειτουργούσαν για 90s συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2. Ως κατ'αρχήν "σωστές" θεωρούνται οι ενδείξεις της υγρασίας που λαμβάνονται με τον τρόπο που περιγράφηκε στο πιο πάνω παράδειγμα (χειροκίνητη λειτουργία ενός δεύτερου ίδιου ψυχομέτρου από άνθρωπο). Παρατηρείται ότι οι κατ'αρχήν σωστές ενδείξεις της σχετικής υγρασίας συμφωνούν μόνο με τις ενδείξεις που λαμβάνονται με τη χρήση του ισχυρότερου ανεμιστήρα (β), ο οποίος φαίνεται να διαθέτει ικανή παροχή αέρα για την ορθή λειτουργία του ψυχομέτρου (βλ. και σκιασμένες περιοχές του Πίνακα 4.2). Αποφασίστηκε επομένως ότι για την αυτοματοποίηση της μέτρησης της υγρασίας με το ψυχρόμετρο του Διαγράμματος 4.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανός ανεμιστήρας. Για το σκοπό ένα από τα δύο διαθέσιμα ψυχρόμετρα διαμορφώθηκε κατά τον τρόπο που δείχνει η φωτογραφία του Διαγράμματος 4.11, ως εξής: (1) αφαιρέθηκε η χειρολαβή για την περιστροφή του ψυχομέτρου, (2) ένας ανεμιστήρας τύπου (β) προσαρμόστηκε σε κατάλληλο πλαστικό πλαίσιο, το οποίο απαλλοτριώθηκε από παλιό PC, IBM. PIII, 133 MHz, (3) το πλαίσιο αυτό τοποθετήθηκε (με βίδες) στο άνω μέρος του πλαστικού καλύμματος ενός πλαστικού δοχείου πληρωμένου με νερό, (3) το

ψυχρόμετρο τοποθετήθηκε πάνω από το πλαστικό δοχείο και δίπλα στο πλαίσιο με τον ανεμιστήρα, με τρόπο ώστε το παραγόμενο ρεύμα αέρα να στοχεύει στους βολβούς, (4) το άκρο του φυτιλιού του υγρού βολβού του ψυχομέτρου βυθίστηκε στο πλαστικό δοχείο με το νερό για να εξασφαλίζεται η συνεχής υγρανή του. Στο πλαστικό κάλυμμα του δοχείου ανοίχθηκε για το σκοπό αυτό μικρή οπή για να περνά το φυτίλι και να μην χύνεται το νερό, και τέλος (5) ο ανεμιστήρας συνδέθηκε με μικρό κατάλληλο τροφοδοτικό. Το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, όταν τοποθετείται σε ένα κλειστό θάλαμο, μπορεί να διαβάζεται οπτικά από υπάρχον διαφανές παράθυρο. Ο έλεγχος του ανεμιστήρα του σε αυτήν την περίπτωση γίνεται από εξωτερικό διακόπτη.

4.5 Ρύθμιση υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης

4.5.1 Γενικά

Όπως έχει αναφερθεί στο 3^ο Κεφάλαιο για τα πειράματα έκθεσης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας διακρίνονται τρεις ονομαστικές σχετικές υγρασίες: (α) 20%, (β) 50% και (γ) 80%, οι οποίες αντιστοιχούν ενδεικτικά στις εξής περιοχές σχετικών υγρασιών: τη "χαμηλή" 10 – 30%, τη "μεσαία" 30 – 70%, και την "υψηλή" 70 – 100%. Με τη βοήθεια αυτών των τριών επιπέδων υγρασίας, διερευνάται η επίδραση της σχετικής υγρασίας στην προσροφητικότητα Ραδονίου από τα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά, κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που παρουσιάζεται από τον Gray (1987). Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να γίνει αυτή η διερεύνηση είναι ότι τα προσροφητικά υλικά, παρουσιάζουν κυρίως το μειονέκτημα ότι, αν η σχετική υγρασία του εσωτερικού χώρου έκθεσης είναι υψηλότερη από τη συνήθως επικρατούσα 40 – 50% για την ανθρώπινη άνεση, τότε οι όποιες προσροφητικές ικανότητες Ραδονίου μειώνονται με αποτέλεσμα να απαιτείται ειδική βαθμονόμηση.

Για τη μέτρηση της υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης (πρόκειται για τον θάλαμο "Α" – βλ. και Μαρινάκης, 2007) χρησιμοποιείται εξοπλισμός ως εξής:

(α) για την "υψηλή" σχετική υγρασία: το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, και κατά δεύτερο λόγο ένα υγρόμετρο τριχός και ένα ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25 [τα δύο τελευταία τοποθετημένα στον θάλαμο, όπως δείχνουν οι φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.12(α και β)].

(β) για τη "μεσαία" σχετική υγρασία: επίσης το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, και κατά δεύτερο λόγο το υγρόμετρο τριχός και το ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25.

(γ) για τη "χαμηλή" σχετική υγρασία: μόνο το υγρόμετρο τριχός και το ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25. Ο λόγος για αυτήν την επιλογή υπαγορεύεται από το γεγονός ότι, όπως διαπιστώθηκε πειραματικά, και θα αναλυθεί σε αμέσως επόμενη παράγραφο, ο υδρατμός από το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο (που βγαίνει από την οπή του καλύμματος του πλαστικού δοχείου ή κατευθείαν από το φυτίλι) μπορεί να αλλοιώσει πολύ γρήγορα (λίγες ώρες) σε σημαντικό βαθμό από την άποψη της σχετικής υγρασίας, μία σχετικά ξηρή ατμόσφαιρα στο θάλαμο, ενδεικτικά δηλαδή να ανεβάσει τη σχετική υγρασία από 20 σε 40%.

Για τη ρύθμιση της υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης χρησιμοποιήθηκαν απλές τεχνικές που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους. Οι τεχνικές αυτές για να λειτουργήσουν προϋποθέτουν ότι, η θερμοκρασία του θαλάμου έκθεσης παραμένει περίπου σταθερή. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση που έχει ρυθμισθεί η σχετική υγρασία σε ένα επιθυμητό επίπεδο, τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας (αύξηση της $p^*(H_2O)$ – σχέση 4.1) θα την μειώσει ενώ τυχόν πτώση (μείωση της $p^*(H_2O)$ – σχέση 4.1) θα την αυξήσει. Στην εδώ περίπτωση ο χρησιμοποιούμενος θάλαμος δεν είναι αδιαβατικός (έχει τοίχωμα από ανοξείδωτο ατσάλι), οπότε η θερμοκρασία του, χωρίς άλλη παρέμβαση, μπορεί να διατηρείται "σταθερή" στην περιοχή θερμοκρασιών ανθρώπινης άνεσης 21 – 25° C, που επικρατεί στο περιβάλλον του Εργαστηρίου.

4.5.2 Ρύθμιση "υψηλής" υγρασίας

Εχοντας υπόψιν ότι η πυκνότητα του αέρα στις συνθήκες του περιβάλλοντος του Εργαστηρίου (25° C, 1 bar) είναι περίπου 1.2 kgm⁻³ και λαμβάνοντας υπόψιν το γράφημα του προσεγγιστικού Διαγράμματος 4.13, μπορεί κανείς να πει ότι ο κορεσμένος σε υγρασία αέρας περιέχει υδρατμό περίπου 15 gm⁻³. Δεδομένου ότι ο χρησιμοποιούμενος θάλαμος "Α" έχει όγκο 2 m³ απαιτούνται περίπου 30 g υδρατμού ώστε αυτός να φθάσει να έχει περιβάλλον με 100% σχετική υγρασία. Για να επιτευχθεί η πλήρωση του θαλάμου με αυτή την ποσότητα υδρατμών και έτσι να εξασφαλισθεί στο περιβάλλον του θαλάμου η "υψηλή" σχετική υγρασία στην περιοχή 70 – 100%, προσφέρεται η μέθοδος της εξάτμισης. Προτάθηκε να χρησιμοποιηθεί δοχείο από αλουμίνιο μικρού ύψους και μεγάλης επιφάνειας (ταψί), διαστάσεων M60 x Π40 x Y4 cm, το οποίο αφού γεμίσει με 1 L νερό να τοποθετηθεί στο πάτωμα του θαλάμου "Α". Το νερό λόγω εξάτμισης αναμένεται να διαχέεται στο εσωτερικό του θαλάμου και να αυξάνει την σχετική υγρασία μέχρι και 100% σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η

επαλήθευση της καλής λειτουργίας αυτής της ρύθμισης "υψηλής" υγρασίας έγινε πειραματικά ως εξής:

Αρχικά τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του θαλάμου "Α" το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο κοντά στο διαφανές παράθυρο (βλ. και φωτογραφίες στο Διάγραμμα 4.14). Η τοποθέτηση έγινε κατά τρόπο που να επιτρέπει την άνετη ανάγνωση των θερμομέτρων. Το τροφοδοτικό του υγρομέτρου συνδέθηκε σε αναμονή τροφοδοσίας που βρίσκεται στο εσωτερικό του θαλάμου (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.15). Η αναμονή αυτή ελέγχεται εξωτερικά από τον διακόπτη Β στον πίνακα ελέγχου του θαλάμου (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.16). Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το ταψί με το νερό στο πάτωμα του θαλάμου "Α" ακριβώς μπροστά από τον ανεμιστήρα του θαλάμου (12x12 cm), όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.17. Τέλος ο θάλαμος έκλεισε στεγανά με την αεροστεγή θύρα και τέθηκε σε λειτουργία ο ανεμιστήρας του θαλάμου μέσω του διακόπτη Η20. Η ταχύτητα του ανεμιστήρα ρυθμίσθηκε στη θέση "150" στο ποτενσιόμετρο Π2 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.18). Με τη χρήση του ανεμιστήρα εξασφαλίζεται ότι ο αέρας που υπάρχει στο θάλαμο "Α" αναδεύεται με επάρκεια. Στη συνέχεια λήφθηκαν μετρήσεις σχετικής υγρασίας με τον ακόλουθο τρόπο:

1. λειτουργία του ανεμιστήρα του ψυχομέτρου για 90s
2. διακοπή της λειτουργίας του ανεμιστήρα του ψυχομέτρου
3. άμεση ανάγνωση των τιμών θερμοκρασίας από τα δύο θερμομέτρα και καταγραφή των T_{DB} και T_{WB}
4. υπολογισμός της σχετικής υγρασίας
5. ανάγνωση σχετικής υγρασίας από το υγρόμετρο τριχός και από το υγρόμετρο OMEGA και καταγραφή τους
6. αναμονή 15 min
7. επανάληψη των βημάτων 1 – 6 για τουλάχιστον 6 κύκλους (1.5 h)

Ο Πίνακας 4.3 συγκεντρώνει τα πειραματικά αποτελέσματα της πιο πάνω διαδικασίας. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά (ενδείξεις μετασκευασμένου ψυχομέτρου) σημειώνεται ότι αρκούν μόλις δύο ώρες εξάτμισης μέσα στο θάλαμο "Α" –υπενθυμίζεται ότι είναι όγκου 2 m³- προκειμένου να επιτευχθεί υγρασία > 85%. Μάλιστα δεδομένου

ότι μετά τον 6^ο κύκλο μετρήσεων, διακόπηκε η λειτουργία του ανεμιστήρα του θαλάμου, διαπιστώθηκε ότι αυτή η υψηλή σχετική υγρασία διατηρείται χωρίς ανάδευση της ατμόσφαιρας, τόσο μετά από μία ώρα, όσο και μετά από περίπου 20 ώρες, βεβαιώνοντας ότι ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη ρύθμιση του περιβάλλοντος του θαλάμου σε "υψηλή" υγρασία είναι συνεπής και αποδοτικός.

4.5.3 Ρύθμιση "μεσαίας" υγρασίας

Για την επίτευξη "μεσαίας" υγρασίας στην περιοχή σχετικών υγρασιών από 30 – 70%, αποφασίστηκε ότι δεν απαιτείται ειδική ρύθμιση διότι μετά από σειρά μετρήσεων με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο διαπιστώθηκε πως η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος του Εργαστηρίου βρίσκεται στην περιοχή που ενδιαφέρει (μεταξύ 40 – 60 %). Επομένως κάθε φορά που κλείνει ο θάλαμος έκθεσης περικλείει αέρα της ατμόσφαιρας του Εργαστηρίου, οπότε προκύπτει και η επιθυμητή ρύθμιση.

4.5.4 Ρύθμιση "χαμηλής" υγρασίας

Η επίτευξη "χαμηλής" υγρασίας στην περιοχή σχετικών υγρασιών από 10 – 30% παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία από τις προηγούμενες δύο ρυθμίσεις.

Ο προφανής και ευκολότερος τρόπος ρύθμισης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας του θαλάμου, μέθοδος που όμως απορρίφθηκε διότι αλλοιώνει τη σταθερή περιοχή θερμοκρασιών (21 – 25^ο C), στην οποία πρέπει να οργανωθούν τα πειράματα.

Άλλος σχετικά εύκολος τρόπος ρύθμισης είναι η αφύγρανση του αέρα του θαλάμου μέσω συμπύκνωσης με ψύξη. Η μέθοδος αυτή αναπαριστάται σχηματικά στο σκαρίφημα του Διαγράμματος 4.19. Η μέθοδος αυτή δεν επιλέχθηκε για οικονομοτεχνικούς λόγους. Συγκεκριμένα, για την μέθοδο αυτή έπρεπε να γίνει προμήθεια και τοποθέτηση μικρού ψυγείου (ίσως ένα ψυγείο καλοριφέρ αυτοκινήτου να ήταν κατάλληλο), υδατοπαγίδας, σωληνώσεων, βαλβίδων, δοχείων συλλογής συμπυκνώματος και δοχείων συλλογής ψυκτικών μέσων κ.ο.κ.

Μετά την απόρριψη των προηγούμενων μεθόδων αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη διάταξη δοχείου με υλικό που να προσροφά υγρασία τοποθετημένη εξωτερικά του θαλάμου έκθεσης, μέσα από την οποία να μπορεί να κυκλοφορεί ο αέρας του θαλάμου σε κλειστό κύκλωμα. Ως δοχείο για το αφυγραντικό υλικό χρησιμοποιήθηκε χύτρα ταχύτητας εταιρείας κατασκευής SEB Γαλλίας, τυπικής χωρητικότητας 6L, η οποία διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.20. Στη

χύτρα αυτή έχει γίνει τροποποίηση και έχουν τοποθετηθεί στο σώμα, κοντά στο χείλος της χύτρας και αντιδιαμετρικά βαλβίδες, οι οποίες επιτρέπουν την είσοδο και έξοδο του αέρα (βλ. και φωτογραφίες στο Διάγραμμα 4.21). Η μία από τις δύο βαλβίδες, αυτή που αποτελεί την είσοδο (αναγράφεται ΕΙΣΟΔΟΣ στο σώμα), συνδέεται με το εσωτερικό της χύτρας με διάτρητο σωληνάκι, το οποίο διατρέχει όλον το πυθμένα της χύτρας στην περιφέρεια του κύκλου που ορίζεται από αυτόν (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.22).

Η χύτρα πληρώθηκε με τα εξής προσροφητικά υλικά, των οποίων ο συνολικός όγκος φθάνει τον ονομαστικό όγκο της (βλ. και φωτογραφίες Διαγράμματος 4.23):

- 1 kg ζεόλιθο, σαν αυτόν του οποίου θα δοκιμασθεί η προσροφητικότητα Ραδονίου
- 1 kg silica gel blue, σαν αυτό του οποίου θα δοκιμασθεί η προσροφητικότητα Ραδονίου. Το silica gel blue αυτό, υπήρχε στο Εργαστήριο από παλαιότερα πειράματα προσδιορισμού του συντελεστή προσρόφησης Ραδονίου (βλ. και Karangelos, 2003), και
- 2 kg ενεργού άνθρακα, σαν αυτόν του οποίου θα δοκιμασθεί η προσροφητικότητα Ραδονίου

Όλα αυτά τα προσροφητικά υλικά τοποθετήθηκαν στην χύτρα (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.24) αφού είχαν πρώτα αφυγρανθεί με θέρμανση κατά το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007).

Η χύτρα τοποθετείται κλειστή εξωτερικά του θαλάμου έκθεσης, με τρόπο ώστε, όπως σημειώθηκε πιο πάνω, μέσα από την οποία να μπορεί να κυκλοφορεί ο αέρας του θαλάμου σε κλειστό κύκλωμα, με την βοήθεια αντλίας κυκλοφορίας (βλ. και την πορεία του αέρα του θαλάμου μέσα από τα βέλη που παρουσιάζονται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.25). Προκειμένου για την υλοποίηση αυτού του κυκλώματος, χρειάστηκε να τροποποιηθούν ορισμένες συνδεσμολογίες σωληνώσεων του θαλάμου έκθεσης – θάλαμος "Α", Μαρινάκης (2007). Η τροποποίηση που έγινε είναι κατανοητή αν συγκριθούν οι φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.25, με την αντίστοιχη παλαιότερη του Διαγράμματος 4.26, από την ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Παρατηρείται από το Διάγραμμα ότι με κατάλληλο τρόπο προστέθηκαν οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3', ΣΒ3", ΣΒ4' και ΣΒ4". Η αντλία κυκλοφορίας που χρησιμοποιείται βρίσκεται μέσα στο θάλαμο

και διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.27. Η αντλία ελέγχεται από τον εξωτερικό διακόπτη H18 (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.28). Η επαλήθευση της καλής λειτουργίας του συστήματος ρύθμισης χαμηλής υγρασίας έγινε πειραματικά ως εξής:

Αρχικά τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του θαλάμου "Α" το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο κοντά στο διαφανές παράθυρο (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.14). Η τοποθέτηση έγινε κατά τρόπο που να επιτρέπει την άνετη ανάγνωση των θερμομέτρων. Το τροφοδοτικό του υγραμέτρου συνδέθηκε σε αναμονή τροφοδοσίας που βρίσκεται στο εσωτερικό του θαλάμου (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.15). Η αναμονή αυτή ελέγχεται εξωτερικά από τον διακόπτη Β στον πίνακα ελέγχου του θαλάμου (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.16). Ο θάλαμος έκλεισε στεγανά με την αεροστεγή θύρα και τέθηκε σε λειτουργία ο ανεμιστήρας του θαλάμου μέσω του διακόπτη H20 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.18) Η ταχύτητα του ανεμιστήρα ρυθμίσθηκε στη θέση "150" στο ποτενσιόμετρο Π2 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.19). Με τη χρήση του ανεμιστήρα εξασφαλίζεται ότι ο αέρας που υπάρχει στο θάλαμο "Α" αναδεύεται με επάρκεια. Η αρχική σχετική υγρασία του θαλάμου προσδιορίσθηκε σε ~50% (βλ. και Πίνακα 4.4). Στη συνέχεια ανοίξαν οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3, ΣΒ3' και ΣΒ4, ΣΒ4' του τροποποιημένου κυκλώματος κυκλοφορίας καθώς και οι βαλβίδες "ΕΙΣΟΔΟΣ" και "ΕΞΟΔΟΣ" της χύτρας, οι οποίες επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα μέσα από τη χύτρα ταχύτητας και λήφθηκαν μετρήσεις σχετικής υγρασίας με τα ακόλουθα βήματα:

1. τίθεται σε λειτουργία η αντλία κυκλοφορίας για 30 min μέσω του διακόπτη H18
2. μετά τη συμπλήρωση 30 min, σταματάει η λειτουργία της αντλίας κυκλοφορίας και κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3 και ΣΒ4 (βλ. και Διάγραμμα 4.25) καθώς και οι σφαιρικές βαλβίδες "ΕΙΣΟΔΟΣ" και "ΕΞΟΔΟΣ" της χύτρας.
3. τίθεται σε λειτουργία ο ανεμιστήρας του ψυχρομέτρου για 90s
4. διακόπτεται η λειτουργία του ανεμιστήρα του ψυχρομέτρου και γίνεται άμεση ανάγνωση των τιμών θερμοκρασίας από τα δύο θερμοόμετρα και καταγραφή των T_{DB} και T_{WB}
5. γίνεται υπολογισμός της σχετικής υγρασίας

6. γίνεται ανάγνωση σχετικής υγρασίας από το υγρόμετρο OMEGA και καταγραφή της
7. μετά από αναμονή 30 min επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 – 6 για τουλάχιστον 3 κύκλους (3 h)

Ο Πίνακας 4.4 συγκεντρώνει τα πειραματικά αποτελέσματα της πιοπάνω διαδικασίας. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά (ενδείξεις μετασκευασμένου ψυχομέτρου) διαπιστώνεται ότι μετά από 3 ωρο πείραμα η μέθοδος δεν αποδίδει όσο αναμενόταν. Ο λόγος προσδιορίστηκε στο γεγονός ότι ο υδρατμός από το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο (που βγαίνει από την οπή του καλύμματος του πλαστικού δοχείου ή κατευθείαν από το φυτίλι) αναπληρώνει τον υδρατμό που προσροφάται από το αφυγραντικό μίγμα υλικών της χύτρας. Μάλιστα, μετά την πάροδο 20 περίπου ωρών χωρίς άλλη παρέμβαση στον αέρα του θαλάμου, πέρα από την ανάδευση με τον εσωτερικό ανεμιστήρα διαπιστώνεται ότι η σχετική υγρασία του θαλάμου επανέρχεται πολύ κοντά στην αρχική της τιμή (σύγκρινε πρώτη και τελευταία μέτρηση στον Πίνακα 4.4). Με βάση τα προηγούμενα επιχειρήθηκε άλλη πειραματική επαλήθευση της καλής λειτουργίας του συστήματος ρύθμισης χαμηλής υγρασίας ως εξής:

Αφαιρέθηκε από το εσωτερικό του θαλάμου "Α" το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο. Ο θάλαμος έκλεισε στεγανά με την αεροστεγή θύρα και τέθηκε σε λειτουργία ο ανεμιστήρας του θαλάμου.. Η αρχική σχετική υγρασία του θαλάμου προσδιορίστηκε σε ~50% (βλ. και Πίνακα 4.5). Στη συνέχεια ανοίξαν οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3, ΣΒ3' και ΣΒ4, ΣΒ4' του τροποποιημένου κυκλώματος κυκλοφορίας καθώς και οι βαλβίδες "ΕΙΣΟΔΟΣ" και "ΕΞΟΔΟΣ" της χύτρας, οι οποίες επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα μέσα από τη χύτρα ταχύτητας και λήφθηκαν μετρήσεις σχετικής υγρασίας με τα ακόλουθα βήματα:

1. τίθεται σε λειτουργία η αντλία κυκλοφορίας για 30 min μέσω του διακόπτη H18
2. μετά τη συμπλήρωση 30 min, σταματάει η λειτουργία της αντλίας κυκλοφορίας και κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3 και ΣΒ4 (βλ. και Διάγραμμα 4.25) καθώς και οι σφαιρικές βαλβίδες "ΕΙΣΟΔΟΣ" και "ΕΞΟΔΟΣ" της χύτρας.
3. γίνεται ανάγνωση σχετικής υγρασίας από το υγρόμετρο OMEGA και καταγραφή της

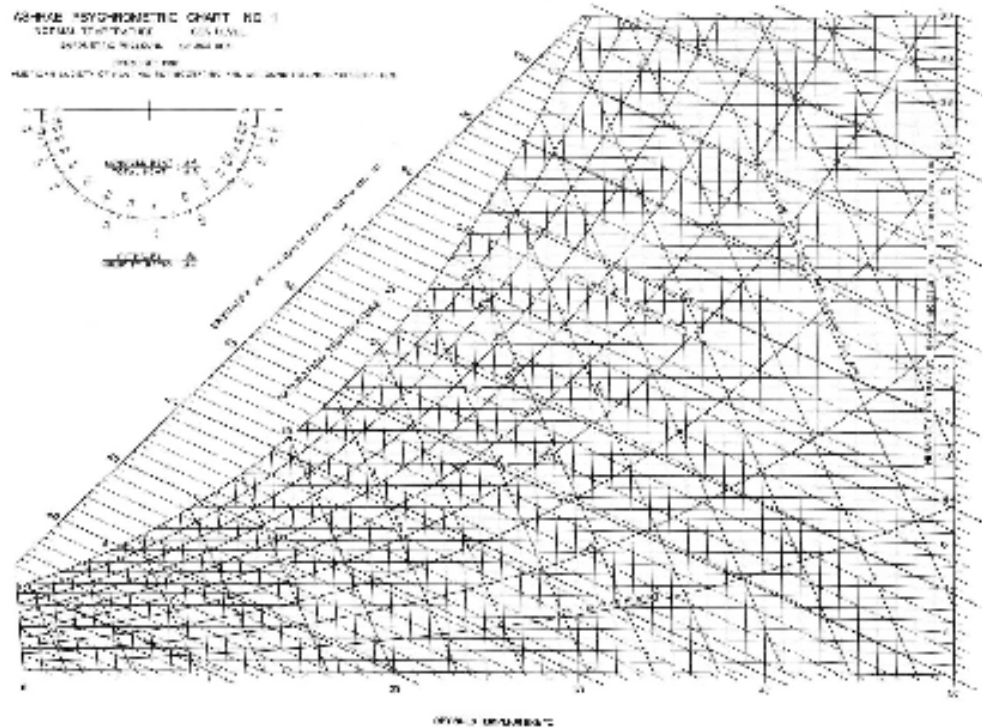
4. *μετά από αναμονή 30 min επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 – 3 για τουλάχιστον 5 κύκλους (5 h)*

Ο Πίνακας 4.5 συγκεντρώνει τα πειραματικά αποτελέσματα της πιο πάνω διαδικασίας. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά (ενδείξεις υγρομέτρου OMEGA) διαπιστώνεται ότι μετά από 3 ωρο πείραμα η μέθοδος αποδίδει σαφώς περισσότερο. Μάλιστα, μετά την πάροδο 20 περίπου ωρών χωρίς άλλη παρέμβαση στον αέρα του θαλάμου, πέρα από την ανάδευση με τον εσωτερικό ανεμιστήρα διαπιστώνεται ότι η σχετική υγρασία του θαλάμου διατηρείται πολύ κοντά στην τελική τιμή του ~20% που επιτεύχθηκε στο τέλος του 5^{ου} κύκλου (σύγκρινε με την τελευταία μέτρηση στον Πίνακα 4.5), βεβαιώνοντας ότι ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη ρύθμιση του περιβάλλοντος του θαλάμου σε "χαμηλή" υγρασία είναι συνεπής και αποδοτικός, αρκεί να μην δίνεται ευκαιρία σε υδρατμούς να εισέρχονται στο θάλαμο με οποιοδήποτε τρόπο και να αλλοιώνουν την ατμόσφαιρά του από την άποψη της σχετικής υγρασίας.

4.6 Παρατηρήσεις - Σχόλια

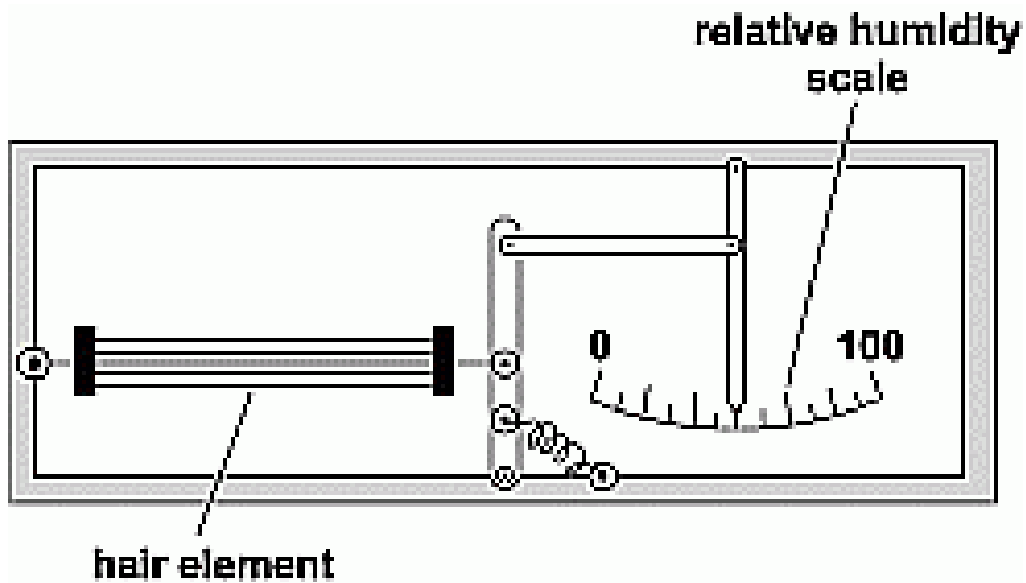
Στις προηγούμενες παραγράφους, παρουσιάστηκαν οι τεχνικές αυτές που προσφέρονται για την μέτρηση της σχετικής υγρασίας σε ένα θάλαμο έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου και πώς αυτές μπορούν να εφαρμόζονται στον θάλαμο που διατίθεται για τα πειράματα αυτής της ΔΕ. Επίσης παρουσιάστηκαν και διερευνήθηκαν πειραματικά οι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν να επιτυγχάνονται οι σχετικές υγρασίες που πρέπει να αναπτυχθούν μέσα στον θάλαμο έκθεσης για τις οποίες πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση των εξεταζόμενων εναλλακτικών προσροφητικών υλικών. Σε συνδυασμό με τα όσα εξετάστηκαν στο 2^ο και το 3^ο Κεφάλαιο, στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο, θα παρορθυσιασθούν η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των αντιστοίχων βαθμονομήσεων. Σημειώνεται ότι με βάση τις μετρήσεις σχετικής υγρασίας που λήφθηκαν παράλληλα με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο και με το υγρόμετρο τριχός και με το υγρόμετρο OMEGA HHM25, είναι δυνατόν κατ'αρχήν να προκύψει μία προσεγγιστική βαθμονόμηση των δύο αυτών υγρομέτρων με τρόπο που σχηματικά παρουσιάζεται στα γραφήματα των Διαγραμμάτων 4.29 και 4.30.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



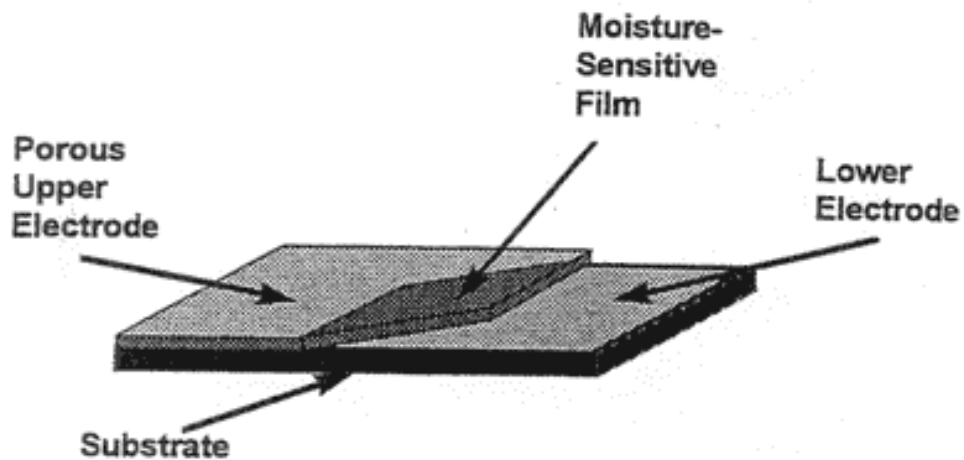
Διάγραμμα 4.1

Ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) για θερμοκρασίες περιβάλλοντος στο υψόμετρο της θάλασσας



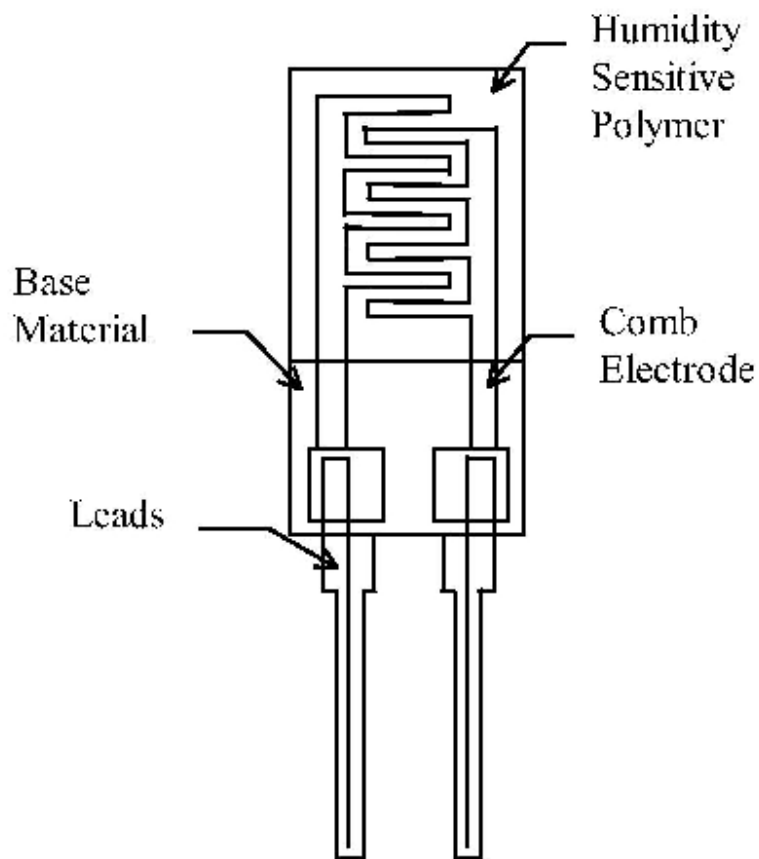
Διάγραμμα 4.2

Σκαρίφημα υγραμέτρου τριχός.



