

«ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ»



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΛΑΓΑΡΑΣ Γ.
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Σ.Ε.Μ.Φ.Ε - Ε.Μ.Π



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε, έπειτα από συνεννόηση με τον επιβλέποντα (κ. Ε. Γαζή), στην Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, που φιλοξενείται στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.)-Δημόκριτος, στην Αγία Παρασκευή. Για το λόγο αυτό, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον κ. Αντώνη Μαλτέζο (Τμήμα Μέτρησης Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος-Ε.Ε.Α.Ε.), για τη φιλοξενία στην Ε.Ε.Α.Ε., τον εξοπλισμό που μου παρείχε, την αγαστή σύμπνοια με την οποία συνεργαστήκαμε και τις αμέτρητες ώρες που διέθεσε για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, μικρού ή μεγάλου, που παρουσιάστηκε κατά τη διεξαγωγή της εργασίας μου.

Κ.Γ.Λ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΝΟΤΗΤΑ Α: «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ραδιενέργεια.....	10
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	10
1.2 Τύποι ακτινοβολίας.....	11
1.3 Χρόνος ημιζωής και ραδιενεργές σειρές.....	12
1.4 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια.....	18
2.1 Εισαγωγικά.....	18
2.2 Φυσική ραδιενέργεια.....	18
2.2.1 Κοσμική ακτινοβολία.....	19
2.2.2 Ακτινοβολία από πηγές του εδάφους.....	20
2.2.3 Ραδιενέργεια στο σώμα.....	20
2.3 Τεχνητή ραδιενέργεια	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ.....	28
4.1 Ακτινοβόληση του ανθρώπινου σώματος.....	28
4.2 Δοσιμετρία.....	34
4.2.1 Μεγέθη δοσιμετρίας.....	34
4.2.2 Μέγιστες επιτρεπτές δόσεις.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΦΟΡΕΙΣ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ «ΕΙΡΗΝΙΚΗΣ» ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....38

5.1 Ιστορικό38

5.2 Τα άρθρα 35 και 36 της συνθήκης Euratom.....39

ΕΝΟΤΗΤΑ Β: «ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΕΡΙΩΝ.....58

2.1 Γενικά58

2.2 Ανιχνευτές ιοντισμού.....61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ.....66

3.1 Γενικά66

3.2 Φωτοπολλαπλασιαστές.....69

3.3 Ανιχνευτές σπινθηρισμών ανόργανων υλικών.....72

3.4 Εσωτερική ανιχνευτική απόδοση.....74

3.4.1 Βαριά ιόντα.....74

3.4.2 Ηλεκτρόνια.....75

3.4.3 Ακτίνες γάμμα.....76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....78

4.1 Αρχές λειτουργίας ανιχνευτών στερεάς κατάστασης.....79

4.1.1 Δομή ενεργειακών ζωνών.....79

4.1.2 Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς.....81

4.1.3 Συγκέντρωση και «ευκινησία» φορέων στους ημιαγωγούς.....	82
4.1.4 Επανασύνδεση και παγίδευση.....	83
4.2 Ενισχυμένοι ημιαγωγοί.....	85
4.3 Η ημιαγώγιμη επαφή.....	88
4.3.1 Το κενό βάθος.....	89
4.4 Χαρακτηριστικά ανιχνευτών ημιαγωγών.....	93
4.4.1 Μέση ενέργεια ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.....	94
4.4.2 Γραμμικότητα.....	95
4.4.3 Ο παράγοντας Fano στην εσωτερική ενεργειακή ανάλυση.....	96
4.4.4 Ρεύμα διαρροής.....	96
4.4.5 Ευαισθησία και εσωτερική απόδοση.....	97
4.4.6 Σχήμα παλμών και χρόνος ανόδου.....	98
4.5 Ανιχνευτές ανόδων πυριτίου.....	101
4.5.1 Δίοδοι διαχυμένης επαφής.....	101
4.5.2 Δίοδοι εμφυτευμένων ιόντων.....	102
4.5.3 Δίοδοι ολίσθησης-Λιθίου Si(Li).....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ.....	106
5.1 Γενικά περί φασματοσκοπίας γάμμα ακτινών.....	106
5.2 Ιδιότητες σπινθηριστών φασματοσκοπίας γάμμα ακτινών.....	107
5.2.1 Συνάρτηση απόκρισης.....	107
5.2.2 Ενεργειακή ανάλυση.....	111

5.2.3 Γραμμικότητα.....113

5.2.4 Ανιχνευτική απόδοση.....113

ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: «ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....116

1.1 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.)-
Τμήμα μέτρησης ραδιενέργειας περιβάλλοντος.....116

1.2 Σταθμοί μέτρησης αεροζόλ της ατμόσφαιρας.....119

1.3 Σύστημα συνεχούς μέτρησης αεροζόλ-AMS02.....120

1.3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος.....120

1.3.1.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτικών διατάξεων και
ενίσχυση.....124

1.3.2 Hardware και software του συστήματος.....125

1.3.2.1 Software του συστήματος.....125

1.3.2.2 Hardware του συστήματος.....141

1.3.3 Λειτουργία συστήματος και διαδικασία
μέτρησης.....145

1.3.3.1 Μετρήσεις υποβάθρου.....145

1.3.3.2 Κανονική λειτουργία σταθμού (normal
operation).....146

1.3.3.3 Μη κανονική λειτουργία σταθμού (off
normal operation).....151

1.3.4 Αξιολόγηση και αποθήκευση δεδομένων στη βάση
δεδομένων.....152

1.3.4.1 Υπορουτίνα “TEST”	160
1.3.4.2 Φασματοσκοπία γάμμα.....	164
1.3.4.3 Ευαισθησία.....	166

ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: «ΕΛΕΓΚΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	168
1.1 Ολική εξωτερική δόση (Doserate).....	168
1.2 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	174
1.3 Ραδόνιο.....	186
1.4 Ακτινοβολία άλφα και βήτα.....	192
1.5 ¹³⁷ Cs (LD).....	199
1.6 Inorganic Iodine ¹³¹ I (LD).....	203
1.7 Totals per filter.....	206
ΚΑΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	220
2.1 Γενικά συμπεράσματα.....	220
2.2 Συμπεράσματα για τις παραμέτρους χρήσης.....	221

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ- ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	224
A.1 Η πυρηνική υπόθεση.....	224
A.2 Ακτίνες γάμμα.....	226
A.3 Ρυθμοί ραδιενεργών διασπάσεων.....	228

B. ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	232
B.1 Ανιχνευτές μέτρησης χρόνου ολίσθησης.....	232
B.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμών οργανικών υλικών.....	234
B.3 Ανιχνευτές ημιαγωγών επιφανειακών φραγμάτων.....	235

ΕΝΟΤΗΤΑ Α: «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ»

1. Ραδιενέργεια

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ραδιενέργεια είναι η αυθόρμητη αποσύνθεση των ατομικών πυρήνων με εκπομπή υποατομικών σωματιδίων μεταξύ των οποίων είναι τα άλφα και βήτα ή ηλεκτρομαγνητικών ακτινών που ονομάζονται ακτίνες Χ και ακτίνες γάμμα. Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1896 από τον Γάλλο φυσικό Antoine Henri Becquerel όταν παρατήρησε ότι το στοιχείο ουράνιο μπορεί να μαυρίσει ένα φωτογραφικό φιλμ, έστω και αν μεσολαβεί ανάμεσά τους γυαλί ή μαύρο χαρτί.



Επίσης παρατήρησε ότι οι ακτίνες που παράγονται είναι σε θέση να φορτίσουν τα ηλεκτροσκόπια δείχνοντας με αυτό τον τρόπο ότι οι ακτίνες κατέχουν μια ηλεκτρική ενέργεια. Το 1898 οι Γάλλοι χημικοί Pierre και Marie Curie συνήγαγαν το συμπέρασμα ότι η ραδιενέργεια είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται με τα άτομα, ανεξάρτητα από την φυσική ή την χημική κατάσταση τους. Επίσης συμπέραναν ότι επειδή το ουράνιο --που περιέχεται στο μέταλλευμα πισσουρανίτης είναι πιο έντονα ραδιενεργό από τα άλατα του ουράνιου που χρησιμοποιήθηκαν από τον Becquerel, πρέπει να βρίσκονται στο μέταλλευμα κι άλλα ραδιενεργά στοιχεία. Έφεραν εις πέρας λοιπόν μια σειρά χημικών επεξεργασιών του πισσουρανίτη που οδήγησε στην ανακάλυψη των δύο νέων ραδιενεργών στοιχείων, του πολωνίου και του ραδίου. Η Marie Curie επίσης ανακάλυψε ότι το στοιχείο θόριο είναι ραδιενεργό, και το 1899 το ραδιενεργό στοιχείο ακτίνιο ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο χημικό Andri Louis Debierne. Στο ίδιο έτος η ανακάλυψη του ραδιενεργού αερίου ραδονίου έγινε από τους Βρετανούς φυσικούς Ernest Rutherford και Frederick Soddy, οι οποίοι το παρατήρησαν σε συνδυασμό με το θόριο, το ακτίνιο, και το ράδιο. Η ραδιενέργεια αναγνωρίστηκε σύντομα ως η πλέον συγκεντρωμένη πηγή ενέργειας από όσες ήταν γνωστές μέχρι τότε. Οι Curie μέτρησαν την θερμότητα που συνδέεται με την αποδιέγερση του ραδίου και καθόρισαν ότι 1 g του ραδίου εκπέμπει



περίπου 420 j ενέργεια ανά ώρα. Αλλά αυτό το θερμικό φαινόμενο συνεχίζεται για ώρες και έτη συνεχώς, ενώ η πλήρης καύση ενός γραμμαρίου άνθρακα οδηγεί στην παραγωγή συνολικά μόνο 33.600 j ενέργεια. Η ραδιενέργεια προσέλκυσε την προσοχή των επιστημόνων σε όλο τον κόσμο μετά από αυτές τις αρχικές ανακαλύψεις. Στις επόμενες δεκαετίες πολλές πτυχές του φαινομένου ερευνήθηκαν λεπτομερώς.

1.2 Τύποι ακτινοβολίας

Ο Rutherford ανακάλυψε ότι τουλάχιστον δύο συστατικά είναι παρόντα στις ραδιενεργές ακτινοβολίες: τα άλφα σωματίδια, που διαπερνούν μόνο μερικά χιλιοστά του εκατοστού του αλουμινίου, και τα βήτα σωματίδια, τα οποία είναι σχεδόν 100 φορές πιο διαπεραστικά. Τα επόμενα πειράματα στα οποία υποβλήθηκαν οι ραδιενεργές ακτινοβολίες, ήταν στα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία που αποκάλυψαν την παρουσία ενός τρίτου συστατικού, τις ακτίνες γάμμα, οι οποίες βρέθηκαν να είναι πιο διαπεραστικές από τα βήτα σωματίδια. Σε ένα ηλεκτρικό πεδίο η πορεία των βήτα σωματιδίων εκτρέπεται πολύ προς τον θετικό ηλεκτρικό πόλο, και αυτή των άλφα σωματιδίων σε μικρότερη έκταση, όμως προς τον αρνητικό πόλο, ενώ οι ακτίνες γάμμα δεν εκτρέπονται καθόλου. Επομένως, τα βήτα σωματίδια είναι φορτισμένα αρνητικά, τα άλφα είναι θετικά και μάλιστα είναι βαρύτερα από τα βήτα σωματίδια λόγω της μικρής απόκλισης, και οι ακτίνες γάμμα είναι ουδέτερες. Η ανακάλυψη ότι το ράδιο αποσυντέθηκε για να παραγάγει το ραδόνιο απέδειξε καθοριστικά ότι η ραδιενεργός αποσύνθεση συνοδεύεται από μια αλλαγή στη χημική φύση του αποσυντιθέμενου στοιχείου. Τα πειράματα στην εκτροπή των άλφα σωματιδίων από ένα ηλεκτρικό πεδίο έδειξαν ότι η σχέση του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα αυτών των σωματιδίων (q/m), είναι η μισή περίπου από τον λόγο q/m του ιόντος του υδρογόνου. Οι φυσικοί υπέθεσαν ότι τα σωματίδια άλφα θα μπορούσαν να έχουν διπλό φορτίο όπως τα ιόντα του ηλίου (άτομα ηλίου με αφαίρεση δύο ηλεκτρονίων). Το ιόν του ηλίου έχει περίπου τέσσερις φορές τη μάζα του ιόντος υδρογόνου, το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος φορτίου προς μάζα (q/m) θα ήταν πράγματι ο μισός από