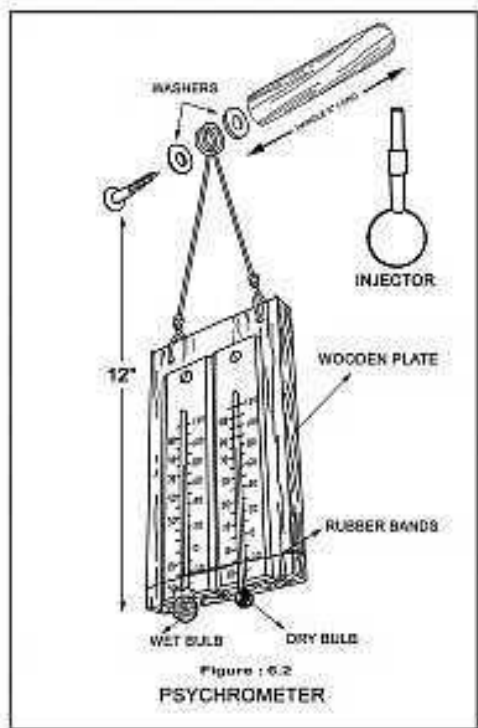
Διάγραμμα 4.3

Σκαρίφημα υγραμέτρου με αισθητήρα τύπου πυκνωτή



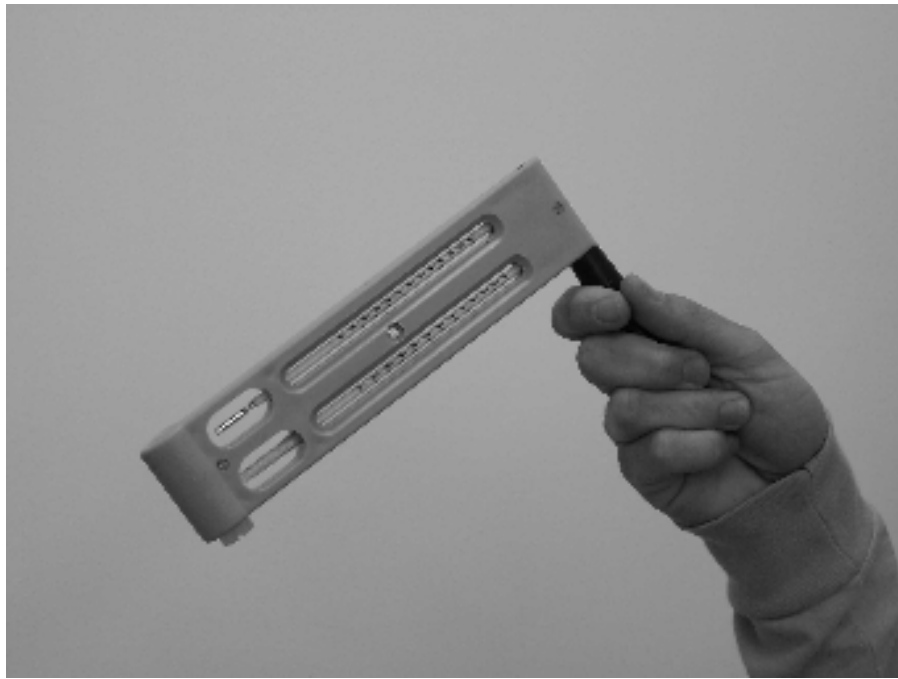
Διάγραμμα 4.4

Σκαρίφημα υγραμέτρου με αισθητήρα τύπου αντίστασης



Διάγραμμα 4.5

Παραστατικό σκαρίφημα και φωτογραφία απλού ψυχομέτρου ξηρού – υγρού βολβού με υδραργυρικά θερμομέτρα



Διάγραμμα 4.6

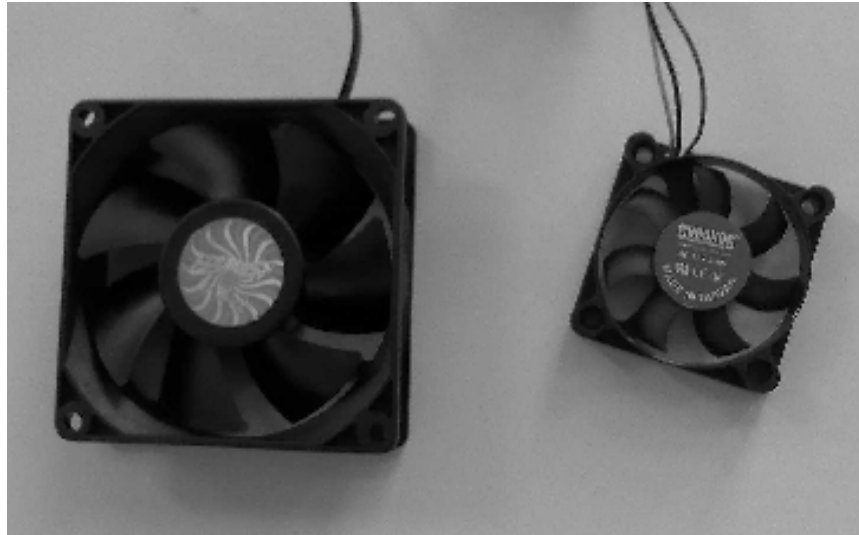
Ψυχρόμετρο ακίνητο (πάνω) και ψυχρόμετρο περιστρεφόμενο (κάτω)

| DRY BULB °C | DEPRESSION OF WET BULB °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | DEPRESSION OF WET BULB °C | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|---------------------------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|
| | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 | 10.5 | 11 | 11.5 | 12 | 12.5 | 13 | 13.5 | 14 | 14.5 | 15 | 15.5 | 16 | 16.5 | 17 | 17.5 | 18 |
| 25 | 96 | 92 | 88 | 84 | 81 | 77 | 74 | 71 | 67 | 63 | 60 | 57 | 54 | 50 | 47 | 44 | 41 | 38 | 36 | 33 | 30 | 27 | 25 | 22 | 19 | 17 | 14 | 12 | 10 | 7 | 5 | 3 | -- | -- | -- | -- |
| 24 | 96 | 92 | 88 | 84 | 80 | 77 | 73 | 69 | 66 | 62 | 58 | 56 | 52 | 49 | 46 | 43 | 40 | 37 | 34 | 31 | 28 | 26 | 23 | 21 | 18 | 16 | 12 | 10 | 7 | 5 | 3 | -- | -- | -- | -- | |
| 23 | 96 | 92 | 88 | 84 | 80 | 76 | 72 | 68 | 65 | 62 | 58 | 55 | 51 | 48 | 45 | 42 | 39 | 36 | 33 | 30 | 27 | 24 | 21 | 18 | 16 | 13 | 10 | 8 | 5 | 3 | -- | -- | -- | -- | | |
| 22 | 96 | 92 | 87 | 83 | 79 | 76 | 72 | 68 | 64 | 61 | 57 | 54 | 50 | 47 | 44 | 40 | 37 | 34 | 31 | 28 | 25 | 22 | 19 | 16 | 13 | 11 | 8 | 5 | 3 | -- | -- | -- | -- | | | |
| 21 | 96 | 91 | 87 | 83 | 79 | 75 | 71 | 67 | 63 | 60 | 56 | 52 | 49 | 46 | 42 | 38 | 35 | 32 | 29 | 26 | 23 | 20 | 17 | 14 | 11 | 9 | 6 | 3 | -- | -- | -- | -- | | | | |
| 20 | 96 | 91 | 87 | 83 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 59 | 55 | 51 | 48 | 44 | 41 | 37 | 34 | 30 | 27 | 24 | 21 | 18 | 15 | 12 | 9 | 6 | 3 | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 19 | 96 | 91 | 86 | 82 | 78 | 74 | 70 | 65 | 61 | 58 | 54 | 50 | 46 | 43 | 39 | 35 | 32 | 29 | 25 | 22 | 19 | 15 | 12 | 9 | 7 | 3 | -- | -- | -- | -- | | | | | | |
| 18 | 95 | 91 | 86 | 82 | 77 | 73 | 69 | 65 | 60 | 56 | 52 | 48 | 45 | 41 | 37 | 34 | 30 | 27 | 23 | 20 | 16 | 13 | 10 | 7 | 4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 17 | 95 | 90 | 86 | 81 | 77 | 72 | 68 | 64 | 59 | 55 | 51 | 47 | 43 | 39 | 35 | 32 | 28 | 24 | 21 | 17 | 14 | 10 | 7 | 4 | 1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 16 | 95 | 90 | 85 | 81 | 76 | 71 | 67 | 62 | 58 | 54 | 50 | 46 | 41 | 37 | 34 | 30 | 26 | 22 | 18 | 15 | 11 | 8 | 4 | 1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 15 | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 71 | 66 | 61 | 57 | 52 | 48 | 44 | 40 | 36 | 31 | 27 | 24 | 20 | 16 | 12 | 8 | 5 | 1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 14 | 95 | 90 | 84 | 79 | 74 | 70 | 65 | 60 | 56 | 51 | 47 | 42 | 38 | 33 | 29 | 25 | 21 | 17 | 14 | 9 | 5 | 2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 13 | 95 | 89 | 84 | 79 | 74 | 69 | 64 | 59 | 54 | 49 | 45 | 40 | 36 | 31 | 27 | 23 | 18 | 14 | 10 | 6 | 2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 12 | 94 | 89 | 83 | 78 | 73 | 68 | 63 | 57 | 53 | 48 | 43 | 38 | 34 | 29 | 24 | 20 | 16 | 11 | 7 | 3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 11 | 94 | 88 | 83 | 77 | 72 | 68 | 61 | 56 | 51 | 46 | 41 | 36 | 31 | 26 | 22 | 17 | 13 | 8 | 4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 10 | 94 | 88 | 82 | 77 | 71 | 66 | 60 | 54 | 49 | 44 | 39 | 34 | 29 | 24 | 19 | 14 | 9 | 5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 9 | 94 | 88 | 82 | 76 | 70 | 64 | 58 | 53 | 47 | 42 | 36 | 31 | 26 | 21 | 16 | 11 | 6 | 1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 8 | 94 | 87 | 81 | 75 | 69 | 63 | 57 | 51 | 45 | 40 | 34 | 29 | 23 | 18 | 12 | 7 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 7 | 93 | 87 | 80 | 74 | 67 | 61 | 55 | 49 | 43 | 37 | 31 | 25 | 20 | 14 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 6 | 93 | 86 | 79 | 73 | 66 | 60 | 53 | 47 | 41 | 35 | 29 | 23 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 5 | 93 | 86 | 79 | 72 | 65 | 58 | 51 | 45 | 38 | 32 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 4 | 92 | 85 | 78 | 70 | 63 | 56 | 49 | 42 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 3 | 92 | 84 | 77 | 68 | 62 | 54 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 2 | 92 | 84 | 75 | 68 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |
| 1 | 91 | 83 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |

WHIRLING HYGROMETER (ASPIRATED PSYCHROMETER) CELCIUS
 Ensure the water reservoir is filled and the wick covering the right hand thermometer bulb adequately wetted.
 Rotate the instrument rapidly for 15 to 20 seconds and record the dry and wet bulb temperatures.
 Use these tables to determine the % relative humidity, by comparing the dry bulb reading with difference between the wet and dry bulb temperatures.

Διάγραμμα 4.7

Απόσπασμα ψυχομετρικού πίνακα με παράδειγμα υπολογισμού σχετικής υγρασίας (η τιμή σε κύκλο: 69%) για την κατανόηση της λειτουργίας του ψυχομέτρου με τη βοήθεια του Πίνακα 4.1



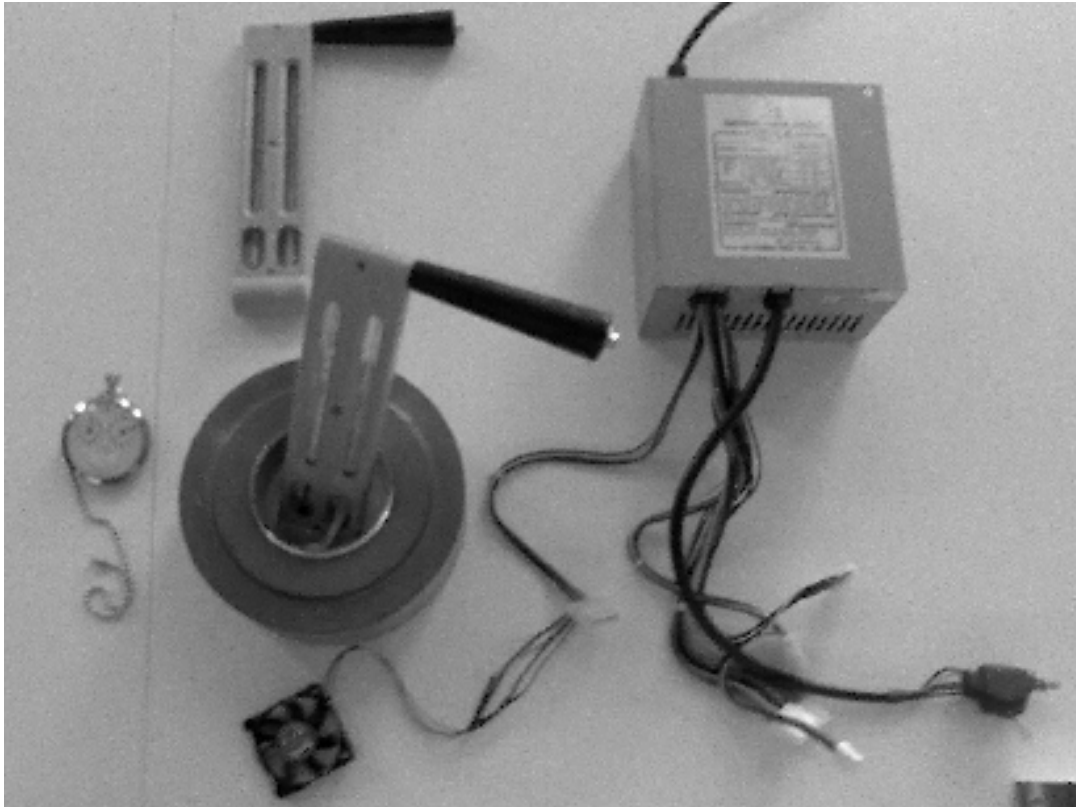
Διάγραμμα 4.8

**Ανεμιστήρες από Η/Υ τύπου PC συμβατού με διαστάσεις 5x5 cm (δεξιά)
και 8x8 cm (αριστερά)**



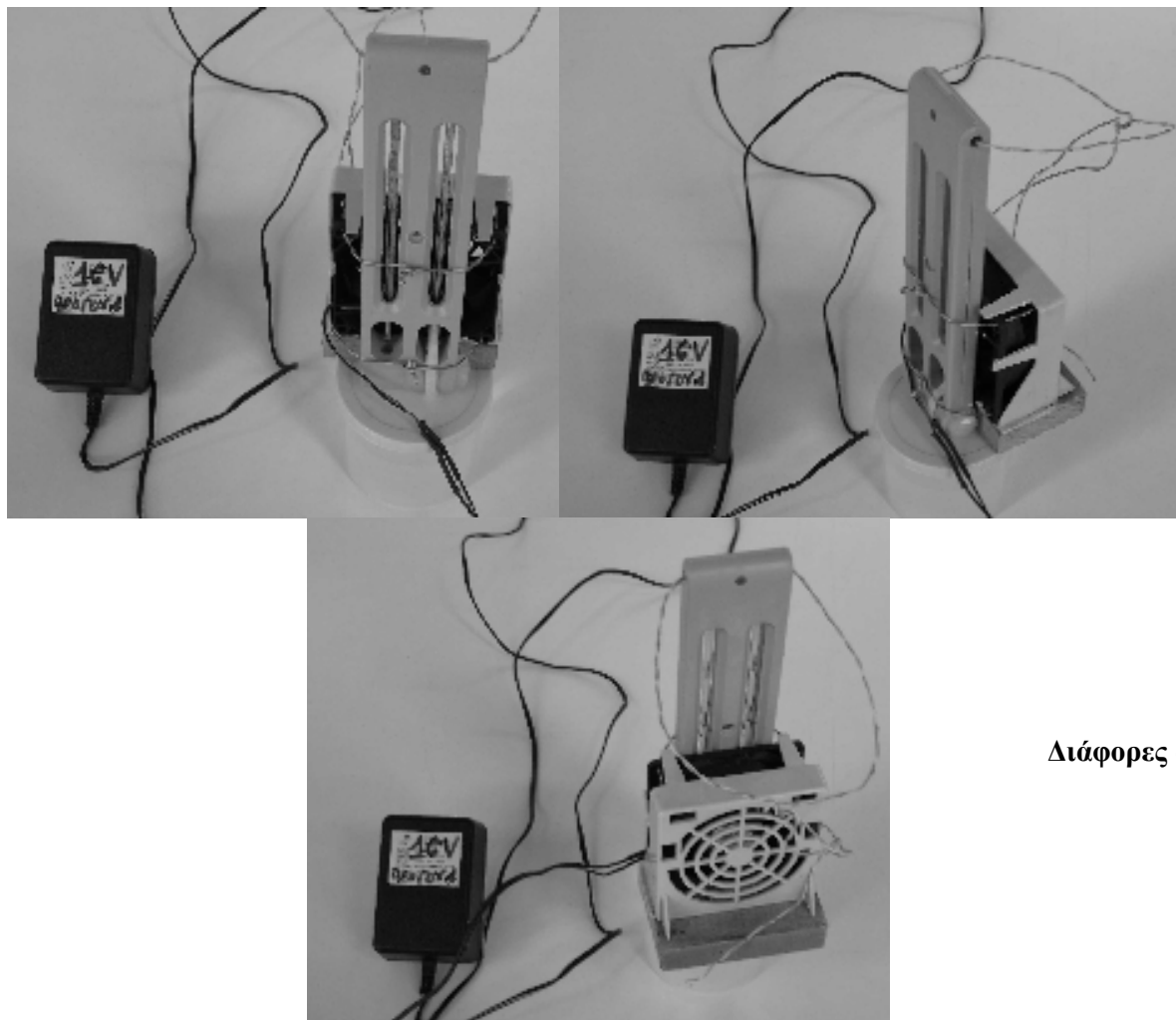
Διάγραμμα 4.9

Το ψυχρόμετρο τοποθετημένο σε πλαστικό δοχείο με λίγο νερό. Το διακρινόμενο φυτίλι του θερμομέτρου υγρού βολβού (θερμόμετρο δεξιά) είναι βυθισμένο στο νερό αυτό. Το θερμομέτρο ξηρού βολβού (θερμόμετρο αριστερά) δεν διαβρέχεται.

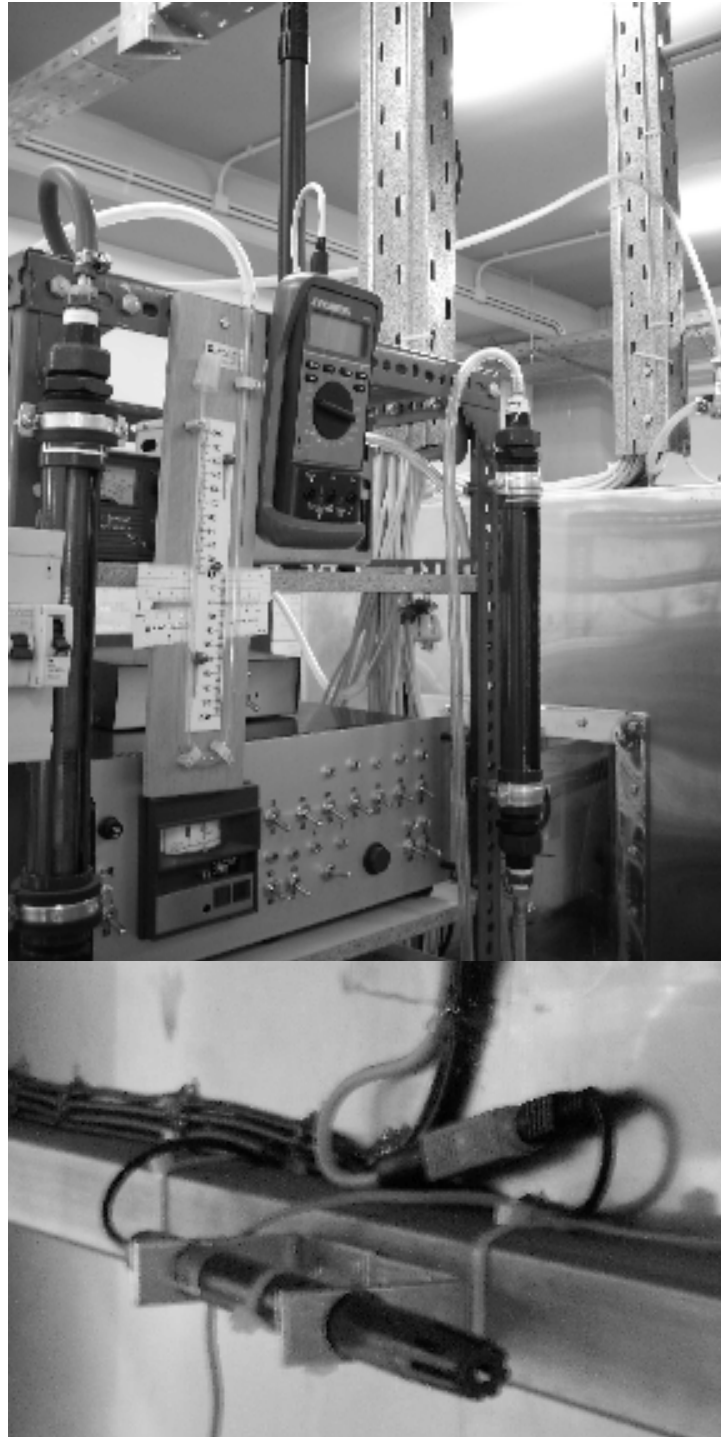


Διάγραμμα 4.10

Η πρόχειρη πειραματική συγκρότηση για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας της μετασκευής του υγραμέτρου.



Διάγραμμα 4.11
Διάφορες όψεις του μετασκευασμένου
ψυχομέτρου



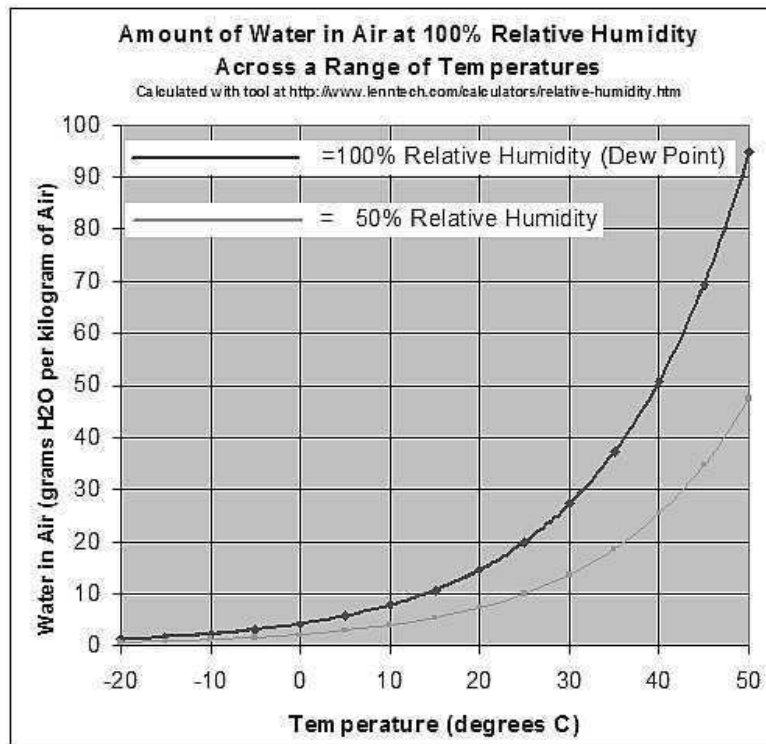
Διάγραμμα 4.12α

Υγρόμετρο και αισθητήρας υγρασίας OMEGA HHM25



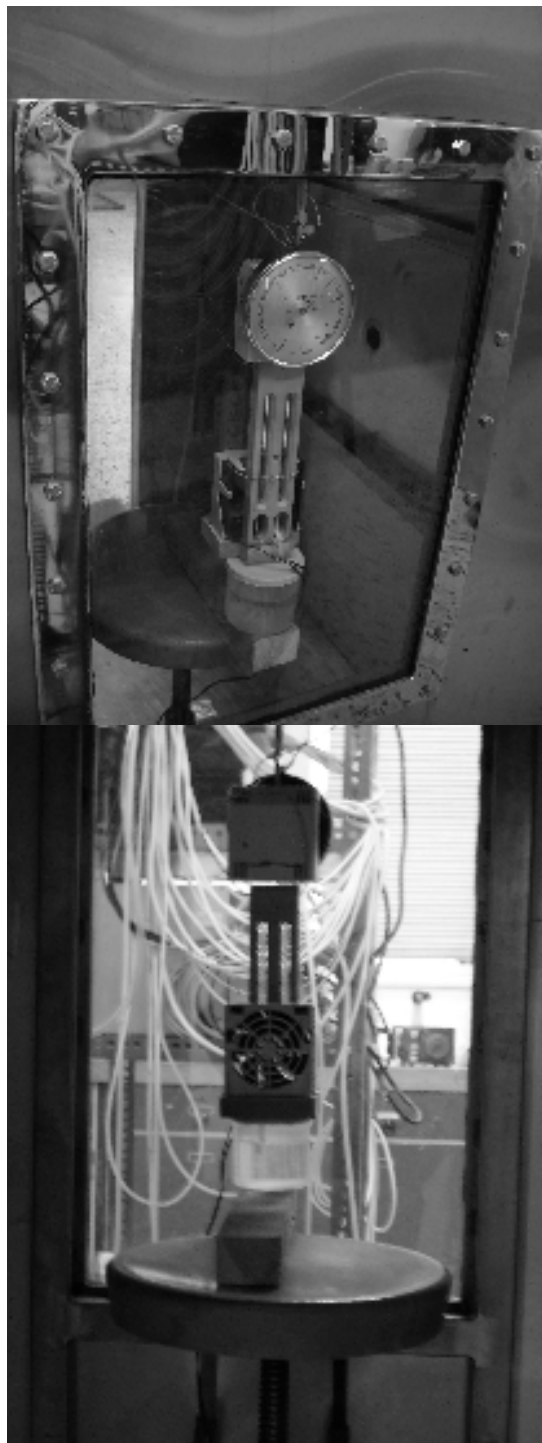
Διάγραμμα 4.12α

Υγρόμετρο τριχός



Διάγραμμα 4.13

Απόσπασμα ψυχομετρικού χάρτη



Διάγραμμα 4.14

Μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, τοποθετημένο στο θάλαμο έκθεσης, φωτογραφημένο από έξω (πάνω) και από μέσα (κάτω)



Διάγραμμα 4.15

Μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, τοποθετημένο στο θάλαμο έκθεσης, συνδεδεμένο με την τροφοδοσία ρεύματος (πολύπριζο "B", δεξιά κάτω)



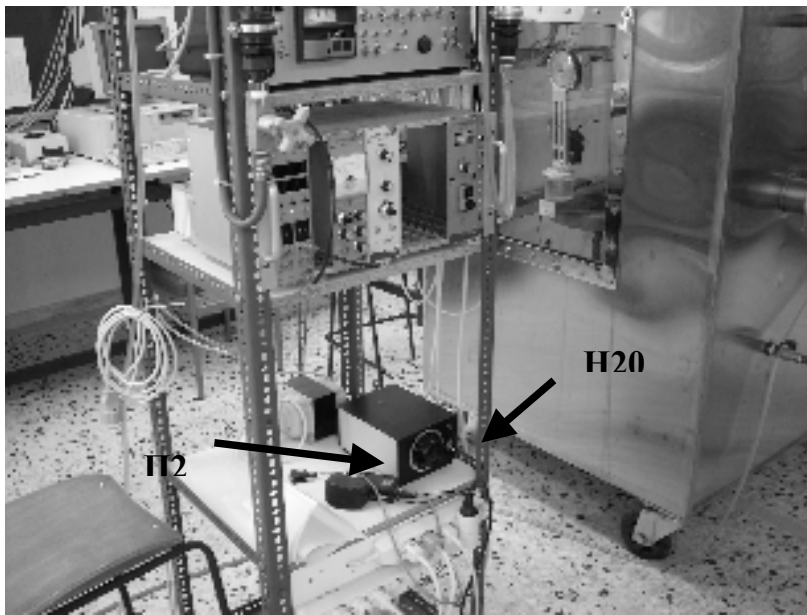
Διάγραμμα 4.16

Διακόπτης ελέγχου (B) τροφοδοσίας ψυχομέτρου



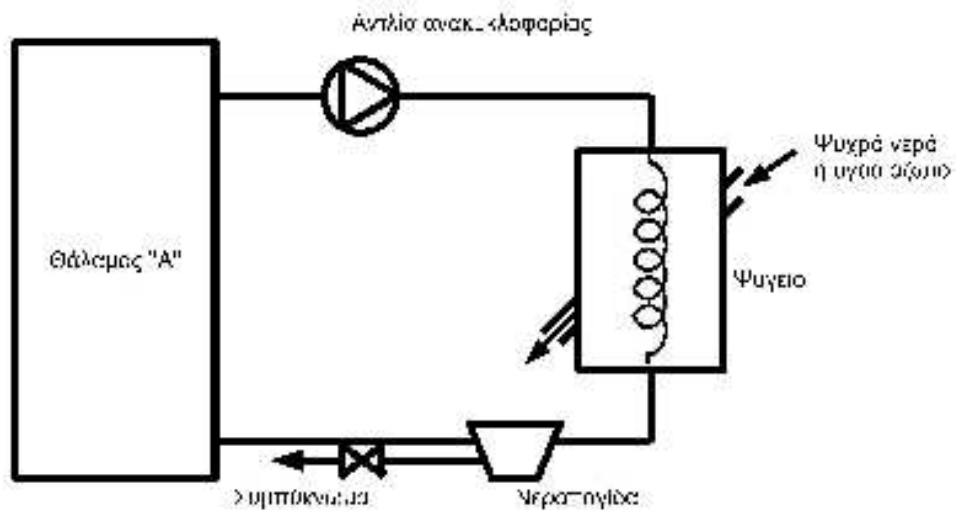
Διάγραμμα 4.17

Ταπί με το νερό στο πάτωμα του θαλάμου έκθεσης (πάνω) ακριβώς μπροστά από τον ανεμιστήρα του θαλάμου (κάτω)



Διάγραμμα 4.18

Διακόπτης Η20 και ποτενσιόμετρο Π2 για την τροφοδοσία με ρεύμα και τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα του θαλάμου (Μαρινάκης, 2007)



Διάγραμμα 4.19

Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου αφύγρανσης του αέρα του θαλάμου μέσω συμπύκνωσης με ψύξη



Διάγραμμα 4.20

Χύτρα ταχύτητας (pressure cooker) χωρητικότητας 6 L του κατασκευαστή SEB Γαλλίας



Διάγραμμα 4.21

Αντιδιαμετρικά τοποθετημένες βαλβίδες για την είσοδο (αριστερά) και την έξοδο του αέρα (δεξιά) από τη χύτρα



Διάγραμμα 4.22

Εσωτερικό χύτρας (κενό): Διακρίνεται διάτρητο σωληνάκι από τεφλόν συνδεδεμένο με την βαλβίδα εισόδου



Διάγραμμα 4.23

Μίγμα προσροφητικών υλικών και χύτρα



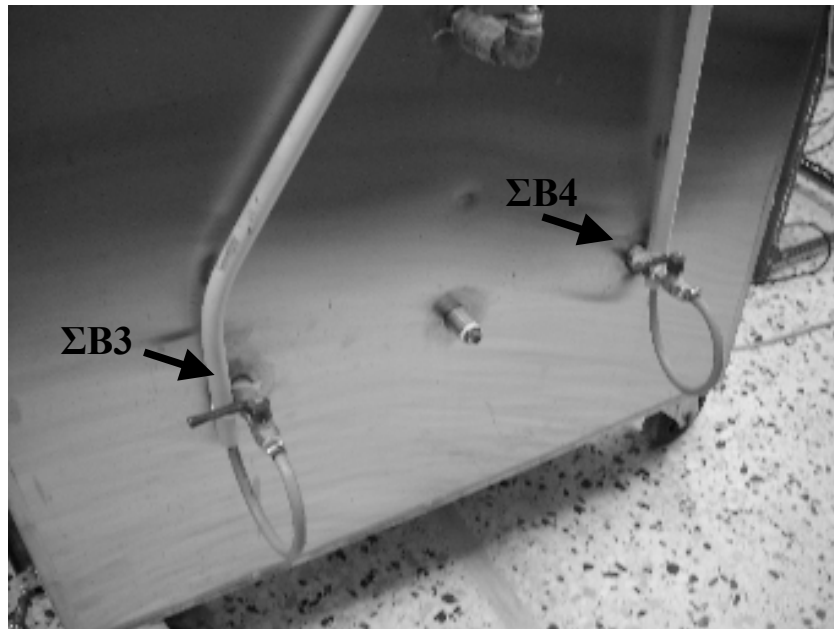
Διάγραμμα 4.24

Εσωτερικό χύτρας πλήρες με προσροφητικά υλικά



Διάγραμμα 4.25

Σύνδεση της χύτρας με το θάλαμο έκθεσης. Ο αέρας που αφυγραίνεται ακολουθεί την πορεία ΣΒ3 > ΣΒ3' > ΕΙΣΟΔΟΣ > ΕΞΟΔΟΣ > ΣΒ4' > ΣΒ4



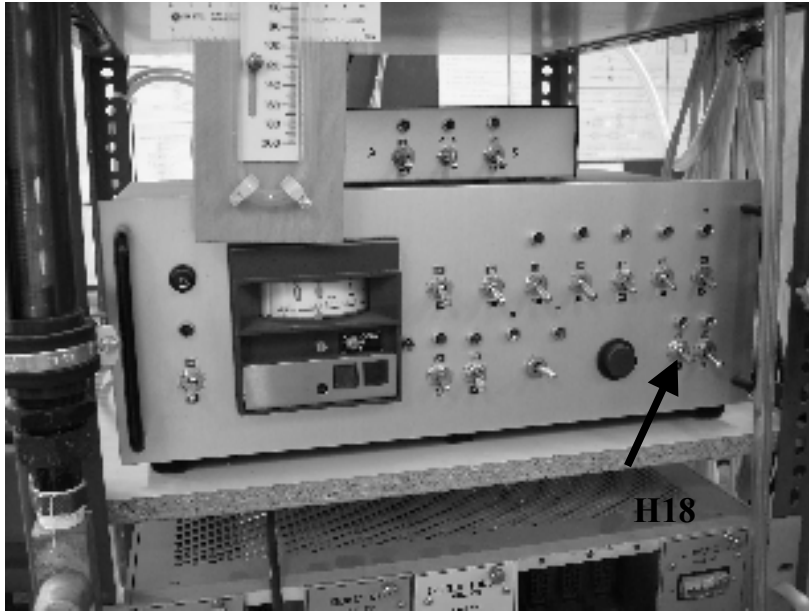
Διάγραμμα 4.26

Θάλαμος έκθεσης: Σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3 και ΣΒ4 πριν την τροποποίηση του κυκλώματος σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.25 (Μαρινάκης, 2007)



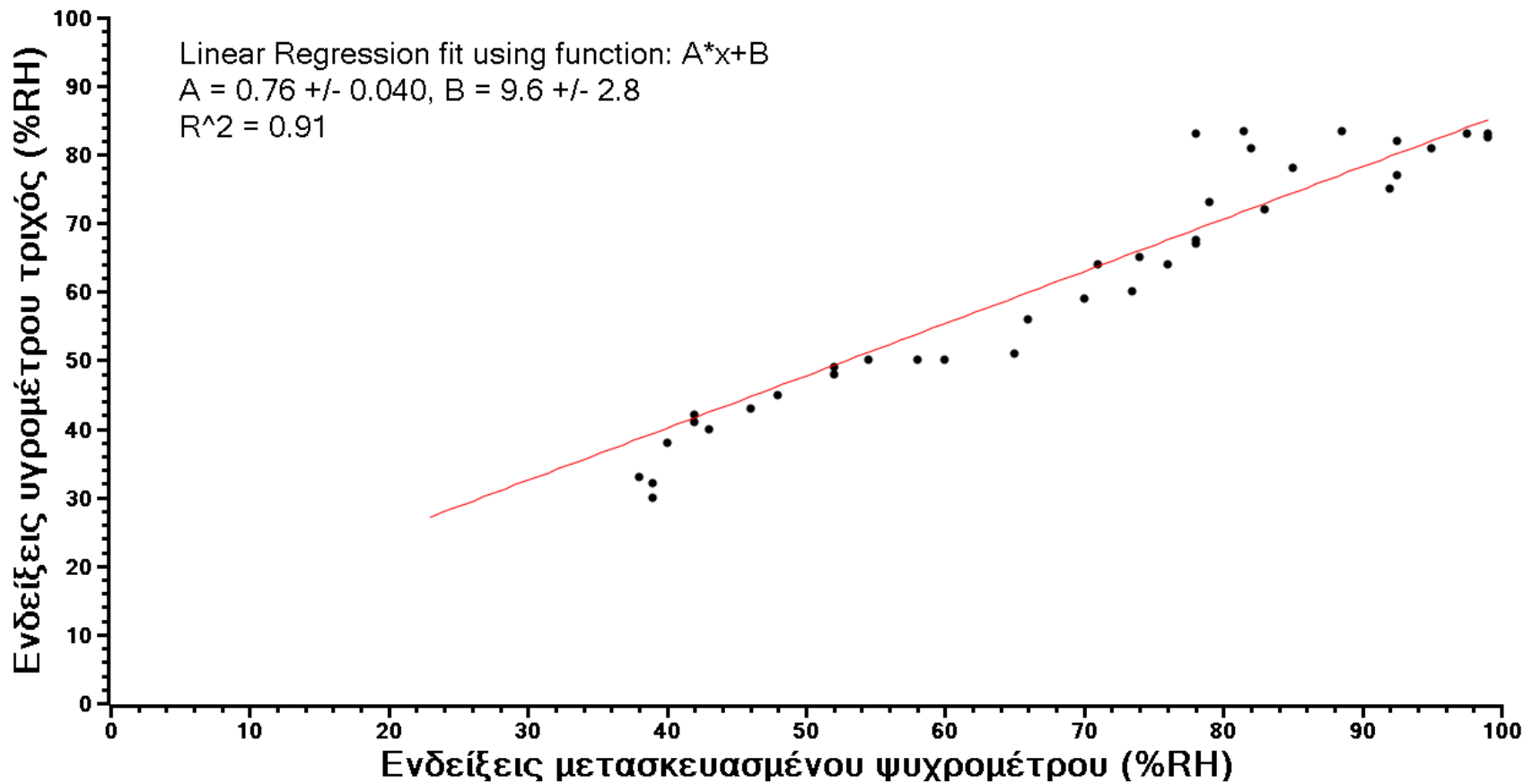
Διάγραμμα 4.27

Θάλαμος έκθεσης: Μικρή εσωτερική αεραντλία (Μαρινάκης, 2007)



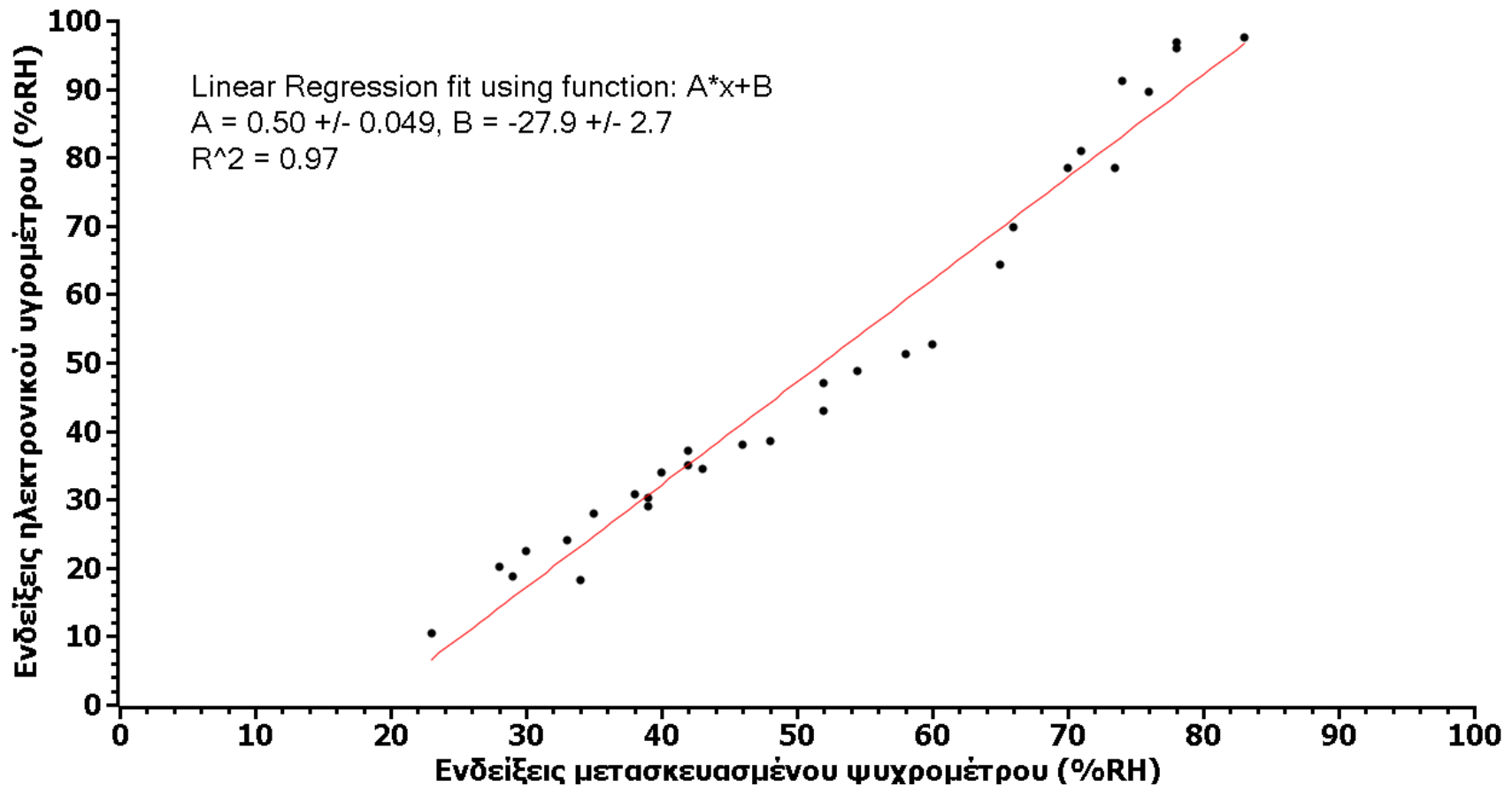
Διάγραμμα 4.28

Διακόπτης ελέγχου H18 για τη μικρή εσωτερική αεραντλία (Μαρινάκης, 2007)



Διάγραμμα 4.29

Ενδείξεις υγρομέτρου τριχός συναρτῆσει πραγματικῆς υγρασίας μετρημένης με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο (για σχετικῆς υγρασίες από 20 ἔως 100%)



Διάγραμμα 4.30

Ενδείξεις ηλεκτρονικού υγραμέτρου OMEGA HHM25 συναρτήσεπραγματικής υγρασίας μετρημένης με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο (για σχετικές υγρασίες από 20 έως 85%)

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

| DEPRESSION OF WET BULB °C | DEPRESSION OF WET BULB °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 13.0 | 14.0 | 15.0 | 16.0 | 17.0 | 18.0 | 19.0 | 20.0 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |

THESE TWO TABLES GIVE THE CORRECTIONS TO PSYCHROMETER CELSIUS READINGS FOR THE CORRECTION OF THE WET BULB TEMPERATURE, AND THE CORRECTION OF THE WET BULB TEMPERATURE.

TO OBTAIN THE CORRECTIONS TO THE WET BULB TEMPERATURE, THE WET BULB TEMPERATURE SHOULD BE READ FROM THE TABLE.

AS THESE TABLES GIVE THE % WHICH SHOULD BE SUBTRACTED FROM THE WET BULB TEMPERATURE, THE CORRECTION TO THE WET BULB TEMPERATURE SHOULD BE SUBTRACTED FROM THE WET BULB TEMPERATURE.

| RELATIVE HUMIDITY TABLES FOR ASPIRATED PSYCHROMETER | RELATIVE HUMIDITY TABLES FOR ASPIRATED PSYCHROMETER | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 13.0 | 14.0 | 15.0 | 16.0 | 17.0 | 18.0 | 19.0 | 20.0 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |

Πίνακας 4.1
Ψυχομετρικός πίνακας

| | ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (RH %) | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ | 64 | 64 | 51 | 64 | 61.5 | 61.5 |
| ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (α) | 58 | 59 | 48 | - | - | - |
| ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (β) | - | - | - | 64 | 61.5 | 59 |
| ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ | 71 | 81 | 77.5 | 81 | 78 | 81 |

Πίνακας 4.2

Δοκιμές τροποποίησης του ψυχομέτρου με τη χρήση ανεμιστήρα 5 x 5 cm / 12V (ανεμιστήρας "α") και ανεμιστήρα 8 x 8 cm / 12 V (ανεμιστήρας "β").

Η χρήση του ανεμιστήρα "β" κρίνεται η πλέον κατάλληλη.

| | | ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (RH %) | | |
|----------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| A/A | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΩΡΑ | ΜΕΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΟ | ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ ΤΡΙΧΟΣ | ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ |
| 0 | 03-10-07:12.55 | 46 | 51 | 38 |
| 1 | 03-10-07:13.11 | 71 | 67.5 | 81 |
| 2 | 03-10-07:14.27 | 82.5 | 77 | 97.6 |
| 3 | 03-10-07:14.43 | 85 | 82.5 | 97.6 |
| 4 | 03-10-07:14.59 | 88.5 | 83.5 | 97.6 |
| 5 | 03-10-07:15.15 | 92.5 | 83.5 | 97.6 |
| 6 | 03-10-07:15.39 | 92.5 | 83 | 97.6 |
| * | 04-10-07:10.10 | 92 | 83 | 97.6 |

Πίνακας 4.3

Επαλήθευση της καλής λειτουργίας της ρύθμισης "υψηλής" υγρασίας: Μετρήσεις "1 – 6" = Έλεγχος ανάπτυξης της "υψηλής" υγρασίας. Μέτρηση "0" = Αρχική σχετική υγρασία θαλάμου. Μέτρηση "*" = Μέτρηση σχετικής υγρασίας θαλάμου μετά από 20 h.

| | | ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (RH %) | |
|-----------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------|
| A/A | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΩΡΑ | ΜΕΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΟ | ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ |
| 0 | 12-11-07:12.18 | 52 | 47 |
| 1 [^] | 12-11-07:12.52 | 40 | 34 |
| 1 ^{^^} | 12-11-07:13.23 | 40 | - |
| 2 [^] | 12-11-07:13.55 | 35 | 28 |
| 2 ^{^^} | 12-11-07:14.26 | 36 | - |
| 3 [^] | 12-11-07:14.58 | 33 | 24 |
| 3 ^{^^} | 12-11-07:15.30 | 33 | - |
| * | 13-11-07:11.15 | 42 | 35 |

Πίνακας 4.4

Επαλήθευση της καλής λειτουργίας της ρύθμισης "χαμηλής" υγρασίας:

Μετρήσεις "1[^] – 3[^]" = Έλεγχος τιμής της "χαμηλής" υγρασίας αμέσως μετά την διακοπή της λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας.

Μετρήσεις "1^{^^} – 3^{^^}" = Έλεγχος τιμής της "χαμηλής" υγρασίας αμέσως πριν την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας.

Μέτρηση "0" = Αρχική σχετική υγρασία θαλάμου.

Μέτρηση "*" = Μέτρηση σχετικής υγρασίας θαλάμου μετά από 20 h.

| | | ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (RH %) |
|-----------------------|----------------------------|---|
| A/A | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΩΡΑ | ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ |
| 0 | 13-11-07:11.20 | 45.2 |
| 1[^] | 13-11-07:11.51 | 35.5 |
| 1^{^^} | 13-11-07:12.22 | 36.2 |
| 2[^] | 13-11-07:12.53 | 28.6 |
| 2^{^^} | 13-11-07:13.25 | 29.9 |
| 3[^] | 13-11-07:13.57 | 25.3 |
| 3^{^^} | 13-11-07:14.29 | 26.5 |
| 4[^] | 13-11-07:15.00 | 21.8 |
| 4^{^^} | 13-11-07:15.31 | 23.3 |
| 5[^] | 13-11-07:16.03 | 19.6 |
| 5^{^^} | 13-11-07:16.36 | 21.1 |
| * | 14-11-07:11.15 | 25.7 |

Πίνακας 4.5

Επαλήθευση της καλής λειτουργίας της ρύθμισης "χαμηλής" υγρασίας χωρίς μετασκευασμένο ψυχρόμετρο στο θάλαμο:

Μετρήσεις "1[^] – 5[^]" = Έλεγχος τιμής της "χαμηλής" υγρασίας αμέσως μετά την διακοπή της λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας.

Μετρήσεις "1^{^^} – 5^{^^}" = Έλεγχος τιμής της "χαμηλής" υγρασίας αμέσως πριν την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας.

Μέτρηση "0" = Αρχική σχετική υγρασία θαλάμου.

Μέτρηση "*" = Μέτρηση σχετικής υγρασίας θαλάμου μετά από 20 h.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια, στο πειραματικό μέρος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας δοκιμάστηκαν τέσσερα προσροφητικά υλικά, προκειμένου να διαπιστωθεί, αν αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές Ραδονίου. Τα υλικά αυτά είναι: (α) Ενεργός άνθρακας εμπορίου, (β) Συνθετικός ζεόλιθος με μέγεθος πόρου 0.5 nm, (γ) Silica gel χρωματογραφίας και (δ) Silica gel blue αφυγραντικό υλικό. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε έναν από τους θαλάμους Ραδονίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, όγκου 1.9 m³, σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν δείχνουν ότι με την εξαίρεση του χρωματογραφικού silica gel, όλα τα υπόλοιπα υλικά μπορούν να συγκροτήσουν ανιχνευτές Ραδονίου, αν ικανή μάζα τους τοποθετηθεί σε κατάλληλα μεταλλικά δοχεία. Σχετικά πιο αυστηρές προϋποθέσεις διατυπώνονται μόνο για τον αφυγραντή silica gel blue, ο οποίος φαίνεται να παρουσιάζει μάλλον υψηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης. Όπως αναμένεται επαληθεύθηκε από τα πειράματα ότι η ποσότητα του Ραδονίου που προσροφάται στα προσροφητικά υλικά είναι ανάλογη με την μέση συγκέντρωση του Ραδονίου που επικρατούσε στο θάλαμο έκθεσης. Ο ρυθμός προσρόφησης του Ραδονίου επηρεάζεται αρνητικά από το χρόνο έκθεσης και την σχετική υγρασία.

5.2 Πειραματική διαδικασία έκθεσης

5.2.1 Μεταλλικά δοχεία με προσροφητικά υλικά – αναγέννηση – ζύγιση

Για κάθε προσροφητικό υλικό πληρώνονται δύο μεταλλικά δοχεία όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Επομένως πληρώνονται συνολικά οκτώ δοχεία, αφού το σύνολο των προσροφητικών υλικών είναι τέσσερα: ο ενεργός άνθρακας, ο συνθετικός ζεόλιθος, το silica gel blue και το silica gel. Τα δοχεία αριθμούνται. Τα δοχεία αυτά, πριν από οποιαδήποτε έκθεση σε περιβάλλον με Ραδόνιο και υγρασία, τοποθετούνται ανοιχτά στον κατάλληλο εργαστηριακό φούρνο που αναφέρεται στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007) (βλ. και φωτογραφία Διαγράμματος 5.1) και θερμαίνονται στους 120° C για 10 – 12 h, προκειμένου να "αναγεννηθούν", να αποβάλλουν δηλαδή τυχόν προσροφηθείσα υγρασία ή τυχόν προσροφηθέν

Ραδόνιο. Η θέρμανση γίνεται σε ουσιαστικά "νεκρό" εργαστηριακά χρόνο, διότι ξεκινάει βραδινές ώρες με το κλείσιμο του κτιρίου και ολοκληρώνεται το πρωί με το άνοιγμα (είναι μία διαδικασία που όπως λέγεται διαρκεί "overnight"). Μετά τη λήξη της θέρμανσης τα δοχεία σκεπάζονται με τα καλύμματά τους. Επιπλέον προσοχή χρειάζεται ώστε το κάθε ένα από τα δοχεία να καλυφθεί με το δικό του κάλυμμα. Τα καλυμμένα δοχεία ζυγίζονται σε αναλογικό ζυγό ακριβείας (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.2). Το καθαρό βάρος του περιεχομένου προσροφητικού υλικού των δοχείων μπορεί να υπολογίζεται αν αφαιρεθεί το απόβαρο. Τα στοιχεία του βάρους που συγκεντρώνονται συμπληρώνονται στις κατάλληλες θέσεις του λογιστικού φύλλου τύπου "Λ2", που συντέθηκε και παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.

5.2.2 Μηδενισμός πηγής Ραδονίου

Για την παραγωγή Ραδονίου για τις εκθέσεις χρησιμοποιείται η πηγή που χαρακτηρίζεται από το Μαρινάκη (2007) με τον κωδικό "1". Πρόκειται για πηγή ονομαστικής ραδιενέργειας Ραδίου-226 274.3 kBq¹. Προκειμένου, να αφαιρεθεί από το δοχείο της πηγής "1" όσο Ραδόνιο τυχόν υπάρχει, ακολουθείται η διαδικασία εξαερισμού, που αναφέρεται στις παραγράφους 5.2.3 και 5.2.4 της ΔΕ του Μαρινάκη (2007).

5.2.3 Παραγωγή Ραδονίου

Η πηγή "1" αμέσως μετά τον μηδενισμό βρίσκεται στην χρονική στιγμή "0". Από το χρονικό σημείο αυτό και μετά, αρχίζει να μετράει ο χρόνος T και στο δοχείο της πηγής να παράγεται Ραδόνιο, η ραδιενέργεια του οποίου είναι συνάρτηση του χρόνου T (min):

$$A(t) = 274300(1 - e^{-\lambda T}) \quad (5.1)$$

όπου:

A είναι η ραδιενέργεια του παραγόμενου Ραδονίου σε Bq

λ είναι η σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου σε min^{-1} ($\lambda = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)

T είναι η διάρκεια παραγωγής Ραδονίου σε min

¹ Τύπος RF200, του κατασκευαστή οίκου Czech Metrology Institute, της Τσεχίας.

Συμπληρώνεται η 6^η στήλη στα λογιστικά φύλλα "Λ2" με την χρονική στιγμή έναρξης παραγωγής Ραδονίου².

5.2.4 Μετάγγιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "υψηλής" υγρασίας

Όπως συνάγεται από το 3^ο Κεφάλαιο (§ 3.5), παρακολουθώντας τον χρόνο T , είναι δυνατόν να μεταγγισθεί από το δοχείο της πηγής "1" στον –κατά τα άλλα αεροστεγή και απομονωμένο από το λοιπό περιβάλλον- θάλαμο Ραδονίου "Α" όγκου $V = 1.9 \text{ m}^3$, όσο Ραδόνιο έχει σχηματισθεί στο δοχείο της πηγής "1" στο διάστημα από τη χρονική στιγμή "0" έως τη χρονική στιγμή "T". Προκειμένου όμως η έκθεση των προσροφητικών υλικών να γίνει σε περιβάλλον "υψηλής" υγρασίας, όπως αυτό έχει οριστεί στο 3^ο και το 4^ο Κεφάλαιο, προτού κλείσει αεροστεγώς η θύρα του θαλάμου έκθεσης, πρέπει να τοποθετηθεί στο πάτωμά του δοχείο από αλουμίνιο μικρού ύψους και μεγάλης επιφανείας (ταψί), διαστάσεων $M60 \times \Pi40 \times Y4 \text{ cm}$, πλήρες με 1 L νερό. Στη συνέχεια, αφού τοποθετηθούν ανοιχτά μέσα στο θάλαμο τα μεταλλικά δοχεία με τα προσροφητικά υλικά, ο θάλαμος κλείνει αεροστεγώς και το νερό λόγω εξάτμισης διαχέεται στο εσωτερικό του θαλάμου και αυξάνει την σχετική υγρασία μέχρι και 100% εντός χρονικού διαστήματος 2 ωρών, όπως πειραματικά επαληθεύθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο. Συγχρόνως με το κλείσιμο του θαλάμου εκκινεί η διαδικασία έκθεσης των δοχείων σε συγκέντρωση Ραδονίου, η οποία θα δημιουργηθεί από την μετάγγιση στο θάλαμο του ήδη παραχθέντος Ραδονίου στο δοχείο της πηγής "1" (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.3). Η μετάγγιση αυτή γίνεται με τη βοήθεια σωληνώσεων με τρόπο που περιγράφεται από τον Μαρινάκη (2007) στην παράγραφο 5.2.6. Σημειώνεται ότι τα βήματα 8 και 12 στην παράγραφο εκείνη, πρέπει να τροποποιηθούν ως εξής:

8: "ανοίγουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "Α" ΣΒ3, ΣΒ3" και ΣΒ4, ΣΒ4" (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.25)"

12: "μετά τη συμπλήρωση 10 min, κλείνει ο διακόπτης H18, κλείνουν κατά το δυνατόν σύντομα αλλά με αυτή την σειρά οι σφαιρικές βαλβίδες του δοχείου της πηγής "1" CRS1 και CRS2 και τέλος κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "Β" ΣΒ3, ΣΒ3" και ΣΒ4, ΣΒ4". Ο χρόνος λήξης του βήματος 12 σημειώνεται σε

² Η 1^η, 2^η, 3^η, 4^η και 5^η στήλη των υπόψιν λογιστικών φύλλων θεωρούνται προσυμπληρωμένες

ημερολόγιο του θαλάμου "Α" και της πηγής "1". Ο χρόνος λήξης του βήματος 12 είναι η χρονική στιγμή T, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 5.2.3³.

Συμπληρώνεται η 7^η στήλη στα λογιστικά φύλλα "Λ2" με την χρονική στιγμή λήξης μετάγγισης Ραδονίου.

Αν θεωρηθεί ότι με τη μέθοδο που ακολουθείται η μετάγγιση είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου "Α" θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_o (Bq m^{-3}) ίση με (βλ. και σχέση 3.8):

$$Rn_o = A(T)/1.9 \quad (5.2)$$

όπου:

1.9 είναι ο όγκος του θαλάμου Ραδονίου σε m^3 .

Η συγκέντρωση Ραδονίου που δημιουργείται θεωρείται βαθμονομημένη καθώς προέρχεται από την πρότυπη και πιστοποιημένη πηγή Ραδονίου "1". Η τεχνική αρχή της λειτουργίας των κυκλωμάτων που περιγράφηκε στα προηγούμενα διακρίνεται στο μονογραμμικό σκαρίφημα του Διαγράμματος 5.4.

Σημειώνεται, ότι γενικά τα προσροφητικά υλικά που εγκλείονται στον θάλαμο, έχουν την προφανή ιδιότητα να μειώνουν σταδιακά την περιεχόμενη σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης, αν αυτή δεν ανατροφοδοτείται με κάποιο τρόπο. Στην περίπτωση του περιβάλλοντος "υψηλής" υγρασίας η ανατροφοδότηση αυτή γίνεται προφανώς από την επιφάνεια του συνεχώς εξαμιζόμενου 1 L νερού του δοχείου.

5.2.5 Μετάγγιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "μεσαίας" υγρασίας

Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.4. Τροποποιείται παρόλάντα ως προς τη ρύθμιση της υγρασίας, αφού όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 4^ο Κεφάλαιο δεν απαιτείται κάποια επέμβαση προκειμένου να ρυθμισθεί η σχετική υγρασία του θαλάμου περί το 50%, αφού το περιβάλλον του Εργαστηρίου, ο αέρας του οποίου εγκλείεται στο θάλαμο, έχει σχετική υγρασία σε αυτή την περιοχή. Για τους λόγους που σημειώθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο, απαιτείται και εδώ ανατροφοδότηση της υγρασίας του περιβάλλοντος

³ Εννοείται η παράγραφος με την αρίθμηση της τρέχουσας ΔΕ

του θαλάμου. Στην εδώ περίπτωση για να επιτευχθεί αυτό αρκεί η εξάτμιση υγρασίας που συμβαίνει από το φυτίλι του μετασκευασμένου ψυχομέτρου.

5.2.6 Μετάγγιση Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο – περιβάλλον "χαμηλής" υγρασίας

Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.4. Τροποποιείται παρόλαυτα ως προς τη ρύθμιση της υγρασίας, αφού όπως έχει ήδη περιγραφεί στο 4^ο Κεφάλαιο απαιτείται να χρησιμοποιείται κλειστό κύκλωμα με κατάλληλη διάταξη δοχείου με υλικό που να προσροφά υγρασία τοποθετημένη εξωτερικά του θαλάμου έκθεσης, μέσα στο οποίο να μπορεί να κυκλοφορεί ο αέρας του θαλάμου. Η θέση της διαδικασίας αφύγρανσης δεν εντάσσεται ακριβώς στη χρονική ακολουθία της μετάγγισης Ραδονίου, διότι αν αφύγρανση και μετάγγιση Ραδονίου ξεκινούσαν την ίδια στιγμή, τότε ο αέρας του θαλάμου που θα περιείχε Ραδόνιο, θα περνούσε μέσα από το αφυγραντικό υλικό στο κλειστό κύκλωμα. Ως αποτέλεσμα το αφυγραντικό υλικό προσροφώντας και Ραδόνιο θα αλλοίωνε την καθορισμένη από την μετάγγιση συγκέντρωση Ραδονίου. Η τροποποίηση που χρειάζεται έχει ως εξής:

... αφού τοποθετηθούν ανοιχτά μέσα στο θάλαμο τα μεταλλικά δοχεία με τα προσροφητικά υλικά –τα οποία πρέπει να έχουν, όπως έχει ορισθεί στο 4^ο Κεφάλαιο, "αναγεννηθεί" (βλ. και § 4.5.4), ο θάλαμος κλείνει αεροστεγώς και εκκινεί ο ανεμιστήρας του θαλάμου για την ανάδευση του εσωτερικού αέρα. Στην συνέχεια τίθεται σε λειτουργία το κλειστό κύκλωμα εξωτερικής κυκλοφορίας του αέρα του θαλάμου μέσα από την χύτρα με τα υλικά αφύγρανσης. Η λειτουργία αυτή συνεχίζεται επί 30 min, ακολουθούμενη από διακοπή 10 min για 4 κύκλους (δηλ για περίπου 2.5 h), ή μέχρι η ένδειξη του ηλεκτρονικού υγρόμετρου OMEGA HHM25, να γίνει περίπου 15%, όποια από τις δύο συνθήκες πληρωθεί πρώτη. Στη συνέχεια εκκινεί η διαδικασία έκθεσης των δοχείων σε συγκέντρωση Ραδονίου ...

Προκειμένου να μην σπαταλάται πολύτιμος εργαστηριακός χρόνος και να τηρείται το κατά προσέγγιση χρονοδιάγραμμα της πειραματικής διαδικασίας, όπως αυτό περιγράφεται στο 3^ο Κεφάλαιο (βλ. και § 3.4), η διαδικασία αφύγρανσης του αέρα του θαλάμου έκθεσης πρέπει να ξεκινά σε τέτοια χρονική στιγμή, ώστε να

ολοκληρώνεται περίπου τη στιγμή που έχει ολοκληρωθεί η προεπιλεγμένη παραγωγή Ραδονίου.

Στην περίπτωση του περιβάλλοντος "χαμηλής" υγρασίας δεν απαιτείται ανατροφοδότηση της υγρασίας του περιβάλλοντος του θαλάμου. Τα προσροφητικά υλικά που εγκλείονται στον θάλαμο, χωρίς ανατροφοδότηση υγρασίας μειώνουν σταδιακά την περιεχόμενη σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης από 15% στο 5 με 10%. Στην εδώ περίπτωση αυτό είναι επιθυμητό για να επιτευχθεί η "χαμηλή" υγρασία σύμφωνα με το επιθυμητό πεδίο τιμών 10 – 30%. Για αυτό το λόγο μετρήσεις υγρασίας μέσα στο θάλαμο λαμβάνονται, όπως έχει σημειωθεί στο 4^ο Κεφάλαιο, από το ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25 και δευτερευόντως από το υγρόμετρο τριχός. Το μετασκευασμένο ψυχομέτρο δεν χρησιμοποιείται διότι η εξάτμιση υγρασίας που συμβαίνει από το φυτίλι του καταστρέφει την επιθυμητή "χαμηλή" σχετική υγρασία.

5.2.7 Εκθεση σε συγκέντρωση Ραδονίου

Όπως σημειώθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο αν ορισθεί μία νέα αρχή των χρόνων που να ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής σε θάλαμο Ραδονίου, τότε η συγκέντρωση του Ραδονίου στον θάλαμο Rn' ($Bq\ m^{-3}$) μεταβάλλεται με την πάροδο χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο ραδιενεργού απομείωσης:

$$Rn = Rn_o e^{-\lambda t} \quad (5.3)$$

Εστω τώρα ότι ο συνολικός χρόνος που παρήρθε από τη λήξη της μετάγγισης έως το άνοιγμα του θαλάμου στο ελεύθερο περιβάλλον ή την με άλλο τρόπο αλλοίωση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε αυτόν (π.χ. με βίαιο εξαερισμό) είναι T_s (min). Συμπληρώνεται η 11^η στήλη στα λογιστικά φύλλα "Λ2" με τη χρονική στιγμή λήξης της έκθεσης. Τότε η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο το χρονικό διάστημα T_s υπολογίζεται προφανώς από την εξίσωση:

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda t} dt}{T_s} = \frac{Rn_o}{T_s} \left[-\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_0^{T_s} \quad (5.4)$$

Η σχέση 5.4 ισχύει, όταν και μόνο όταν ο θάλαμος "Α" δεν έχει διαρροές προς το εξωτερικό περιβάλλον, είναι δηλαδή αεροστεγής και ραδονιοστεγής, και όταν,

προφανώς, δεν συντρέχει λόγος άλλης "καταστροφής" του περιεχόμενου Ραδονίου στον θάλαμο έκθεσης. Όταν δεν ισχύουν τα παραπάνω τότε $\lambda = \lambda'$, όπου λ' είναι ο ρυθμός καταστροφής του Ραδονίου σε min^{-1} με $\lambda' \gg \lambda$.

5.2.8 Προσδιορισμός ρυθμού καταστροφής Ραδονίου (λ')

Όπως σημειώνεται και στον Μαρινάκη (2007), πολλαπλά πειράματα που έχουν γίνει στο παρελθόν με την πηγή "1" και τον υπόψιν θάλαμο εφαρμόζοντας τις διαδικασίες των προηγούμενων παραγράφων, αλλά χωρίς να υπάρχουν στον θάλαμο προσροφητικά υλικά, έχουν αποδείξει την ακρίβεια των σχέσεων 5.3 και 5.4. Για τα πειράματα αυτά παρακολούθηθηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης του Ραδονίου στο θάλαμο με ενεργητικές τεχνικές (θάλαμος ιονισμού Alphaguard P2000), με τη βοήθεια των οποίων διαπιστώθηκε ότι η σταθερά διασπάσεως λ στη σχέση 5.3 είναι στατιστικά ίση με τη σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου.

Παρόλα αυτά, όταν στον θάλαμο υπάρχει και ικανή ποσότητα προσροφητικών υλικών διαπιστώνεται με απλούς υπολογισμούς ότι ο ρυθμός καταστροφής λ' του Ραδονίου μέσα στον πειραματικό θάλαμο είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό διασπάσεως του λ , διότι λαμβάνεται υπόψιν και η καταστροφή του Ραδονίου με την απορρόφηση από τα προσροφητικά υλικά που εκτίθενται στον θάλαμο. Για την θεμελίωση του ισχυρισμού αυτού γίνονται οι ακόλουθοι παραδειγματικοί υπολογισμοί, που αντιπροσωπεύουν ένα από τα δυνατά "χειρότερα σενάρια":

Εστω ότι στον θάλαμο εγκλείονται οκτώ μεταλλικά δοχεία, καθένα από τα οποία περιέχει περίπου 150 g αναγεννημένο (ξηρού και χωρίς Ραδόνιο) ενεργό άνθρακα, δηλαδή 1200 g, τα οποία εκτίθενται επί 24 h, σε ονομαστική συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq m^{-3} (δηλαδή για όγκο θαλάμου 1.9 m^3 , συνολικό Ραδόνιο 4.75 kBq), υπό συνθήκες "μεσαίας" σχετικής υγρασίας 50% και σε θερμοκρασία Εργαστηρίου περίπου $20 - 24^\circ \text{ C}$. Όπως εκτιμήθηκε στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007), αλλά και από τα πειραματικά αποτελέσματα βαθμονόμησης, που συγκεντρώθηκαν στην παρούσα ΔΕ, και τα οποία θα παρουσιασθούν με λεπτομέρεια στη συνέχεια, σε κάθε Bq kg^{-1} που μετράται με τον ανιχνευτή NaI VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης, αντιστοιχούν περίπου 1.9 CPM (έχει αφαιρεθεί το υπόστρωμα). Όπως επίσης εκτιμήθηκε στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007) 150 g ενεργού άνθρακα που έχει εκτεθεί σε συγκέντρωση Ραδονίου κάτω από τις συνθήκες που υποτέθηκαν και μετράται με τον ίδιο τρόπο,

βρίσκονται να έχουν 3250 CPM. Αυτό με τη βοήθεια της βαθμονόμησης σημαίνει ότι τα 1200 g θα βρίσκονται να έχουν $(3250/1.9) \times 1.2 \text{ Bq} \approx 2050 \text{ Bq}$. Αυτό μεταφραζόμενο στην πράξη σημαίνει ότι ο ενεργός άνθρακας αυτού του υποθετικού πειράματος είναι δυνατόν υπό συνθήκες να απορροφήσει το μισό περίπου του περιεχόμενου Ραδονίου στον θάλαμο, μειώνοντας έτσι με πολύ σημαντικότερους του λ ρυθμούς τη συγκέντρωση Ραδονίου που επικρατεί στο θάλαμο κατά τη διάρκεια της έκθεσης.

Με βάση αυτούς τους παραδειγματικούς υπολογισμούς εκτιμάται ότι ο λ' μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερος του λ. Επίσης εκτιμάται, όπως σημειώθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο, ότι ο λ' θα είναι τόσο μεγαλύτερος του λ, όσο ξηρότερη είναι η ατμόσφαιρα έκθεσης των προσροφητικών υλικών. Αυτό θα συμβαίνει διότι αν δεν υπάρχει υγρασία στην ατμόσφαιρα του θαλάμου, δεν θα υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ υγρασίας - Ραδονίου στην διαδικασία προσρόφησης τους στα προσροφητικά υλικά. Το αποτέλεσμα θα είναι, τα προσροφητικά υλικά να απορροφούν (δηλ. στην ουσία να καταστρέφουν) πολύ περισσότερο Ραδόνιο του θαλάμου σε ξηρές ατμόσφαιρες έκθεσης από ότι σε υγρότερες. Η διαδικασία προσδιορισμού του ρυθμού καταστροφής λ' γίνεται σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί στην παράγραφο 3.5 της παρούσης ΔΕ με την οργάνωση τριών πειραμάτων ως εξής:

Πείραμα 1: Αρχικά τα δοχεία με προσροφητικό υλικό αναγεννώνται. Στη συνέχεια τοποθετούνται στο εσωτερικό του θαλάμου "Α" ανοιχτά. Στο θάλαμο τοποθετείται και ο ενεργητικός ανιχνευτής τύπου ALPHAGUARD P2000 της εταιρείας κατασκευής Genitron GmbH. Ο ανιχνευτής αυτός συνδέεται σε αναμονή ρεύματος στο εσωτερικό του θαλάμου (βλ. και φωτογραφίες στο Διάγραμμα 5.5) και προγραμματίζεται ώστε να λαμβάνει μέτρηση μέσω διάχυσης ανά δεκάλεπτο. Ακολουθούνται οι διαδικασίες "μηδενισμού της πηγής Ραδονίου", "παραγωγής Ραδονίου", "μετάγμισης Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο έκθεσης – περιβάλλον υψηλής υγρασίας", όπως έχουν ήδη αναφερθεί. Τα προσροφητικά υλικά και η συσκευή εκτίθενται σε αρχική συγκέντρωση Ραδονίου $Rn_0 \approx 2.5 \text{ kBq m}^{-3}$ επί 72 h σε περιβάλλον ονομαστικής σχετικής υγρασίας 80%. Μετά το πέρας των 72 h, ο θάλαμος ανοίγει και παραλαμβάνονται τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων μεταβολής

συγκέντρωσης Ραδονίου συναρτήσει του χρόνου από τον ενεργητικό ανιχνευτή ALPHAGUARD P2000.

Πειράματα 2 και 3: Επαναλαμβάνεται ακριβώς το Πείραμα 1 για περιβάλλοντα "μεσαίας" και "χαμηλής" υγρασίας.

Τα πειραματικά ζεύγη (t, Rn) περίπου 430 το πλήθος, από κάθε πείραμα, παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.6, 5.7 και 5.8. Μετά από διαδικασία προσαρμογής των πειραματικών ζευγών σε συνάρτηση αναδρομής εκθετικής απομείωσης της μορφής:

$$Rn = Rn_0 e^{-\lambda' t} \quad (5.5)$$

εκτιμώνται:

- από το Πείραμα 1, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 80\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.
- από το Πείραμα 2, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 50\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.
- από το Πείραμα 3, η αρχική συγκέντρωση Rn_0 και τα $\lambda'_{i,j}$, με $i = 20\% RH$ και $j = 24, 48, 72 h$.

Η διαδικασία αναδρομής γίνεται με τον αλγόριθμο Scaled Levenberg – Marquardt, που περιέχεται στο ελεύθερο λογισμικό (shareware) γραφικών παραστάσεων πειραματικών και άλλων αποτελεσμάτων Qtiplot v. 0.9.0-rc2. Το υπόψιν λογισμικό είναι κλώνος του εμπορικού λογισμικού Origin της Microcal Software Inc. και λειτουργεί με τον ίδιο περίπου τρόπο. Οι πειραματικές μετρήσεις (ανά 10 min) της συγκέντρωσης Ραδονίου με το χρόνο, για την εφαρμογή της μεθόδου Levenberg – Marquardt, "ζυγίζονται" κατά το σφάλμα μέτρησης αυτής της συγκέντρωσης, όπως υπολογίζεται από τον ενεργητικό ανιχνευτή ALPHAGUARD P2000, για κάθε μία από αυτές τις μετρήσεις (βλ. και Vasilief I., 2008). Για την αριθμητική μέθοδο Levenberg – Marquardt, βλ και Press (1992). Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με αυτόν τον τρόπο, συμπληρώθηκε ο Πίνακας 5.1, στον οποίο δίνονται οι τιμές των Rn_0 και λ' με τα σφάλματά τους και τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης. Από τον Πίνακα 5.1 προκύπτουν ως συμπεράσματα τα ακόλουθα:

- η εκτιμώμενη από την προσαρμογή αρχική συγκέντρωση Rn_o , δεν διαφέρει σημαντικά από την τιμή της αρχικής συγκέντρωσης Ραδονίου, η οποία υπολογίζεται ότι εισήλθε στο θάλαμο, σύμφωνα με την σχέση 5.2. Σημειώνεται ότι ο αέρας του περιβάλλοντος του θαλάμου, προτού γίνει η μετάγχιση Ραδονίου σε αυτόν, περιείχε $30 - 60 \text{ Bqm}^{-3}$ Ραδονίου, συγκέντρωση που είναι η τυπική συγκέντρωση Ραδονίου στον αέρα του Εργαστηρίου. Αυτή η ποσότητα Ραδονίου αμελείται, ως πολύ μικρή σε σχέση με την ποσότητα Ραδονίου που μεταγγίζεται στο θάλαμο από την πηγή και η συμβολή της στο σφάλμα της εκτίμησης της αρχικής συγκέντρωσης Rn_o θεωρείται αμελητέα.
- τα λ' που εκτιμώνται είναι σαφώς μεγαλύτερα από τη σταθερά διάσπασης του Ραδονίου λ και μάλιστα στην περιοχή $1.5 - 2.5$ φορές, ακριβώς όπως προβλέφθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.

Στο Διάγραμμα 5.9, έχουν σχεδιασθεί για παράδειγμα οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων απομείωσης Ραδονίου που προέκυψαν από την διαδικασία προσαρμογής, σε περιβάλλον "μεσαίας" υγρασίας για διάρκεια έκθεσης 24, 48 και 72 h. Οι τιμές των λ' που εκτιμήθηκαν, χρησιμοποιούνται στα λογιστικά φύλλα τύπου "Λ2" στη θέση όπου υλοποιείται η εξίσωση 3.9.

Εκτιμάται ότι η επίδραση του λ' στην μέση τιμή της συγκέντρωσης Ραδονίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης, όπως αυτή δίνεται από τη σχέση (3.9), δεν θα είναι μεγαλύτερη από ~10% ακόμα και όταν $\lambda' \approx 2\lambda$. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εκθετικής μορφής του ολοκληρώματος του αριθμητή. Με άλλα λόγια η πραγματική διαφορά των ποσοτήτων

$\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda' t} dt$ και $\int_0^{T_s} Rn_o e^{-\lambda t} dt$, βρίσκεται μέσα στα εκτιμηθέντα από τον Μαρινάκη

(2007) όρια της αβεβαιότητας της πειραματικής διαδικασίας βαθμονόμησης των υπόψιν προσροφητικών υλικών. Σημειώνεται ότι στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) λήφθηκε πάντα $\lambda' = \lambda$.

5.3 Διαδικασία μέτρησης

5.3.1 Γενικά

Στη Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) διερευνήθηκαν για την αποτελεσματικότητά τους τέσσερις (4) τρόποι μετρήσεων:

- (α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης
- (β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης
- (γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης
- (δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Τα είδη των ανιχνευτών, όπως αναφέρονται εδώ, καθώς και οι λεπτομέρειες που αφορούν στην λυόμενη θωράκιση, έχουν εξηγηθεί με επάρκεια στην ΔΕ του Μαρινάκη (2007). Με βάση τη διερεύνηση αυτή προέκυψε ότι οι πλέον κατάλληλοι και λίγο ως πολύ ισοδύναμοι τρόποι μετρήσεων είναι οι (α) και (γ). Στο πλαίσιο της παρούσης ΔΕ, αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί ο τρόπος (α).

Μία μέτρηση μεταλλικού δοχείου με τον ανιχνευτή VICTOREEN, στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας γίνεται / ορίζεται ως εξής:

Κλειστό μεταλλικό δοχείο τοποθετείται εντός της λυόμενης θωράκισης. Ο ανιχνευτής τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό δοχείο σε επαφή με το κάλυμμα. Με το διακόπτη ON/OFF διακόπτη ξεκινάει η συσκευή. Η οθόνη μας δείχνει μετρήσεις ρυθμού σε mSv/h. Με το διακόπτη MODE η μονάδα μέτρησης αλλάζει σε counts/min (CPM). Με το διακόπτη RATE/INTEG από μετρήσεις ρυθμού η συσκευή μεταπίπτει σε ολοκληρωτική μέτρηση. Πατώντας το διακόπτη RESP TIME επί 3 sec μηδενίζεται ο χρόνος της ολοκληρωτικής μέτρησης. Κατά σύμβαση για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ως μέτρηση δοχείου καταγράφεται το αποτέλεσμα που φαίνεται στην οθόνη μετά από 1000 s. Το πιθανό σφάλμα του αποτελέσματος αυτού μπορεί να υπολογίζεται από το σφάλμα ρυθμού κρούσεων από μετρήσεις που περιέχουν σημαντικό υπόστρωμα που υπολογίζεται από την σχέση πιθανού σφάλματος που προτείνεται στον Gray (1987):

$$e = 2 \times \frac{\sqrt{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} + CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}}}{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} - CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}} \times 100$$

(5.6)

5.3.2 Μέτρηση υποστρώματος

Για την εκτίμηση του υποστρώματος πριν από κάθε μέτρηση μετράται μία φορά το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος του προσροφητικού υλικού που εξετάζεται από την μέτρηση αυτή, εντός λυόμενης θωράκισης. Από όλες τις μετρήσεις υποστρώματος,

για όλα τα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά προκύπτουν οι ακόλουθοι μέσοι όροι σε CPM \pm μία τυπική απόκλιση.