αυτόν του ιόντος του υδρογόνου. Αυτή η υπόθεση



αποδείχθηκε από τον Rutherford όταν επέτρεψε σε μια ουσία που εξέπεμπε σωματίδια άλφα, να αποσυντεθεί κοντά σε ένα δοχείο με κενό αέρος, φτιαγμένο από λεπτό γυαλί. Τα άλφα σωματίδια ήταν σε θέση να διαπεράσουν το γυαλί και τότε παγιδεύτηκαν μέσα στο γυάλινο δοχείο, και μέσα σε μερικές ημέρες καταδείχθηκε η παρουσία του στοιχείου ηλίου μέσω ενός φασματομέτρου. Τα βήτα σωματίδια αποδείχθηκαν στη συνέχεια πως πρέπει να είναι ηλεκτρόνια, και οι ακτίνες γάμμα ότι αποτελούν μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με την ίδια φύση με τις ακτίνες Χ, αλλά πολύ μεγαλύτερης ενέργειας. Κατά τον χρόνο της ανακάλυψης της ραδιενέργειας οι φυσικοί πίστευαν ότι το άτομο ήταν η τελευταία, αδιαίρετη δομική μονάδα της ύλης. Κατόπιν τα άλφα και βήτα σωματίδια αναγνωρίστηκαν πως είναι διακριτές μονάδες της ύλης και η ραδιενέργεια πως είναι μια διαδικασία στην οποία τα άτομα μετασχηματίζονται από την εκπομπή του ενός ή του άλλου σωματιδίου σε νέα είδη ατόμων που κατέχουν νέες χημικές ιδιότητες. Μαζί με αυτό αναγνωρίσθηκε ότι τα ίδια τα άτομα πρέπει να έχουν δομή και ότι δεν είναι τα τελευταία, θεμελιώδη τμήματα της φύσης.

1.3 Χρόνος ημιζωής και ραδιενεργές σειρές

Η αποσύνθεση μερικών ουσιών, όπως το ουράνιο-238 και το θόριο-232, εμφανίζεται να συνεχίζεται κατά τρόπο αόριστο χωρίς ανιχνεύσιμη μείωση του ποσοστού αποδιέγερσης ανά μονάδα μάζας του ισότοπου (ορισμένο ποσοστό αποδιέγερσης). Άλλες ραδιενεργές ουσίες παρουσιάζουν χαρακτηριστική μείωση στο συγκεκριμένο ποσοστό αποδιέγερσης με το χρόνο. Μεταξύ αυτών είναι το ισότοπο θόριο-234 (αρχικά αποκαλούμενο σαν ουράνιο-Χ), το οποίο, μετά από την απομόνωση από το ουράνιο, διασπάται με τη μισή αρχική ραδιενεργό έντασή μέσα σε 25 ημέρες. Κάθε μεμονωμένη ραδιενεργός ουσία έχει μια χαρακτηριστική περίοδο διάσπασης ή όπως λέγεται χρόνος ημιζωής (ο χρόνος

μέσα στον οποίο η αρχική ποσότητα μειώθηκε στο ήμισυ). Επειδή οι ημιζωές τους είναι τόσο μακροχρόνιες που η αποσύνθεση δεν είναι αξιόλογη εντός της περιόδου παρατήρησης, η μείωση του συγκεκριμένου ποσοστού αποδιέγερσης μερικών ισotόπων δεν είναι αισθητή με τις παρούσες μεθόδους. Το Θόριο-232, παραδείγματος χάριν, έχει χρόνο ημιζωής 14 δισεκατομμύρια έτη.

Όταν το ουράνιο-238 διασπάται λόγω της εκπομπής άλφα σωματιδίων, διαμορφώνονται σε θόριο-

234.
$${}_{92}^{238}\text{U} \longrightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$$
 Το θόριο- 234 είναι ένας πυρήνας που εκπέμπει βήτα σωματίδια και διασπάται για να διαμορφώσει πρωτακτίνο-234.

$${}_{90}^{234}\text{Th} \longrightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa} + e^- + \bar{\nu}$$
 Εν συνέχεια το πρωτακτίνο- 234 που εκπέμπει κι αυτό σωματίδια βήτα, σχηματίζει ένα νέο ισότοπο του ουράνιου, το ουράνιο- 234. Το ουράνιο-234 διασπάται λόγω εκπομπής α-σωματιδίων σε μορφή θορίου-230, και τέλος το θόριο-230 αποσυντίθεται στη συνέχεια λόγω άλφα εκπομπής για να παραγάγει το ισότοπο ράδιο-226.

Αυτή η ραδιενεργός σειρά αποσύνθεσης, που ονομάζεται ραδιενεργός σειρά ουρανίου-ραδίου, συνεχίζεται ομοίως μέσω ακόμη πέντε άλφα εκπομπών και ακόμη τεσσάρων βήτα εκπομπών έως ότου φθάνει στο τελικό προϊόν, που είναι ένα μη-ραδιενεργό (σταθερό) ισότοπο του μολύβδου (το στοιχείο 82) με μαζικό αριθμό 206.

Κάθε στοιχείο στον περιοδικό πίνακα μεταξύ του ουράνιου και του μολύβδου αντιπροσωπεύεται σε αυτήν την σειρά, και κάθε ισότοπο είναι διακριτό από το χαρακτηριστικό χρόνο ημιζωής του.

Όλα τα μέλη της σειράς έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: οι μαζικοί αριθμοί τους μπορούν να διαιρεθούν ακριβώς με το τέσσερα εάν ο αριθμός 2 αφαιρεθεί από αυτούς. Δηλαδή οι μαζικοί αριθμοί τους μπορούν να εκφραστούν με τον απλό τύπο $4n+ 2$, στα οποία το n είναι ένας ακέραιος αριθμός.

Άλλη φυσική ραδιενεργή σειρά είναι η σειρά του θορίου, που αποκαλείται σειρά 4n επειδή οι μαζικοί αριθμοί όλων των μελών του είναι ακριβώς διαιρετοί με το τέσσερα, και η σειρά του ακτινίου, ή 4n+3 σειρά.

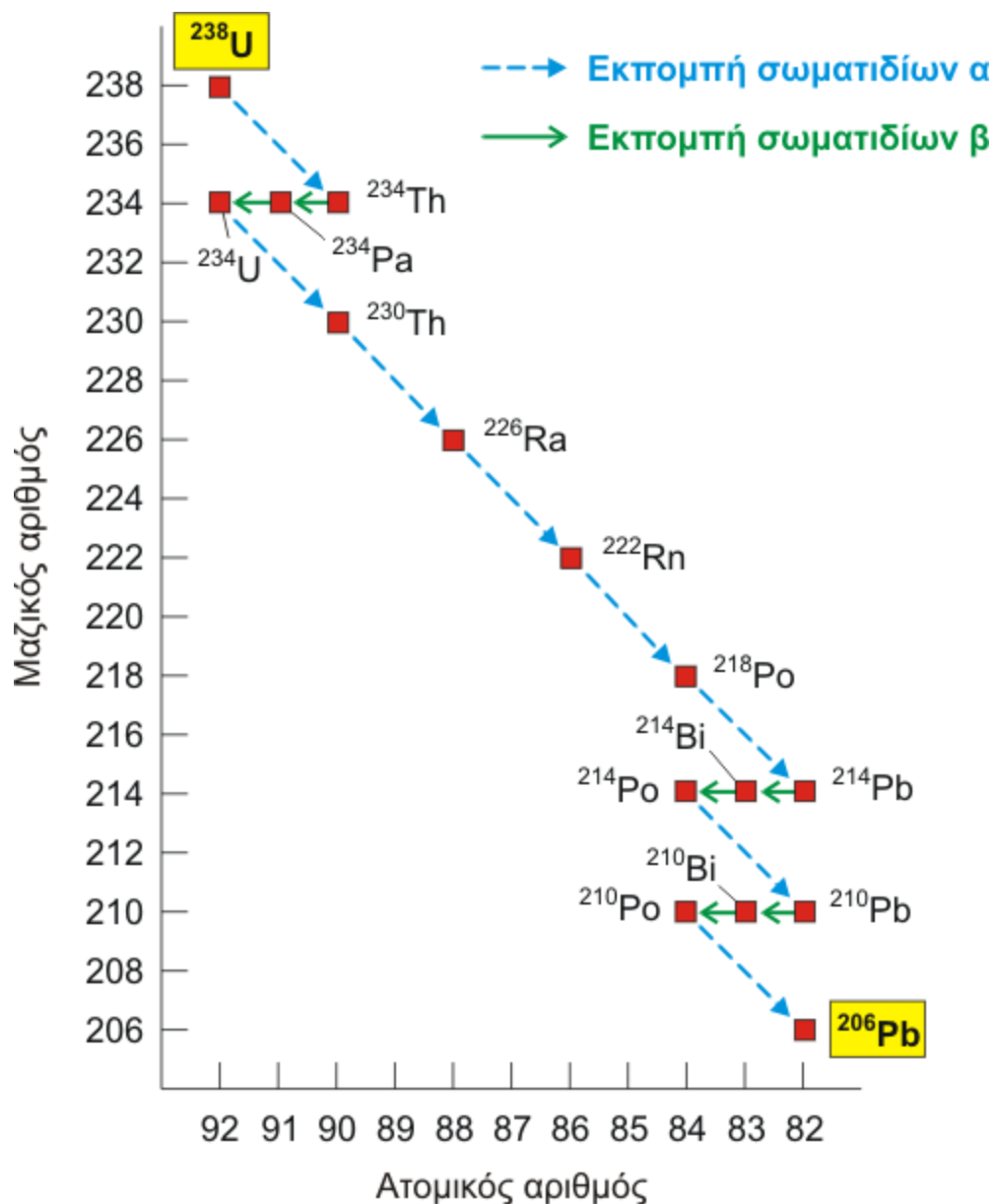
Ο μητρικός πυρήνας της σειράς του θορίου είναι το ισότοπο θόριο-232, και το τελικό προϊόν του είναι το σταθερό ισότοπο μόλυβδου-208.

Η σειρά ακτινίου αρχίζει με ουράνιο-235 (που ονομάζεται actinouranium) από τους πρώτους ερευνητές και τελειώνει με τον μόλυβδο-207.

Μια τέταρτη σειρά, η 4n+1 σειρά, όλα τα μέλη της οποίας είναι τεχνητά ραδιενεργά, έχει ανακαλυφθεί τα τελευταία χρόνια και έχει χαρακτηριστεί λεπτομερώς. Το αρχικό μέλος του είναι ένα τεχνητό ισότοπο το κιούριο-241 (curium). Περιέχει το ισότοπο του στοιχείου ποσειδώνιου με μεγάλο χρόνο ζωής και το τελικό προϊόν του είναι βισμούθιο- 209.

Στις σειρές διασπάσεως $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} \Rightarrow ^{207}\text{Pb}$ και $^{232}\text{Th} \Rightarrow ^{208}\text{Pb}$, που αποτελούν τη βάση για τρεις διαφορετικές και ανεξάρτητες μεθόδους προσδιορισμού της ηλικίας γεωλογικών σχηματισμών, παράγονται και εκπέμπονται αρκετά σωματίδια α και β, σε μία ακολουθία ενδιάμεσων ραδιενεργών προϊόντων.

Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο κάτωθεν σχήμα, όπου κανείς μπορεί να δει ότι όταν το μητρικό ραδιενεργό ^{238}U (ατομικός αριθμός 92, μαζικός αριθμός 238) διασπάται, εκπέμπει 8 σωματίδια α και 6 σωματίδια β πριν καταστεί το σταθερό θυγατρικό ^{206}Pb (ατομικός αριθμός 82, μαζικός αριθμός 206).



Αυτό φυσικά γίνεται με τις διαδοχικές μετατροπές σε διάφορα στοιχεία. Εκπομπή 8 σωματιδίων α σημαίνει εκπομπή $8 \times 2 = 16$ πρωτονίων και $8 \times 2 = 16$ νετρονίων, δηλαδή μείωση του μαζικού αριθμού του μητρικού ισότοπου κατά 32 και του ατομικού του αριθμού κατά 16.

Ομοίως, εκπομπή 6 σωματιδίων β σημαίνει εκπομπή 6 ηλεκτρονίων από τον πυρήνα του, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ατομικού αριθμού κατά 6 χωρίς να μεταβάλλεται ο μαζικός αριθμός.

Έχουμε δηλαδή συνολικά μείωση του μαζικού αριθμού κατά 32 ($238 \Rightarrow 206$) και του ατομικού αριθμού κατά 10 ($-16+6=10$), 92.

1.4 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας

Οι ραδιενεργοί πυρήνες μπορεί να εκπέμπουν όπως έχουμε αναφέρει α σωματία, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, φωτόνια ή θραύσματα σχάσης. Σε δεδομένο δείγμα πυρήνων ονομάζουμε **ενεργότητα** τον μέσο αριθμό διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο, η οποία μετράται σε becquerels: 1Bq αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο, κατά μέσο όρο.

Η ολική ενεργότητα ενός νεοπαρασκευασθέντος δείγματος μπορεί αρχικά να αυξάνει με το χρόνο, επειδή τα θυγατρικά προϊόντα του ραδιενεργού πυρήνα μπορεί να είναι και αυτά ραδιενεργά αν και τελικά η ολική ενεργότητα μπορεί να μηδενιστεί.

Το Becquerel είναι η μονάδα στο SI, η οποία έχει αντικαταστήσει το curie: $1\text{Ci}=3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$. Το curie είχε οριστεί αρχικά ως η ενεργότητα του ^{226}Ra από μία πηγή που περιέχει $1\text{g}^{226}\text{Ra}$. Επειδή ο μέσος χρόνος ζωής του ^{226}Ra είναι $7,28 \times 10^{10}\text{s}$, είναι εύκολο να ελέγξουμε ότι ο παραπάνω ορισμός είναι σύμφωνος, κατά προσέγγιση, με τον παλαιότερο.

2. Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια περιβάλλοντος

2.1 Εισαγωγικά

Τα ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στη φύση μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Φυσικά ραδιοϊσότοπα** (ραδιοϊσότοπα τα οποία είναι συστατικά του φλοιού της γης από τη στιγμή της δημιουργίας της).
- **Κοσμογενή ραδιοϊσότοπα** (ραδιοϊσότοπα που παράγονται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα).
- **Τεχνητά παραγόμενα ραδιοϊσότοπα** (παράγονται τεχνητά σε εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας, όπως σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματίων).

Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα υπάρχουν στη γη από την στιγμή της δημιουργίας της. Τα κυριότερα είναι το ουράνιο-238 (U-238), το ουράνιο-235 (U-235), το θόριο-232 (Th-232), το κάλιο-40 (K-40) και τα θυγατρικά τους ραδιοϊσότοπα (ραδιοϊσότοπα τα οποία παράγονται με την αποδιέγερση του αρχικού ραδιοϊσοτόπου). Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, εκτός από το έδαφος και τα ορυκτά, βρίσκονται στο νερό, στον αέρα, στους ζώντες οργανισμούς, στις τροφές και στα οικοδομικά υλικά.

2.2 Φυσική ραδιενέργεια

Τα ραδιενεργά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν επίσης σε ορισμένες ακολουθίες οι οποίες ονομάζονται οικογένειες. Είναι φυσικό ότι τα μέλη κάθε οικογένειας έχουν μαζικό αριθμό που ακολουθεί έναν γενικό τύπο. Οι οικογένειες αρχίζουν με ένα ισότοπο με μεγάλο χρόνο ζωής και καταλήγουν σε ένα σταθερό ισότοπο. Από τις τέσσερις οικογένειες οι τρεις περιλαμβάνουν τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία και η τέταρτη είναι η τεχνητή ραδιενεργός οικογένεια του **ποσειδωνίου**. Οι οικογένειες των φυσικών

ραδιενεργών στοιχείων είναι: α) η οικογένεια του **θορίου**, β) η οικογένεια του **ακτινίου** και γ) η οικογένεια του **ουρανίου**, οι οποίες καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα του μολύβδου, ενώ η οικογένεια του ποσειδωνίου καταλήγει στο βισμούθιο. Όλα τα φυσικά εμφανιζόμενα ισότοπα πάνω από το βισμούθιο στον περιοδικό πίνακα είναι ραδιενεργά, και υπάρχουν επιπλέον φυσικά ραδιενεργά ισότοπα του βισμούθιου, του θαλλίου, του βαναδίου, του ινδίου, του νεοδυμίου, του γαδολίνιου, του αίφνιου, του λευκόχρυσου, του μολύβδου, του ρήνιου, του λουτήτιου, του ρουβιδίου, του καλίου, του υδρογόνου, του άνθρακα, του λανθανίου, και του σαμαρίου. Η ραδιενέργεια που παρατηρείται στο περιβάλλον έχει δύο δυνατές προελεύσεις. Η μία προέλευση οφείλεται στην **κοσμική και ηλιακή** ακτινοβολία, που προέρχεται από το διάστημα και τον ήλιο και προσπίπτει στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας της γης.

2.2.1 Κοσμική ακτινοβολία

Η σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι πρωτόνια, ελαφροί πυρήνες και ηλεκτρόνια, τα οποία κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ατμόσφαιρα προκαλούν την γένεση δευτερογενούς ακτινοβολίας, που αποτελείται από σωματίδια συμπεριλαμβανομένων και των βραχύβιων π-μεσονίων και μ-λεπτονίων. Η μελέτη της φύσης, σύστασης και ενεργειακής κατανομής και πρωταρχικής κοσμικής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται καλύτερα με μετρήσεις και πειράματα που γίνονται επάνω από την ατμόσφαιρα με τη χρήση αερόστατων, τεχνητών δορυφόρων και διαστημοπλοίων.

Η πιο έντονη πηγή ακτινοβολίας κοντά στον πλανήτη της γης είναι ,βέβαια, ο ήλιος. Εκτός από το φως της ορατής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του ήλιου και την ακτινοβολία των νετρίνων που εκπέμπεται από το εσωτερικό του λόγω των

κυκλικών αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης, εκπέμπονται επίσης και σωματίδια, κυρίως **πρωτόνια** και **ηλεκτρόνια**, που προέρχονται από τις ηλιακές εκρήξεις και ηλιακές κηλίδες που συμβαίνουν επάνω στην επιφάνεια του ήλιου. Όταν η σωματιδιακή ακτινοβολία του ήλιου φτάνει στη γη προκαλεί το ζωδιακό φως και τις μαγνητικές καταιγίδες, τον λεγόμενο «ηλιακό άνεμο» που είναι υπεύθυνος για τις ζώνες ακτινοβολίας γύρω από τη γη.

2.2.2 Ακτινοβολία από πηγές του εδάφους

Η άλλη προέλευση φυσικής πηγής ραδιενέργειας είναι αυτή που ανακαλύφθηκε από τον Becquerel το 1896 σε ορυκτά Ουρανίου και αποτελείται από σωματίδια-α, σωματίδια-β και τις ακτίνες γ.

Τα πετρώματα και το έδαφος της γης περιέχουν μικρές ποσότητες των ραδιενεργών στοιχείων Ουράνιο και Θόριο μαζί με τα παράγωγά τους (ραδιενεργές σειρές που αναφέρθηκαν και άνωθεν). Η συγκέντρωση των στοιχείων στο έδαφος ποικίλει πολύ ανάλογα με το είδος του πετρώματος. Στον ασβεστόλιθο και στον ψαμμίτη, για παράδειγμα, η συγκέντρωση αυτή είναι πολύ πιο μικρή απ' ό,τι στο γρανίτη. Έτσι ο ρυθμός δόσης από αυτήν την πηγή εξαρτάται από την γεωγραφική θέση που γίνεται η μέτρηση. Άλλα μακρόβια ισότοπα όπως το ^{48}Ca ή το ^{50}V δεν συμβάλλουν ιδιαίτερα στη μέτρηση της ραδιενεργού δόσης γιατί υπάρχουν στη φύση σε πολύ μικρές ποσότητες.

2.2.3 Ραδιενέργεια στο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα περιέχει πολύ μικρές ποσότητες τω ραδιενεργών ισοτόπων ^{14}C και ^{40}K . Ο ^{14}C προέρχεται από την ατμόσφαιρα ενώ το ^{40}K εμφανίζεται φυσικά στο σώμα. Σημαντική για την ραδιενέργεια στο σώμα είναι και η συνεισφορά των αέριων προϊόντων αποσύνθεσης των σειρών του Ουρανίου και του Θορίου, το **Ραδόνιο** και το **Θορόνιο** αντίστοιχα. Αυτά τα αέρια διαχέονται από τα πετρώματα και το έδαφος και είναι παρόντα σε εύκολα μετρούμενες ποσότητες στην ατμόσφαιρα. Εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα με την εισπνοή και την τροφή. Το τελευταίο είναι προφανές αφού τα φυτά και τα ζώα εκτίθενται στα αέρια αυτά. Το ποσό της ραδιενέργειας που παίρνουμε με αυτόν τον τρόπο εξαρτάται φυσικά από τη διατροφή μας. Γενικά, τα γαλακτοκομικά προϊόντα, τα φρούτα και τα λαχανικά περιέχουν μικρές ποσότητες ραδιενέργειας ενώ τα δημητριακά μεγαλύτερες.

2.3 Τεχνητή ραδιενέργεια

Το 1919 ο Rutherford επέφερε την πρώτη προκληθείσα πυρηνική αντίδραση με τεχνητό τρόπο, όταν βομβάρδισε το συνηθισμένο αέριο αζώτου (άζωτο-14) με άλφα σωματίδια και διαπίστωσε ότι οι πυρήνες αζώτου συνέλαβαν τα άλφα σωματίδια και εξέπεμψαν τα πρωτόνια πολύ γρήγορα, διαμορφώνοντας ένα σταθερό ισότοπο του οξυγόνου, το οξυγόνο-17. Το 1933 ήταν που καταδείχθηκε ότι τέτοιες πυρηνικές αντιδράσεις θα μπορούσαν μερικές φορές να οδηγήσουν στο σχηματισμό των νέων ραδιενεργών πυρήνων. Οι Γάλλοι χημικοί Irene και Frederic Joliot-Curie προετοίμασαν την πρώτη τεχνητή ραδιενεργό ουσία το ίδιο έτος, όταν βομβάρδισαν το αργίλιο με άλφα σωματίδια. Οι πυρήνες αργιλίου συνέλαβαν τα άλφα σωματίδια και εξέπεμψαν έπειτα νετρόνια, με τον επακόλουθο σχηματισμό ενός



ισοτόπου του φωσφόρου, το οποίο αποσυντέθηκε λόγω εκπομπής ποζιτρονίων και που παρουσιάζει ένα μικρό χρόνο ημιζωής.