Για τον ενεργό άνθρακα:

263 \pm 6

Για τον συνθετικό ζεόλιθο:

273 \pm 4

Για το silica gel:

238 \pm 4

Για το silica gel blue:

240 \pm 3

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι κατ'αρχήν τα υποστρώματα όλων των προσροφητικών υλικών είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποιο στατιστικό τεστ σύγκρισης, είναι δυνατόν επίσης να σημειώνεται ότι τα υποστρώματα για τον συνθετικό ζεόλιθο και τον ενεργό άνθρακα φαίνεται να είναι σχετικά υψηλότερα σε σχέση με τα υποστρώματα για το silica gel και το blue gel. Επιπλέον, οι μικρές τιμές των τυπικών αποκλίσεων που συνοδεύουν τα πιό πάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι γενικά υπάρχει επαναληψιμότητα στις μετρήσεις υποστρώματος, όπως αυτές λαμβάνονται από τα ειδικά κατασκευασμένα δοχεία υποστρώματος, με τον ανιχνευτή VICTOREEN, εντός λυόμενης θωράκισης. Η παρατηρούμενη επαναληψιμότητα προϋποθέτει και για σχετική σταθερότητα της απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος VICTOREEN, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας της παρούσης ΔΕ.

5.3.3 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, βαθμός απόδοσης και MDA

Για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης του ανιχνευτή VICTOREEN πριν από κάθε μέτρηση μετράται μία φορά το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης (περιέχει, όπως σχολιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο, ιπτάμενη τέφρα). Από όλες τις μετρήσεις του μεταλλικού δοχείου, προκύπτει ο ακόλουθος μέσος όρος σε CPM \pm μία τυπική απόκλιση.

2135 \pm 41

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσεως 3.5 και προκύπτει ότι είναι κατά μέσο όρο σε CPM/(Bqkg⁻¹):

Για τον ενεργό άνθρακα:

1.89 ± 0.04

Για τον συνθετικό ζεόλιθο:

1.88 ± 0.04

Για το silica gel:

1.92 ± 0.04

Για το silica gel blue:

1.92 ± 0.04

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι κατ'αρχήν και χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποιο στατιστικό τεστ οι βαθμοί απόδοσης του ανιχνευτή VICTOREEN για όλα τα προσροφητικά υλικά φαίνεται να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Οι μικροδιαφορές που παρατηρήθηκαν στο υπόστρωμα δεν συμβάλλουν σε αντίστοιχες μικροδιαφορές στο βαθμό απόδοσης, προφανώς διότι οι μετρήσεις από το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης είναι πολύ υψηλότερες (8 – 9 φορές) από οποιαδήποτε μέτρηση από οποιοδήποτε δοχείο υποστρώματος. Επιπλέον, και πάλι, οι μικρές τιμές των τυπικών αποκλίσεων που συνοδεύουν τα πιο πάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι γενικά, όπως είχε εύλογα υποτεθεί και στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχει σταθερότητα του βαθμού απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος VICTOREEN, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας της παρούσης ΔΕ.

Η ποσότητα (MDA, Minimum Detectable Activity σε CPM), όπως παρουσιάστηκε στην σχέση 3.13 του 3^{ου} Κεφαλαίου, αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο ανιχνευόμενο καθαρό ρυθμό κρούσεων που οφείλεται στα θυγατρικά του Ραδονίου που υπάρχουν στο προσροφητικό υλικό και όχι στο υπόστρωμα. Για το μέγεθος αυτό προκύπτει ο ακόλουθος μέσος όρος σε CPM ± μία τυπική απόκλιση:

Για τον ενεργό άνθρακα:

11.9 ± 0.1

Για τον συνθετικό ζεόλιθο:

12.1 ± 0.1

Για το silica gel:

11.3 ± 0.1

Για το silica gel blue:

11.4 ± 0.1

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι κατ'αρχήν οι ποσότητες MDA για όλα τα προσροφητικά υλικά είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποιο στατιστικό τεστ σύγκρισης, είναι δυνατόν επίσης να σημειώνεται ότι τα MDA για τον συνθετικό ζεόλιθο και τον ενεργό άνθρακα φαίνεται να είναι σχετικά υψηλότερα σε σχέση με τα MDA για το silica gel και το blue gel. Το φαινόμενο εξηγείται διότι η ποσότητα MDA εξαρτάται άμεσα από το υπόστρωμα που παρουσιάζει κάθε ένα από τα προσροφητικά υλικά. Δεδομένου λοιπόν ότι τα υποστρώματα του ενεργού άνθρακα και του συνθετικού ζεόλιθου είναι ελαφρά μεγαλύτερα από τα υποστρώματα του silica gel και του silica gel blue, λογικά και τα αντίστοιχα MDA προκύπτουν υψηλότερα.

5.3.4 Μέτρηση εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων με προσροφητικά υλικά

Τα εκτεθέντα μεταλλικά δοχεία προς μέτρηση, στο τέλος του χρόνου έκθεσης T_s , εξέρχονται από το θάλαμο έκθεσης και καλύπτονται με τα αντίστοιχα καλύμματά τους. Χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου για επιπλέον στεγάνωση. Η έξοδος των δοχείων γίνεται με απλό άνοιγμα της θύρας του θαλάμου. Ο χειριστής που κάνει αυτή την εργασία (δηλ. έξοδος και κάλυψη) οφείλει να φορά ελαστικά γάντια προκειμένου να μην μεταφερθούν στα χέρια του (και δια μέσου αυτών, όπου αλλού στο σώμα του) τυχόν θυγατρικά του Ραδονίου που είναι δυνατόν να βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια των δοχείων. Η χρονική στιγμή της έναρξης μετρήσεων προκύπτει φυσιολογικά, αν στο τέλος του χρόνου έκθεσης T_s προστεθούν οι απαραίτητες τρεις ώρες για την ωρίμανση των θυγατρικών.

5.4 Πειραματικά αποτελέσματα

5.4.1 Πειραματικά λογιστικά φύλλα "Λ1"

Το τυπικό λογιστικό φύλλο MS Excel® "Λ1" (βλ. και την πλήρη περιγραφή του στο 3^ο Κεφάλαιο), το οποίο προβαίνει αυτόματα στον υπολογισμό της απόδοσης του

ανιχνευτή VICTOREEN, κάθε φορά που χρειάζεται να μετρηθεί ένα εκτεθέν μεταλλικό δοχείο, συμπληρώθηκε κατά τη μετρητική διαδικασία για κάθε ένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά. Προέκυψαν οι Πίνακες αποτελεσμάτων 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5 για τα προσροφητικά υλικά "Ενεργός Άνθρακας", "Συνθετικός Ζεόλιθος", "Silica Gel" και "Silica Gel Blue".

5.4.2 Πειραματικά λογιστικά φύλλα "Λ2"

Το τυπικό λογιστικό φύλλο MS Excel[®] "Λ2" (βλ. και την πλήρη περιγραφή του στο 3^ο Κεφάλαιο), το οποίο προβαίνει αυτόματα στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης, και του κατώτερου ορίου ανίχνευσης του εκτεθέντος προσροφητικού υλικού, συμπληρώθηκε κατά τη μετρητική διαδικασία για κάθε ένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά. Προέκυψαν οι Πίνακες αποτελεσμάτων 5.6 (α,β,γ,δ), 5.7 (α,β,γ,δ), 5.8 (α,β,γ,δ) και 5.9 (α,β,γ,δ) για τα προσροφητικά υλικά "Ενεργός Άνθρακας", "Συνθετικός Ζεόλιθος", "Silica Gel" και "Silica Gel Blue". Από τον Πίνακα 5.8 διαπιστώνεται ότι, όσο αφορά στο προσροφητικό μέσο silica gel, η προσρόφηση Ραδονίου είναι αμελητέα (βλ. πχ. τις στήλες των συντελεστών βαθμονόμησης και των κατώτερων ορίων ανίχνευσης). Με βάση αυτή τη διαπίστωση κρίνεται ότι δεν αξίζει τον κόπο να αναλυθεί ως προσροφητικό υλικό Ραδονίου το υπόψιν silica gel.

5.4.3 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Όπως ήταν αναμενόμενο και από προηγούμενες αντίστοιχες πειραματικές εργασίες (βλ. π.χ. και George,1984), καθώς και από θεωρητικές προσεγγίσεις (βλ. π.χ. και Cohen, 1983), σχετικά με την προσρόφηση Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα, στις περιπτώσεις του ενεργού άνθρακα, του συνθετικού ζεόλιθου και του silica gel blue που εξετάστηκαν εδώ, ο συντελεστής βαθμονόμησης AF που προκύπτει, μειώνεται με την αύξηση της σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον της έκθεσης και την αύξηση του χρόνου έκθεσης. Το φαινόμενο, σε ό,τι αφορά το χρόνο έκθεσης (σταθερή υγρασία), προσεγγίζεται ημιεμπειρικά με τη σχέση:

$$AF = aT_s^2 + bT_s + c \quad (5.7)$$

Ο Πίνακας 5.10 συνοψίζει, τους συντελεστές συσχέτισης και τους παράγοντες a , b και c , καθώς και τα σφάλματά τους, όπως αυτά προέκυψαν από τη διαδικασία προσαρμογής στα πειραματικά αποτελέσματα για τα τρία περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Ως πειραματικά αποτελέσματα εννοούνται όλες οι

μετρήσεις που λήφθηκαν από κάθε ένα δοχείο με προσροφητικό υλικό που εκτέθηκε. Η προσαρμογή στα πειραματικά αποτελέσματα έγινε με τη χρήση του αλγόριθμου Scaled Levenberg – Marquardt, που –όπως ήδη σημειώθηκε- περιέχεται στο ελεύθερο λογισμικό (shareware) γραφικών παραστάσεων πειραματικών και άλλων αποτελεσμάτων Qtiplot v. 0.9.0-rc2. Όπως αναμένεται, επαληθεύεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.10, κυρίως στην περίπτωση του ενεργού άνθρακα ότι σε περιβάλλοντα χαμηλής σχετικής υγρασίας, η προσρόφηση Ραδονίου στα μεταλλικά δοχεία είναι σαφώς ταχύτερη από ότι σε περιβάλλοντα υψηλότερης σχετικής υγρασίας. Αντίστοιχο συμπέρασμα για τα άλλα δύο προσροφητικά υλικά δεν προκύπτει με σαφήνεια. Τα Διαγράμματα 5.10, 5.11 και 5.12 αποδίδουν με γραφικό τρόπο τα πιο πάνω αποτελέσματα για τον ενεργό άνθρακα, το συνθετικό ζεόλιθο και το silica gel blue.

Τόσο τα τρέχοντα πειραματικά αποτελέσματα, για τα τρία από τα τέσσερα προσροφητικά υλικά που δοκιμάστηκαν (εξαιρείται λόγω χαμηλής απόδοσης το υλικό silica gel), αλλά και παλαιότερα πειραματικά αποτελέσματα για τον ενεργό άνθρακα (βλ. π.χ. τις εργασίες του George, 1984 και του Gray, 1987) δείχνουν ότι η μεταβολή του συντελεστή βαθμονόμησης με το χρόνο έκθεσης σε διάφορες υγρασίες μπορεί να προσεγγίζεται καλώς και από τη σχέση:

$$\ln(AF) = AT_s + B \quad (5.8)$$

Ο Πίνακας 5.11 συνοψίζει, τους συντελεστές συσχέτισεως και τους παράγοντες A και B καθώς και τα σφάλματά τους, όπως αυτά προέκυψαν από τη διαδικασία προσαρμογής στα πειραματικά αποτελέσματα για τα τρία περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Ως πειραματικά αποτελέσματα εννοούνται όλες οι μετρήσεις που λήφθηκαν από κάθε ένα δοχείο με προσροφητικό υλικό που εκτέθηκε. Η προσαρμογή στα πειραματικά αποτελέσματα έγινε με τη χρήση του αλγόριθμου Scaled Levenberg – Marquardt. Είναι φανερό ότι, όπως εξάλλου αναμένεται, η κλίση A της ευθείας αναδρομής είναι γενικά μεγαλύτερη, στην περίπτωση της χαμηλότερης σχετικής υγρασίας, γεγονός που δείχνει ότι η προσρόφηση Ραδονίου στα μεταλλικά δοχεία είναι ταχύτερη όταν ο περιβάλλον αέρας είναι σχετικά ξηρότερος. Τα Διαγράμματα 5.13, 5.14 και 5.15 αποδίδουν με γραφικό τρόπο τα πιο πάνω αποτελέσματα για τον ενεργό άνθρακα, το συνθετικό ζεόλιθο και το silica gel blue.

Από τη προσεκτική μελέτη των γραφημάτων στα Διαγράμματα 5.10 έως και 5.15 και των αποτελεσμάτων στους Πίνακες 5.10 και 5.11, προκύπτει ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης του συνθετικού ζεόλιθου στις υψηλές υγρασίες δεν φαίνεται να ακολουθεί την τυπική συμπεριφορά που διακρίνεται για τον συνθετικό ζεόλιθο στις μεσαίες και τις χαμηλές υγρασίες και για τον ενεργό άνθρακα σε όλα τα περιβάλλοντα υγρασίας. Επίσης, παρόμοια προκύπτει ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης του silica gel blue στις χαμηλές υγρασίες δεν φαίνεται να ακολουθεί την τυπική συμπεριφορά που διακρίνεται για το silica gel blue στις μεσαίες και τις υψηλές υγρασίες και για τον ενεργό άνθρακα σε όλα τα περιβάλλοντα υγρασίας. Κατά συνέπεια απαιτείται προσοχή στην βαθμονόμηση του συνθετικού ζεόλιθου και του silica gel blue αν προγραμματίζεται κάποιο από αυτά τα υλικά να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής Ραδονίου σε υψηλές και χαμηλές σχετικές υγρασίες αντίστοιχα.

Η προηγούμενη διαδικασία προσαρμογής σε ευθεία αναδρομής, επιτρέπει να δοθεί και μία μάλλον ποιοτική απάντηση στο εύλογο ερώτημα του αν επαρκούν ή όχι δύο μεταλλικά δοχεία για κάθε προσροφητικό υλικό προκειμένου να εξαχθούν συνεπή επιστημονικά συμπεράσματα σχετικά με την προσροφητικότητά τους σε περιβάλλον με Ραδόνιο. Ο τρόπος με τον οποίο δίνεται αυτή η απάντηση είναι ο εξής:

- Για κάθε προσροφητικό υλικό και για κάθε ένα από τα δύο δοχεία υπολογίζεται η εξίσωση αναδρομής 5.8, και επομένως οι παράμετροι της A και B και η εκτίμηση της μεταβλητότητας της αναδρομής s από τη σχέση:

$$s = \frac{\sum_i^n [\ln AF(T_{si})_{est} - \ln AF(T_{si})]}{n-2} \quad (5.9)$$

όπου:

$\ln AF(T_{si})_{est}$ η εκτιμώμενη από την αναδρομή ποσότητα

n το πλήθος των πειραματικά προσδιορισμένων ζευγών $T_{si}, \ln AF(T_{si})$

- Στη συνέχεια οι δύο εξισώσεις αναδρομής (μία για κάθε δοχείο) συγκρίνονται μεταξύ τους με τη μέθοδο των ελλείψεων εμπιστοσύνης. Συγκεκριμένα χαράσσονται σε γράφημα, τα δύο ζεύγη παραμέτρων (A, B) και οι ελλείψεις εμπιστοσύνης που υπολογίζονται με τον τρόπο που παρουσιάζει η Κωνστανταροπούλου (1991) με βάση τη σχέση:

$$\sum_i^n (T_{si}^2)(x - A_j)^2 + 2 \sum_i^n (T_{si})(x - A_j)(y - B_j) + n(y - B_j)^2 = 2s_j^2 F(2, n - 2, 1 - a)$$

(5.10)

όπου:

$F(2, n, 1 - a)$ η τιμή της παραμέτρου της στατιστικής κατανομής F σε επίπεδο εμπιστοσύνης $100(1 - \alpha)\%$

j ο αύξων αριθμός δοχείου (εδώ 1 ή 2)

ή ισοδύναμα ως:

$$y = \frac{-2 \sum_i^n (T_{si})(x - A_j) \pm \sqrt{\left[2 \sum_i^n (T_{si})(x - A_j) \right]^2 - 4n \left[\sum_i^n (T_{si}^2)(x - A_j)^2 - 2s_j^2 F(2, n - 2, 1 - a) \right]}}{2n} + B_j$$

(5.11)

Τα Διαγράμματα 5.16, 5.17 και 5.18 παρουσιάζουν τις ελλείψεις εμπιστοσύνης για τα δύο μεταλλικά δοχεία κάθε ενός από τα τρία αποδοτικά προσροφητικά υλικά, σε σχετική υγρασία στην περιοχή 30 – 70% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η επικάλυψη των ελλείψεων εμπιστοσύνης δείχνει ότι τουλάχιστον τα δύο μεταλλικά δοχεία που εξετάστηκαν με κάθε προσροφητικό υλικό στις παρουσιαζόμενες πειραματικές συνθήκες δεν συμπεριφέρονται διαφορετικά.

Πέρα από τα παραπάνω αποτελέσματα στους πίνακες ή στις σχέσεις που προέκυψαν από αναδρομές, τα οποία ερμηνεύουν την προσροφητική συμπεριφορά του ενεργού άνθρακα, του συνθετικού ζεόλιθου και του silica gel blue, τα πειράματα δείχνουν επίσης ότι η μεταβολή του συντελεστή βαθμονόμησης με την αύξηση του χρόνου έκθεσης είναι σχετικά περιορισμένη στο εύρος σχετικών υγρασιών από 10 έως 50%. Στο εύρος αυτό παρατηρούνται φυσικά και οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή αυτού. Η αρνητική συμβολή της σχετικής υγρασίας αρχίζει να γίνεται φανερή για σχετικές υγρασίες πάνω από 60%. Αυτή η τάση υποστηρίζεται και από πολλά παλαιότερα πειράματα για τον ενεργό άνθρακα. Επομένως, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.10, 5.11 και 5.12, προκύπτει το συμπέρασμα ότι μία σχετικά απλή συνεχής επιφάνεια της μορφής:

$$\ln(AF) = C + D \cdot RH + E \cdot T_s + F \cdot RH^2 + G \cdot T_s^2 + H \cdot RH \cdot T_s \quad (5.12)$$

παρεμβάλλεται με επιτυχία στις πειραματικές μετρήσεις. Τα Διαγράμματα 5.19, 5.20 και 5.21 παρουσιάζουν τις αντίστοιχες επιφάνειες αναδρομής για τον ενεργό άνθρακα, το συνθετικό ζεόλιθο και το silica gel blue. Ο Πίνακας 5.12 συνοψίζει τους συντελεστές συσχέτισεως, καθώς και τους παράγοντες *C*, *D*, *E*, *F*, *G* και *H* μαζί με τα σφάλματά τους για τα τρία αυτά προσροφητικά υλικά. Οι σχετικοί υπολογισμοί για τις προσαρμογές έγιναν με το εμπορικό λογισμικό Datafit for Windows, Version 6.1.10, 1999, της Oakdale Engineering⁴.

Ο Πίνακας 5.13 συνοψίζει τα αποτελέσματα για το κατώτερο όριο ανίχνευσης και για τα τρία είδη προσροφητικών υλικών που εκτέθηκαν για διάρκεια T_s 24, 48 και 72 h σε περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας *RH* 20%, 50% και 80%. Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνεται ότι το κατώτερο όριο ανίχνευσης του ενεργού άνθρακα (το οποίο εξαρτάται από το χρόνο T_s και την υγρασία *RH* και υπολογίζεται μεταξύ 7 και 14 Bqm⁻³), είναι πολύ μικρότερο από το κατώτερο όριο ανίχνευσης των δύο άλλων υλικών. Παρόλαυτά το κατώτερο όριο ανίχνευσης του συνθετικού ζεόλιθου, δεν είναι πολύ υψηλό και βρίσκεται στην περιοχή 35 έως 53 Bqm⁻³. Το όριο αυτό, καθιστά τον συνθετικό ζεόλιθο, κατάλληλο προσροφητικό υλικό για να χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής Ραδονίου. Σχετικά με το υλικό silica gel blue, δεδομένου ότι το κατώτερο όριο ανίχνευσής του κυμαίνεται από 290 έως 720 Bqm⁻³, μπορεί κανείς να σημειώσει, ότι δεν μπορεί να αγνοείται ως κατάλληλο προσροφητικό υλικό για ανιχνευτές Ραδονίου, ειδικά όταν εκτίθεται σε περιβάλλον χαμηλής υγρασίας και υψηλής συγκέντρωσης Ραδονίου. Τέτοια περιβάλλοντα συναντώνται συχνά σε ξηρά υπόγεια σπήλαια.

5.5 Παρατηρήσεις - σχόλια

Δεδομένου, ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, η σχετική υγρασία διατηρούνταν κατά το δυνατόν σταθερή, σύμφωνα με τις προδιαγραφές κάθε πειράματος, η μάζα των υδρατμών που προσροφάται από τα διάφορα υλικά στα μεταλλικά δοχεία, μπορεί να χρησιμεύσει ως δείκτης της σχετικής υγρασίας που επικρατούσε στο περιβάλλον έκθεσης. Οπως υπολογίζεται με βάση τους Πίνακες 5.6 (α,β,γ,δ), 5.7 (α,β,γ,δ), 5.8 (α,β,γ,δ) και 5.9 (α,β,γ,δ), π.χ. για εκθέσεις που διαρκούν 48 h σε περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας 20 – 50%, η

⁴ <http://www.oakdaleengr.com>, Oakdale Engineering, 23 Tomey Road, Oakdale, PA 15071, USA, Fax: +17246930320

προσροφηθείσα μάζα των υδρατμών βρίσκεται να είναι μικρότερη από 2% του αρχικού ξηρού βάρους του ενεργού άνθρακα, 3% του αρχικού ξηρού βάρους του συνθετικού ζεόλιθου και 3% του αρχικού ξηρού βάρους του silica gel blue. Αυτά τα πειραματικά δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι μόνο όταν το περιβάλλον έκθεσης έχει σχετική υγρασία σαφώς μεγαλύτερη από το 50%, αναμένεται να προσροφάται σημαντική μάζα υδρατμών στα προσροφητικά υλικά που δοκιμάστηκαν. Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, φαίνεται ότι η μέγιστη προσρόφηση υδρατμού που παρατηρήθηκε σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 80% ήταν 9% του αρχικού ξηρού βάρους του ενεργού άνθρακα, 6% του αρχικού ξηρού βάρους του συνθετικού ζεόλιθου και 8% του αρχικού ξηρού βάρους του silica gel blue. Διακρίνεται ότι ο συνθετικός ζεόλιθος, σε περιβάλλοντα υψηλής σχετικής υγρασίας, φαίνεται να προσροφά λιγότερους υδρατμούς τόσο από τον ενεργό άνθρακα, όσο και από το silica gel blue.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 5.1

Ανοιχτά μεταλλικά δοχεία με προσροφητικά υλικά στον εργαστηριακό φούρνο



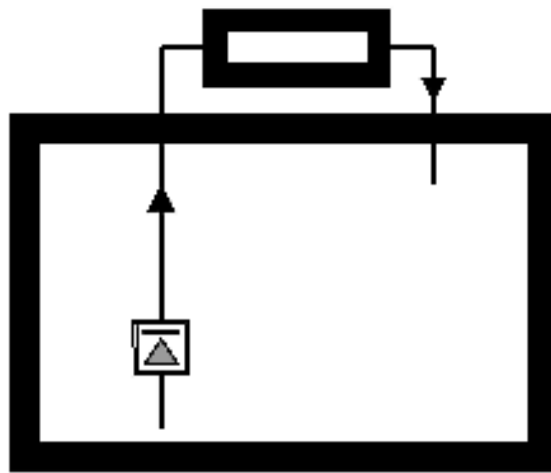
Διάγραμμα 5.2

Αναλογικός ζυγός ακριβείας



Διάγραμμα 5.3

Δοχείο πηγής "1": Διακρίνονται οι σφαιρικές βαλβίδες του κυκλώματος μετάγγισης

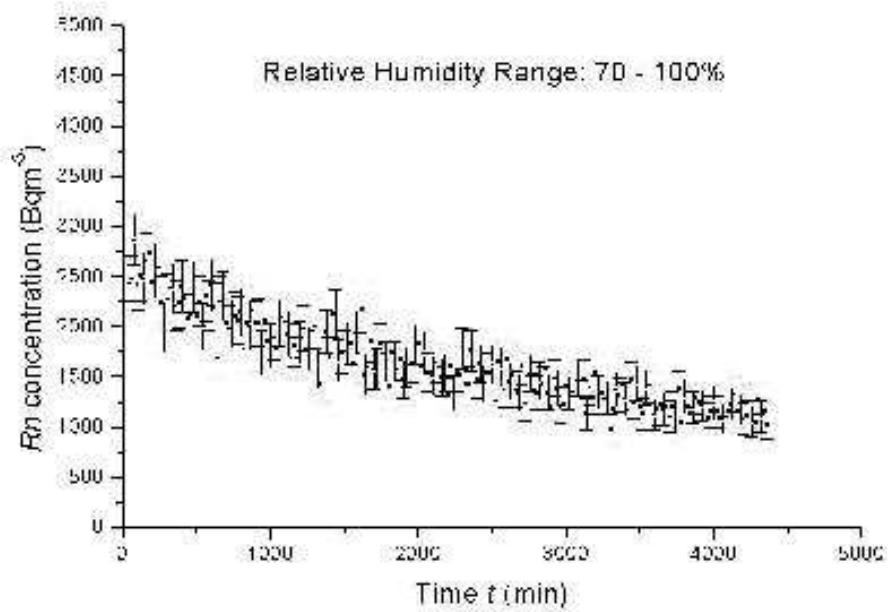


Διάγραμμα 5.4

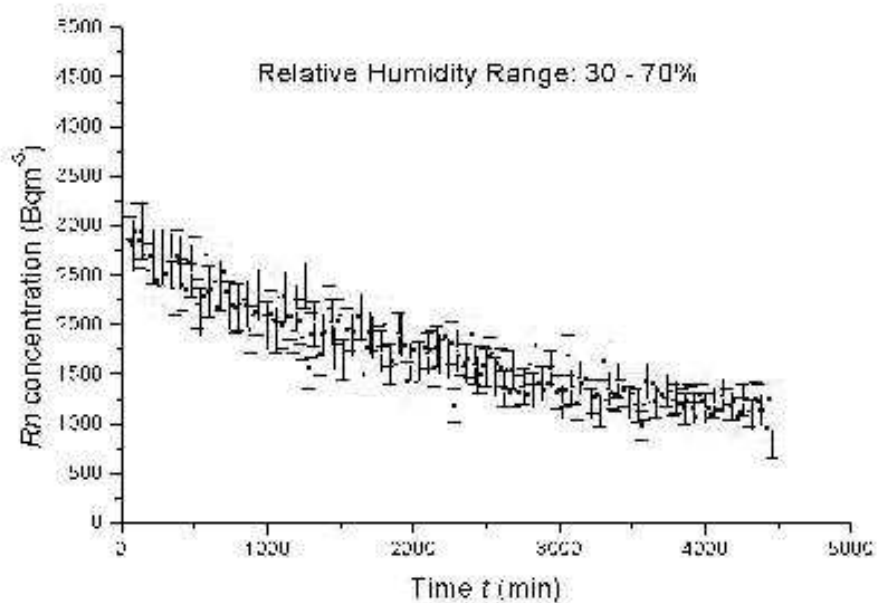
Αρχή λειτουργίας κυκλώματος μετάγγισης σε μονογραμμικό διάγραμμα



Διάγραμμα 5.5
Ενεργητικός ανιχνευτής Ραδονίου Alphaguard P2000

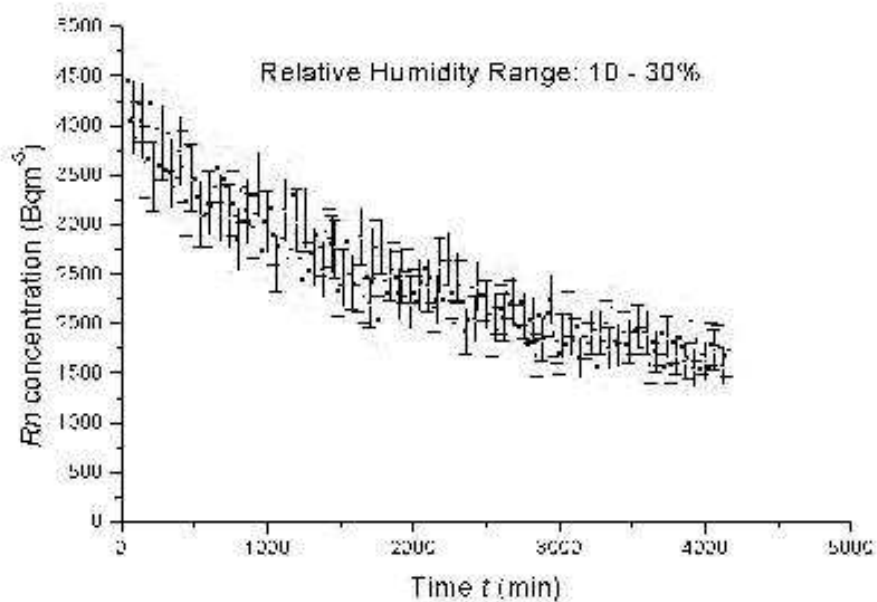


Διάγραμμα 5.6
Πειραματικά αποτελέσματα (t, Rn) για τον προσδιορισμό του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου σε περιβάλλον έκθεσης με "υψηλή" σχετική υγρασία και σημαντική μάζα προσροφητικών υλικών



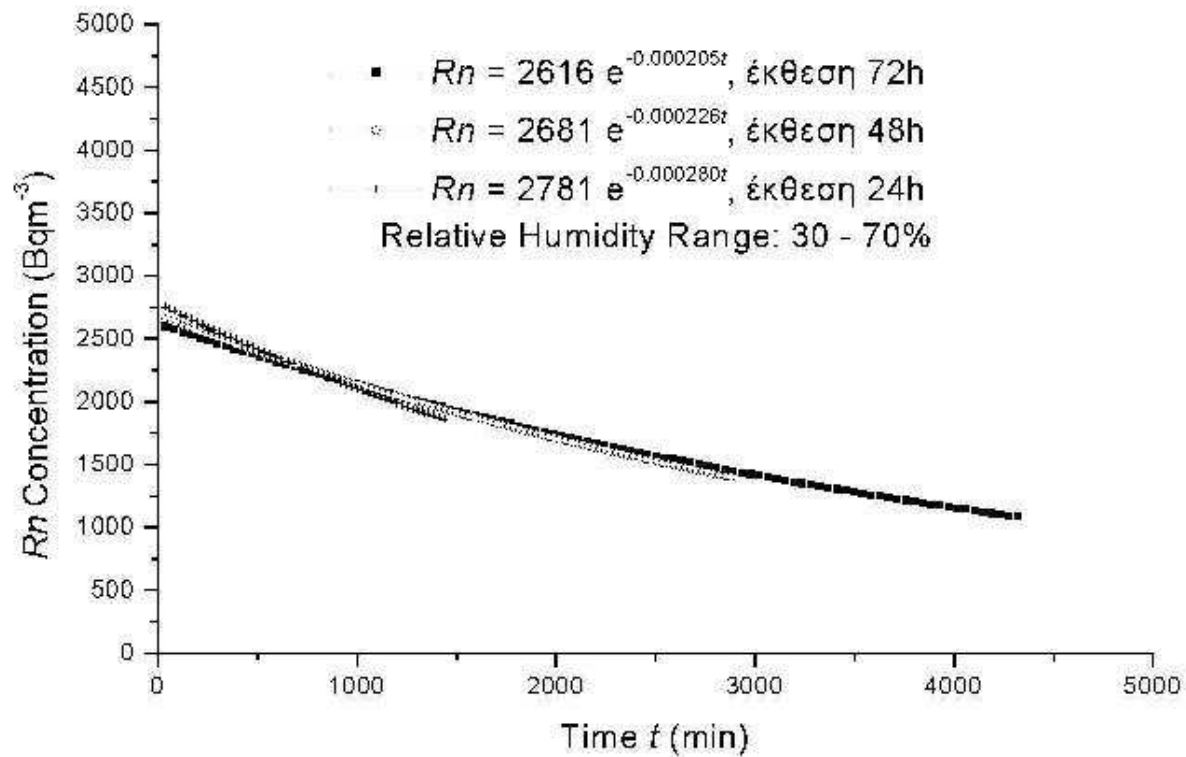
Διάγραμμα 5.7

Πειραματικά αποτελέσματα (t, Rn) για τον προσδιορισμό του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου σε περιβάλλον έκθεσης με "μεσαία" σχετική υγρασία και σημαντική μάζα προσροφητικών υλικών



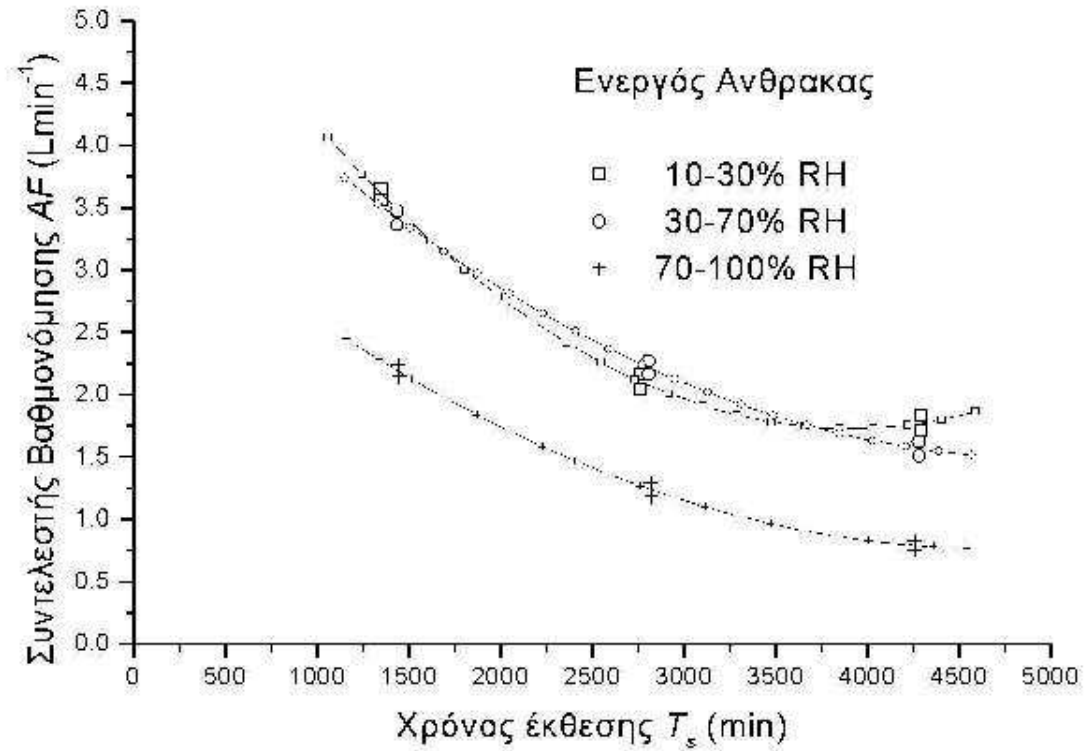
Διάγραμμα 5.8

Πειραματικά αποτελέσματα (t, Rn) για τον προσδιορισμό του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου σε περιβάλλον έκθεσης με "χαμηλή" σχετική υγρασία και σημαντική μάζα προσροφητικών υλικών



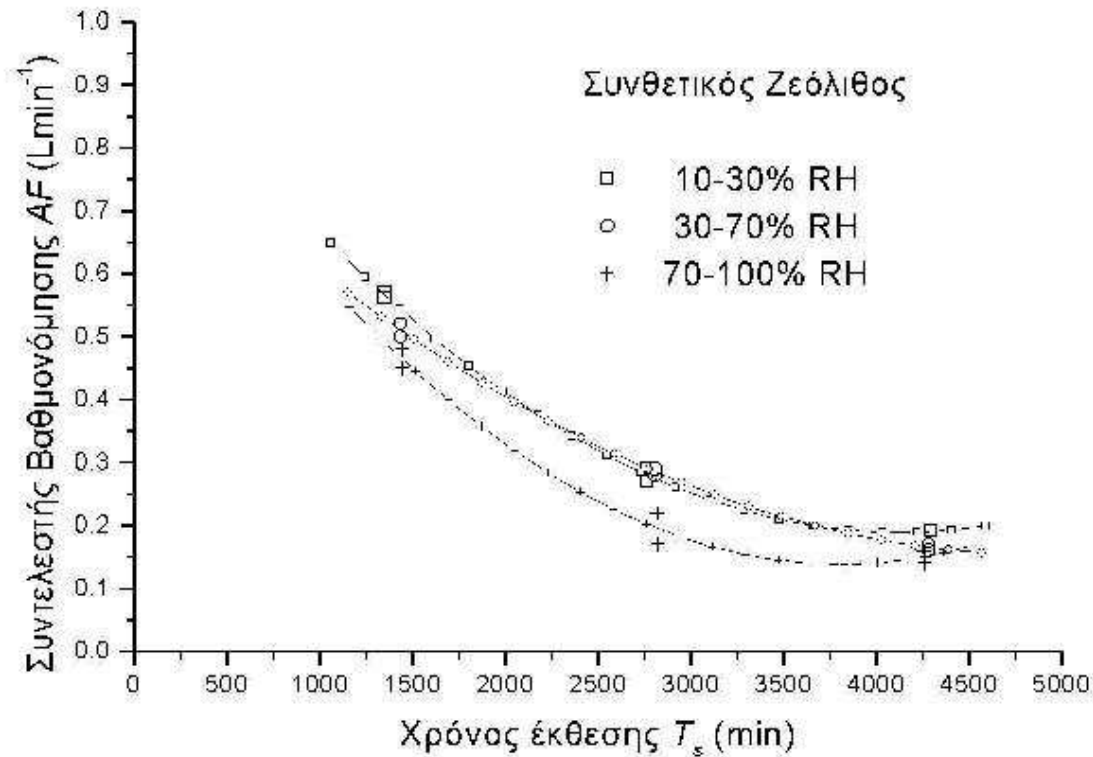
Διάγραμμα 5.9

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής για την απομείωση του Ραδονίου σε περιβάλλον έκθεσης με "μεσαία" σχετική υγρασία και σημαντική μάζα προσροφητικών υλικών. Έκθεση για 72, 48 και 24 h (βλ. και Πίνακα 5.1)



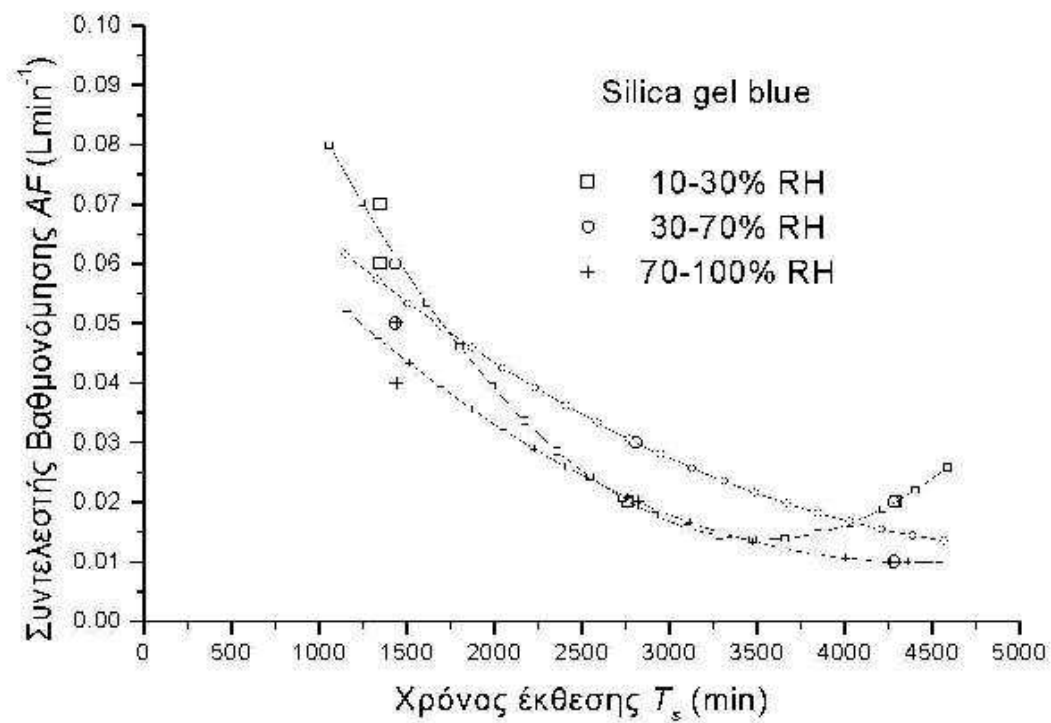
Διάγραμμα 5.10

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.7 για τον ενεργό άνθρακα (βλ. και Πίνακα 5.10)



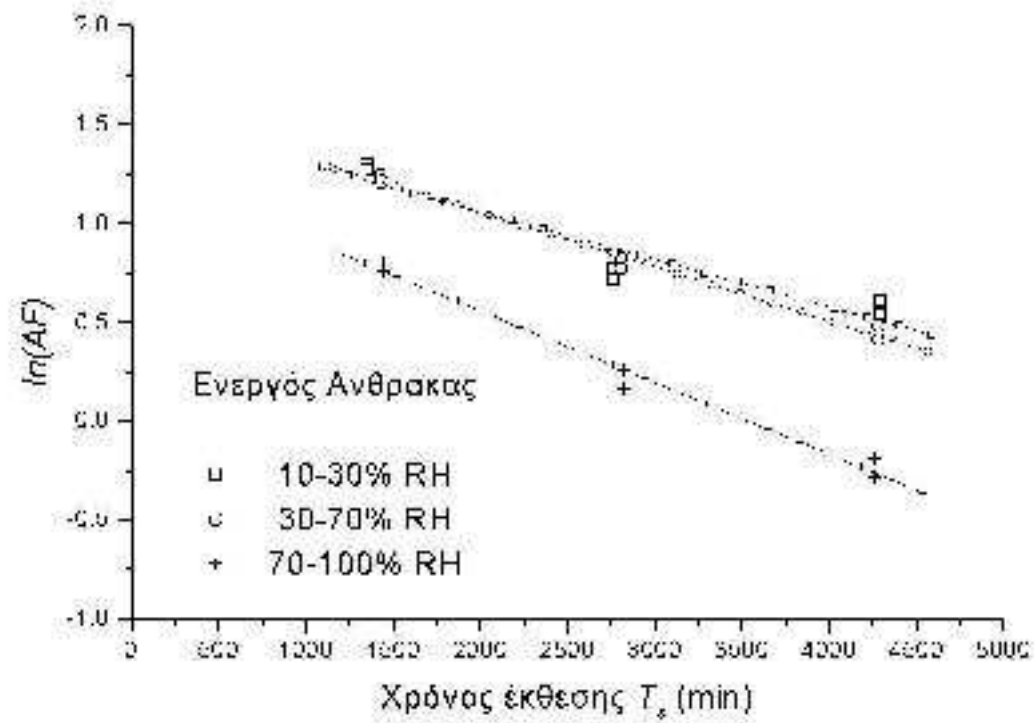
Διάγραμμα 5.11

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.7 για το συνθετικό ζεόλιθο (βλ. και Πίνακα 5.10)



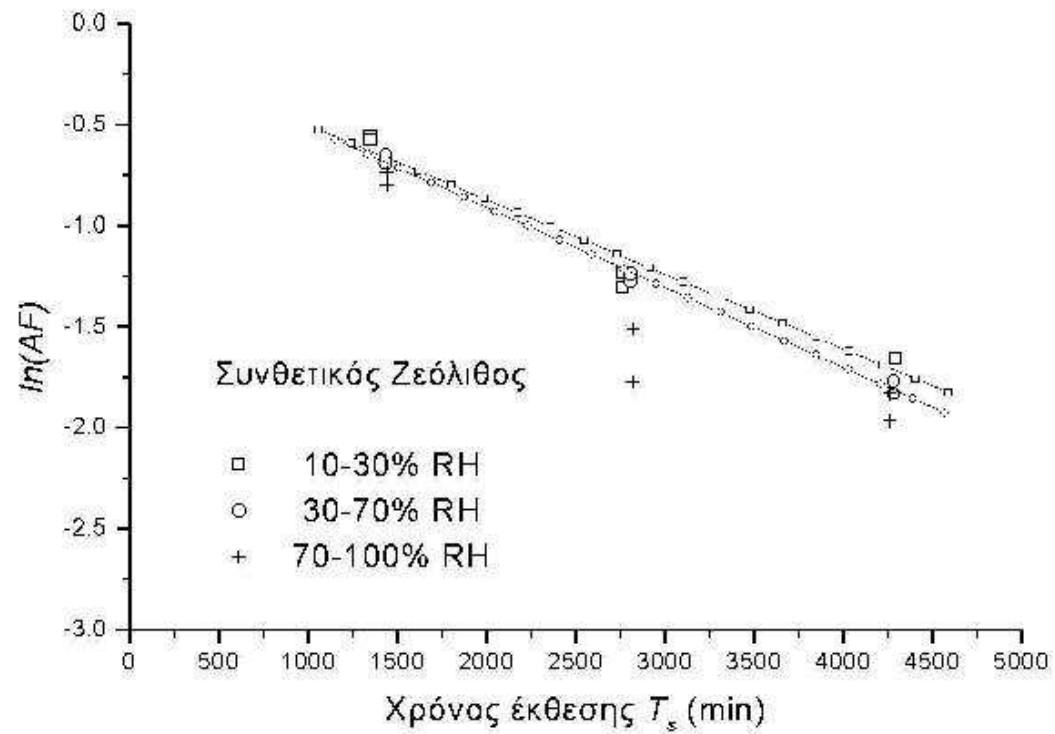
Διάγραμμα 5.12

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.7 για το silica gel blue (βλ. και Πίνακα 5.10)



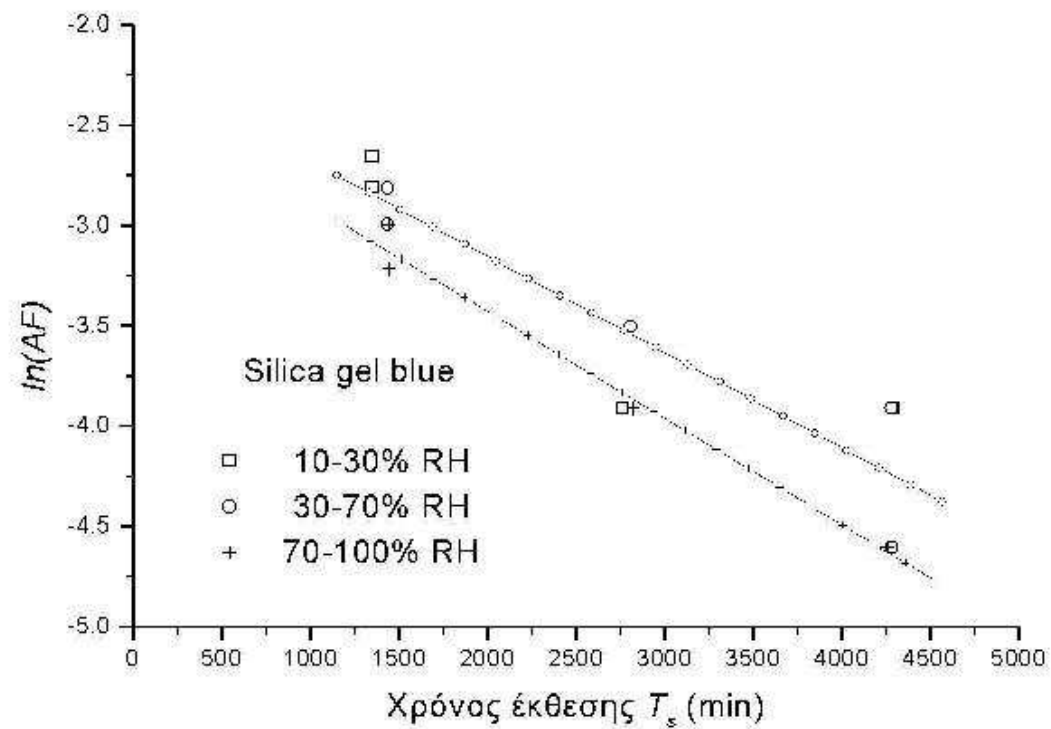
Διάγραμμα 5.13

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.8 για τον ενεργό άνθρακα (βλ. και Πίνακα 5.11)



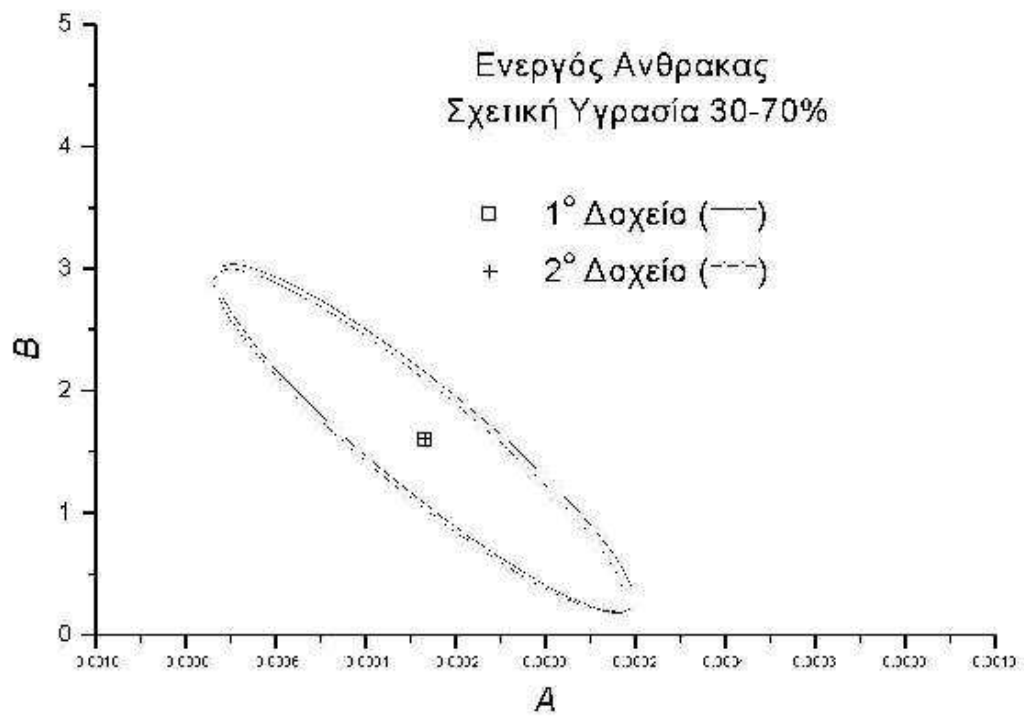
Διάγραμμα 5.14

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.8 για το συνθετικό ζεόλιθο (βλ. και Πίνακα 5.11)



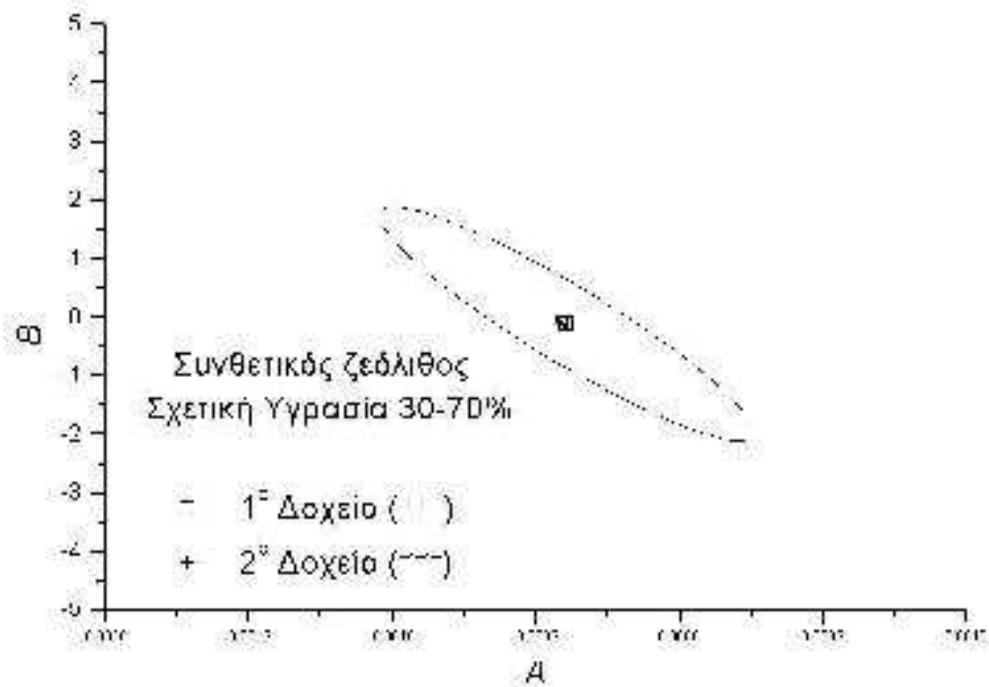
Διάγραμμα 5.15

Γραφικές παραστάσεις εξισώσεων αναδρομής 5.8 για το silica gel blue (βλ. και Πίνακα 5.11)



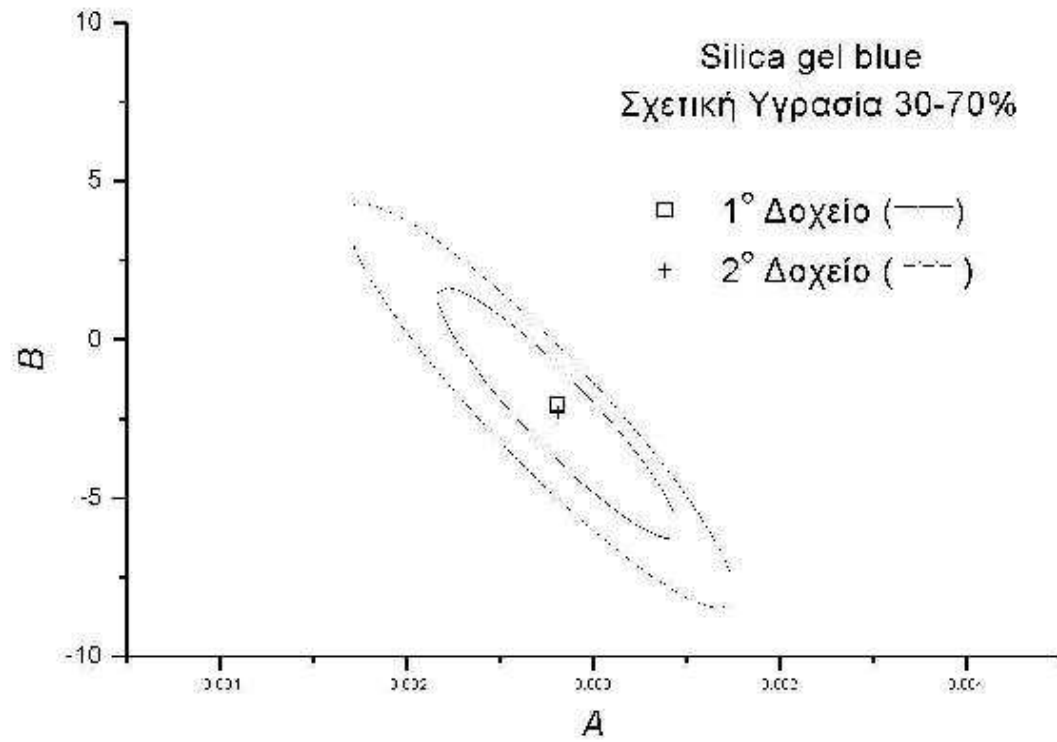
Διάγραμμα 5.16

Ελλείψεις εμπιστοσύνης εξισώσεων αναδρομής 5.8 για δύο δοχεία με προσροφητικό υλικό ενεργό άνθρακα



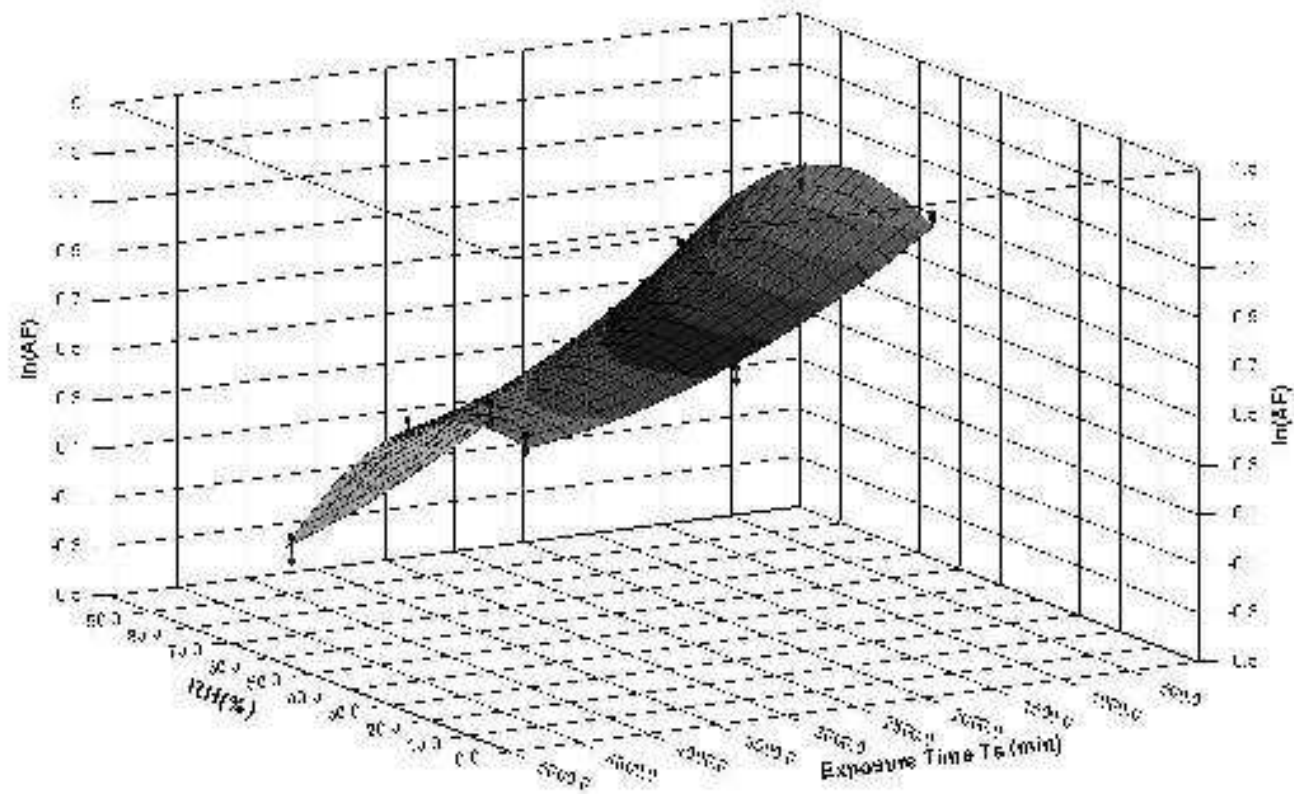
Διάγραμμα 5.17

Ελλείψεις εμπιστοσύνης εξισώσεων αναδρομής 5.8 για δύο δοχεία με προσροφητικό υλικό συνθετικό ζεόλιθο (η έλλειψη του δεύτερου δοχείου είναι σχετικά πολύ μικρή)



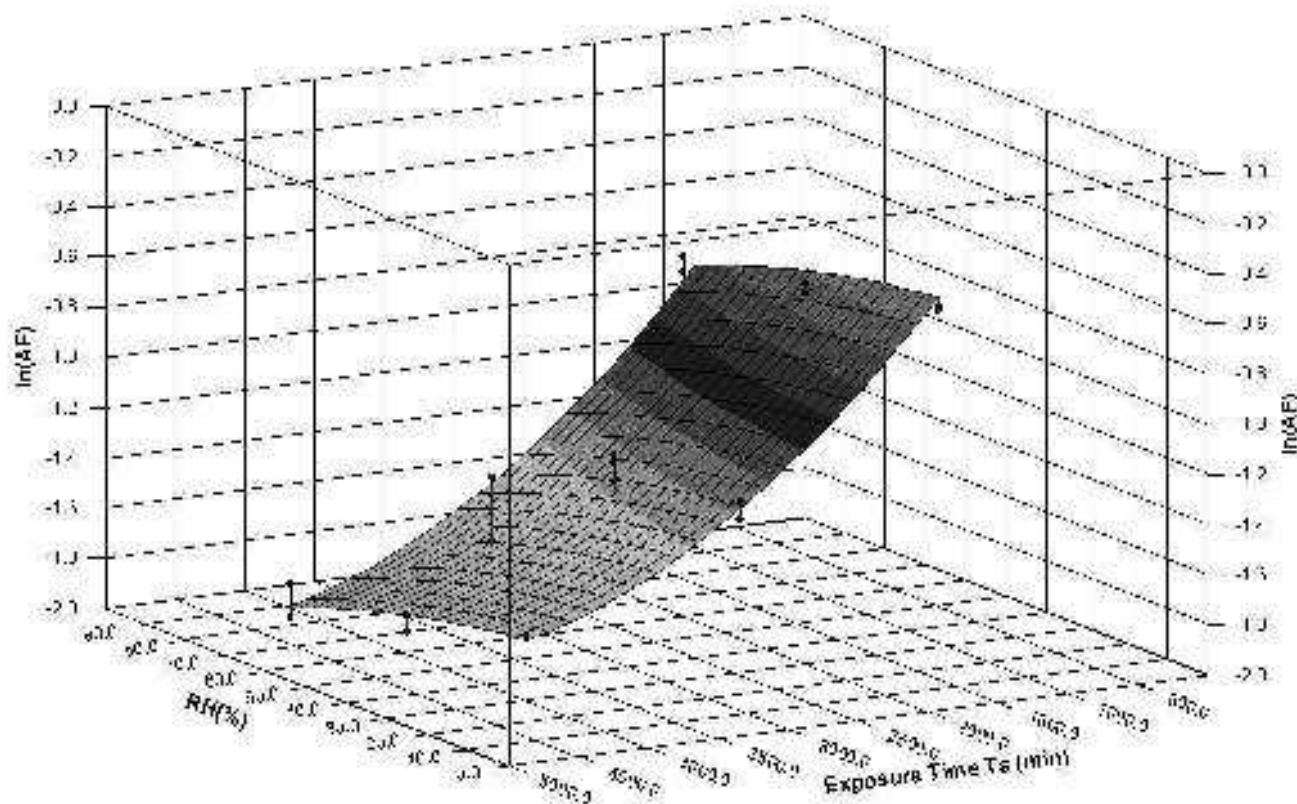
Διάγραμμα 5.18

Ελλείψεις εμπιστοσύνης εξισώσεων αναδρομής 5.8 για δύο δοχεία με προσροφητικό υλικό silica gel blue



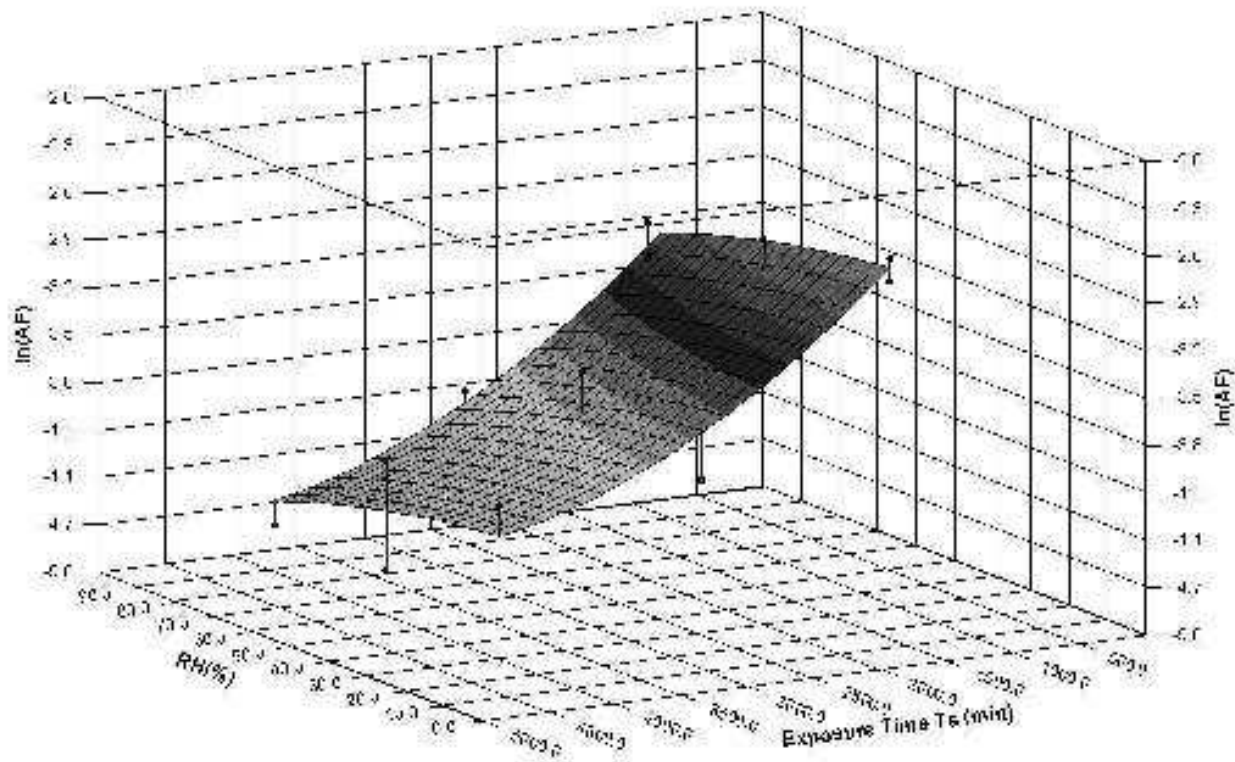
Διάγραμμα 5.19

Γραφική παράσταση επιφάνειας αναδρομής 5.12 για τον ενεργό άνθρακα (βλ. και Πίνακα 5.12)



Διάγραμμα 5.20

Γραφική παράσταση επιφάνειας αναδρομής 5.12 για το συνθετικό ζεόλιθο (βλ. και Πίνακα 5.12)



Διάγραμμα 5.21

Γραφική παράσταση επιφάνειας αναδρομής 5.12 για το silica gel blue (βλ. και Πίνακα 5.12)

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

| RH(%) | Χρόνος έκθεσης (h) | Rn_o (Bqm⁻³) | λ' (min⁻¹) | r^2 |
|---------------|-------------------------------|---|---|-------------------------|
| 70-100 | 24 | 2573 ± 47 | 0.00027 ± 2e-05 | 0.999 |
| | 48 | 2475 ± 33 | 0.000212 ± 8e-06 | 0.999 |
| | 72 | 2413 ± 27 | 0.000190 ± 5e-06 | 0.999 |
| 30-70 | 24 | 2781 ± 50 | 0.00028 ± 2e-05 | 0.999 |
| | 48 | 2681 ± 35 | 0.000226 ± 8e-06 | 0.999 |
| | 72 | 2616 ± 29 | 0.000205 ± 5e-06 | 0.999 |
| 10-30 | 24 | 4002 ± 69 | 0.00029 ± 2e-05 | 0.999 |
| | 48 | 3841 ± 47 | 0.000238 ± 8e-06 | 0.999 |
| | 72 | 3734 ± 39 | 0.000213 ± 4e-06 | 0.999 |

Πίνακας 5.1

**Τιμές των μεγεθών Rn_o , λ' (σχέση 5.5), όπως προέκυψαν
από τη διαδικασία αναδρομής**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----------------------------|--------|---------------------------------|---|----------|---------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΕΦΡΑΣ σε Bqkg ⁻¹ | 988.50 | | | | | | | | |
| ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΕΦΡΑΣ σε % | 6.00 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | BKG σε Counts /1000s | CPMBKG | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ BKG σε % | ΤΕΦΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ σε Counts /1000s | CPMΤΕΦΡΑ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΕΦΡΑΣ σε % | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ E σε CPM /(Bqkg ⁻¹) | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ E σε % | ΠΙΘΑΝΟ ΑΠΟΛΥΤΟ ΣΦΑΛΜΑ του E |
| 16/01/2008 | 4219 | 253.14 | 3.08 | 35500 | 2130.00 | 1.27 | 1.90 | 6.86 | 0.13 |
| 21/12/2007 | 4319 | 259.14 | 3.04 | 36500 | 2190.00 | 1.26 | 1.95 | 6.84 | 0.13 |
| 28/12/2007 | 4351 | 261.06 | 3.03 | 36600 | 2196.00 | 1.26 | 1.96 | 6.84 | 0.13 |
| 07/02/2008 | 4257 | 255.42 | 3.07 | 35500 | 2130.00 | 1.28 | 1.90 | 6.86 | 0.13 |
| 20/01/2008 | 4514 | 270.84 | 2.98 | 35600 | 2136.00 | 1.29 | 1.89 | 6.82 | 0.13 |
| 31/01/2008 | 4431 | 265.86 | 3.00 | 34900 | 2094.00 | 1.30 | 1.85 | 6.84 | 0.13 |
| 11/02/2008 | 4439 | 266.34 | 3.00 | 34400 | 2064.00 | 1.32 | 1.82 | 6.84 | 0.12 |
| 24/01/2008 | 4440 | 266.40 | 3.00 | 35700 | 2142.00 | 1.28 | 1.90 | 6.83 | 0.13 |
| 28/01/2008 | 4465 | 267.90 | 2.99 | 35500 | 2130.00 | 1.29 | 1.88 | 6.83 | 0.13 |

Πίνακας 5.2

Λογιστικό φύλλο τύπου "Δ1" υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή για ενεργό άνθρακα

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----------------------------|--------|---------------------------------|---|----------|---------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΕΦΡΑΣ σε Bqkg ⁻¹ | 988.50 | | | | | | | | |
| ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΕΦΡΑΣ σε % | 6.00 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | BKG σε Counts /1000s | CPMBKG | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ BKG σε % | ΤΕΦΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ σε Counts /1000s | CPMΤΕΦΡΑ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΕΦΡΑΣ σε % | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ E σε CPM /(Bqkg ⁻¹) | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ E σε % | ΠΙΘΑΝΟ ΑΠΟΛΥΤΟ ΣΦΑΛΜΑ του E |
| 16/01/2008 | 4499 | 269.94 | 2.98 | 35500 | 2130.00 | 1.29 | 1.88 | 6.82 | 0.13 |
| 21/12/2007 | 4471 | 268.26 | 2.99 | 36500 | 2190.00 | 1.26 | 1.94 | 6.82 | 0.13 |
| 28/12/2007 | 4449 | 266.94 | 3.00 | 36600 | 2196.00 | 1.26 | 1.95 | 6.82 | 0.13 |
| 07/02/2008 | 4623 | 277.38 | 2.94 | 35500 | 2130.00 | 1.30 | 1.87 | 6.81 | 0.13 |
| 20/01/2008 | 4601 | 276.06 | 2.95 | 35600 | 2136.00 | 1.29 | 1.88 | 6.81 | 0.13 |
| 31/01/2008 | 4631 | 277.86 | 2.94 | 34900 | 2094.00 | 1.31 | 1.84 | 6.81 | 0.13 |
| 11/02/2008 | 4494 | 269.64 | 2.98 | 34400 | 2064.00 | 1.32 | 1.82 | 6.83 | 0.12 |
| 24/01/2008 | 4559 | 273.54 | 2.96 | 35700 | 2142.00 | 1.29 | 1.89 | 6.81 | 0.13 |
| 28/01/2008 | 4580 | 274.80 | 2.96 | 35500 | 2130.00 | 1.29 | 1.88 | 6.81 | 0.13 |

Πίνακας 5.3

Λογιστικό φύλλο τύπου "Δ1" υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή για συνθετικό ζεόλιθο

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----------------------------|---------|---------------------------------|---|-----------|---------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΕΦΡΑΣ σε Bqkg ⁻¹ | 988.50 | | | | | | | | |
| ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΕΦΡΑΣ σε % | 6.00 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | BKG σε Counts /1000s | CRM BKG | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ BKG σε % | ΤΕΦΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ σε Counts /1000s | CRM ΤΕΦΡΑ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΕΦΡΑΣ σε % | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ E σε CRM /(Bqkg ⁻¹) | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ E σε % | ΠΙΘΑΝΟ ΑΠΟΛΥΤΟ ΣΦΑΛΜΑ του E |
| 16/01/2008 | 3830 | 229.80 | 3.23 | 35500 | 2130.00 | 1.25 | 1.92 | 6.93 | 0.13 |
| 21/12/2007 | 4024 | 241.44 | 3.15 | 36500 | 2190.00 | 1.24 | 1.97 | 6.89 | 0.14 |
| 28/12/2007 | 3905 | 234.30 | 3.20 | 36600 | 2196.00 | 1.23 | 1.98 | 6.91 | 0.14 |
| 07/02/2008 | 3918 | 235.08 | 3.20 | 35500 | 2130.00 | 1.26 | 1.92 | 6.91 | 0.13 |
| 20/01/2008 | 3966 | 237.96 | 3.18 | 35600 | 2136.00 | 1.26 | 1.92 | 6.90 | 0.13 |
| 31/01/2008 | 3936 | 236.16 | 3.19 | 34900 | 2094.00 | 1.27 | 1.88 | 6.91 | 0.13 |
| 11/02/2008 | 4012 | 240.72 | 3.16 | 34400 | 2064.00 | 1.29 | 1.84 | 6.90 | 0.13 |
| 24/01/2008 | 4049 | 242.94 | 3.14 | 35700 | 2142.00 | 1.26 | 1.92 | 6.89 | 0.13 |
| 28/01/2008 | 4068 | 244.08 | 3.14 | 35500 | 2130.00 | 1.27 | 1.91 | 6.89 | 0.13 |

Πίνακας 5.4

Λογιστικό φύλλο τύπου "Δ1" υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή για silica gel

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----------------------------|--------|---------------------------------|---|----------|---------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΕΦΡΑΣ σε Bqkg ⁻¹ | 988.50 | | | | | | | | |
| ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΕΦΡΑΣ σε % | 6.00 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | BKG σε Counts /1000s | CPMBKG | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ BKG σε % | ΤΕΦΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ σε Counts /1000s | CPMΤΕΦΡΑ | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΕΦΡΑΣ σε % | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ E σε CPM /(Bqkg ⁻¹) | ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ E σε % | ΠΙΘΑΝΟ ΑΠΟΛΥΤΟ ΣΦΑΛΜΑ του E |
| 16/01/2008 | 3992 | 239.52 | 3.17 | 35500 | 2130.00 | 1.26 | 1.91 | 6.90 | 0.13 |
| 21/12/2007 | 3997 | 239.82 | 3.16 | 36500 | 2190.00 | 1.24 | 1.97 | 6.89 | 0.14 |
| 28/12/2007 | 3872 | 232.32 | 3.21 | 36600 | 2196.00 | 1.23 | 1.99 | 6.92 | 0.14 |
| 07/02/2008 | 4022 | 241.32 | 3.15 | 35500 | 2130.00 | 1.26 | 1.91 | 6.89 | 0.13 |
| 20/01/2008 | 4043 | 242.58 | 3.15 | 35600 | 2136.00 | 1.26 | 1.92 | 6.89 | 0.13 |
| 31/01/2008 | 4039 | 242.34 | 3.15 | 34900 | 2094.00 | 1.28 | 1.87 | 6.89 | 0.13 |
| 11/02/2008 | 3972 | 238.32 | 3.17 | 34400 | 2064.00 | 1.29 | 1.85 | 6.91 | 0.13 |
| 24/01/2008 | 3970 | 238.20 | 3.17 | 35700 | 2142.00 | 1.26 | 1.93 | 6.90 | 0.13 |
| 28/01/2008 | 4039 | 242.34 | 3.15 | 35500 | 2130.00 | 1.26 | 1.91 | 6.89 | 0.13 |