Οι Joliot-Curie παρήγαγαν επίσης ένα ισότοπο του αζώτου από το βόριο και ένα του αργιλίου από το μαγνήσιο. Από τότε πολλές πυρηνικές αντιδράσεις έχουν ανακαλυφθεί, και οι πυρήνες των στοιχείων σ' όλο τον περιοδικό πίνακα έχουν βομβαρδιστεί με διαφορετικά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένου των άλφα σωματιδίων, πρωτονίων, νετρονίων, και δευτερονίων (πυρήνες του δευτέρου, το ισότοπο υδρογόνου με μαζικό αριθμό=2). Ως αποτέλεσμα αυτής της εντατικής έρευνας, περισσότερες από 400 τεχνητές ραδιενέργειες είναι τώρα γνωστές. Αυτή η έρευνα έχει βοηθηθεί αποφασιστικά από την ανάπτυξη των επιταχυντών που επιταχύνουν τα σωματίδια που βομβαρδίζουν τους πυρήνες, με τεράστιες ταχύτητες και κατά συνέπεια αυξάνοντας σε πολλές περιπτώσεις την πιθανότητα της σύλληψής τους από τους πυρήνες-στόχους.

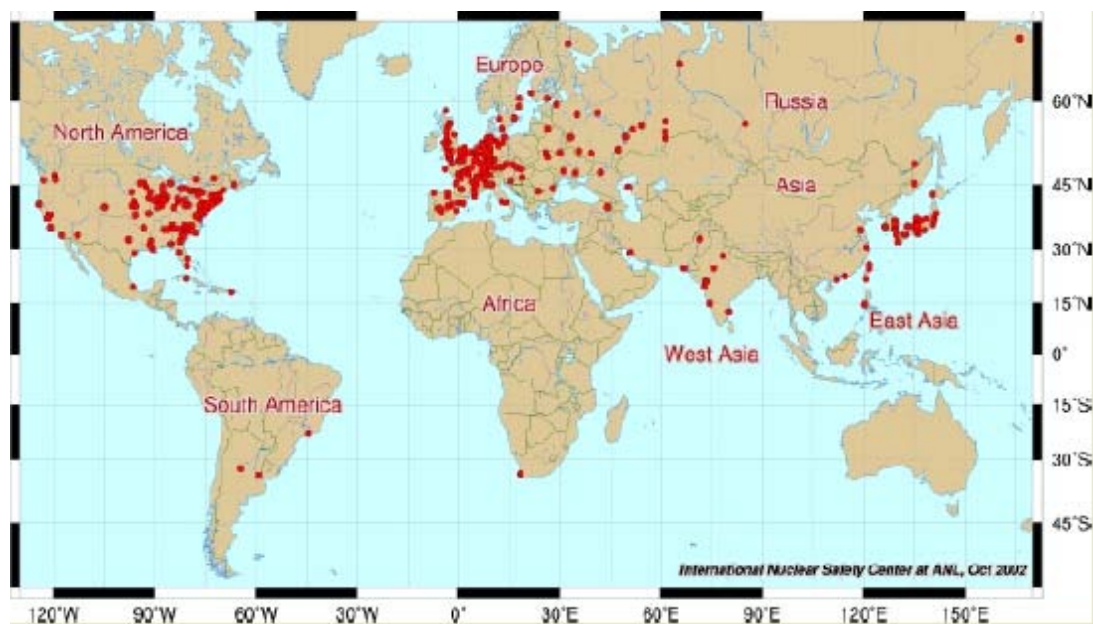
Η έντονη έρευνα για τις πυρηνικές αντιδράσεις και η αναζήτηση νέων τεχνητών ραδιενεργειών, ειδικά μεταξύ των βαρύτερων στοιχείων, ήταν υπεύθυνες για την ανακάλυψη της πυρηνικής διάσπασης και επομένως της ανάπτυξης της ατομικής βόμβας. Οι έρευνες έχουν οδηγήσει επίσης στην ανακάλυψη διάφορων νέων στοιχείων που δεν υπάρχουν στη φύση. Η ανάπτυξη των πυρηνικών αντιδραστήρων έχει καταστήσει πιθανή την παραγωγή σε μια μεγάλη κλίμακα των ραδιενεργών ισοτόπων σχεδόν όλων των στοιχείων του περιοδικού πίνακα, και η διαθεσιμότητα αυτών των ισοτόπων αποτελεί μια ανυπολόγιστη ενίσχυση στην χημική, στην βιολογική και τέλος στην ιατρική έρευνα. Από αυτά με τη μεγάλη σημασία μεταξύ των τεχνητά παραχθέντων ραδιενεργών ισοτόπων είναι ο άνθρακας-14, ο οποίος έχει χρόνο ημιζωής 5730 ± 40 έτη. Η διαθεσιμότητα αυτής της ουσίας έχει καταστήσει πιθανή την έρευνα πολυάριθμων πτυχών των διαδικασιών της ζωής, όπως είναι η φωτοσύνθεση με ένα πιο θεμελιώδη τρόπο από αυτόν που έως τώρα θεωρείτο πιθανόν.

Σε ανάλυση νετρονίου, ένα δείγμα μιας ουσίας γίνεται ραδιενεργό μέσα σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Διάφορες προσμίξεις που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με άλλα μέσα μπορούν έπειτα να βρεθούν με την ανίχνευση των ιδιαίτερων τύπων ραδιενεργειών που συνδέονται με τα ραδιοϊσότοπα αυτών των προσμίξεων. Άλλες εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων είναι στην ιατρική διαγνωστική και τη θεραπεία, τη βιομηχανική ακτινογραφία και συγκεκριμένες συσκευές όπως οι φωσφορίζουσες πηγές φωτός, οι στατικοί εξουδετερωτές, οι μετρητές πάχους, και οι πυρηνικές μπαταρίες.

3. Πυρηνικοί σταθμοί στον κόσμο και ατυχήματα

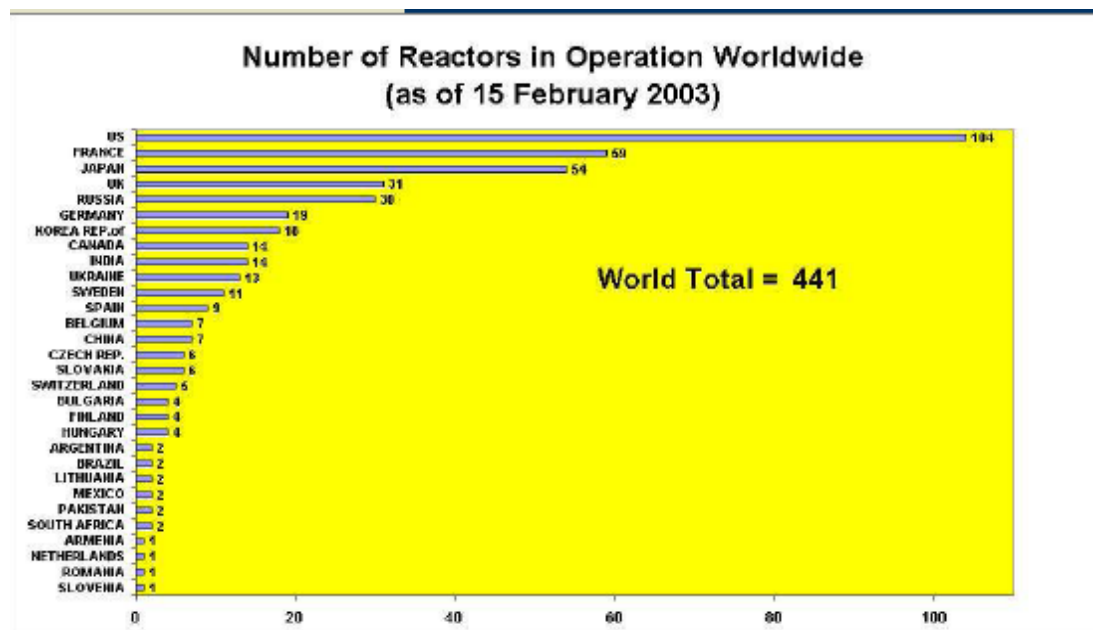
Μία από τις πλέον σημαντικές εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων είναι η χρήση τους σαν πυρηνικό καύσιμο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος. Ως πυρηνικό αντιδραστήρα ορίζουμε τη διάταξη στην οποία αποκαθίσταται αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με νετρόνια και έκλυση ενέργειας. Ο πρώτος στον κόσμο πυρηνικός αντιδραστήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στις 2/12/1942 στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο των Η.Π.Α. και το σύστημα αυτό ήταν ετερογενής διάταξη γραφίτη-φυσικού ουρανίου. Στο διάστημα εξήντα περίπου ετών από τότε έχουν κατασκευασθεί πάρα πολλοί πυρηνικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως η ηλεκτροπαραγωγή, η παραγωγή ραδιοϊσοτόπων.

Ακολουθεί σχηματικά η γεωγραφική κατανομή των πυρηνικών αντιδραστήρων σε όλες τις χώρες του κόσμου.



Εν συνεχεία παραθέτουμε αριθμητικά στοιχεία για τη λειτουργία πυρηνοληκτρικών σταθμών στον κόσμο.

NUCLEAR POWER PLANTS INFORMATION ..					IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF		0	0	2	2111
Operational & Under construction Reactors by Country					JAPAN		54	44267	3	3696
Country	Operational		Under Construction		LITHUANIA, REPUBLIC OF	2	2370	0	0	
	No. of Units	Total MW(e)	No. of Units	Total MW(e)						
ARGENTINA	2	935	1	692	MEXICO	2	1360	0	0	
ARMENIA	1	376	0	0	NETHERLANDS	1	450	0	0	
BELGIUM	7	5760	0	0	PAKISTAN	2	425	0	0	
BRAZIL	2	1901	0	0	ROMANIA	1	655	1	655	
BULGARIA	4	2722	0	0	RUSSIAN FEDERATION	30	20793	3	2825	
CANADA	14	10018	0	0	SLOVAK REPUBLIC	6	2408	2	776	
CHINA	7	5318	4	3275	SLOVENIA	1	676	0	0	
CZECH REPUBLIC	6	3468	0	0	SOUTH AFRICA	2	1800	0	0	
DEM. P.R. KOREA	0	0	1	1040	SPAIN	9	7574	0	0	
FINLAND	4	2656	0	0	SWEDEN	11	9432	0	0	
FRANCE	59	63073	0	0	SWITZERLAND	5	3200	0	0	
GERMANY	19	21283	0	0	UKRAINE	13	11207	4	3800	
HUNGARY	4	1755	0	0	UNITED KINGDOM	27	12052	0	0	
INDIA	14	2503	6	3622	UNITED STATES OF AMERICA	104	98230	0	0	
					Total:	437	358461	33	27112	



Είναι γεγονός ότι η επιστήμη σήμερα έχει ενσωματώσει πλήρη γνώση της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής, αλλά η εμπειρία που έχουμε αναπτύξει έχει σημαδευτεί από κυρίως τρία μεγάλα ατυχήματα στα πενήντα και πλέον χρόνια της ανάπτυξης της πυρηνικής τεχνολογίας. Το πρώτο ατύχημα συνέβη στο Windscale της Αγγλίας το 1957, το δεύτερο στο Three Mile Island των Η.Π.Α. το 1979 και το τρίτο και πλέον επικίνδυνο στο Chernobyl (μονάδα 4 του εργοστασίου) της Ε.Σ.Σ.Δ. το 1986. Η γνώση που εξήχθη από

τα ατυχήματα αυτά συνετέλεσε και συντελεί ακόμη στην βελτίωση της κατασκευής των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Στο Windscale οι ύψους 125 μέτρων καμινάδες εμπόδισαν σε μεγάλο βαθμό τη διαρροή, ενώ ακτίνα 500 τετραγωνικών χιλιομέτρων ρυπάνθηκε από τις ραδιενεργές αποθέσεις. Συγκεκριμένα η υψηλή δόση του ραδιοϊσοτόπου I-131 επέβαλε στις αρχές την απαγόρευση της κατανάλωσης γάλακτος. Επίσης ένας εργαζόμενος εκτέθηκε σε δόση 46mSv, ενώ η ετήσια δόση του φυσικού υποστρώματος είχε καθοριστεί τότε στα 2mSv.