Πίνακας 5.5

Λογιστικό φύλλο τύπου "Δ1" υπολογισμού βαθμού απόδοσης ανιχνευτή για silica gel blue

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|---|--------------------|---------------|---------------------|---|--|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| Απόβαρο δοχείου 1 (10) | 78.4 | | | | | | | | |
| Απόβαρο δοχείου 2 (27) | 78.5 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Ε σε CRM /($Bqkg^{-1}$) | CRM _{ΒΚG} | ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm^{-3}) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) |
| 16/01/2008 | 1.90 | 253.14 | 24 | 20 | 11.57 | 14.12 | 135 | 2434.94 | 14.12 |
| 21/12/2007 | 1.95 | 259.14 | 24 | 50 | 10.55 | 13.35 | 160 | 2881.33 | 13.35 |
| 28/12/2007 | 1.96 | 261.06 | 24 | 80 | 10.00 | 12.20 | 140 | 2524.33 | 12.20 |
| 07/02/2008 | 1.90 | 255.42 | 48 | 20 | 11.26 | 15.13 | 227 | 4070.73 | 15.13 |
| 20/01/2008 | 1.89 | 270.84 | 48 | 50 | 12.08 | 14.28 | 140 | 2524.33 | 14.28 |
| 31/01/2008 | 1.85 | 265.86 | 48 | 80 | 11.40 | 13.56 | 136 | 2452.82 | 13.56 |
| 11/02/2008 | 1.82 | 266.34 | 72 | 20 | 11.23 | 13.49 | 146 | 2631.52 | 13.49 |
| 24/01/2008 | 1.90 | 266.40 | 72 | 50 | 10.33 | 12.52 | 139 | 2506.46 | 12.52 |
| 28/01/2008 | 1.88 | 267.90 | 72 | 80 | 11.51 | 14.06 | 135 | 2434.94 | 14.06 |

Πίνακας 5.6α

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης ενεργού άνθρακα (στήλες 1-10)

| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|---|---|-------------------------------|--|-------------------|------|--|--|--|
| ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _s (min) | ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³) | EXPOSURE MIDPOINT (min) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ t (min) | DF | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (kg) |
| 12.45 | 1353 | 2005.15 | 677 | 17.43 | 975 | 0.88 | 233.80 | 243.30 | 0.1554 |
| 13.30 | 1435 | 2371.21 | 718 | 17.24 | 952 | 0.89 | 233.70 | 243.30 | 0.1553 |
| 12.21 | 1441 | 2091.20 | 721 | 15.31 | 911 | 0.89 | 240.90 | 250.80 | 0.1625 |
| 13.17 | 2764 | 2982.83 | 1382 | 16.21 | 1566 | 0.82 | 234.00 | 243.50 | 0.1556 |
| 13.15 | 2807 | 1869.17 | 1404 | 16.12 | 1581 | 0.82 | 234.10 | 243.60 | 0.1557 |
| 12.55 | 2819 | 1846.45 | 1410 | 16.06 | 1601 | 0.82 | 246.00 | 256.90 | 0.1676 |
| 13.24 | 4295 | 1724.22 | 2148 | 16.35 | 2339 | 0.74 | 233.60 | 243.10 | 0.1552 |
| 12.15 | 4283 | 1668.26 | 2142 | 16.02 | 2369 | 0.74 | 233.90 | 243.50 | 0.1555 |
| 13.03 | 4257 | 1669.66 | 2129 | 16.45 | 2351 | 0.74 | 251.20 | 263.10 | 0.1728 |

Πίνακας 5.6β

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης ενεργού άνθρακα (στήλες 11-20)

| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|---|--|--------------------------|--|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|------------|--|
| | | | | | | | | | |
| ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (kg) | ΔΟΧΕΙΟ 1 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 1 | ΔΟΧΕΙΟ 2 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 2 | AF1 (L/min) | AF2 (L/min) | (AF1+AF2)/2 (L/min) | MDA | LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (Bqm³) |
| 0.1648 | 47300 | 2838.00 | 48800 | 2928.00 | 3.65 | 3.56 | 3.61 | 11.69 | 9.07 |
| 0.1648 | 57200 | 3432.00 | 58700 | 3522.00 | 3.47 | 3.36 | 3.41 | 11.83 | 8.84 |
| 0.1723 | 36200 | 2172.00 | 36600 | 2196.00 | 2.24 | 2.14 | 2.19 | 11.87 | 12.99 |
| 0.1650 | 76100 | 4566.00 | 76300 | 4578.00 | 2.16 | 2.04 | 2.10 | 11.74 | 8.13 |
| 0.1651 | 52400 | 3144.00 | 52800 | 3168.00 | 2.27 | 2.16 | 2.22 | 12.09 | 7.87 |
| 0.1784 | 32800 | 1968.00 | 32000 | 1920.00 | 1.29 | 1.18 | 1.23 | 11.98 | 13.00 |
| 0.1646 | 52000 | 3120.00 | 51500 | 3090.00 | 1.83 | 1.71 | 1.77 | 11.99 | 7.25 |
| 0.1650 | 46600 | 2796.00 | 46100 | 2766.00 | 1.62 | 1.51 | 1.56 | 11.99 | 7.91 |
| 0.1846 | 28400 | 1704.00 | 27500 | 1650.00 | 0.83 | 0.75 | 0.79 | 12.03 | 13.98 |

Πίνακας 5.6γ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης ενεργού άνθρακα (στήλες 21-30)

| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|--|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|---|
| LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (Bqm ⁻³) | (LLD1+LLD2)/2 (Bqm ⁻³) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (kg) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kg) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΜΑΖΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (kg) |
| 8.76 | 8.92 | 232.30 | 241.80 | 0.1539 | 0.1633 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
| 8.60 | 8.72 | 232.60 | 242.20 | 0.1542 | 0.1637 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 |
| 12.83 | 12.91 | 232.80 | 242.30 | 0.1544 | 0.1638 | 0.0081 | 0.0085 | 0.0083 |
| 8.10 | 8.12 | 232.30 | 241.80 | 0.1539 | 0.1633 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 |
| 7.80 | 7.83 | 232.50 | 242.00 | 0.1541 | 0.1635 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 |
| 13.37 | 13.19 | 232.40 | 242.00 | 0.1540 | 0.1635 | 0.0136 | 0.0149 | 0.0143 |
| 7.32 | 7.28 | 232.20 | 241.70 | 0.1538 | 0.1632 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 |
| 8.00 | 7.96 | 232.50 | 242.00 | 0.1541 | 0.1635 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0015 |
| 14.53 | 14.26 | 232.00 | 241.60 | 0.1536 | 0.1631 | 0.0192 | 0.0215 | 0.0204 |

Πίνακας 5.6δ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης ενεργού άνθρακα (στήλες 31-39)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|---|--------------------|---------------|---------------------|---|--|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| Απόβαρο δοχείου 1 (29) | 77.7 | | | | | | | | |
| Απόβαρο δοχείου 2 (30) | 78 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Ε σε CRM /($Bqkg^{-1}$) | CRM _{ΒΚG} | ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm^{-3}) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) |
| 16/01/2008 | 1.88 | 269.94 | 24 | 20 | 11.57 | 14.12 | 135 | 2434.94 | 14.12 |
| 21/12/2007 | 1.94 | 268.26 | 24 | 50 | 10.55 | 13.35 | 160 | 2881.33 | 13.35 |
| 28/12/2007 | 1.95 | 266.94 | 24 | 80 | 10.00 | 12.20 | 140 | 2524.33 | 12.20 |
| 07/02/2008 | 1.87 | 277.38 | 48 | 20 | 11.26 | 15.13 | 227 | 4070.73 | 15.13 |
| 20/01/2008 | 1.88 | 276.06 | 48 | 50 | 12.08 | 14.28 | 140 | 2524.33 | 14.28 |
| 31/01/2008 | 1.84 | 277.86 | 48 | 80 | 11.40 | 13.56 | 136 | 2452.82 | 13.56 |
| 11/02/2008 | 1.82 | 269.64 | 72 | 20 | 11.23 | 13.49 | 146 | 2631.52 | 13.49 |
| 24/01/2008 | 1.89 | 273.54 | 72 | 50 | 10.33 | 12.52 | 139 | 2506.46 | 12.52 |
| 28/01/2008 | 1.88 | 274.80 | 72 | 80 | 11.51 | 14.06 | 135 | 2434.94 | 14.06 |

Πίνακας 5.7α

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης συνθετικού ζεόλιθου (στήλες 1-10)

| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|---|---|-------------------------------|--|-------------------|------|--|--|--|
| ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _s (min) | ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³) | EXPOSURE MIDPOINT (min) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ t (min) | DF | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (kg) |
| 12.45 | 1353 | 2005.15 | 677 | 16.34 | 906 | 0.89 | 345.00 | 348.10 | 0.2673 |
| 13.30 | 1435 | 2371.21 | 718 | 19.01 | 1049 | 0.88 | 347.40 | 337.60 | 0.2697 |
| 12.21 | 1441 | 2091.20 | 721 | 16.08 | 948 | 0.89 | 352.60 | 347.00 | 0.2749 |
| 13.17 | 2764 | 2982.83 | 1382 | 16.56 | 1601 | 0.82 | 347.00 | 349.80 | 0.2693 |
| 13.15 | 2807 | 1869.17 | 1404 | 16.48 | 1617 | 0.82 | 350.10 | 352.20 | 0.2724 |
| 12.55 | 2819 | 1846.45 | 1410 | 16.41 | 1636 | 0.81 | 360.50 | 366.40 | 0.2828 |
| 13.24 | 4295 | 1724.22 | 2148 | 17.11 | 2375 | 0.74 | 348.00 | 350.50 | 0.2703 |
| 12.15 | 4283 | 1668.26 | 2142 | 15.26 | 2333 | 0.75 | 350.30 | 355.00 | 0.2726 |
| 13.03 | 4257 | 1669.66 | 2129 | 16.09 | 2315 | 0.75 | 361.50 | 366.30 | 0.2838 |

Πίνακας 5.7β

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης συνθετικού ζεόλιθου (στήλες 11-20)

| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------|-------|---|
| ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (kg) | ΔΟΧΕΙΟ 1 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 1 | ΔΟΧΕΙΟ 2 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 2 | AF1 (L/min) | AF2 (L/min) | (AF1+AF2)/2 (L/min) | MDA | LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (Bqm ³) |
| 0.2701 | 16100 | 966.00 | 15900 | 954.00 | 0.57 | 0.56 | 0.56 | 12.07 | 34.78 |
| 0.2596 | 18000 | 1080.00 | 16900 | 1014.00 | 0.52 | 0.50 | 0.51 | 12.04 | 35.16 |
| 0.2690 | 16000 | 960.00 | 15000 | 900.00 | 0.48 | 0.45 | 0.47 | 12.01 | 36.23 |
| 0.2718 | 21100 | 1266.00 | 20300 | 1218.00 | 0.29 | 0.27 | 0.28 | 12.24 | 36.93 |
| 0.2742 | 14900 | 894.00 | 15300 | 918.00 | 0.28 | 0.29 | 0.29 | 12.21 | 36.93 |
| 0.2884 | 12800 | 768.00 | 11000 | 660.00 | 0.22 | 0.17 | 0.20 | 12.25 | 46.14 |
| 0.2725 | 13100 | 786.00 | 13100 | 786.00 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 12.07 | 40.29 |
| 0.2770 | 12500 | 750.00 | 12000 | 720.00 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 12.15 | 42.55 |
| 0.2883 | 12200 | 732.00 | 11100 | 666.00 | 0.16 | 0.14 | 0.15 | 12.18 | 44.49 |

Πίνακας 5.7γ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης συνθετικού ζεόλιθου (στήλες 21-30)

| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|--|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|---|
| LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (Bqm ⁻³) | (LLD1+LLD2)/2 (Bqm ⁻³) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (kg) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kg) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΜΑΖΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (kg) |
| 35.39 | 35.08 | 340.10 | 343.00 | 0.2624 | 0.2650 | 0.0049 | 0.0051 | 0.0050 |
| 38.27 | 36.71 | 342.60 | 331.70 | 0.2649 | 0.2537 | 0.0048 | 0.0059 | 0.0053 |
| 39.66 | 37.94 | 343.00 | 336.00 | 0.2653 | 0.2580 | 0.0096 | 0.0110 | 0.0103 |
| 38.81 | 37.87 | 338.80 | 341.80 | 0.2611 | 0.2638 | 0.0082 | 0.0080 | 0.0081 |
| 35.55 | 36.24 | 342.30 | 344.10 | 0.2646 | 0.2661 | 0.0078 | 0.0081 | 0.0080 |
| 59.19 | 52.67 | 345.30 | 351.20 | 0.2676 | 0.2732 | 0.0152 | 0.0152 | 0.0152 |
| 40.29 | 40.29 | 341.00 | 343.50 | 0.2633 | 0.2655 | 0.0070 | 0.0070 | 0.0070 |
| 45.41 | 43.98 | 341.20 | 345.90 | 0.2635 | 0.2679 | 0.0091 | 0.0091 | 0.0091 |
| 51.99 | 48.24 | 340.50 | 344.70 | 0.2628 | 0.2667 | 0.0210 | 0.0216 | 0.0213 |

Πίνακας 5.7δ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης συνθετικού ζεόλιθου (στήλες 31-39)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|---|--------------------|---------------|---------------------|---|--|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| Απόβαρο δοχείου 1 (24) | 77.9 | | | | | | | | |
| Απόβαρο δοχείου 2 (25) | 78.6 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Ε σε CRM /($Bqkg^{-1}$) | CRM _{BKG} | ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm^{-3}) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) |
| 16/01/2008 | 1.92 | 229.80 | 24 | 20 | 11.57 | 14.12 | 135 | 2434.94 | 14.12 |
| 21/12/2007 | 1.97 | 241.44 | 24 | 50 | 10.55 | 13.35 | 160 | 2881.33 | 13.35 |
| 28/12/2007 | 1.98 | 234.30 | 24 | 80 | 10.00 | 12.20 | 140 | 2524.33 | 12.20 |
| 07/02/2008 | 1.92 | 235.08 | 48 | 20 | 11.26 | 15.13 | 227 | 4070.73 | 15.13 |
| 20/01/2008 | 1.92 | 237.96 | 48 | 50 | 12.08 | 14.28 | 140 | 2524.33 | 14.28 |
| 31/01/2008 | 1.88 | 236.16 | 48 | 80 | 11.40 | 13.56 | 136 | 2452.82 | 13.56 |
| 11/02/2008 | 1.84 | 240.72 | 72 | 20 | 11.23 | 13.49 | 146 | 2631.52 | 13.49 |
| 24/01/2008 | 1.92 | 242.94 | 72 | 50 | 10.33 | 12.52 | 139 | 2506.46 | 12.52 |
| 28/01/2008 | 1.91 | 244.08 | 72 | 80 | 11.51 | 14.06 | 135 | 2434.94 | 14.06 |

Πίνακας 5.8α

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel (στήλες 1-10)

| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|---|---|-------------------------------|--|-------------------|------|--|--|--|
| ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _s (min) | ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³) | EXPOSURE MIDPOINT (min) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ t (min) | DF | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (kg) |
| 12.45 | 1353 | 2005.15 | 677 | 17.09 | 941 | 0.89 | 253.70 | 255.50 | 0.1758 |
| 13.30 | 1435 | 2371.21 | 718 | 18.25 | 1013 | 0.88 | 253.90 | 256.60 | 0.1760 |
| 12.21 | 1441 | 2091.20 | 721 | 16.44 | 984 | 0.88 | 259.20 | 260.80 | 0.1813 |
| 13.17 | 2764 | 2982.83 | 1382 | 18.08 | 1673 | 0.81 | 254.60 | 256.50 | 0.1767 |
| 13.15 | 2807 | 1869.17 | 1404 | 17.24 | 1653 | 0.81 | 255.00 | 256.80 | 0.1771 |
| 12.55 | 2819 | 1846.45 | 1410 | 17.16 | 1671 | 0.81 | 264.10 | 265.40 | 0.1862 |
| 13.24 | 4295 | 1724.22 | 2148 | 18.22 | 2446 | 0.73 | 253.90 | 255.80 | 0.1760 |
| 12.15 | 4283 | 1668.26 | 2142 | 16.37 | 2404 | 0.74 | 255.30 | 257.10 | 0.1774 |
| 13.03 | 4257 | 1669.66 | 2129 | 17.56 | 2422 | 0.74 | 268.00 | 270.30 | 0.1901 |

Πίνακας 5.8β

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel (στήλες 11-20)

| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|---|--|--------------------------|--|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|------------|--|
| ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (kg) | ΔΟΧΕΙΟ 1 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 1 | ΔΟΧΕΙΟ 2 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 2 | AF1 (L/min) | AF2 (L/min) | (AF1+AF2)/2 (L/min) | MDA | LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (Bqm³) |
| 0.1769 | 4165 | 249.90 | 4074 | 244.44 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 11.14 | 1111.27 |
| 0.1780 | 4138 | 248.28 | 4207 | 252.42 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.42 | 3958.32 |
| 0.1822 | 4223 | 253.38 | 4205 | 252.30 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 11.25 | 1232.81 |
| 0.1779 | 4289 | 257.34 | 4288 | 257.28 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.27 | 1509.75 |
| 0.1782 | 4185 | 251.10 | 4272 | 256.32 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.34 | 1612.50 |
| 0.1868 | 4288 | 257.28 | 4212 | 252.72 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.29 | 987.28 |
| 0.1772 | 4248 | 254.88 | 4101 | 246.06 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 11.40 | 1388.29 |
| 0.1785 | 4375 | 262.50 | 4116 | 246.96 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 11.45 | 976.87 |
| 0.1917 | 4154 | 249.24 | 4099 | 245.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 11.48 | 3714.81 |

Πίνακας 5.8γ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel (στήλες 21-30)

| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|--|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|---|
| LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (Bqm ⁻³) | (LLD1+LLD2)/2 (Bqm ⁻³) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (kg) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kg) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΜΑΖΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (kg) |
| 1525.72 | 1318.49 | 251.50 | 253.40 | 0.1736 | 0.1748 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0021 |
| 2465.84 | 3212.08 | 252.20 | 255.40 | 0.1743 | 0.1768 | 0.0017 | 0.0012 | 0.0015 |
| 1306.78 | 1269.80 | 252.00 | 254.40 | 0.1741 | 0.1758 | 0.0072 | 0.0064 | 0.0068 |
| 1513.83 | 1511.79 | 251.20 | 253.20 | 0.1733 | 0.1746 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0034 |
| 1154.04 | 1383.27 | 251.70 | 253.50 | 0.1738 | 0.1749 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 |
| 1259.13 | 1123.20 | 251.50 | 253.20 | 0.1736 | 0.1746 | 0.0126 | 0.0122 | 0.0124 |
| 3681.30 | 2534.79 | 251.10 | 253.00 | 0.1732 | 0.1744 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0028 |
| 4753.12 | 2865.00 | 251.50 | 253.30 | 0.1736 | 0.1747 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0038 |
| 10305.59 | 7010.20 | 251.30 | 253.10 | 0.1734 | 0.1745 | 0.0167 | 0.0172 | 0.0170 |

Πίνακας 5.8δ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel (στήλες 31-39)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|---|--------------------|---------------|---------------------|---|--|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| Απόβαρο δοχείου 1 (11) | 77.3 | | | | | | | | |
| Απόβαρο δοχείου 2 (13) | 77.3 | | | | | | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Ε σε CRM /($Bqkg^{-1}$) | CRM _{BKG} | ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm^{-3}) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) |
| 16/01/2008 | 1.91 | 239.52 | 24 | 20 | 11.57 | 14.12 | 135 | 2434.94 | 14.12 |
| 21/12/2007 | 1.97 | 239.82 | 24 | 50 | 10.55 | 13.35 | 160 | 2881.33 | 13.35 |
| 28/12/2007 | 1.99 | 232.32 | 24 | 80 | 10.00 | 12.20 | 140 | 2524.33 | 12.20 |
| 07/02/2008 | 1.91 | 241.32 | 48 | 20 | 11.26 | 15.13 | 227 | 4070.73 | 15.13 |
| 20/01/2008 | 1.92 | 242.58 | 48 | 50 | 12.08 | 14.28 | 140 | 2524.33 | 14.28 |
| 31/01/2008 | 1.87 | 242.34 | 48 | 80 | 11.40 | 13.56 | 136 | 2452.82 | 13.56 |
| 11/02/2008 | 1.85 | 238.32 | 72 | 20 | 11.23 | 13.49 | 146 | 2631.52 | 13.49 |
| 24/01/2008 | 1.93 | 238.20 | 72 | 50 | 10.33 | 12.52 | 139 | 2506.46 | 12.52 |
| 28/01/2008 | 1.91 | 242.34 | 72 | 80 | 11.51 | 14.06 | 135 | 2434.94 | 14.06 |

Πίνακας 5.9α

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel blue (στήλες 1-10)

| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|---|---|-------------------------------|--|-------------------|------|--|--|--|
| ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm) | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _s (min) | ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³) | EXPOSURE MIDPOINT (min) | ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm) | ΧΡΟΝΟΣ t (min) | DF | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 μετά έκθεση (kg) |
| 12.45 | 1353 | 2005.15 | 677 | 18.19 | 1011 | 0.88 | 361.10 | 348.20 | 0.2838 |
| 13.30 | 1435 | 2371.21 | 718 | 17.04 | 932 | 0.89 | 361.90 | 348.30 | 0.2846 |
| 12.21 | 1441 | 2091.20 | 721 | 17.20 | 1020 | 0.88 | 371.90 | 358.80 | 0.2946 |
| 13.17 | 2764 | 2982.83 | 1382 | 17.31 | 1636 | 0.81 | 362.50 | 349.70 | 0.2852 |
| 13.15 | 2807 | 1869.17 | 1404 | 17.59 | 1688 | 0.81 | 364.40 | 351.40 | 0.2871 |
| 12.55 | 2819 | 1846.45 | 1410 | 17.51 | 1706 | 0.81 | 379.40 | 366.50 | 0.3021 |
| 13.24 | 4295 | 1724.22 | 2148 | 17.47 | 2411 | 0.74 | 361.10 | 348.50 | 0.2838 |
| 12.15 | 4283 | 1668.26 | 2142 | 17.13 | 2440 | 0.74 | 365.00 | 352.00 | 0.2877 |
| 13.03 | 4257 | 1669.66 | 2129 | 17.21 | 2387 | 0.74 | 394.00 | 378.10 | 0.3167 |

Πίνακας 5.9β

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel blue (στήλες 11-20)

| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------|-------|--|
| ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 μετά έκθεση (kg) | ΔΟΧΕΙΟ 1 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 1 | ΔΟΧΕΙΟ 2 σε Counts /1000s | CPM ΔΟΧΕΙΟΥ 2 | AF1 (L/min) | AF2 (L/min) | (AF1+AF2)/2 (L/min) | MDA | LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (Bqm ⁻³) |
| 0.2709 | 5508 | 330.48 | 5181 | 310.86 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 11.37 | 250.70 |
| 0.2710 | 5730 | 343.80 | 5413 | 324.78 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 11.38 | 259.51 |
| 0.2815 | 5106 | 306.36 | 4974 | 298.44 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 11.20 | 316.35 |
| 0.2724 | 5445 | 326.70 | 5267 | 316.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 11.42 | 398.81 |
| 0.2741 | 5061 | 303.66 | 5065 | 303.90 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 11.45 | 350.24 |
| 0.2892 | 4837 | 290.22 | 4625 | 277.50 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 11.44 | 441.15 |
| 0.2712 | 4789 | 287.34 | 4858 | 291.48 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 11.34 | 399.02 |
| 0.2747 | 4731 | 283.86 | 4654 | 279.24 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 11.34 | 414.37 |
| 0.3008 | 4616 | 276.96 | 4395 | 263.70 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.44 | 551.70 |

Πίνακας 5.9γ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel blue (στήλες 21-30)

| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|--|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|---|
| LLD ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (Bqm ⁻³) | (LLD1+LLD2)/2 (Bqm ⁻³) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (g) | ΜΙΚΤΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (g) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 πριν έκθεση (kg) | ΚΑΘΑΡΗ ΜΑΖΑ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 πριν έκθεση (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 1 (kg) | ΜΑΖΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΧΕΙΟΥ 2 (kg) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΜΑΖΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΘΕΙΣΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (kg) |
| 319.65 | 285.18 | 357.10 | 344.30 | 0.2798 | 0.2670 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0039 |
| 317.61 | 288.56 | 357.40 | 344.40 | 0.2801 | 0.2671 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0042 |
| 354.24 | 335.29 | 357.90 | 344.80 | 0.2806 | 0.2675 | 0.0140 | 0.0140 | 0.0140 |
| 455.82 | 427.32 | 356.10 | 343.50 | 0.2788 | 0.2662 | 0.0064 | 0.0062 | 0.0063 |
| 348.87 | 349.56 | 357.40 | 344.30 | 0.2801 | 0.2670 | 0.0070 | 0.0071 | 0.0070 |
| 600.75 | 520.95 | 356.50 | 343.90 | 0.2792 | 0.2666 | 0.0229 | 0.0226 | 0.0228 |
| 367.94 | 383.48 | 356.10 | 343.40 | 0.2788 | 0.2661 | 0.0050 | 0.0051 | 0.0051 |
| 461.02 | 437.70 | 357.10 | 344.10 | 0.2798 | 0.2668 | 0.0079 | 0.0079 | 0.0079 |
| 894.19 | 722.95 | 356.80 | 344.00 | 0.2795 | 0.2667 | 0.0372 | 0.0341 | 0.0357 |

Πίνακας 5.9δ

Λογιστικό φύλλο τύπου "Λ2" για τα πειράματα έκθεσης silica gel blue (στήλες 31-39)

| Προσροφητικό Υλικό | RH(%) | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> ² |
|---------------------|--------|---------------|----------------|-------------|-----------------------|
| Ενεργός άνθρακας | 70-100 | 1.4e-7 ± 3e-8 | -1.3e-3 ± 2e-4 | 3.7 ± 0.2 | 0.993 |
| | 30-70 | 1.5e-7 ± 3e-8 | -1.5e-3 ± 2e-4 | 5.3 ± 0.2 | 0.995 |
| | 10-30 | 2.8e-7 ± 3e-8 | -2.2e-3 ± 2e-4 | 6.1 ± 0.2 | 0.995 |
| Συνθετικός ζεόλιθος | 70-100 | 5.8e-8 ± 1e-8 | -4.4e-4 ± 6e-5 | 0.98 ± 0.08 | 0.983 |
| | 30-70 | 2.9e-8 ± 4e-9 | -2.9e-4 ± 2e-5 | 0.86 ± 0.03 | 0.997 |
| | 10-30 | 4.8e-8 ± 4e-9 | -4.0e-4 ± 2e-5 | 1.02 ± 0.03 | 0.998 |
| Silica gel blue | 70-100 | 4.0e-9 ± 2e-9 | -3.5e-5 ± 1e-5 | 0.08 ± 0.01 | 0.962 |
| | 30-70 | - | -3.0e-5 ± 1e-5 | 0.09 ± 0.02 | 0.942 |
| | 10-30 | 1.1e-8 ± 2e-9 | -7.6e-5 ± 9e-6 | 0.14 ± 0.01 | 0.981 |

Πίνακας 5.10

Παράγοντες και συντελεστές συσχέτισης εξίσωσης αναδρομής 5.7

| Προσροφητικό Υλικό | RH(%) | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>r</i> |
|------------------------|--------|--------------------|------------------|----------|
| Ενεργός άνθρακας | 70-100 | $-3.6e-4 \pm 2e-5$ | 1.28 ± 0.07 | -0.991 |
| | 30-70 | $-2.7e-4 \pm 2e-5$ | 1.60 ± 0.05 | -0.993 |
| | 10-30 | $-2.4e-4 \pm 4e-5$ | 1.5 ± 0.1 | -0.943 |
| Συνθετικός ζεόλιθος | 70-100 | NA | NA | NA |
| | 30-70 | $-3.9e-4 \pm 1e-5$ | -0.11 ± 0.04 | -0.998 |
| | 10-30 | $-3.7e-4 \pm 4e-5$ | - | -0.981 |
| Silica gel blue | 70-100 | $-5.3e-4 \pm 3e-5$ | -2.3 ± 0.1 | -0.992 |
| | 30-70 | $-4.8e-4 \pm 9e-5$ | -2.2 ± 0.3 | -0.935 |
| | 10-30 | NA | NA | NA |

Πίνακας 5.11

Παράγοντες και συντελεστές συσχέτισεως εξίσωσης αναδρομής 5.8 (όπου "NA", η εξίσωση αναδρομής δεν είναι δυνατόν να υπολογίζεται με ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης)

| Προσροφητικό Υλικό | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>H</i> | <i>r</i> ² |
|------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-----------------------|
| Ενεργός άνθρακας | 1.5 ± 0.1 | 0.026 ± 0.003 | -5e-4 ± 8e-5 | -3e-4 ± 3e-5 | 5e-8 ± 1e-8 | -2e-6 ± 4e-7 | 0.99 |
| Συνθετικός ζεόλιθος | 0.52 ± 0.16 | - | -9e-4 ± 1e-4 | -4e-5 ± 9e-6 | 9e-8 ± 2e-8 | - | 0.97 |
| Silica gel blue | -1.5 ± 0.4 | - | 1e-3 ± 3e-4 | -6e-5 ± 2e-5 | 1e-7 ± 6e-8 | - | 0.89 |

Πίνακας 5.12

Παράγοντες και συντελεστές συσχέτισεως εξίσωσης αναδρομής 5.12

| Ονομαστική διάρκεια έκθεσης (h) | RH (%) | LLD ενεργού άνθρακα (Bqm⁻³) | LLD συνθετικού ζεόλιθου (Bqm⁻³) | LLD silica gel blue (Bqm⁻³) |
|--|---------------|---|---|---|
| 24 | 20 | 9 | 35 | 285 |
| 24 | 50 | 9 | 37 | 289 |
| 24 | 80 | 13 | 38 | 335 |
| 48 | 20 | 8 | 38 | 427 |
| 48 | 50 | 8 | 36 | 350 |
| 48 | 80 | 13 | 53 | 521 |
| 72 | 20 | 7 | 40 | 383 |
| 72 | 50 | 8 | 44 | 438 |
| 72 | 80 | 14 | 48 | 723 |

Πίνακας 5.13
Σύνοψη κατώτερων ορίων ανίχνευσης (LLD)

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα πειραματικά αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ οδήγησαν σε συμπεράσματα, τα περισσότερα από τα οποία παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.4.3. Συνοψίζοντας μπορεί κανείς να σημειώσει:

(α) Το silica gel χρωματογραφίας που δοκιμάστηκε είναι ακατάλληλο για να χρησιμοποιείται ως προσροφητικό υλικό που ανιχνεύει Ραδόνιο.

(β) Αντίθετα το silica gel blue αφυγραντής που επίσης δοκιμάστηκε είναι κατάλληλο για ανιχνευτής Ραδονίου, αρκεί να υπάρχει βεβαιότητα ότι η συγκέντρωση του Ραδονίου στο περιβάλλον μέτρησης είναι αρκετά υψηλή (στη τάξη μεγέθους του 1 kBq m^{-3}). Με αυτό κατά νου μπορεί κανείς να χρησιμοποιεί το silica gel blue ως ανιχνευτή τύπου "ΠΕΡΝΑΕΙ – ΔΕΝ ΠΕΡΝΑΕΙ". Αν μεν η ανιχνευόμενη συγκέντρωση δεν υπερβαίνει το κατώτερο όριο ανίχνευσης με αυτό το υλικό (από 290 έως 720 Bq m^{-3} , ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης), τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλου τύπου ανιχνευτής για ακριβέστερες μετρήσεις. Αν πάλι το υπερβαίνει και το silica gel είναι κατάλληλο.

(γ) Σχετικά με το συνθετικό ζεόλιθο, αποδείχθηκε ότι είναι κατάλληλο προσροφητικό υλικό, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί παραγωγικά ως παθητική ολοκληρωτική μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου, μετά από βραχυχρόνια έκθεση μίας έως τριών ημερών. Ο τρόπος που λειτουργεί ο συνθετικός ζεόλιθος ως ανιχνευτής φαίνεται να είναι εντελώς ανάλογος με τον τρόπο που λειτουργεί ο ενεργός άνθρακας. Απλώς το κατώτερο όριο ανίχνευσης με το συνθετικό ζεόλιθο υπολογίζεται ως κατά τι μεγαλύτερο (στην περιοχή 35 έως 53 Bq m^{-3} έναντι 7 έως 14 Bq m^{-3} για τον ενεργό άνθρακα).

(δ) Για τον ενεργό άνθρακα που δοκιμάστηκε επαληθεύθηκαν οι από καιρό διαπιστωμένη τυπική συμπεριφορά του ως κατάλληλο προσροφητικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής Ραδονίου.

(ε) Οπως συμβαίνει και με τον ενεργό άνθρακα, έτσι οι ίδιες ποσότητες silica gel blue και συνθετικού ζεόλιθου μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές φορές ως ανιχνευτές Ραδονίου, μετά από τυποποιημένη διαδικασία αναγέννησης που περιγράφηκε. Παρόλαυτά, ακόμα και αν τα προσροφητικά αυτά υλικά,

αλλάζουν από μέτρηση σε μέτρηση, το κόστος τους είναι μάλλον χαμηλό και ως εκ τούτου ανεκτό.

(στ) Επαληθεύθηκε ότι, όπως είχε διαπιστωθεί και από τον Μαρινάκη (2007), το φορητό σύστημα ανιχνευτή NaI και λυόμενης θωράκισης, είναι κατάλληλο για την εξυπηρέτηση όλων των αναγκαίων μετρήσεων. Το κόστος αυτού του μετρητικού συστήματος είναι εξαιρετικά χαμηλό σε σχέση με τα εργαστηριακά Ιωδιούχα Νάτρια, με τα ακριβά πυρηνικά ηλεκτρονικά και τις μεγάλες σταθερές εργαστηριακές θωρακίσεις.

Από την αξιολόγηση των πιο πάνω εργαστηριακών συμπερασμάτων, προκύπτουν οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική ερευνητική εργασία:

(i) Υπό τις πειραματικές συνθήκες που εξετάστηκαν ο μέγιστος χρόνος έκθεσης των προσροφητικών υλικών που δοκιμάστηκαν στα μεταλλικά δοχεία που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίζεται να είναι 3 ημέρες. Η εκτίμηση αυτή συμφωνεί με τα πρακτικά συμπεράσματα του Cohen (1986) αλλά και με τα θεωρητικά του Urosevic (1999), σύμφωνα με τα οποία για προσροφητικά υλικά με πάχος στρώματος 5 cm, όπως στην εδώ περίπτωση, μετά από περίπου 72 h έκθεσης ήδη έχει συμπληρωθεί πάνω από το 85% της μέγιστης δυνατής προσρόφησης του Ραδονίου. Προτείνεται να διερευνηθεί αν υπάρχει ανώτερο όριο σταθερής συγκέντρωσης Ραδονίου, πέρα από το οποίο για έκθεση τριών ημερών, δεν μπορούν οι ανιχνευτές που κατασκευάστηκαν έτσι να καταγράψουν λόγω κορεσμού. Σύμφωνα με τον Nikezic (1998), αυτή η ανώτερη συγκέντρωση C_o (BqL^{-1}) πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση που ισχύει για άπειρο χρόνο προσρόφησης, ή ισοδύναμα για χρόνο προσρόφησης 3 – 4 ημερών, διάστημα κατά το οποίο η προσρόφηση έχει πλέον ολοκληρωθεί:

$$A_{max} = k\rho C_o S l$$

όπου:

A_{max} η μέγιστη ραδιενέργεια Ραδονίου που μπορεί να προσροφηθεί (Bq)

k ο συντελεστής προσρόφησης Ραδονίου (Lg^{-1})

ρ η πυκνότητα του προσροφητικού υλικού (gcm^{-3})

S η εκτιθέμενη επιφάνεια του προσροφητικού υλικού (cm^2)

l το πάχος του στρώματος του προσροφητικού υλικού (cm)

Η διερεύνηση αυτή προϋποθέτει ότι θα γίνουν και πειράματα για τον προσδιορισμό του k των προσροφητικών υλικών με τρόπο που περιγράφεται π.χ. από τους Scarpitta (1992), Zikovsky (1998) και Karangelos (2003).

(ii) Για να αυξηθεί ο χρόνος έκθεσης σε διάστημα μίας εβδομάδας ή μεγαλύτερο, και έτσι να επιτευχθεί καλύτερη ολοκλήρωση, δηλ. ακριβέστερος προσδιορισμός του μέσου όρου συγκέντρωσης Ραδονίου, όταν χρησιμοποιούνται προσροφητικά υλικά όπως ο συνθετικός ζεόλιθος και το silica gel blue, πρέπει να περιορισθεί ο ρυθμός πρόσληψη της υγρασίας. Ο Cohen (1986), αλλά και ο George (1990) στην περίπτωση του ενεργού άνθρακα, πρότειναν με επιτυχία να μην χρησιμοποιούνται ανοιχτά μεταλλικά δοχεία με προσροφητικό υλικό. Το άνοιγμα συστήνεται να καλύπτεται με φίλτρο διάχυσης (π.χ. χαρτί) το οποίο γενικά εμποδίζει τους υδρατμούς να εισέρχονται στο προσροφητικό υλικό, χωρίς αντίστοιχα να εμποδίζει το Ραδόνιο. Προτείνεται και από αυτή τη θέση να διεξαχθούν αντίστοιχα πειράματα. Μάλιστα, αντί για φίλτρο διάχυσης, μπορεί η επιφάνεια του συνθετικού ζεόλιθου ή του silica gel blue, να καλυφθεί με λεπτό στρώμα silica gel χρωματογραφίας, το οποίο αποδεδειγμένα από τα πειράματα [βλ. και Πίνακα 5.8 (α,β,γ,δ)], προσροφά υδρατμούς χωρίς να προσροφά Ραδόνιο.