Όσον αφορά στο ατύχημα του Three Mile Island, παρά τη σοβαρότητά του, καθώς επήλθε τήξη του ενός τρίτου του πυρήνα του αντιδραστήρα, η διαρροή ραδιενέργειας λόγω περιβλήματος ήταν πολύ περιορισμένη και ανήλθε περίπου στο 1/40.000 αυτής του Chernobyl και το 1/400 αυτής του Windscale.

Από την έκρηξη του πυρηνικού σταθμού στο Chernobyl διέρρευσαν τα ευγενή αέρια Kr-85, Xe-135, το 20% του Cs-137 του πυρήνα και το 5% των Sr-89, Sr-90 και Pu-239. Η συνολική διαρροή ραδιενέργειας ήταν 4×10^{18} Bq, ποσότητα ίση με τετρακόσιες φορές την ενέργεια που ελευθερώθηκε από την έκρηξη της βόμβας στη Χιροσίμα το 1945.

Παρακάτω παραθέτουμε έναν χαρακτηριστικό πίνακα του μεγέθους της ραδιενέργειας που απελευθερώθηκε από το ατύχημα εν συγκρίσει με τις πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα και τη φυσική ραδιενέργεια.

Σύγκριση Συνεπειών Ατμοσφαιρικών
Πυρηνικών Δοκιμών(1945-80), Πυρηνικού Ατυχήματος
Chernobyl (1986) και Λύσεων από Φυσική Ραδιενέργεια

Μέγεθος	Πυρηνικές Δοκιμές	Ατύχημα Chernobyl
Συνολική έκλυση Ραδιενέργειας 10^{18} Bq		
Στρόντιο - 90	0.85	0.0074
Ιώδιο - 131	910	0.27
Καίσιο - 134	-	0.018
Καίσιο - 137	1.3	0.033
Μέση εναπόθεση Καίσιου - 137 $kBq m^{-2}$		
Ευρωπαϊκή Ζώνη, Ευρώπη	5.2	0.01-15
Αυστρία	5.2	15
Ιταλία	5.6	4.4
Ελλάδα	4.2	8
Μέση εναπόθεση στην Ελλάδα $kBq m^{-2}$		
Στρόντιο - 90	2.7	<0.5
Σιρκόνιο - 95	35	3
Ρουθένιο - 106	20	6
Δημήτριο - 144	40	2.5
Μέσες Δόσεις στην Ελλάδα μέχρι το 2000 μSv		
Εισπονή Υπερουρανίων	80	1
Εξωτερική Ακτινοβολία	1000	<200
Σύνολο	2000	<700

Δόσεις από φυσική Ραδιενέργεια: 2000 μSv κάθε χρόνο

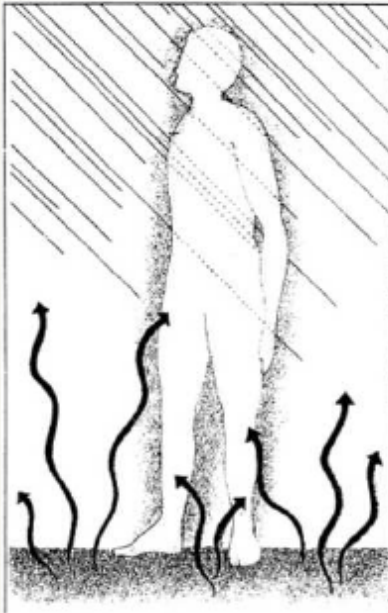
4. Ραδιοβιολογικές επιπτώσεις στον άνθρωπο

4.1 Ακτινοβολήση του ανθρώπινου σώματος

Ο άνθρωπος βρίσκεται συνεχώς εκτεθειμένος σε ραδιενέργεια που προέρχεται κυρίως από την κοσμική ακτινοβολία και σε μικρότερο ποσοστό από τα ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στη φύση. Ωστόσο όπως προείπαμε, η ραγδαία αύξηση της πυρηνικής τεχνολογίας τον τελευταίο μισό αιώνα τόσο στην παραγωγή ενέργειας όσο και στην πολεμική βιομηχανία, έχει αυξήσει κατά πολύ το επίπεδο ραδιενέργειας που δέχεται ο πληθυσμός στη γη. Οι βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας μετρώνται από την ισχύ της να προκαλεί ιονισμό στην ατμόσφαιρα και σε βιολογικούς ιστούς. Καθώς σωματίδια α , β ή ακτίνες γάμμα διέρχονται μέσα από την ύλη, χάνουν ενέργεια μέσω διαφόρων γνωστών μηχανισμών και προκαλούν τη διάσπαση μοριακών δεσμών και τη δημιουργία ιόντων. Το αποτέλεσμα της δράσης στους βιολογικούς ιστούς, εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και το χρόνο της έκθεσης και μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ασθένειες ή ακόμη και το θάνατο, με ποικιλία μηχανισμών, μεταξύ των οποίων είναι η μαζική καταστροφή των κυττάρων του οργανισμού, η μεταβολή του γενετικού υλικού και καταστροφή των συστατικών του μυελού των οστών που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή των ερυθρών αιμοσφαιρίων.

Ε-ΠΤ

Εξωτερική Ακτινοβόληση



- Από την κοσμική ακτινοβολία
- Από έκθεση σε ραδιενεργό νέφος
- Από έκθεση σε πηγές ραδιενέργειας μέσα ή έξω από θωρακίσεις
- Από φυσικά ραδιοϊσότοπα που βρίσκονται στο έδαφος ή τεχνητά ραδιοϊσότοπα που έχουν πέσει στο έδαφος (ραδιενεργός εναπόθεση - fallout).

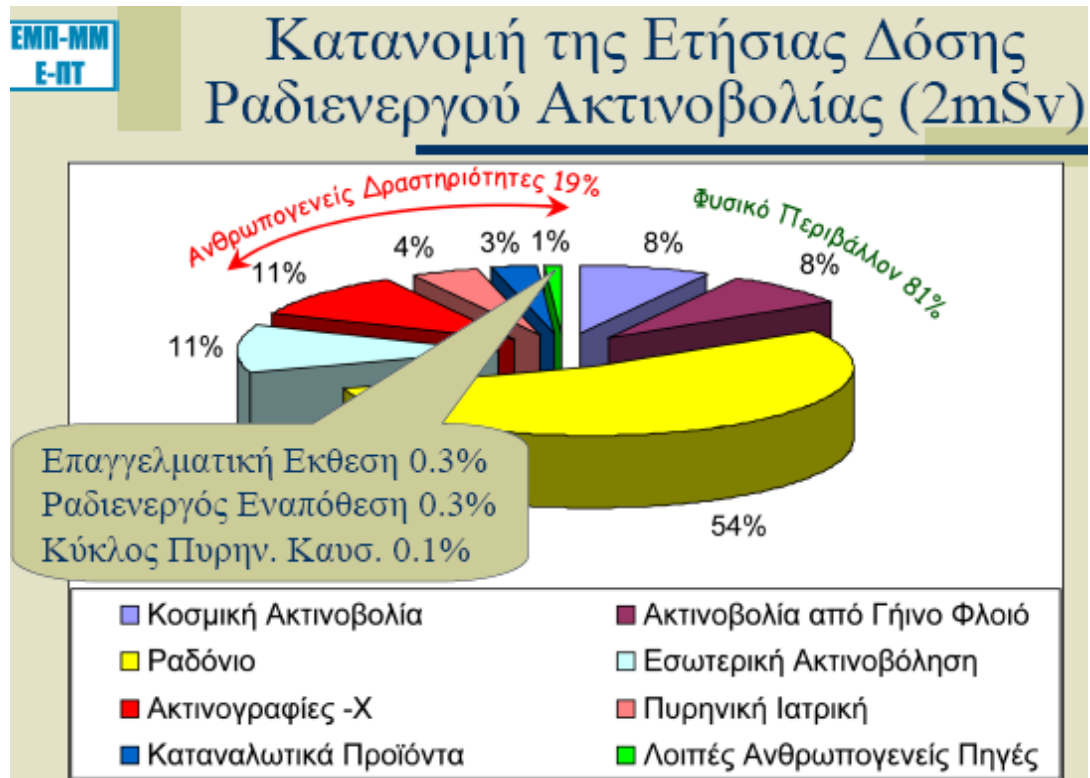
ΕΜΠ-ΜΜ
Ε-ΠΤ

Εσωτερική Ακτινοβόληση



- Εξαιτίας της εισπνοής ραδιενεργών ισοτόπων
- Εξαιτίας της κατάποσης ραδιενεργών ισοτόπων
- Εξαιτίας της θεραπείας με ραδιοφάρμακα

Πιο κάτω φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή της απορροφημένης δόσης από τον άνθρωπο εξ' αιτίας όλων των παραγόντων.

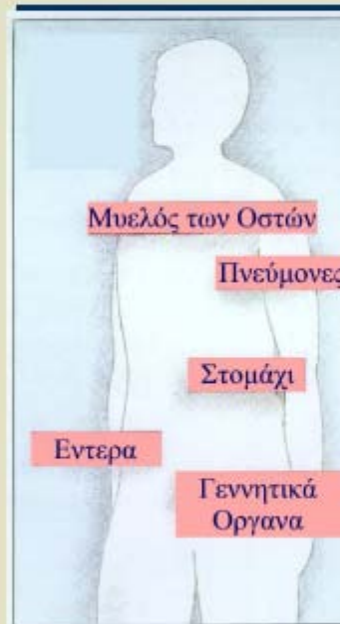


Ακολουθούν σχηματικά οι συνέπειες από την απορρόφηση ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα.



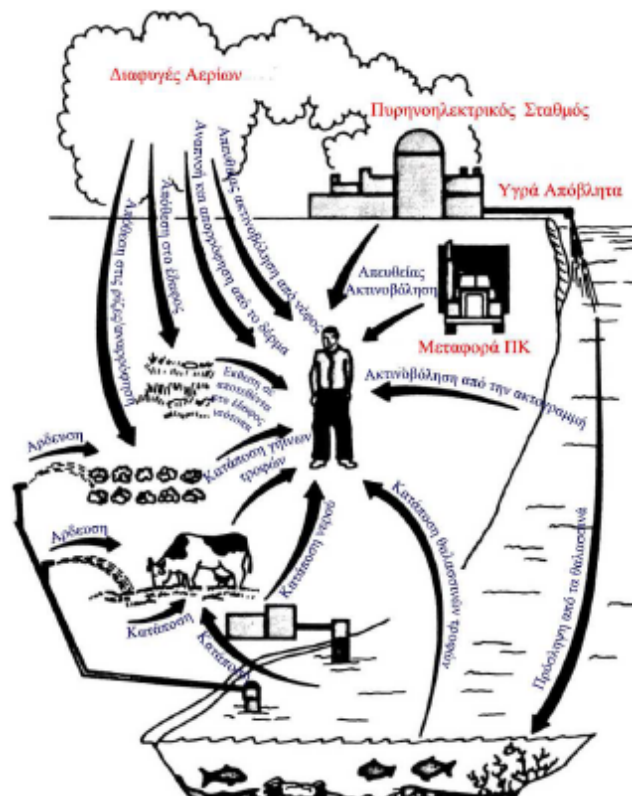
ΕΜΠ-ΜΜ
Ε-ΠΤ

Όργανα του Ανθρώπινου Σώματος ευαίσθητα στις Ακτινοβολίες



Παρουσιάζουμε τώρα τις συνέπειες της πιθανής διαφυγής ραδιοϊσοτόπων στον άνθρωπο, μέσω της τροφικής αλυσίδας και τις ραδιοοικολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας.