(iii) Για το συνθετικό ζεόλιθο, διατυπώνεται η ερώτηση αν "ζεόλιθος με διαφορετικό μέγεθος πόρου (μικρότερο ή μεγαλύτερο) είναι δυνατόν να έχει καλύτερη επιλεκτικότητα προσρόφησης Ραδονίου σε σχέση με την επιλεκτικότητα προσρόφησης υδρατμών". Το ερώτημα αυτό προτείνεται να διερευνηθεί πειραματικά. Μικροφωτογράφιση των πόρων των διαφόρων συνθετικών ζεόλιθων που θα χρησιμοποιηθούν σε τέτοια πειράματα, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, πριν και μετά την έκθεση σε περιβάλλοντα με Ραδόνιο και σχετική υγρασία, πιθανόν να βοηθήσει να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα για την διερευνούμενη επιλεκτικότητα.

(iv) Ειδικά πάλι για το συνθετικό ζεόλιθο, προτείνεται να διερευνηθεί κατά πόσο αυτός μπορεί να μετρηθεί μετά την προσρόφηση Ραδονίου, με τη χρήση υγρού σπινθηριστή. Η αρχή της μεθόδου συνοψίζεται στο ότι ζεόλιθος που έχει εκτεθεί διαβρέχεται πλήρως με υγρό σπινθηριστή. Το μίγμα τοποθετείται σε διαφανές φιαλίδιο. Το παραγόμενο φως που προκύπτει από την

αλληλεπίδραση της α και β ακτινοβολίας των θυγατρικών του προσροφηθέντος Ραδονίου με το υλικό του υγρού σπινθηριστή, μπορεί να μετράται με κλασική διάταξη φωτοπολλαπλασιαστή [βλ. π.χ. και την εργασία του Iimoto (2005), για αντίστοιχη μέθοδο με ενεργό άνθρακα].

(v) Σε ότι αφορά, τον ακριβή προσδιορισμό της επίδρασης πάνω στον συντελεστή βαθμονόμησης, μάζας υδρατμών που έχει προσροφηθεί στα δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά, προτείνεται η προετοιμασία μεταλλικών δοχείων με προσροφητικά υλικά, τα οποία να έχουν προσλάβει με ουδέτερο (δηλ. χωρίς Ραδόνιο) τρόπο υδρατμούς σε σημαντική ποσότητα. Η έκθεση αυτών των μεταλλικών δοχείων σε συγκεντρώσεις Ραδονίου θα δώσει ακριβείς πληροφορίες για την επίδραση προσροφηθέντων υδρατμών στο συντελεστή βαθμονόμησης.

(vi) Οι πειραματικές μέθοδοι με τον τρόπο που εφαρμόστηκαν εξασφαλίζουν την ακριβή διαπίστωση της συμπεριφοράς των προσροφητικών υλικών που δοκιμάστηκαν κάτω από συνθήκες σταθερότητας και συνέχειας σε ό,τι αφορά τη σχετική υγρασία και τη συγκέντρωση Ραδονίου στο περιβάλλον έκθεσης. Πειράματα πρέπει ίσως να γίνουν και για τη διαπίστωση της επίδρασης ή όχι μεγάλων μεταβολών στα δύο αυτά μεγέθη. Για το σκοπό αυτό πρέπει κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων να καταγράφεται συνεχώς, τόσο η συγκέντρωση του Ραδονίου, όσο και η σχετική υγρασία.

(vii) Είναι γνωστό ότι γενικά ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται ως φίλτρο για τη δέσμευση I-131 σε αντλίες δειγματοληψίας αέρα¹, όταν υπάρχει υποψία ότι, έχει γίνει πυρηνικό ατύχημα, το οποίο συνοδεύεται από έκλυση προϊόντων σχάσης. Η παρούσα ΔΕ έδειξε ότι ο συνθετικός ζεόλιθος θα μπορούσε να είναι εναλλακτικό τέτοιο υλικό σε αυτά τα φίλτρα.

(viii) Σε περίπτωση που ο συνθετικός ζεόλιθος ή το silica gel blue, εφαρμοσθούν ως ανιχνευτές Ραδονίου, σε παραγωγικές μετρήσεις, χρειάζεται να γίνουν εκτεταμένα και λεπτομερή πειράματα πιστοποίησης της απόδοσής τους. Μία διαδικασία τέτοιας προτεινόμενης πιστοποίησης περιγράφει, για παράδειγμα, το άρθρο του Underhill (2003).

¹ βλ. και <http://www.fjspecialty.com/>

Τέλος:

(ix) Σε ό,τι αφορά τις μεθόδους αναγέννησης των προσροφητικών υλικών, απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση της θέρμανσης σε φούρνο και της θέρμανσης με μικροκύματα. Επίσης θα πρέπει να δοκιμασθεί η απόδοση αυτής της διαδικασίας, όταν χρησιμοποιείται ρεύμα θερμού αέρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγγελόπουλος Μ.Γ., "Πυρηνική Τεχνολογία", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1983
2. Αναγνωστάκης Μ.Ι., Προσωπική επικοινωνία, 2007
3. Bauser H., Range W., "The Electret Ionization Chamber: A dosimeter for Long-Term Personnel Monitoring", Health Physics, 34: 97-102, 1978
4. Burt B.P., Kurbatov J.D., "Mixed Adsorption of Radon and Argon on Silica Gel", Journal of the American Chemical Society, 70(6): 2278-2282, 1948.
5. Canoba A.C, Lopez F.O., Oliveira A.A., "Radon Determination by Activated Charcoal Adsorption and Liquid Scintillation Measurement", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 24(1): 237-241, 1999.
6. Cohen B.L., Cohen E.S., "Theory and Practice of Radon Monitoring by Adsorption in Charcoal", Health Physics, 45(2): 501-508, 1983
7. Cohen B.L, Nason R., "A Diffusion Barrier Charcoal Adsorption Collector for Measuring Radon Concentration in Indoor Air", Health Physics, 50(4): 457-463, 1986
8. Collela C., Gualtieri A.F., "Cronstedt's Zeolite", Microporus and Mesoporous Materials, 105: 213-221, 2007
9. Dean J.C.J., Burke M., "An Intercomparison of ^{222}Rn Measurement Systems in European Laboratories", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 339: 264-270, 1994
10. Dean J.C.J., Woods S.A., Bowles N.E., "A second Intercomparison of ^{222}Rn Measurement Systems in European Laboratories", Applied Radiation and Isotopes, 47(9-10): 835-840, 1996
11. Denman A.R., Groves-Kirkby C.J., Phillips P.S., Crockett R.G.M., Woolridge A., Gillmore G.K., "The Practical Use of Electrets in a Public Health Radon Remediation Campaign", Journal of Environmental Radioactivity, 84: 375-391, 2005
12. George A.C., "Passive, Integrated Measurement of Indoor Radon Using Activated Carbon", Health Physics, 46(4): 867-872, 1984
13. George A.C, Weber T, "An Improved Passive Activated Collector for Measuring Environmental ^{222}Rn in Indoor Air", Health Physics, 58(5): 583-589-872, 1990

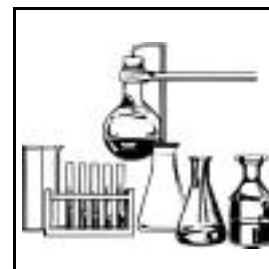
14. Gervino G., Bonetti R., Cigolini C., Marino C., Prati P., Pruiti L., "Environmental Radon Monitoring: Comparing Drawbacks and Performances of Charcoal Canisters, Alpha-Track and E-PERM detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 518: 452-455, 2004.
15. Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (EURATOM), "Commission Recommendation of 21 February 1990 on the Protection of the Public against Indoor Radon Exposure to Radon", (90/143/EURATOM), Brussels, 1990
16. Gray D.J., Windman S.T., "EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters", Report EPA 520/5-87-005, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Eastern Environmental Radiation Facility (EERF), 1890 Federal Drive, Montgomery Alabama 36109, March 1987.
17. ICRP, International Commission on Radiological Protection, "Reference Man: Anatomical Physiological and Metabolic Characteristics", ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford, UK, 1975
18. Iimoto T., Tokonami S., Morishita Y., Kosako T., "Application of Activated Charcoal Radon Collectors in High Humidity Environments", Journal of Environmental Radioactivity, 78: 69-76, 2005.
19. Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E., "Experimental Investigation of Radon Adsorption Behavior of Silica Gel", presented in 3rd Dresden Symposium on Radiation Protection, Dresden University of Technology, 3 – 7 March, 2003.
20. Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E., "Radiological Characteristics and Investigation of the Radioactive Equilibrium in the Ashes produced in Lignite-fired Power Plants", Journal of Environmental Radioactivity, 77:233-246, 2004
21. Κωνστανταροπούλου Α., "Διερεύνηση της Επίδρασης της Παροχής του Ψυκτικού στο Φαινόμενο της Επανάψυξης", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 1991
22. Kotrappa P. Gupta P.C., Dua S.K., Soman S.D., "X and Gamma Dose Measurement using Electrets", Radiation Protection Dosimetry, 2: 175-181, 1982

23. Kotrappa P., Dempsey J.C., Hickey J.R., Stieff L.R., "An Electret Passive Environmental ^{222}Rn Monitor based on Ionization Measurement", Health Physics, 54: 47-56, 1988.
24. Kotrappa P., Dempsey J.C., Ramsey R.W., Stieff L.R., "A Practical E-PERMTM (Electret Passive Environmental Radon Monitor) System for Indoor ^{222}Rn Measurement", Health Physics, 58(4): 461-467, 1990
25. Λεωνίδου Δ.Ι., "Μέθοδοι και Όργανα Ανιχνεύσεως Πυρηνικών Ακτινοβολιών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1990
26. Livingston R., Reyerson L.H., "The Adsorption of Radon by Silica Gel", Journal of Physical Chemistry, 37(4): 534-535, 1933
27. Μαρινάκης Γ., "Βαθμονόμηση Δοχείων με Ενεργό Άνθρακα για τη Μέτρηση Συγκεντρώσεων Ραδονίου σε Εσωτερικούς Χώρους", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2007
28. Marvin H.B., "How to measure Radiation with Electrets", Nucleonics, 13: 82-83, 1955
29. Merck-a Data Sheet Cat. No. 1.07733 (από <http://www.merck-chemicals.com>)
30. Merck-b Product Data Sheet Cat. No. 1.01925.1000 (από <http://www.merck-chemicals.com>)
31. Nikezic D., Urosevic V., "A Theoretical Study of Radon Measurement with Activated Charcoal", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 406: 486-498, 1998.
32. Ohgushi T., Wakana A., "Simple Suppressing Method of Thermal Runaway in Microwave Heating of Zeolite and its Application", PhysChemComm, 3: 1-3, The Royal Society of Chemistry, 2001
33. Ohgushi T., Nagae M., "Microwave Heating of Hydrated Zeolites and Application of Zeolites as a Domestic Reusable Dessiccant through its Technique", Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 23, 195-198, 2005.
34. Ortega X, Novell M., Vargas A., Baixeras C., Font L., "Study of the Variation of ^{222}Rn Indoor Concentration with several Passive Detectors and an Active Detection System", Environment International, 22(S1): S601-S606, 1996.
35. Press W.H, Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery, B.P., "Numerical Recipes in FORTRAN, The Art of Scientific Computing", Second Edition, Cambridge University Press, 1992.

36. Pretsch G., Kostel U., "Energy Response of the Electret Ionization Chamber for X and Gamma Rays", *Radiation Protection Dosimetry*, 5: 179-181, 1983.
37. Σιμόπουλος Σ.Ε., "Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1989
38. Scarpitta S.C., "Optimum ²²²Rn-Adsorbing Activated Charcoals", *Health Physics*, 62(6): 576-580, 1992
39. Sun K., Majdan M., Field D.W., Field R.W., "Field Comparison of Commercially Available Short-Term Radon Detectors", *Health Physics*, 91(3): 221-226, 2006
40. Underhill D.W., "Diffusive Sampling of Radon" (Review Article), *Health Physics*, 84(3): 287-295, 2003
41. Urosevic V., Nikezic D., Vulovic S., Kojic M., "Optimization of Radon Measurements with Active Charcoal", *Health Physics*, 76(6): 687-691, 1999
42. Vasilief I., Gadiou R., Franke K., "The QtiPlot Handbook", 2008, <http://prdownload.berlios.de/qtiplot/qtiplot-manual-en.pdf>
43. Virta R.L., "Zeolites", 2006 Minerals Yearbook, 83.1 – 83.3, US Geological Survey, US Department of the Interior, 2006
(<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/zeolimyb06.pdf>)
44. Zikovsky L., "Determination of Adsorption Coefficients of ²²²Rn on Activated Charcoal By Adsorption-Desorption in a Simple Laboratory Apparatus", (Note), *Health Physics*, 75(3): 313 – 314, 1998.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "Α"

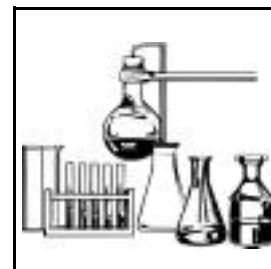
Molecular sieve, 0.3 nm



| | |
|---------------------------------------|---|
| Chemical / physical properties | Crystalline, synthetic zeolite Chemical composition: Potassium-aluminium silicate Pore size 0.3 nm (3 Å) See the Merck reagent catalogue oder ChemDAT [®] for further details |
| Parameter specified | Identity, loss on ignition, water absorption capacity |
| Application | Drying agent for liquids and gases Separation and purification of molecules based on their molecular size |
| Concentrations | Company-internal procedures |
| Determination of content | Water absorption capacity: 15 resp. 20 % Determination by weighing |
| Advantages | Insoluble in water and organic solvents Alternatives: powder, beads, beads with indicator |
| Literature references | See general literature Merck brochure: „Drying Agents“, W.283123 |
| Safety information | All general laboratory safety regulations should be observed See Merck Safety Data Sheet |
| Storage | Store dry and tightly sealed |
| Regeneration | Molecular sieves (without indicator) can be regenerated between 250 °C - 350°C; with indicator, only to 150°C |
| Disposal | Treat as special chemical waste |
| Order information | 1.05706.0250 Molecular sieve, 0.3 nm, powder, 250 g in a plastic bottle 1.05704.0250 Molecular sieve, 0.3 nm, bead ~ 2 mm 250 g in a plastic bottle 1.16234.0250 Molecular sieve, 0.3 nm, bead ~ 2 mm, with moisture indicator 250 g in a plastic bottle 1.05741.0050 Molecular sieve 0.3 nm, pellets ~ 1.6 mm (1/16") 250 g in a plastic bottle 1.05740.0250 Molecular sieve 0.3 nm, pellets ~ 3.2 mm (1/8") 250 g in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck reagent catalog, ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.

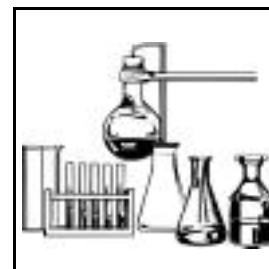
Molecular sieve, 0.4 nm



| | |
|---------------------------------------|--|
| Chemical / physical properties | Crystalline, synthetic zeolite Chemical composition: Sodium-aluminium silicate Pore size 0.4 nm (4 Å) See the Merck reagent catalogue oder ChemDAT [®] for further details |
| Parameter specified | Identity, loss on ignition, water absorption capacity |
| Application | Drying agent for liquids and gases Separation and purification of molecules based on their molecular size |
| Concentrations | Company-internal procedures |
| Determination of content | Water absorption capacity: 15 resp. 20 % Determination by weighing |
| Advantages | Insoluble in water and organic solvents Alternatives: powder, beads, beads with indicator |
| Literature references | See general literature Merck brochure: „Drying Agents“, W.283123 |
| Safety information | All general laboratory safety regulations should be observed See Merck Safety Data Sheet |
| Storage | Store dry and tightly sealed |
| Regeneration | Molecular sieves (without indicator) can be regenerated between 250 °C - 350°C; with indicator, only to 150°C |
| Disposal | Treat as special chemical waste |
| Order information | <p>1.05696.0250 Molecular sieve, 0.4 nm, powder, 250 g in a plastic bottle</p> <p>1.05708.0250 Molecular sieve, 0.4 nm, bead ~ 2 mm, 250 g in a plastic bottle</p> <p>1.16239.0250 Molecular sieve, 0.4 nm, bead ~ 2 mm, with moisture indicator, 250 g in a plastic bottle</p> <p>1.05743.0050 Molecular sieve 0.4 nm, pellets ~ 1.6 mm (1/16") 250 g in a plastic bottle</p> <p>1.05742.0250 Molecular sieve 0.4 nm, pellets ~ 3.2 mm (1/8") 250 g in a plastic bottle</p> |

For further package sizes please refer to the Merck reagent catalog, ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.

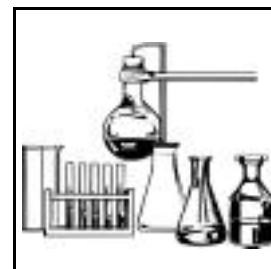
Molecular sieve, 0.5 nm



| | |
|---------------------------------------|---|
| Chemical / physical properties | Crystalline, synthetic zeolite Chemical composition: Calcium-aluminium silicate Pore size 0.5 nm (5 Å) See the Merck reagent catalogue oder ChemDAT [®] for further details |
| Parameter specified | Identity, loss on ignition, water absorption capacity |
| Application | Drying agent for liquids and gases Separation and purification of molecules based on their molecular size |
| Concentrations | Company-internal procedures |
| Determination of content | Water absorption capacity: 15 resp. 20 % Determination by weighing |
| Advantages | Insoluble in water and organic solvents Alternatives: powder, beads, beads with indicator |
| Literature references | See general literature Merck brochure: „Drying Agents“, W.283123 |
| Safety information | All general laboratory safety regulations should be observed See Merck Safety Data Sheet |
| Storage | Store dry and tightly sealed |
| Regeneration | Molecular sieves (without indicator) can be regenerated between 250 °C - 350°C; with indicator, only to 150°C |
| Disposal | Treat as special chemical waste |
| Order information | 1.05710.0250 Molecular sieve, 0.3 nm, powder, 250 g in a plastic bottle 1.05705.0250 Molecular sieve, 0.3 nm, bead ~ 2 mm 250 g in a plastic bottle 1.05752.0050 Molecular sieve 0.3 nm, pellets ~ 1.6 mm (1/16") 250 g in a plastic bottle 1.05753.0250 Molecular sieve 0.3 nm, pellets ~ 3.2 mm (1/8") 250 g in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck reagent catalog, ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.

Molecular sieve, 1,0 nm



| | |
|---------------------------------------|---|
| Chemical / physical properties | Crystalline, synthetic zeolite Chemical composition: Sodium-aluminium silicate Pore size 1,0 nm (10 Å) See the Merck reagent catalogue oder ChemDAT [®] for further details |
| Parameter specified | Identity, loss on ignition, water absorption capacity |
| Application | Drying agent for liquids and gases Separation and purification of molecules based on their molecular size |
| Concentrations | Company-internal procedures |
| Determination of content | Water absorption capacity: 15 resp. 20 % Determination by weighing |
| Advantages | Insoluble in water and organic solvents, hence no contamination Alternatives: powder, beads, beads with indicator |
| Literature references | See general literature Merck brochure: „Drying Agents“, W.283123 |
| Safety information | All general laboratory safety regulations should be observed See Merck Safety Data Sheet |
| Storage | Store dry and tightly sealed |
| Regeneration | Molecular sieves (without indicator) can be regenerated between 250 °C - 350°C; with indicator, only to 150°C |
| Disposal | Treat as special chemical waste |
| Order information | 1.05698.0250 Molecular sieve, 1,0 nm, powder, 250 g in a plastic bottle 1.05703.0250 Molecular sieve, 1,0 nm, bead ~ 2 mm 250 g in a plastic bottle 1.05792.0050 Molecular sieve 1,0 nm, pellets ~ 1.6 mm (1/16") 250 g in a plastic bottle 1.05791.0250 Molecular sieve 1,0 nm, pellets ~ 3.2 mm (1/8") 250 g in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck reagent catalog, ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.

Silica Gel 60

For Column Liquid Chromatography

Operating Tips for Cat. No. 1.07733, 1.07734, 1.09385 & 1.15111

| | |
|------------------------|---|
| Packing Procedure | Since the silicas have a wide particle size range, packing techniques must ensure that segregation does not occur. This is best accomplished by packing dry, then equilibrating the silica with the solvent to be used for the separation. If wet packing is done, it must be done with a thick mud-like slurry. |
| Sample Preparation | The sample is ideally dissolved in the mobile phase. |
| Column Treatment | The column has to be equilibrated with 10 to 20 column void volumes until a stable base line is recorded (1/2 of the column tubing volume; e.g: 250 x 100 = 20 l). For regeneration back-flush the column with a very strong solvent |
| Scale Up | Because of the large solvent volumes needed to equilibrate any column, initial method development should be done on a 4 x 250 mm column. Both the mobile phase selection and the determination of mass loading is done on this small column. Then scale-up to any size of larger column can be done by simple ratioing. |
| Benefit | <i>Identical raw materials for all sorbents guarantees identical chromatographic selectivity. This results in significant saving of scale-up time and effort.</i> |
| Temperature Dependence | If exposed to open air, silica adsorbs water. This physically adsorbed water can be removed by heating up to 150 °C. Table 1 shows the temperature dependence of amorphous silica. |
| Relative Humidity | The relative humidity of a sorbent is directly related to the quality of the chromatographic result. In the state of equilibrium the relative humidity corresponds with the activity. Table 2 shows the correlation between relative humidity and activity acc. to Brockmann. |

Table 1: Temperature dependence of amorphous silica

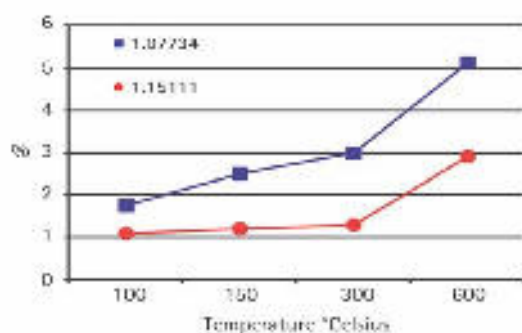


Table 2: Correlation between relative humidity and activity acc. to Brockmann

| Relative Humidity | % Water added | Activ. Grade (Brockmann) | Rf of Dye |
|-------------------|---------------|--------------------------|-----------|
| 0 % | 0 | I | 0.15 |
| | 3 | | 0.22 |
| | 6 | | 0.33 |
| | 9 | | 0.44 |
| 20 % | 12 | II | 0.55 |
| 40 % | 15 | III | 0.65 |

Particle size ranges of
 200 - 500 µm
 63 - 200 µm
 40 - 63 µm
 15 - 40 µm

Silica gel 60 from Merck with the below particle size ranges are manufactured to the requirements of column liquid chromatographers for use in production scale or flash chromatography columns with gravity flow or low pressure chromatography methods.

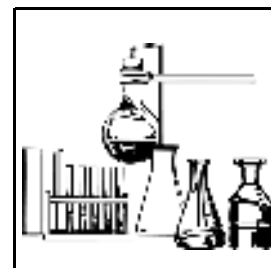
Silica gel 60 is produced by a highly reproducible, fully automated, and continuously on-line monitored manufacturing process in several hundred tons per year. Its high specific surface area and its high pore volume make this silica gel excellently suitable for production chromatography.

Properties of Silica Gel 60

| Cat.-No. | 1.07733 | 1.07734 | 1.09385 | 1.15111 |
|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CAS-No. | 7631-86-9 | 7631-86-9 | 7631-86-9 | 7631-86-9 |
| Packing Sizes | 0.5 kg / 1 kg / 5 kg / 25 kg | 1 kg / 2.5 kg / 25 kg | 1 kg / 2.5 kg / 25 kg | 1 kg / 2.5 kg / 25 kg |
| Particle Size | 200 - 500 µm | 63 - 200 µm | 40 - 63 µm | 15 - 40 µm |
| Particle Size Distribution D ₁₀ | 200 - 240 µm | 70 - 95 µm | 25 - 35 µm | appr. 8 µm |
| D ₅₀ | 250 - 320 µm | 105 - 130 µm | 45 - 55 µm | appr. 22 µm |
| D ₉₀ | 320 - 450 µm | 160 - 180 µm | 60 - 75 µm | appr. 33 µm |
| Specific Surface Area | 480 - 540 m ² /g | 480 - 540 m ² /g | 480 - 540 m ² /g | 480 - 540 m ² /g |
| Specific Pore Volume | 0.74 - 0.84 ml/g | 0.74 - 0.84 ml/g | 0.74 - 0.84 ml/g | 0.74 - 0.84 ml/g |
| Mean Pore Size | 6 nm | 6 nm | 6 nm | 6 nm |
| pH (10 % aq. Solution) | 6.5 - 7.5 | 6.5 - 7.5 | 6.5 - 7.5 | 6.5 - 7.5 |
| Loss on Drying (3H/150 °C) | ≤ 7 % | ≤ 7 % | ≤ 7 % | ≤ 7 % |
| Bulk Density | approx. 0.45 g/ml | approx. 0.45 g/ml | approx. 0.45 g/ml | approx. 0.45 g/ml |
| Pressure | 0.5 bar | 1 bar | 2 bar | 5 bar |
| Plate Number (Anisole) | 300 n/m | 1,000 n/m | 3,000 n/m | 5,000 n/m |
| Iron Content | < 200 ppm | < 200 ppm | < 200 ppm | < 200 ppm |

For further information please contact:
 Merck KGaA • LSP Processing • D-64271 Darmstadt • Germany
 Phone: +49 (0) 6151 72-6179 • Fax: +49 (0) 6151 72-916179
 www.merck.de • processing@merck.de

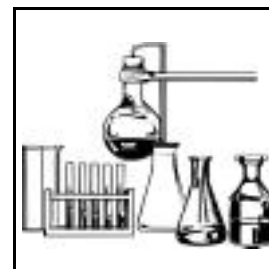
Silica gel with indicator (blue gel)



| | |
|---------------------------------------|--|
| Chemical / physical properties | SiO ₂ , Indicator cobalt(II)chloride (ca. 2 %) Colour changes caused by uptake of crystal water Granulate See Merck catalogue or ChemDAT [®] for further details. |
| Parameter specified | Loss of ignition, water absorption capacity, bulk density |
| Application | As drying agent (statically and dynamically) for: <ul style="list-style-type: none"> - Solvents, air and gases - Chemical products - Electronic and optical instruments, - Machines and tools |
| Concentrations | The amount used is dependent of the volume to be dried and of the water content and amount of product to be dried. |
| Determination of content | Water absorption capacity: min. 27 %. Determination by weighing. |
| Advantages | Indicator indicates degree of saturation visually. Color change blue to pink at ca. 7 - 10 % water absorption. Insoluble in organic solvents. Material of defined particle size. |
| Literature references | Please refer to the literature and Merck instructions DIN 55474. Merck brochure: "Drying Agents", W.283123 |
| Safety information | R 49: May cause cancer by inhalation. S 53-45: Avoid exposure - obtain special instructions before use. Decant in a safety cell or fume hood. Please adhere to all laboratory and general safety regulations. Please refer to the Merck Safety Data Sheet. |
| Storage | Store dry and tightly sealed. |
| For drying: | Silica gel can be regenerated at 120 - 150 °C. |
| Disposal | Dispose of as special waste. |
| Order information | 1.01908.1000 Silica gel with indicator (blue gel) Granulate ~ 0,2 - 1 mm 1 kg in a plastic bottle 1.01925.1000 Silica gel with indicator (blue gel) Granulate ~ 1 - 3 mm 1 kg in a plastic bottle 1.01981.1000 Silica gel indicator (blue gle) Granulate ~ 2 - 5 mm 1 kg in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck catalogue,
ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.

Silica gel with indicator (brown gel)



| | |
|---------------------------------------|---|
| Chemical / physical properties | SiO ₂ , Indicator: Iron compound Colour changes caused by uptake of crystal water Granulate See Merck catalogue or ChemDAT for further details. |
| Parameter specified | Loss of ignition, water absorption capacity, bulk density |
| Application | As drying agent (statically and dynamically) for: <ul style="list-style-type: none">- Air and gases- Chemical and pharmaceutical products- Electronic and optical instruments,- Machines and tools |
| Concentrations | The amount used is dependent of the volume to be dried and of the water content and amount of product to be dried. |
| Determination of content | Water absorption capacity: min. 20 %. Determination by weighing. |
| Advantages | Indicator indicates degree of saturation visually. Color change brown to yellowish at ca. 7 - 10 % water absorption. Material of defined particle size. |
| Literature references | Please refer to the literature and Merck instructions DIN 55474. Merck brochure: "Drying Agents", W.283123 |
| Safety information | Please adhere to all laboratory and general safety regulations. Please refer to the Merck Safety Data Sheet. |
| Storage | Store dry and tightly sealed |
| For drying: | Silica gel can be regenerated at 120 - 150 °C. |
| Disposal | Dispose of as special waste. |
| Order information | 1.01972.1000 Silica gel with indicator (brown gel) Granulate ~ 1 - 4 mm 1 kg in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck catalogue,
ChemDAT® the MerckChemical Database on CD-ROM or ChemDAT®-online.

Silica gel with indicator (orange gel)



| | |
|---------------------------------------|--|
| Chemical / physical properties | SiO ₂ , Indicator: phenolphthalein Colour changes by changing value of pH Granulate See the Merck reagent catalogue oder ChemDAT [®] for further details |
| Parameter specified | Loss of ignition, water absorption capacity, bulk density |
| Application | As drying agent (statically and dynamically) for: <ul style="list-style-type: none"> - Air and gases (not suitable for acid and basic gases) - Chemical and pharmaceutical products (not suitable for drying solvents as the indicator is soluble.) - Electronic and optical instruments, - Machines and tools |
| Concentrations | The amount used is dependent of the volume to be dried and of the water content and amount of product to be dried. |
| Determination of content | Water absorption capacity: min. 25 %. Determination by weighing. |
| Advantages | Indicator indicates degree of saturation visually. Color change orange to colorless at ca. 7 - 10 % water absorption. Material of defined particle size. |
| Literature references | Please refer to the literature and Merck instructions DIN 55474. Merck brochure: "Drying Agents", W.283123 |
| Safety information | Please adhere to all laboratory and general safety regulations. Please refer to the Merck Safety Data Sheet. |
| Storage | Store dry and tightly sealed. |
| For drying: | Silica gel can be regenerated at 110 - 140 °C. |
| Disposal | Dispose of as special waste. |
| Order information | 1.01967.1000 Silica gel with indicator (orange gel) Granulate ~ 0,2 - 1 mm 1 kg in a plastic bottle 1.01969.1000 Silica gel with indicator (orange gel) Granulate ~ 1 - 3 mm 1 kg in a plastic bottle |

For further package sizes please refer to the Merck reagent catalog, ChemDAT[®] the Merck Chemical Database on CD-ROM or ChemDAT[®]-online.


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "Β"

Equilibrium Relative Humidity Saturated Salt Solutions

| Relative Humidity (%RH) | | | |
|-------------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Temperature °C | Lithium Chloride | Potassium Acetate | Magnesium Chloride |
| 0 | 11.23 ± 0.54 | | 33.66 ± 0.33 |
| 5 | 11.26 ± 0.47 | | 33.60 ± 0.28 |
| 10 | 11.29 ± 0.41 | 23.28 ± 0.53 | 33.47 ± 0.24 |
| 15 | 11.30 ± 0.35 | 23.40 ± 0.32 | 33.30 ± 0.21 |
| 20 | 11.31 ± 0.31 | 23.11 ± 0.25 | 33.07 ± 0.18 |
| 25 | 11.30 ± 0.27 | 22.51 ± 0.32 | 32.78 ± 0.16 |
| 30 | 11.28 ± 0.24 | 21.61 ± 0.53 | 32.44 ± 0.14 |
| 35 | 11.25 ± 0.22 | | 32.05 ± 0.13 |
| 40 | 11.21 ± 0.21 | | 31.60 ± 0.13 |
| 45 | 11.16 ± 0.21 | | 31.10 ± 0.13 |
| 50 | 11.10 ± 0.22 | | 30.54 ± 0.13 |
| 55 | 11.03 ± 0.23 | | 29.93 ± 0.16 |
| 60 | 10.95 ± 0.26 | | 29.26 ± 0.18 |
| 65 | 10.86 ± 0.29 | | 28.54 ± 0.21 |
| 70 | 10.75 ± 0.33 | | 27.77 ± 0.25 |
| 75 | 10.64 ± 0.38 | | 26.94 ± 0.29 |
| 80 | 10.51 ± 0.44 | | 26.05 ± 0.34 |
| 85 | 10.38 ± 0.51 | | 25.11 ± 0.39 |
| 90 | 10.23 ± 0.59 | | 24.12 ± 0.46 |
| 95 | 10.07 ± 0.67 | | 23.07 ± 0.52 |
| 100 | 9.90 ± 0.77 | | 21.97 ± 0.60 |

Saturated Salt Solutions

A very convenient method to calibrate humidity sensors is the use of saturated salt solutions. At any temperature, the concentration of a saturated solution is fixed and does not have to be determined. By providing excess solute, the solution will remain saturated even in the presence of modest moisture sources and sinks. When the solute is a solid in the pure phase, it is easy to determine that there is saturation.

The saturated salt solution, made up as a slushy mixture with distilled water and chemically pure salt, is enclosed in a sealed metal or a glass chamber. Wexler and Hasegawa measured the humidity in the atmosphere above eight saturated salt solutions for ambient temperatures 0 to 50°C using a dew-point hygrometer. Later, Greenspan compiled, from the literature, data on 28 saturated salt solutions to cover the entire range of relative humidity. Using a data base from 21 separate investigations comprising 1106 individual measurements, fits were made by the method of least squares to regular polynomial equations to obtain the "best" value of relative humidity in air as a function of temperature. These values are summarized in the table shown. 

| Relative Humidity (%RH) | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Temperature °C | Potassium Carbonate | Magnesium Nitrate | Sodium Chloride | Potassium Chloride | Potassium Nitrate | Potassium Sulfate |
| 0 | 43.13 ± 0.66 | 60.35 ± 0.55 | 75.51 ± 0.34 | 88.61 ± 0.53 | 96.33 ± 2.9 | 98.77 ± 1.1 |
| 5 | 43.13 ± 0.50 | 58.86 ± 0.43 | 75.65 ± 0.27 | 87.67 ± 0.45 | 96.27 ± 2.1 | 98.48 ± 0.91 |
| 10 | 43.14 ± 0.39 | 57.36 ± 0.33 | 75.67 ± 0.22 | 86.77 ± 0.39 | 95.96 ± 1.4 | 98.18 ± 0.76 |
| 15 | 43.15 ± 0.33 | 55.87 ± 0.27 | 75.61 ± 0.18 | 85.92 ± 0.33 | 95.41 ± 0.96 | 97.89 ± 0.63 |
| 20 | 43.16 ± 0.33 | 54.38 ± 0.23 | 75.47 ± 0.14 | 85.11 ± 0.29 | 94.62 ± 0.66 | 97.59 ± 0.53 |
| 25 | 43.16 ± 0.39 | 52.89 ± 0.22 | 75.29 ± 0.12 | 84.34 ± 0.26 | 93.58 ± 0.55 | 97.30 ± 0.45 |
| 30 | 43.17 ± 0.50 | 51.40 ± 0.24 | 75.09 ± 0.11 | 83.62 ± 0.25 | 92.31 ± 0.60 | 97.00 ± 0.40 |
| 35 | | 49.91 ± 0.29 | 74.87 ± 0.12 | 82.95 ± 0.25 | 90.79 ± 0.83 | 96.71 ± 0.38 |
| 40 | | 48.42 ± 0.37 | 74.68 ± 0.13 | 82.32 ± 0.25 | 89.03 ± 1.2 | 96.41 ± 0.38 |
| 45 | | 46.93 ± 0.47 | 74.52 ± 0.16 | 81.74 ± 0.28 | 87.03 ± 1.8 | 96.12 ± 0.40 |
| 50 | | 45.44 ± 0.60 | 74.43 ± 0.19 | 81.20 ± 0.31 | 84.78 ± 2.5 | 95.82 ± 0.45 |
| 55 | | | 74.41 ± 0.24 | 80.70 ± 0.35 | | |
| 60 | | | 74.50 ± 0.30 | 80.25 ± 0.41 | | |
| 65 | | | 74.71 ± 0.37 | 79.85 ± 0.48 | | |
| 70 | | | 75.06 ± 0.45 | 79.49 ± 0.57 | | |
| 75 | | | 75.58 ± 0.55 | 79.17 ± 0.66 | | |
| 80 | | | 76.29 ± 0.65 | 78.90 ± 0.77 | | |
| 85 | | | | 78.68 ± 0.89 | | |
| 90 | | | | 78.50 ± 1.0 | | |
| 95 | | | | | | |
| 100 | | | | | | |



UNITED STATES

www.omega.com
1-800-TC-OMEGA
Stamford, CT.

CANADA

www.omega.ca
Laval(Quebec)
1-800-TC-OMEGA

GERMANY

www.omega.de
Deckenpfronn, Germany
0800-8266342

UNITED KINGDOM

www.omega.co.uk
Manchester, England
0800-488-488

FRANCE

www.omega.fr
Guyancourt, France
088-466-342

CZECH REPUBLIC

www.omegaeng.cz
Karviná, Czech Republic
596-311-899

BENELUX

www.omega.nl
Amstelveen, NL
0800-099-33-44



More than 100,000 Products Available!