ΕΜΠ-ΜΜ
Ε-ΠΤ

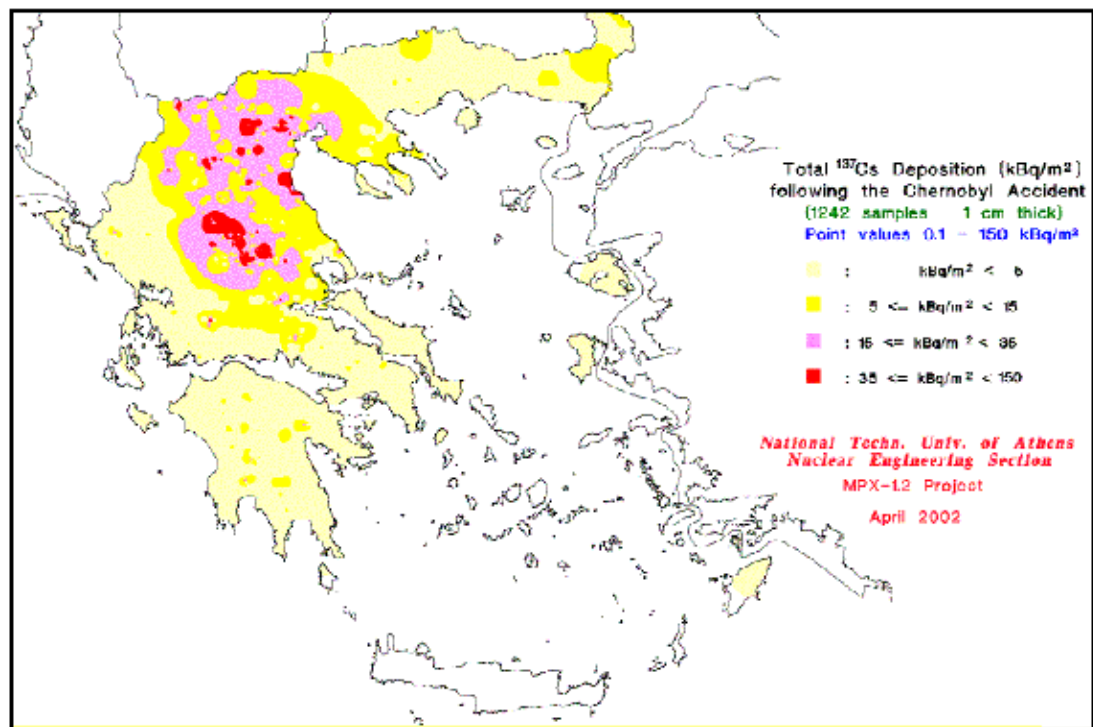
Τα Κυριότερα Ισότοπα ως προς την Τροφική Αλυσίδα

Ισότοπο	$T_{1/2}$	Παρατηρήσεις
Sr-90	28 y	Συγκεντρώνεται στο γάλα μέσω της χορτοζωοτροφής. Συγγενές προς το ασβέστιο, εγκαθίσταται στα οστά. Υψηλή ραδιοτοξικότητα.
I-131	8 d	Συγκεντρώνεται στο γάλα μέσω της χορτοζωοτροφής. Έχει σημασία για 2-3 εβδομάδες. Συγκεντρώνεται κυρίως στο θυρεοειδή. Εκπνέεται γρήγορα.
Cs-137	30 y	Συγκεντρώνεται στο γάλα και το κρέας μέσω της χορτο-ζωοτροφής. Συγγενές προς το Κάλιο. Εγκαθίσταται σε μαλακούς ιστούς, όπως το στομάχι και το παχύ έντερο. Βιολογική ημιζωή περί τις 110d.

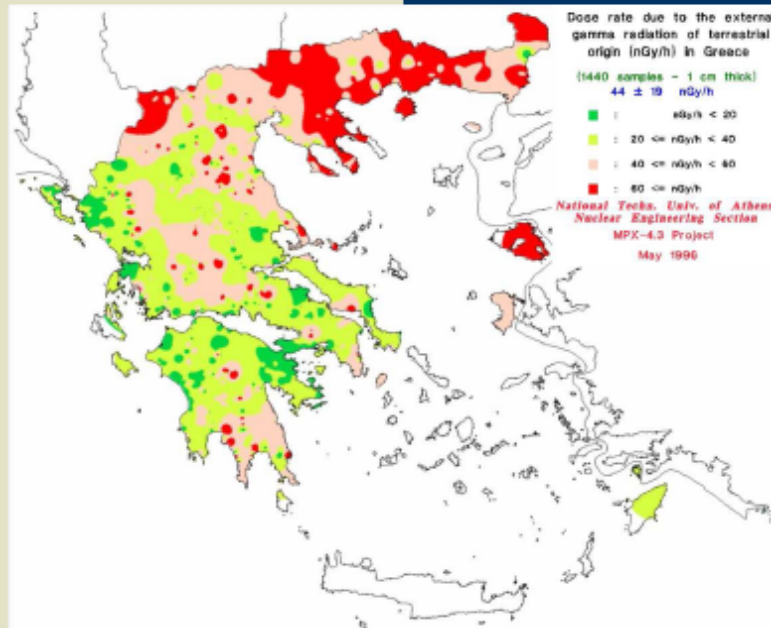
Αξίζει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο τα σημαντικότερα ραδιοϊσότοπα που μετέφερε το ραδιενεργό νέφος στην Ελλάδα μετά το ατύχημα στο Chernobyl, καθώς και τις εναποθέσεις του ισότοπου Cs-137 στον ελλαδικό χώρο.

Isotope	Sample size	Geographical Mean $\pm 1\sigma$ (kBq/m ²)	Arithmetic Mean $\pm 1\sigma$ (kBq/m ²)	Maximum detected Ground Activity $\pm 1\sigma$ (kBq/m ²)
¹³⁷ Cs	1231	8 ± 10	12 ± 21	149.5 ± 0.1
¹³⁴ Cs	1211	4 ± 5	6 ± 10	76.1 ± 0.1
¹²⁵ Sb	940	0.4 ± 0.3	0.6 ± 0.7	4.56 ± 0.02
¹⁰⁶ Ru	787	6 ± 5	10 ± 11	79.1 ± 0.1
¹⁴⁴ Ce	499	2.5 ± 2	4 ± 5	32.9 ± 0.2
^{110m} Ag	467	0.8 ± 0.8	0.5 ± 0.6	7.98 ± 0.02
⁵⁴ Mn	409	0.5 ± 0.5	0.2 ± 0.4	3.02 ± 0.02
⁹⁵ Zr	127	3 ± 3	5 ± 4	20.1 ± 0.2
¹⁰³ Ru	84	103 ± 80	147 ± 74	337 ± 2
¹⁴¹ Ce	46	13 ± 12	21 ± 13	46 ± 2

Table 1. Ground activities of Chernobyl fallout isotopes following the analysis of 1242 samples (decayed down to May 1st, 1986)



Δοσιμετρία –γ Φυσικού Υποστρώματος



Φυσική –γ :
0.5 mSv/yr

Chernobyl –
Καρδίτσα
0.4 mSv/yr

Μέση Τιμή
Συνολικά
στη Γη
2 mSv/yr

4.2 Δοσιμετρία

4.2.1 Μεγέθη δοσιμετρίας

Οφείλουμε τέλος να ορίσουμε ποσοτικά τα μεγέθη μέτρησης της επίδρασης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη.

Ως **ενεργειακή δόση D**, ορίζεται η ενέργεια ακτινοβολίας W_D που απορροφάται από όγκο ύλης V και πυκνότητας ρ :

$$D = \frac{dW_D}{\rho dV}$$

Μονάδα μέτρησης της ενεργειακής δόσης είναι:

1 rad = 10^{-2} J/kg

1 gray = 1 J/kg

Η **δόση ιοντισμού** D_i δίδεται από τη σχέση του φορτίου Q που απελευθερώνεται λόγω ακτινοβολίας στον αέρα με πυκνότητα ρ_A :

$$D_i = \frac{dQ}{\rho_A dV}$$

Μονάδα μέτρησης της δόσης ιοντισμού είναι το Roentgen (R):
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{kg} \text{ αέρα})$

Η δόση ιοντισμού 1 R στον αέρα αντιστοιχεί με τον αριθμό $1R/e = 1.61 \times 10^{15}$ ιόντα/Kg και με μια ενεργειακή δόση $1R \cdot W_i/e$, όπου W_i είναι η μέση ενέργεια επίδρασης που απαιτείται για την απελευθέρωση ενός ζεύγους ιόντος-ηλεκτρονίου στον αέρα.

Η **ισοδύναμη δόση** D_q είναι το μέτρο της επίδρασης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών επάνω στο ανθρώπινο σώμα. Ορίζεται από τη σχέση:

$$D_q = qD,$$

όπου q είναι ο ποιοτικός παράγοντας της βιολογικής επίδρασης των διαφόρων τύπων των ακτινοβολιών επάνω στο βιολογικό ιστό. Η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το Rem (=Roentgen equivalent mass):

$$1 \text{ Rem} = q \text{ 1rad}$$

Πλέον, μονάδα ισοδύναμης δόσης στο σύστημα SI είναι το Sievert (Sv), με τη σχέση ισοδυναμίας:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem.}$$

Ο ποιοτικός παράγοντας q έχει περίπου τις τιμές $q=1$ για ακτίνες γ και ηλεκτρόνια, $q=10$ για σωματίδια α , πρωτόνια και δευτέρια, $q=20$ για βαρείς πυρήνες και $2 < q < 10$ για νετρόνια, ανάλογα με την κινητική τους ενέργεια.

4.2.2 Μέγιστες επιτρεπτές δόσεις

Η επιστημονική ένωση ICRP ιδρύθηκε το 1928 από το δεύτερο διεθνές συνέδριο ραδιολογίας (ICR). Από την ίδρυσή της είναι το μόνο διεθνές σώμα που προτείνει τιμές για τη μέγιστη επιτρεπτή έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Η ICRP διακρίνει δύο είδη αποτελεσμάτων που μπορεί να προκληθούν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες, τα **στοχαστικά** και τα **μη στοχαστικά**.

Τα στοχαστικά αποτελέσματα είναι εκείνα για τα οποία η πιθανότητα εμφάνισής τους και όχι η σοβαρότητά τους είναι συνάρτηση της δόσης χωρίς την ύπαρξη κατωφλίου, όπως η εμφάνιση καρκίνου.

Τα μη στοχαστικά αποτελέσματα είναι εκείνα για τα οποία η σοβαρότητά τους είναι συνάρτηση της δόσης και για τα οποία υπάρχει κάποιο κατώφλι. Παράδειγμα τέτοιων αποτελεσμάτων είναι ο καταρράκτης των ματιών και οι βλάβες στα αιμοσφαίρια και τη γονιμότητα.

Για την αποφυγή των μη στοχαστικών αποτελεσμάτων το ετήσιο όριο ισοδύναμης δόσης για όλους τους ιστούς έχει τεθεί ίσο με 0.5 Sv, εκτός από το φακό του ματιού που το ετήσιο όριο είναι 0.3 Sv. Για τον περιορισμό των στοχαστικών αποτελεσμάτων το ετήσιο όριο ισοδύναμης δόσης για ομοιόμορφη ακτινοβολήση όλου του σώματος είναι ίσο με 50 mSv. Για την περίπτωση μη ομοιόμορφης ακτινοβολήσης του σώματος έχουν τεθεί κάποιοι παράγοντες βάρους για κάθε όργανο που αντιστοιχούν στη βλάβη που προκαλεί η ακτινοβολήσή του. Η σχέση που συνδέει τις ετήσιες ισοδύναμες δόσεις των διάφορων ιστών με αυτή ολόκληρου του σώματος είναι η ακόλουθη:

$$\sum_T w_T \cdot H_T \leq H_{wb,L},$$

όπου w_T είναι ο συντελεστής βάρους του ιστού T, H_T είναι η ετήσια ισοδύναμη δόση του ιστού T και $H_{wb,L}$ είναι το προτεινόμενο ετήσιο όριο ισοδύναμης δόσης για ομοιόμορφη ακτινοβολήση ολόκληρου του σώματος, δηλαδή τα 500 mSv.

Οι συντελεστές βάρους δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ιστός	w_T
Γονάδες	0.25
Στήθος	0.15
Κόκκινος μυελός των οστών	0.12
Πνεύμονας	0.12
Θυρεοειδής	0.03
Επιφάνεια οστών	0.03
Υπόλοιπα	0.30

5. Φορείς διασφάλισης «ειρηνικής» χρήσης της πυρηνικής ενέργειας

Η συνθήκη Euratom, η οποία θεσπίστηκε αρχικά για τον συντονισμό των ερευνητικών προγραμμάτων των κρατών με στόχο την «ειρηνική» χρήση της πυρηνικής ενέργειας, συμβάλλει σήμερα στην από κοινού χρήση των γνώσεων, των υποδομών και των χρηματοδοτικών πόρων της πυρηνικής ενέργειας. Διασφαλίζει, επίσης, την ασφάλεια εφοδιασμού με ατομική ενέργεια στο πλαίσιο κεντρικού συστήματος ελέγχου.

5.1 Ιστορικό

Η ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Άνθρακα και Χάλυβα ([EKAX](#)) τον Ιούλιο του 1952, αποτελεί το πρώτο σημαντικό επίτευγμα της υπερεθνικής Ευρώπης. Για πρώτη φορά, τα έξι κράτη μέλη εκχώρησαν, αν και σε ένα αναμφισβήτητα περιορισμένο τομέα, ένα μέρος των εθνικών κυριαρχικών δικαιωμάτων τους υπέρ της Κοινότητας. Τα όρια της πρώτης αυτής προσπάθειας ολοκλήρωσης έγιναν γρήγορα αισθητά με την αποτυχία της Ευρωπαϊκής Αμυντικής Κοινότητας (ΕΑΚ), το 1954. Ενώ υπήρχε φόβος να μην τελεσφορήσει η προσπάθεια που αναλήφθηκε από την EKAX, η Διάσκεψη της Μεσσήνης, τον Ιούνιο του 1955, επεδίωξε να δώσει νέα ώθηση στην ευρωπαϊκή διαδικασία. Μετά τη διάσκεψη αυτή, ακολούθησε σειρά συνεδριάσεων σε επίπεδο υπουργών ή εμπειρογνομώνων. Στις αρχές του έτους 1956, συγκροτήθηκε προπαρασκευαστική επιτροπή με αποστολή την κατάρτιση έκθεσης σχετικής με τη δημιουργία ευρωπαϊκής κοινής αγοράς. Η επιτροπή αυτή συνεδρίαζε στις Βρυξέλλες υπό την προεδρία του τότε Βέλγου υπουργού Εξωτερικών, P.H. Spaak. Τον Απρίλιο του 1956, η εν λόγω επιτροπή πρότεινε δύο σχέδια που αντιστοιχούσαν στις δύο επιλογές των κρατών:

- 1) τη δημιουργία μιας γενικευμένης κοινής αγοράς
- 2) τη δημιουργία μιας κοινότητας ατομικής ενέργειας

Τον Μάρτιο του 1957, υπογράφηκαν στη Ρώμη οι γνωστές «συνθήκες της Ρώμης». Η πρώτη ίδρυσε την Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα ([ΕΟΚ](#)) και η δεύτερη την Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας, περισσότερο γνωστή ως Euratom.

Δεδομένου ότι δεν σημειώθηκαν προβλήματα κατά τη διαδικασία κύρωσης αυτών των συνθηκών στα διάφορα κράτη μέλη, οι δύο αυτές συνθήκες τέθηκαν σε ισχύ την 1^η Ιανουαρίου 1958.

5.2 Τα άρθρα 35 και 36 της συνθήκης Euratom

Το άρθρο 36 της συνθήκης Euratom ορίζει ότι οι αρμόδιες αρχές κάθε κράτους μέλους της Ευρωπαϊκής Ένωσης οφείλουν να επικοινωνούν περιοδικά και να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τους ελέγχους που διενεργούνται σύμφωνα με τις υποδείξεις του άρθρου 35, για τα επίπεδα της ραδιενέργειας στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο θα ενημερώνεται και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα επίπεδα της ραδιενέργειας στα οποία εκτίθενται ο πληθυσμός της Ευρώπης.

«ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ 36 ΤΗΣ ΣΥΝΘΗΚΗΣ ΕΥΡΑΤΟΜ»

Η Ευρωπαϊκή επιτροπή

Έχοντας υπόψη τη συνθήκη για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (ΕΚΑΕ) και συγκεκριμένα τα άρθρα 124 και 36,

Έχοντας επίσης συμβουλευτεί την ομάδα επιστημόνων που προσελήφθη για το σκοπό αυτόν και σε συμφωνία με το άρθρο 31 της συνθήκης Euratom της Επιστημονικής και Τεχνικής Επιτροπής,

Εκτιμώντας ότι:

1. Το άρθρο 35 της συνθήκης Euratom απαιτεί από το κάθε κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης να κατασκευάσει τις απαραίτητες εγκαταστάσεις και τα έργα υποδομής έτσι ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής μέτρηση των επιπέδων της ραδιενέργειας στον αέρα, στο νερό και στο υπέδαφος και να εξασφαλίσει τη σύμπτωση με τα βασικά πρότυπα.
2. Έχει συσσωρευτεί θετική πείρα από την εφαρμογή του άρθρου 36 της συνθήκης. Είναι τρέχουσα πρακτική της Επιτροπής η έκδοση ετήσιων αναφορών των ελέγχων, βάσει των ποιοτικών δεδομένων που συγκέντρωσε η Επιτροπή σε εφαρμογή των άρθρων 36 και 39. Η Επιτροπή θα πρέπει να συνεχίσει να εκδίδει τις αναφορές αυτές.

ΜΕ ΤΟ ΠΑΡΟΝ ΕΓΓΡΑΦΟ ΣΥΣΤΗΝΕΙ:

- 1) Προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις υποχρεώσεις τους, τα κράτη-μέλη, θα πρέπει να ανταλλάσσουν περιοδικά πληροφορίες για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του επιπέδου της ραδιενέργειας, που οφείλουν να εκτελούν υπό τις προϋποθέσεις του άρθρου 35 της συνθήκης και να προωθούν στην Επιτροπή τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε μορφή όπως αυτή του Παραρτήματος 1, μέσα στα χρονικά πλαίσια που ορίζονται στο 5.c). Σε περίπτωση υψηλής συγκέντρωσης κάποιου ραδιονουκλιδίου που δεν συμπεριλαμβάνεται στο Παράρτημα 1, θα πρέπει να επισυνάπτονται και οι απαραίτητες πληροφορίες για αυτό.
- 2) Για τους σκοπούς της Σύστασης αυτής, ισχύουν τα εξής:
 - a) Ο «συνεχής έλεγχος» αφορά στην ύπαρξη και εφαρμογή ενός συνεχούς μετρητικού προγράμματος. Ανάλογα με το ελεγχόμενο μέγεθος, αυτό επιτυγχάνεται καταλλήλως μέσω:
 - I. Συνεχών δειγματοληψιών και αξιολόγησης
 - II. Συνεχών δειγματοληψιών και περιοδικής αξιολόγησης

III. Περιοδικών δειγματοληψιών και περιοδικής αξιολόγησης

IV. Άμεσης συνεχούς μέτρησης

- b) Με τον όρο «εγκαταστάσεις» εννοείται το πρόγραμμα μετρήσεων, η άμεση μέτρηση και ο εξοπλισμός δειγματοληψίας και ανάλυσης δεδομένων (συμπεριλαμβανομένου του ποιοτικού ελέγχου και της αναφοράς και αρχειοθέτησης των δεδομένων). Συμπεριλαμβάνονται επίσης τα απαραίτητα εργαστήρια που διεξάγουν συνεχείς ελέγχους των επιπέδων της ραδιενέργειας.
- c) Το «δίκτυο μετρήσεων» υποδηλώνει τον συνδυασμό του κάθε μεγέθους του δείγματος και των τόπων των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο του συγκεκριμένου μεγέθους.
- d) «πυκνό δίκτυο μετρήσεων» αφορά το δίκτυο που περιλαμβάνει δειγματοληπτικούς σταθμούς κατανομημένους σε όλη την επικράτεια του κράτους-μέλους έτσι ώστε να επιτρέπεται στην Επιτροπή να υπολογίζει περιφερειακούς μέσους όρους για τα ραδιενεργά επίπεδα στην Κοινότητα.
- e) «αραιό δίκτυο μετρήσεων» αφορά το δίκτυο ελέγχου που περιλαμβάνει για κάθε περιοχή και για κάθε δειγματικό μέσο, τουλάχιστον έναν αντιπροσωπευτικό σταθμό για το μετρούμενο μέγεθος. Σε αυτές τις περιοχές θα πρέπει να γίνονται μετρήσεις υψηλής ακριβείας ούτως ώστε να δίνονται αντιπροσωπευτικές παρουσιάσεις και γραφήματα των πραγματικών επιπέδων ραδιενέργειας.
- f) Με τον όρο «περιοχή» εννοείται κάθε αντιπροσωπευτική περιοχή ενός κράτους-μέλους για την αξιολόγηση της ραδιολογικής έκθεσης του πληθυσμού σαν σύνολο, λαμβάνοντας υπόψη την ραδιολογική επίδραση των εκπομπών, την περιβαλλοντική δόση και τη κατανομή του

πληθυσμού. Οι περιοχές που γίνεται λήψη δεδομένων για την Επιτροπή δίνονται στο Παράρτημα 2.

- 3) Τα κράτη-μέλη πρέπει να ειδοποιούν την Επιτροπή για τις αρμόδιες αρχές που αναφέρονται στο άρθρο 36 της συνθήκης.
- 4) Οι ακόλουθες προϋποθέσεις πρέπει να καλυφθούν:

a) Δίκτυα μετρήσεων

- I. Κάθε κράτος-μέλος θα πρέπει να καθορίσει αντιπροσωπευτικές περιοχές στην επικράτειά του.
- II. Κάθε κράτος-μέλος θα πρέπει να καθορίσει για κάθε τύπο μεγέθους ένα αραιό και ένα πυκνό δίκτυο μετρήσεων.
- III. Οι περιοχές που περιλαμβάνει ένα δίκτυο πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές της γεωγραφικής κατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη ει δυνατόν, την πληθυσμιακή κατανομή.

b) Δειγματοληπτικά μεγέθη, είδη μετρήσεων και περιοδικότητα

- I. Τα δειγματοληπτικά μεγέθη και τα είδη των μετρήσεων είναι καταγεγραμμένα στο Παράρτημα 1. Εκτός και αν αποσαφηνίζεται διαφορετικά στην Σύσταση αυτή, οι μετρήσεις προτιμάται να παίρνονται από το αραιό δίκτυο μετρήσεων σε μηνιαία βάση και στο πυκνό δίκτυο κάθε τρεις μήνες.
- II. Για το αραιό δίκτυο ελέγχου, τα ανιχνευτικά όρια και η ευαισθησία των μετρητικών συσκευών θα πρέπει να επιτρέπουν τη μέτρηση των πραγματικών επιπέδων ραδιενέργειας.
- III. Για το πυκνό δίκτυο ελέγχου τα ανιχνευτικά όρια των μετρητικών συσκευών θα πρέπει να είναι χαμηλότερα από τα επίπεδα των αναφορών στο Παράρτημα 3.