• Temperature

Calibrators, Connectors, General Test and Measurement Instruments, Glass Bulb Thermometers, Handheld Instruments for Temperature Measurement, Ice Point References, Indicating Labels, Crayons, Cements and Lacquers, Infrared Temperature Measurement Instruments, Recorders Relative Humidity Measurement Instruments, RTD Probes, Elements and Assemblies, Temperature & Process Meters, Timers and Counters, Temperature and Process Controllers and Power Switching Devices, Thermistor Elements, Probes and Assemblies, Thermocouples Thermowells and Head and Well Assemblies, Transmitters, Wire

• Flow and Level

Air Velocity Indicators, Doppler Flowmeters, Level Measurement, Magnetic Flowmeters, Mass Flowmeters, Pitot Tubes, Pumps, Rotameters, Turbine and Paddle Wheel Flowmeters, Ultrasonic Flowmeters, Valves, Variable Area Flowmeters, Vortex Shedding Flowmeters

• pH and Conductivity

Conductivity Instrumentation, Dissolved Oxygen Instrumentation, Environmental Instrumentation, pH Electrodes and Instruments, Water and Soil Analysis Instrumentation

• Data Acquisition

Auto-Dialers and Alarm Monitoring Systems, Communication Products and Converters, Data Acquisition and Analysis Software, Data Loggers Plug-in Cards, Signal Conditioners, USB, RS232, RS485 and Parallel Port Data Acquisition Systems, Wireless Transmitters and Receivers

• Pressure, Strain and Force

Displacement Transducers, Dynamic Measurement Force Sensors, Instrumentation for Pressure and Strain Measurements, Load Cells, Pressure Gauges, Pressure Reference Section, Pressure Switches, Pressure Transducers, Proximity Transducers, Regulators, Strain Gages, Torque Transducers, Valves

• Heaters

Band Heaters, Cartridge Heaters, Circulation Heaters, Comfort Heaters, Controllers, Meters and Switching Devices, Flexible Heaters, General Test and Measurement Instruments, Heater Hook-up Wire, Heating Cable Systems, Immersion Heaters, Process Air and Duct, Heaters, Radiant Heaters, Strip Heaters, Tubular Heaters

DMM/Thermometer/ Relative Humidity Meter



OMEGACALSM
Factory CAL
AVAILABLE
See Section I
for this Option

Model HHM25
\$189
Basic Unit

- ✓ Measure Voltage, Current, Frequency, Resistance, Temperature, Capacitance
- ✓ 3 Type K Thermocouple Inputs with Differential Measurement Available
- ✓ Optional % RH Measurement
- ✓ Autoranging Voltage and Resistance
- ✓ True RMS
- ✓ 0.25% Basic dc Accuracy

The Model HHM25 is a portable and versatile true RMS multimeter with a 4½ digit display. Aside from its full DMM and single input temperature measurement functions, an available temperature socket permits three simultaneous temperature measurements. An optional probe measures relative humidity from 5 to 95%. Both the humidity probe and thermocouple adaptor are included in the HHM25-KIT, which also includes a rugged carrying case. The HHM25 measures voltage from 0.01 mV to 1000 Vdc or 1000 ac, current from 0.01 mA to 10 A for ac and dc, frequency from 1 Hz to 199.99 kHz, capacitance from 0.001 nF to 99.99 µF, resistance from 400 Ω to 40 MΩ, and temperature from -346 to 2498°F (-200 to 1370°C). Additional features include true RMS, min/max readings, auto range for voltage and resistance readings, relative and zero set, zoom and null capabilities. The front panel display indicates



the measurement function, measurement units, thermocouple (T1, T2, T1-T2) or relative humidity probe, display hold, overrange and low battery warnings and also has a bargraph display.

General Specifications

Operating Temperature:
14 to 122°F (-10 to 50°C)
Storage Temperature:
-4 to 140°F (-20 to 60°C)
Temperature Coefficient:
0.1 x (specified accuracy) per °C
Relative Humidity:
0 to 90% (0 to 50°C)



Power Requirements: 9 V battery
Battery Life: 200 hours typical (alkaline)
Dimensions:
7.6"H x 3.4"W x 1.45"D
(193 x 86 x 37 mm)
Weight: 13 oz (369 g)

DC Voltage

| Range | Accuracy* |
|-----------------|-----------|
| 200.0mV, 2.000V | 0.25% ±1 |
| 20.00V, 200.0V | |
| 1000 V | |

Maximum resolution: 0.01 mV in 200.00mV range; .1mV in 400 mV range
Input Impedance: 10MΩ (nominal), <100pF
Normal Mode Rejection Ratio: >60dB @ 50 or 60 Hz
Common Mode Rejection Ratio: >120 dB @ dc, 50 or 60 Hz
Overload Protection: 600V RMS

Current (45 to 2000 Hz)

| Range | Accuracy* |
|--------------|------------|
| dc .01-10 mA | ±(0.5% +2) |
| ac .01-10 mA | ±(1% ±2) |

Maximum Resolution: 0.1 mA in 400.0 mA range; .01 mA in 200 mA range
Input Impedance: 10 MΩ (nominal), <100pF
Common Mode Rejection Ratio: >60dB @ dc to 60 Hz

Resistance

Max. Resolution .01Ω in 400 Ω range

| Range | Accuracy* |
|--------------------|-------------|
| 400.0 Ω, 4.000 KΩ | ±(0.25% +1) |
| 40.00 KΩ, 400.0 KΩ | |
| 4.000 MΩ | |
| 40.00 MΩ | (1% + 3) |

Relative Humidity

Resolution .1% RH

| Range | Accuracy* |
|--------|-----------|
| 15-90% | ±5% |
| 5-15% | ±7% |
| 90-95% | ±7% |

Capacitance[†]

Resolution .001 μF in 9.999 μF

| Range | Accuracy* |
|----------|----------------|
| 9.999 μF | ±(1.5% + 10)** |
| 999.9 μF | ±(1.5% + 2) |
| 99.00 μF | ±(2.0% + 2) |

[†] Accuracy with film capacitors or better
****** ±1.0%rdg +2 digits if Relative mode is used for zero residual

Maximum resolution: 0.001 μF on the 9.999 μF range

Temperature

Resolution .1°C/F

| Range | Accuracy* |
|----------------|----------------|
| -346 to 2498°F | ±(0.1% + 1.3°) |
| -200 to 1370°C | ±(0.1 + 0.7°) |

Note: For differential measurements (T1-T2), accuracy is ±0.1% + 1.8°F (1°C)



The HHM25-KIT includes the HHM25 DMM/Thermometer, HHM25-RH humidity probe, HHM25-TC 3-input thermocouple adaptor, three type K beaded wire thermocouple probes, test leads, rubber holster, 9 V battery and rugged carrying case.

AC Voltage (50 to 60 Hz)

| Range | Accuracy* |
|-----------|-----------|
| 200.0 mV | ±(1% + 2) |
| 2 V, 20 V | |
| 200 V | |
| 1000 V | |

Frequency

Resolution 1Hz in 9999 Hz range

| Range | Accuracy* |
|------------|--------------|
| 9999 Hz | ±(0.05% + 3) |
| 99.999 kHz | ±(0.05% + 2) |
| 199.99 kHz | ±(0.05% + 2) |

AC Voltage (45 to 5 kHz)

| Range | Accuracy* |
|-----------|-----------|
| 200.0 mV | ±(1% + 4) |
| 2 V, 20 V | ±(1% + 2) |
| 200 V | ±(2% + 2) |
| 1000 V | |

AC Voltage (5k to 10 kHz)

| Range | Accuracy* |
|-----------|-----------|
| 200.0 mV | ±(2% + 4) |
| 2 V, 20 V | ±(1% + 2) |
| 200 V | ±(2% + 2) |
| 1000 V | |

* Specified accuracy is % of rdg + digits

To Order (Specify Model Number)

| Model No. | Price | Description |
|---------------------|-------|--|
| HHM25 | \$189 | DMM/Thermometer |
| HHM25-KIT | 259 | HHM25 Meter with HHM25 RH Humidity Probe and Carrying Case |
| HHM25-TC | 50 | 3-Input Thermocouple Adaptor |
| HHM25-RH | 75 | Relative Humidity Probe |
| HHM25-CAL | 89 | 1 each: 33% RH and 75 % RH Calibration Kits |
| HHM25-CARRYING CASE | 18 | Carrying Case |
| CAL-3-HU | 125 | NIST Traceable Calibration |

HHM25 meter is supplied with type K beaded wire thermocouple, rubber holster, 9 V battery and operator's manual. HHM25-KIT also includes three thermocouple probes, HHM25-RH humidity probe, the HHM25-TC thermocouple adaptor and rugged carrying case.

Ordering Example: HHM25-KIT. HHM25 digital thermometer/multimeter with HHM25-RH relative humidity probe and HHM25-TC 3-input thermocouple adaptor, \$259.



UNITED STATES

www.omega.com
1-800-TC-OMEGA
Stamford, CT.

CANADA

www.omega.ca
Laval(Quebec)
1-800-TC-OMEGA

GERMANY

www.omega.de
Deckenpfronn, Germany
0800-8266342

UNITED KINGDOM

www.omega.co.uk
Manchester, England
0800-488-488

FRANCE

www.omega.fr
Guyancourt, France
088-466-342

CZECH REPUBLIC

www.omegaeng.cz
Karviná, Czech Republic
596-311-899

BENELUX

www.omega.nl
Amstelveen, NL
0800-099-33-44



More than 100,000 Products Available!

• Temperature

Calibrators, Connectors, General Test and Measurement Instruments, Glass Bulb Thermometers, Handheld Instruments for Temperature Measurement, Ice Point References, Indicating Labels, Crayons, Cements and Lacquers, Infrared Temperature Measurement Instruments, Recorders Relative Humidity Measurement Instruments, RTD Probes, Elements and Assemblies, Temperature & Process Meters, Timers and Counters, Temperature and Process Controllers and Power Switching Devices, Thermistor Elements, Probes and Assemblies, Thermocouples Thermowells and Head and Well Assemblies, Transmitters, Wire

• Flow and Level

Air Velocity Indicators, Doppler Flowmeters, Level Measurement, Magnetic Flowmeters, Mass Flowmeters, Pitot Tubes, Pumps, Rotameters, Turbine and Paddle Wheel Flowmeters, Ultrasonic Flowmeters, Valves, Variable Area Flowmeters, Vortex Shedding Flowmeters

• pH and Conductivity

Conductivity Instrumentation, Dissolved Oxygen Instrumentation, Environmental Instrumentation, pH Electrodes and Instruments, Water and Soil Analysis Instrumentation

• Data Acquisition

Auto-Dialers and Alarm Monitoring Systems, Communication Products and Converters, Data Acquisition and Analysis Software, Data Loggers Plug-in Cards, Signal Conditioners, USB, RS232, RS485 and Parallel Port Data Acquisition Systems, Wireless Transmitters and Receivers

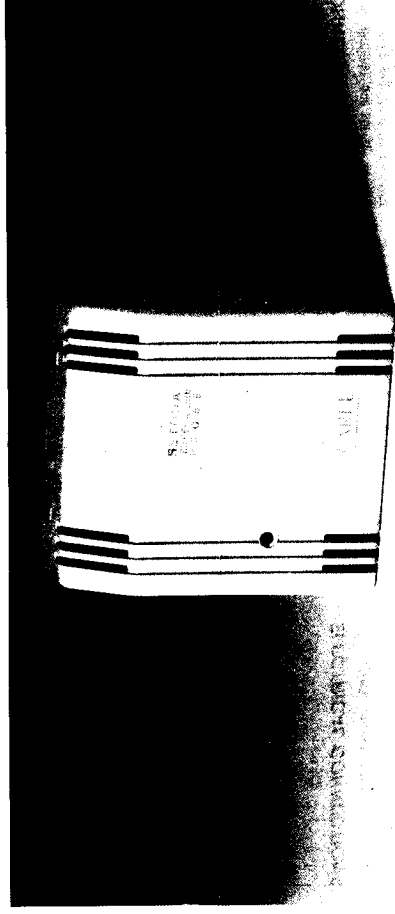
• Pressure, Strain and Force

Displacement Transducers, Dynamic Measurement Force Sensors, Instrumentation for Pressure and Strain Measurements, Load Cells, Pressure Gauges, Pressure Reference Section, Pressure Switches, Pressure Transducers, Proximity Transducers, Regulators, Strain Gages, Torque Transducers, Valves

• Heaters

Band Heaters, Cartridge Heaters, Circulation Heaters, Comfort Heaters, Controllers, Meters and Switching Devices, Flexible Heaters, General Test and Measurement Instruments, Heater Hook-up Wire, Heating Cable Systems, Immersion Heaters, Process Air and Duct, Heaters, Radiant Heaters, Strip Heaters, Tubular Heaters

SONDE AMBIENTE TEMPERATURA/UMIDITÀ TEMPERATURE/HUMIDITY PROBES



MODELLI DISPONIBILI

SONDA TEMPERATURA **SST00A**
 SSONDA UMIDITÀ **SHWOOP**
 SSONDA TEMP + UMIDITÀ **STHOAP**

Le sonde SST00A, SHWOOP, STHOAP, sono impiegate negli impianti di comfort per la misura della temperatura e/o umidità ambiente. Si presentano curate nei design per essere applicate anche in ambienti con particolari richieste di estetica. Il segnale dell'elemento sensibile è trasformato dal circuito elettronico interno in un segnale in tensione unificato che varia linearmente con la grandezza misurata (10mV per grado C / % R.H.). Possono pertanto, indipendentemente dal campo di lavoro, essere collegate senza nessun accostamento a qualsiasi regolatore Carel con ingresso per sonde attive.

La nuova tecnologia con cui sono state costruite (SMT) e le procedure automatizzate di collaudo sono a garanzia dello standard qualitativo e delle prestazioni dichiarate.

MODELS AVAILABLE

TEMPERATURE PROBE **SST00A**
 HUMIDITY PROBE **SHWOOP**
 TEMP + HUMIDITY PROBE **STHOAP**

The SST00A, SHWOOP, STHOAP, probes are used in climatic control units for the measurement of environmental temperature and/or humidity.

They are specifically designed for use in situations where esthetic application are required.

The signal of the transducer is transformed by the internal electronic circuit into a signal of unified voltage that varies linearly with the measured parameter (10 mV per Degree °C/% of Relative Humidity).

They may also be connected, independently of the working range, without alteration to any CAREL regulator with the input for active probes.

The new technology with which they have been constructed (SMT) as well as automated testing procedures guarantee high quality standards in addition to the declared features.

ARATTERISTICHE TECNICHE / TECHNICAL SPECIFICATIONS

| | | | | |
|---|--|----------|--------|-----------|
| Tipo di sonda / Type of probe | | SST00A | SHWOOP | STHOAP |
| Campo di lavoro / Working range | | 0 ÷ 50 | | 0 ÷ 50 |
| Precisione nel campo di lavoro / Precision in working range | | ±0.5 | | ±0.5 |
| Segnale di uscita / Output signal | | °C | | °C |
| Segnale di uscita / Output signal at 0 °C | | mV/°C | | 10 |
| Campo di lavoro / Working range | | %RH | | 0 |
| Precisione sul campo di lavoro: / Precision in working range: | | | | 20 ÷ 90 |
| - Tra 40 e 65% R.H. a 25 °C / between 40 and 65% R.H. at 25 °C | | %RH | | ±2 |
| - Tra 20 e 90% R.H. a 25 °C / between 20 and 90% R.H. at 25 °C | | %RH | | ±3 |
| Segnale di uscita / Output Signal | | mV/%RH | | 10 |
| Segnale di uscita a 40% RH / Output Signal at 40% RH | | Volts | | 0.400 |
| Dipendenza dalla temperatura / Dependence on temperature | | %RH/°C | | ±0.07 |
| Costante di tempo / Time constant for Temperature (°) | | s | | 300 |
| Alimentazione / Voltage supply | | Volts ac | | 360 |
| Tensione minima di alimentazione / Min. voltage supply | | Volts dc | | 12.0 ± 12 |
| Tensione massima di alimentazione / Max. voltage supply | | Volts dc | | 10.0 ± 10 |
| Potenza ass. alla tensione nominale / Current drain at rated voltage | | mW | | 15.0 ± 15 |
| Min.-max. temp. di immagaz. (U.R. 70%) / Min.-max. storage temp. (RH 70%) | | °C | | 25 ÷ 70 |
| Peso / Weight | | g | | 120 |
| Grado di protezione / Protection degree | | | | IP 40 |

(*) A seconda della velocità del aria e dell'accoppiamento alla sonda (*) depending on air flow and resistance on air

CONSTRUZIONE

Ciascuna delle sonde in oggetto è realizzata in due parti: uno zoccolo da fissare a parete e la sonda vera e propria racchiusa in una custodia di materiale plastico. In questo modo viene ad essere semplificato il montaggio a parete. Il tipo di realizzazione non consente il funzionamento in ambienti soggetti a condensazione o in presenza di solventi chimici.

SUGGERIMENTI PER IL MONTAGGIO

- 1) Separare lo zoccolo dalla sonda
- 2) Fissare quest'ultimo a parete con due o più viti. La posizione prescelta dovrà essere distante da fonti di calore o di umidità e non dovrà essere impedita la circolazione dell'aria (come avverrebbe in sistemazioni incassate). Collegare quindi i fili ai morsetti secondo lo schema corretto (fig. 2)
- 3) Infine innestare la sonda nello zoccolo in questo modo:
 - appoggiare la sonda ai due incastri superiori dello zoccolo
 - spingere la sonda nello zoccolo fino al serraggio completo dell'incastro inferiore. Nel caso l'utente desideri calibrare a suo piacimento il segnale della sonda di umidità (SHWOOP e STHOAP), può agire sul potenziometro, accessibile attraverso il foro collocato nel mezzo della sonda (fig. 3).

CONNESSIONI ELETTRICHE

- 7 = alimentazione sonda, + 12 V dc
- 8 = uscita segnale di temperatura (SSTOOP, STHOAP)
- 9 = riferimento sonda
- 10 = alimentazione sonda, -12 V dc
- 11 = uscita segnale di umidità (SHWOOP, STHOAP)

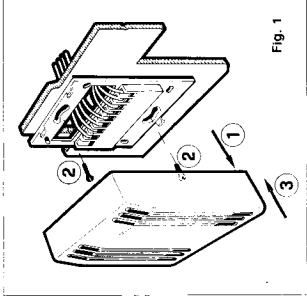
Ogni sonda può pilotare fino a tre regolatori CAREL (alimentare la sonda, +12/-12, da un solo regolatore). La lunghezza massima di collegamento è di 100m (sezione minima conduttore = 0.5 mm²). Non collocare mai nella stessa cantina i conduttori delle sonde e i cavi a 220/380 V ac onde evitare interferenze elettromagnetiche sul segnale della sonda.

CONSTRUCTION

Each of these probes is composed of two parts: a socket to be fixed to the wall and the actual probe that is housed in a plastic container. In this way it can be easily mounted on the wall. The particular type of construction of these probes does not allow them to be used in the presence of chemical solvents.

HINTS ON MOUNTING

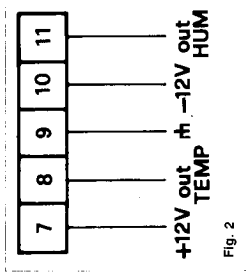
- 1) Separate the control from the socket
- 2) Fix the socket to the wall by two or more screws. The selected position must be a certain distance from sources of heat and humidity, and where air circulation is not impeded (as would occur if the probe were embedded). Connect the wires to the screws in the plug according to the wiring diagram (fig. 2)
- 3) Finally attach the probe to the socket as follows:
 - insert the probe to the socket
 - push the probe onto the socket until fixed onto the lower slot. In cases where the user wishes to recalibrate the humidity probe signal (SHWOOP e STHOAP), he may do so using the potentiometer located under the hole in the middle of the probe (fig. 3).



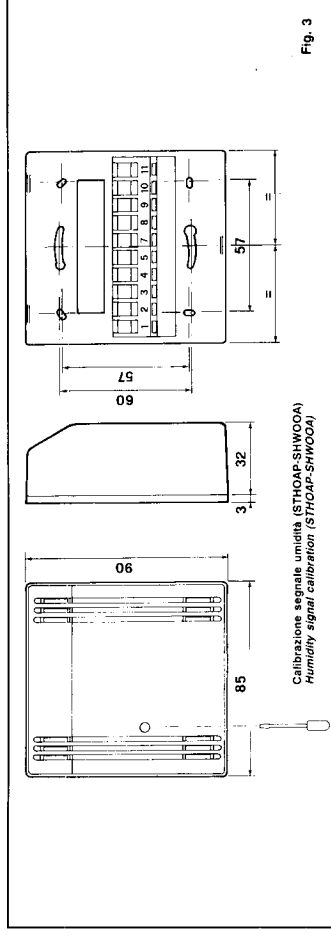
ELECTRICAL CONNECTIONS

- 7 = probe voltage supply, + 12V dc
- 8 = output signal temperature (only for SSTOOP, STHOAP)
- 9 = zero measurements
- 10 = probe voltage supply, -12 V dc
- 11 = output signal humidity (only for SHWOOP, STHOAP)

Each probe can drive up to three CAREL regulators (supply the probe, +12/-12, only from a regulator). The maximum cable length can reach 100 m. (min. section of conductor = 0.5 mm²). Never place the probe wires and 220/380 V ac wires in the same duct to avoid electromagnetic interferences on the probe's signal.



DIMENSIONI E DIME / DIMENSIONS AND DRILLING TEMPLATES



Calibrazione segnale umidità (STHOAP-SHWOOP)
Humidity signal calibration (STHOAP-SHWOOP)

Caratteristiche dimensionali e pesi soggetti a modifiche senza preavviso

Specifications, dimensions and weights may be subject to modifications without prior notice

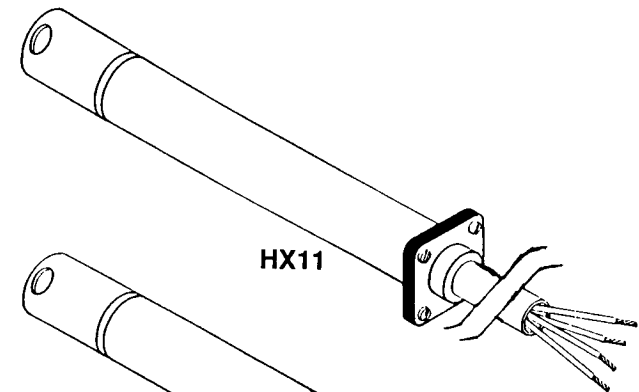
CAREL s.p.a.

35020 Brugine (Padova) Italy - Via dell'Industria, 2/A - Zona Industriale
Tel. 049/5806111 - Fax 049/5806590 - Telex 431426 CAREL I

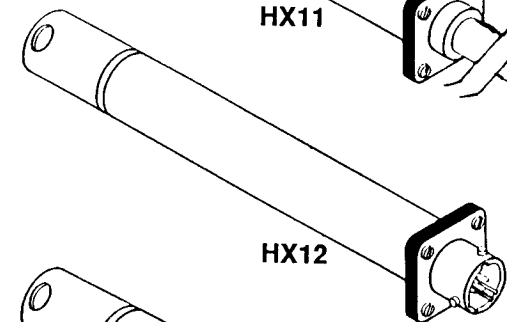
•050000440

 **HX11, HX12, & HX13**

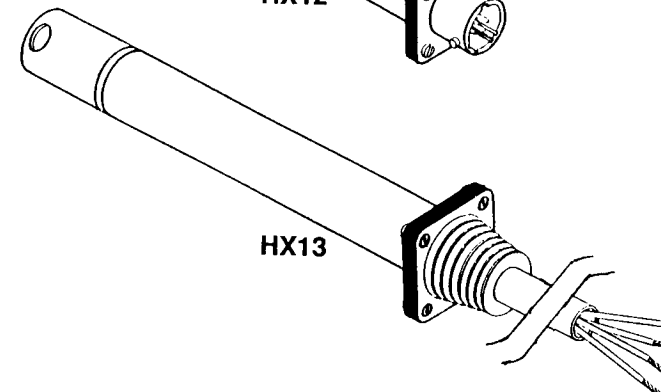
 **Relative Humidity / Temperature Transmitters**



HX11



HX12



HX13



TABLE OF CONTENTS
HX11, HX12 & HX13
RH/TEMPERATURE TRANSMITTERS

| SECTION | PAGE |
|--|-------------|
| SECTION 1 INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Description | 1 |
| 1.2 Features | 1 |
| 1.3 Available Models | 1 |
| SECTION 2 UNPACKING | 2 |
| SECTION 3 THEORY OF OPERATION | 2 |
| SECTION 4 TERMINAL CONNECTIONS | 3 |
| SECTION 5 WIRING | 4 |
| SECTION 6 RH/TEMPERATURE CALCULATIONS | 5 |
| SECTION 7 CALIBRATION | 6 |
| SECTION 8 MAINTENANCE | 7 |
| SECTION 9 ACCESSORIES | 7 |
| SECTION 10 SPECIFICATIONS | 8 |

SECTION 1 INTRODUCTION

1.1 DESCRIPTION

The OMEGA® HX11, HX12, and HX13 relative humidity and temperature transmitters provide temperature compensated RH output and linearized RH and temperature outputs. A thin film polymer capacitor senses relative humidity, and the temperature sensor is an integrated circuit temperature sensor. The sensors are protected by a stainless filter that is easily removable for cleaning. A low compliance voltage (12 volts) allows the use of large impedances for longer wire runs.

1.2 FEATURES

- ✓ Duct mount design ideal for HVAC application
- ✓ Available in 3 different styles
- ✓ 316 Stainless steel, NEMA-4 enclosure protects surface mounted electronics
- ✓ Compact cylindrical design allows easy mounting in tight locations
- ✓ Two standard 4-20mA or 1-5V outputs
- ✓ 2% RH, 0.6°C accuracy

1.3 AVAILABLE MODELS

The following models are available from OMEGA Engineering, Inc.

| PART NUMBER | DESCRIPTION |
|-------------|---|
| HX11C | RH/Temperature transmitter with 3 ft lead wires and current output |
| HX11V | RH/Temperature transmitter with 3 ft lead wires and voltage output |
| HX12C | RH/Temperature transmitter with Bendix 4-pin connector and current output |
| HX12V | RH/Temperature transmitter with Bendix 4-pin connector and voltage output |
| HX13C | RH/Temperature transmitter with 1/2" male NPT fitting and 3 ft leads and current output |
| HX13V | RH/Temperature transmitter with 1/2" male NPT fitting and 3 ft leads and voltage output |

SECTION 2 UNPACKING

Remove the Packing List and verify that all equipment has been received. If there are any questions about the shipment, please call the OMEGA Customer Service Department .

Upon receipt of shipment, inspect the container and equipment for any signs of damage. Take particular note of any evidence of rough handling in transit. Immediately report any damage to the shipping agent.

NOTE

The carrier will not honor any claims unless all shipping material is saved for their examination. After examining and removing contents, save packing material and carton in the event reshipment is necessary.

Make sure you have the following in your packing box:

One (1) HX10 Series RH/Temperature Transmitter
One (1) Operator's Manual

NOTE: A NIST certificate is available on request.

SECTION 3 THEORY OF OPERATION

A 4-20mA loop is a series loop in which a transmitter will vary the current flow depending on the input to the transmitter. In the HX11C, HX12C, and HX13C, the amount of current allowed to flow will vary depending on the relative humidity. Some of the advantages of a current output over a voltage output is that is less susceptible to noise interference and it allows the connection of more than one meter or recorder to the loop as long as the maximum resistance is not exceeded.

The typical current loop will consist of a power supply, a transmitter and a meter to measure the current flow. The loop resistance is the sum of the impedance of the meter(s) and the lead wire. The maximum allowable loop impedance for the HX11C, HX12C, and HX13C is found by using the formula:

$$R_{\max} = (\text{power supply voltage} - 12 \text{ volts}) / 0.02 \text{ amps}$$

Example: When using a 24 VDC power supply:

$$R_{\max} = \frac{24 - 12}{0.02} = 600$$

If the meter or recorder being used accepts only voltage, then the current can be converted to a voltage using a shunt resistor, and Ohm's law (voltage = current x resistance). By installing a 250 ohm resistor across the input terminals of the recorder, the input voltage would equal 1 - 5 volts.

SECTION 4 TERMINAL CONNECTIONS

Refer to Figure 4-1.

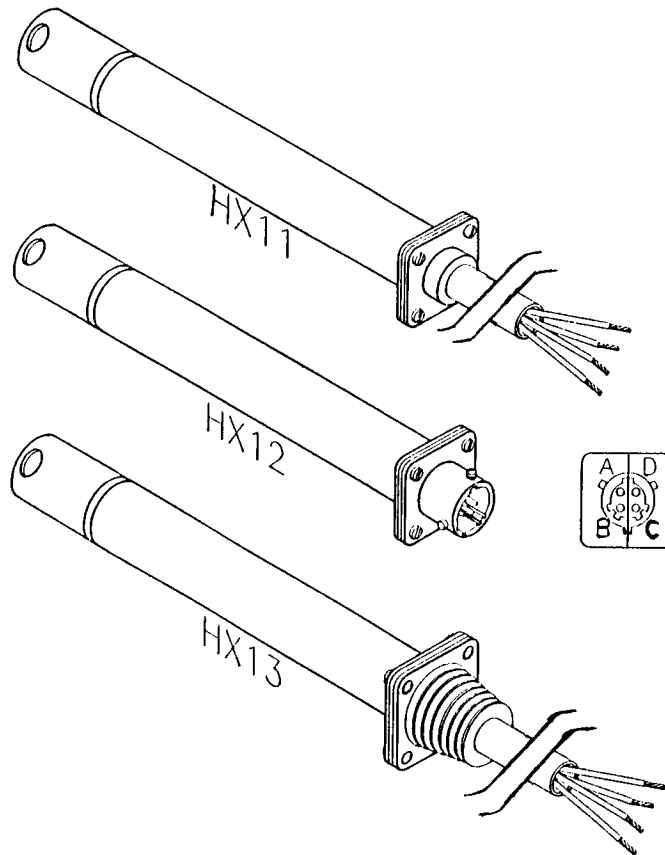


Figure 4-1. HX11, HX12, HX13 Transmitters

TABLE 4-1
TERMINAL CONNECTIONS AND WIRE COLORS

| | HX11C | HX12C | HX13C |
|----------------|-------|-------|-------|
| RH Positive | RED | A | RED |
| RH Negative | BLACK | B | BLACK |
| Temp. Positive | WHITE | C | WHITE |
| Temp. Negative | GREEN | D | GREEN |

| | HX11V | HX12V | HX13V |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Positive Supply | RED | A | RED |
| Negative Supply | WHITE | C | WHITE |
| RH Volt Out | BLACK | B | BLACK |
| Temp Volt Out | GREEN | D | GREEN |

SECTION 5 WIRING

Figure 5-1 shows how to wire up the HX11C, HX12C and HX13C. Table 4-1 shows the color scheme and pin out configurations for the transmitters.

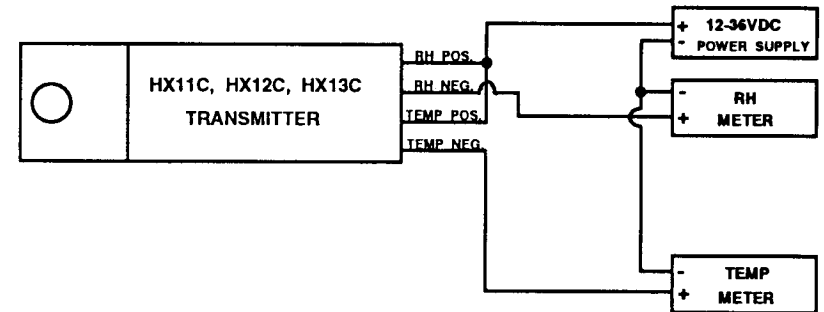


Figure 5-1. Wiring Diagram for the HX11C, HX12C and HX13C

Figure 5-2 shows how to wire up the HX11V, HX12V and HX13V. Table 4-1 shows the color scheme and pin out configurations for the transmitters.

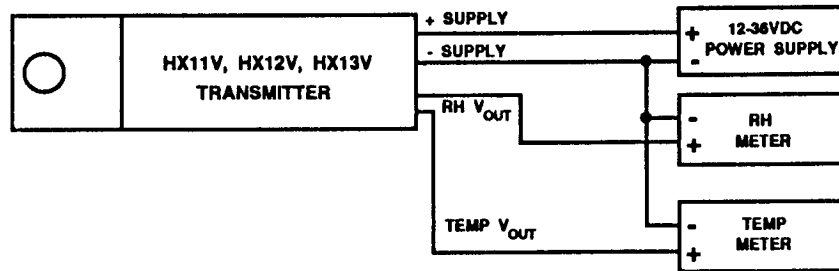


Figure 5-2. Wiring Diagram for the HX11V, HX12V and HX13V

SECTION 6 RH/TEMPERATURE CALCULATIONS

To find maximum loop impedance:

$$R_{max} = \frac{(V_{supply} - 12)}{0.02}$$

HX11C, HX12C and HX13C:

To calculate %RH by measuring current output in milliamperes (I):

$$\%RH = \frac{(I - 4)}{0.16}$$

To calculate temperature in °C or °F:

$$^{\circ}C = (I - 4) \times 6.25$$

$$^{\circ}F = ((I - 4) \times 11.25) + 32$$

HX11V, HX12V and HX13V:

To calculate temperature in °C or °F from voltage outputs (V):

$$^{\circ}C = (V - 1) \times 25$$

$$^{\circ}F = ((V - 1) \times 45) + 32$$

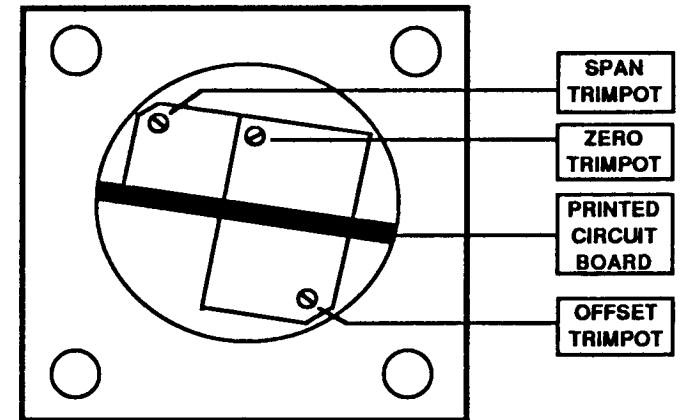
To calculate %RH:

$$\%RH = \frac{(V - 1)}{0.04}$$

$$\%RH = \frac{(I_{mA} - 4)}{0.16}$$

SECTION 7 CALIBRATION

Refer to Figure 7-1 for the location of the span, zero, and offset trimpots.



(NOTE: The four wires normally attached to the board are removed from the figure).

Figure 7-1. Trimpot Locations

Required equipment and conditions:

- Long small-bladed screwdriver
- Known low RH environment (5 to 25%)
- Known high RH environment (75 to 95%)
- Known temperature environment (0 to 100°C - not liquid)

- Remove the four flange screws.
- Gently pull on the four wires to stretch them out to gain access to the trimpots.

CALIBRATION (Cont'd)

CALIBRATION (Cont'd)

3. Place the sensor in a known low RH environment. Adjust the zero trimpot to obtain the corresponding current or voltage output as appropriate.
4. Place the sensor in a known high RH environment. Adjust the span trimpot to obtain the corresponding current or voltage output as appropriate.
5. Place the sensor in known temperature environment and adjust the offset trimpot to obtain the corresponding current or voltage output as appropriate.
6. Gently "stuff" the four wires back into the long tube of the transmitter by curling in a circular pattern.
7. Replace the cover with the screws.

SECTION 8 MAINTENANCE

If the transmitter is operated in a dusty environment, the protective sensor filter, if clogged, may be removed for cleaning. Unscrew filter and gently blow compressed air through screen. If necessary, use a soft brush to remove lint from the sensors.

If the sensors are subjected to 100% condensation, they must be dried to obtain correct readings. There is no permanent calibration shift, nor is recalibration necessary if 100% condensation occurs. It may take from 24 to 48 hours for the transmitter to return to calibrated accuracy.

SECTION 9 ACCESSORIES

The following accessories may be obtained from OMEGA Engineering, Inc.

| PART NUMBER | DESCRIPTION |
|----------------------------------|---|
| PT06F-8-4S U24Y101 PSU-24B | Mating Bendix 4-pin connector for the HX12 24VDC, 1000mA, unregulated power supply 24VDC, 200mA, unregulated power supply |

SECTION 10 SPECIFICATIONS

RELATIVE HUMIDITY

| | |
|--|--|
| INPUT VOLTAGE RANGE: | 12 - 36 VDC (polarity protected) |
| RH RANGE: | 5% to 95% RH |
| ACCURACY: | ±2% RH |
| RH TEMPERATURE | -4° to 140°F |
| COMPENSATION RANGE: | (-20° to 60°C) |
| HX11C, HX12C AND HX13C RH OUTPUT: | 4-20mA for 0 to 100% RH |
| HX11V, HX12V AND HX13V RH OUTPUT: | 1-5V for 0 to 100% RH |
| RH TIME CONSTANT: | 100 sec, 20 - 90%; 60 sec, 90 - 20% |
| REPEATABILITY: | ±1% RH |

TEMPERATURE

| | |
|---|---|
| INPUT VOLTAGE RANGE: | 12 - 36 VDC (polarity protected) |
| TEMPERATURE RANGE: | 32° to 212°F (0° to 100°C) |
| ACCURACY: | ±1°F (±0.6°C) |
| HX11C, HX12C AND HX13C TEMP OUTPUT: | 4-20mA for 0° to 100°C |
| HX11V, HX12V AND HX13V TEMP OUTPUT: | 1-5V for 0° to 100°C |
| TEMP TIME CONSTANT (WITHOUT SCREEN): | (for 63.2% response) less than 9 seconds in moving air (1M/sec); less than 30 seconds in still air |
| REPEATABILITY: | ±0.5°F (±0.3°C) |

MECHANICAL

| | |
|--------------------|---|
| HOUSING: | 316SS watertight enclosure; meets NEMA-1, 2, 3, 3R, 4, 4X, 5, 12, and 13 specs. |
| CONNECTORS: | |
| HX11: | 36" braided and shielded cable, PVC sheathing |
| HX12: | Bendix 4-pin (#PT02A-8-4P); mating connection optional |
| HX13: | 1/2" male NPT conduit with 36" braided/shielded PVC cable |
| DIMENSIONS: | 5.1" long x 0.625" dia. (130 x 16mm) |
| WEIGHT: | 0.6 lb (270 g) |