- IV. Τα κράτη-μέλη πρέπει να ενημερώνουν την Επιτροπή για τα ανιχνευτικά όρια και την αβεβαιότητα που πάρθηκε υπόψη στις μετρήσεις.
- V. Τα κράτη-μέλη πρέπει επίσης να διατηρούν τις τεχνικές μέτρησης που έχουν αποδειχθεί αξιόπιστες και να διασφαλίζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων.
- VI. Τα εργαστήρια των κρατών-μελών που εφοδιάζονται με δεδομένα υπό τους όρους της Σύστασης αυτής θα πρέπει περιοδικά να συμμετέχουν σε διακρατικές «ασκήσεις», ιδιαίτερα σε εκείνες που διοργανώνονται από την Επιτροπή ούτως ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα των δεδομένων που ανακτώνται.

c) **Μέθοδοι δειγματοληψίας και μετρήσεων για το κάθε δειγματοληπτικό μέγεθος**

- I. Μικροσωματίδια αιωρούμενα στον αέρα (αεροζόλ)

Οι μετρήσεις των ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν γ ακτινοβολία θα πρέπει να εκτελούνται σε τακτική βάση για να εντοπίζονται και να προσμετρούνται τόσο η τεχνητή όσο και η φυσική ραδιενέργεια. Ξεχωριστή σημασία πρέπει να δοθεί στο ισότοπο του Βηρυλλίου (Be-7), το οποίο πρέπει να αξιοποιείται στα πλαίσια του ποιοτικού ελέγχου των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Επίσης θα πρέπει να αναφέρεται οποτεδήποτε εντοπίζεται ολική (total-gross) βήτα ακτινοβολία.

Οι σταθμοί δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι πλησίον πυκνοκατοικημένων περιοχών. Η επαρκής γεωγραφική κάλυψη μπορεί να διασφαλιστεί με την επιλογή τουλάχιστον ενός σταθμού ανά γεωγραφική «περιοχή».

Η δειγματοληψία θα πρέπει να εκτελείται από συστήματα με αδιάλειπτη λειτουργία.

- II. Η εξωτερική σφαιρική γ δόση ακτινοβολίας (ambient gamma) θα πρέπει να μετράται συνεχώς. Δεν έχει καθοριστεί κάποιο επίπεδο αναφοράς.
- III. Επιφανειακά νερά

Τα δείγματα πρέπει να λαμβάνονται από κύριους υδροφόρους ορίζοντες στην επικράτεια του κάθε κράτους-μέλους και εάν είναι δυνατό από παρόχθιες περιοχές.

Στην περίπτωση νερών από ποτάμια, η δειγματοληψία πρέπει να διενεργείται, όπου είναι πρακτικό, σε περιοχές για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις του ρυθμού της βροχόπτωσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να αναφέρεται ο μέσος όρος του ρυθμού κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, έτσι ώστε να βελτιώνει την αντιπροσωπευτικότητα των μέσων τιμών που υπολογίζονται από την Επιτροπή.

Θα πρέπει να ελέγχονται τα ραδιονουκλίδια που έχουν γ ακτινοβολία. Όπου υπάρχει καταγεγραμμένη εναπομένουσα (residual) βήτα ακτινοβολία, αυτό θα πρέπει επίσης να αναφέρεται.

- IV. Νερό που προορίζεται για κατανάλωση

Ο έλεγχος των επιπέδων της ραδιενέργειας στο πόσιμο νερό θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να διασφαλίζεται η συμφωνία με τις απαιτήσεις της κοινοτικής οδηγίας 98/83.

Για το σκοπό της τήρησης των όρων του άρθρου 36 της συνθήκης Euratom, οι τιμές που θα αναφέρονται

για τα κύρια υπόγεια ή επιφανειακά υδροφόρα αποθέματα και για τα οικιακά υδάτινα δίκτυα θα πρέπει να διασφαλίζουν την αντιπροσωπευτική κάλυψη του κράτους-μέλους.

Θα πρέπει να αναφέρονται επίσης οι αντίστοιχοι ετήσιοι όγκοι του παραγόμενου ή διανεμημένου νερού, για τη βελτίωση της αντιπροσωπευτικότητας των μέσων τιμών που υπολογίζονται από την Επιτροπή.

V. Γάλα

Τα δείγματα του γάλακτος θα πρέπει να παίρνονται από γαλακτοκομεία. Τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία του ρυθμού παραγωγής θα πρέπει να αναφέρονται για τη διασφάλιση της αντιπροσωπευτικότητας των μέσων τιμών που υπολογίζονται από την Επιτροπή. Η γεωγραφική κάλυψη των γαλακτοκομείων θα πρέπει να είναι αποδοτική για την εξασφάλιση των σωστών αποτελεσμάτων ανά την επικράτεια του κάθε κράτους-μέλους.

Πρέπει να ελέγχονται τα στοιχεία που έχουν γ ακτινοβολία και το Στρόντιο (Strontium Sr-90). Ακόμη, οι τιμές από το Κάλιο (Potassium K-40) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν στοιχεία ποιοτικού ελέγχου των χρησιμοποιούμενων μεθόδων.

VI. Μεικτή διαίτα

Λόγω του εμπορίου τροφίμων η μεικτή διαίτα δεν είναι απαραίτητα αντιπροσωπευτική της γεωγραφικής ή της εθνικής περιβαλλοντικής ρύπανσης, αλλά είναι ένας χρήσιμος δείκτης της έκθεσης του πληθυσμού.

Όπου είναι κατάλληλο, θα πρέπει να μετρώνται τα ξεχωριστά συστατικά των τροφίμων. Σε αυτή την περίπτωση το κράτος-μέλος θα πρέπει να αναφέρει στην Επιτροπή τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ξεχωριστών συστατικών και τη σύνθεση της δίαιτας. Το δειγματοληπτικό πρόγραμμα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις γεωγραφικές μεταβολές στις διατροφικές συνήθειες. Τα ξεχωριστά συστατικά πρέπει να είναι από αγορές ή τοπικά κέντρα διανομής που παρέχουν προϊόντα φαγητού σε μεγάλες ομάδες πληθυσμού. Πρέπει να παρθεί μία κατάλληλη λίστα από προϊόντα φυσικών ή ημι-φυσικών οικοσυστημάτων υπό τον φόβο ότι οι συνέπειες του ατυχήματος του Chernobyl επηρεάζουν ακόμη τα οικοσυστήματα αυτά. Επιπρόσθετα, τα κράτη-μέλη θα πρέπει να λαμβάνουν σαν δείγματα, πλήρη διατροφικά γεύματα, για να υπάρχει αντιπροσωπευτική εικόνα της μέσης τιμής ραδιενέργειας στη μεικτή δίαιτα. Τα πραγματικά δείγματα γευμάτων θα πρέπει να παίρνονται από κέντρα μεγάλης κατανάλωσης όπως καντίνες ή εστιατόρια. Θα πρέπει τέλος να ελέγχονται τα στοιχεία γ-ακτινοβολίας και το Στρόντιο (Sr-90) και οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται σε τριμηνιαία βάση ή ακόμη πιο συχνά.

5) Η διαδικασία αναφοράς προς την Επιτροπή θα πρέπει να είναι ως εξής:

a) Διαχείριση δεδομένων

Τα κράτη-μέλη πρέπει να προωθούν στην Επιτροπή δεδομένα που έχουν υποστεί ποιοτικό έλεγχο και είναι έτοιμα για δημόσια έκδοση. Το σύνολο των δεδομένων

θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειες που αναφέρονται στο Παράρτημα 4.

Το κράτος-μέλος πρέπει να προωθεί τα δεδομένα στη μορφή που έχει καθοριστεί από την Επιτροπή και είναι προτιμητέο να χρησιμοποιεί το ειδικό λογισμικό που παρέχεται από αυτήν.

Δεδομένα μεμονωμένων μη συνυπολογισμένων μετρήσεων πρέπει να διαβιβάζονται αντί για τις μέσες τιμές αυτών, για κάθε μέγεθος και περιοχή. Παρ' όλα αυτά εάν τα δεδομένα ανταποκρίνονται σε άμεσες και συνεχείς μετρήσεις, τότε οι μηνιαίοι μέσοι όροι για κάθε περιοχή θα πρέπει να βρίσκονται σε σύμπνοια.

b) Μέσα μεταφοράς

Τα δεδομένα πρέπει να προωθούνται σε ψηφιακή μορφή χρησιμοποιώντας τα πλέον κατάλληλα και σύγχρονα ηλεκτρονικά μέσα.

c) Περιοδικότητα

Όλα τα απαραίτητα δεδομένα πρέπει να προωθούνται στην Επιτροπή μόλις επικυρωθούν, ούτως ώστε να επιτρέπεται η ταχεία αξιολόγηση από την Επιτροπή της επίδρασης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας στη δημόσια υγεία. Όλα τα δεδομένα για έναν ημερολογιακά χρόνο θα πρέπει να υποβάλλονται όχι αργότερα από τις 30 Ιουνίου του ακόλουθου έτους.

d) Μεταφορά άλλων δεδομένων

Μαζί με τα άλλα δεδομένα που μεταφέρονται υπό τους όρους του εδαφίου α), τα κράτη-μέλη πρέπει να μεταφέρουν στην Επιτροπή τις εθνικές αναφορές ελέγχου, έτσι ώστε να επιτρέπεται η πλήρης κατανόηση της σημασίας των δεδομένων που αναφέρονται στο Παράρτημα 1 σε σχέση με τα εθνικά ελεγκτικά

προγράμματα. Οι ετήσιες αναφορές της Επιτροπής θα έχουν αναφορές από τις εθνικές εκθέσεις.

e) Συνεργασία των εκθεσιακών πρακτικών

Τα δεδομένα που αναφέρονται τακτικά υπό τους όρους του άρθρου 36, εκείνα που αναφέρονται εθελοντικά αντί των εθνικών εκθέσεων και μεγάλα ποσά δεδομένων, ενδεχόμενα σχετικών, με διάφορα είδη επειγουσών καταστάσεων πρέπει να προωθούνται μέσω των ίδιων επικοινωνιακών μέσων και καναλιών. Ύστερα, θα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια μορφή, με σκοπό την απλοποίηση των εκθεσιακών πρακτικών, την αποφυγή επανάληψης προσπαθειών και τέλος την διεξαγωγή τακτικών ασκήσεων για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Sample types and measurements

Media	Measurement category	
	Dense network	Sparse network
Airborne particulates	Cs-137, gross beta	Cs-137, Be-7
Air	Ambient gamma dose rate	Ambient gamma dose rate
Surface water	Cs-137, residual beta	Cs-137
Drinking water	Tritium, Sr-90, Cs-137 Natural radionuclides as monitored in compliance with Council Directive 98/83/EC	Tritium, Sr-90, Cs-137 Natural radionuclides as monitored in compliance with Council Directive 98/83/EC
Milk	Cs-137, Sr-90	Cs-137, Sr-90, K-40
Mixed diet	Cs-137, Sr-90	Cs-137, Sr-90, C-14

ANNEX II

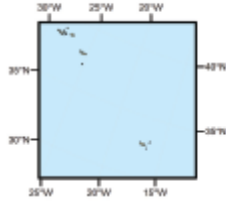
Definition of country partitions and country codes according to ISO 3166/4217

Country	Geographical region	Detailed description
AT	Austria	
BE	Belgium	
DE-N	Germany - North	Bremen, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen and Schleswig-Holstein
DE-C	Germany - Central	Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland
DE-S	Germany - South	Baden-Württemberg and Bayern
DE-E	Germany - East	Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt and Thüringen
DK	Denmark	
ES-N	Spain - North	Aragón, Asturias, Cantabria, Galicia, Navarra, País Vasco and Rioja
ES-C	Spain - Central	Castilla-La Mancha, Castilla-León, Extremadura and Madrid
ES-S	Spain - South	Andalucía, Canarias, Ceuta and Melilla and Murcia
ES-E	Spain - East	Baleares, Cataluña and Comunidad Valenciana
FI-N	Finland - North	Lapland and Oulu
FI-S	Finland - South	Alvsnänna, Central Finland, Häme, North Karelia, Kuopio, Kymi, Mikkeli, Turku and Pori, Uusimaa and Vaaasa
FR-NW	France - Northwest	Brittany, Centre, Île de France, Nord-Pas-de-Calais, Haute Normandie, Basse Normandie, Pays de la Loire and Picardie
FR-NE	France - Northeast	Alsace, Burgundy, Champagne-Ardenne, Franche-Comté and Lorraine
FR-SW	France - Southwest	Aquitaine, Languedoc-Roussillon, Limousin, Midi-Pyrénées and Poitou-Charentes
FR-SE	France - Southeast	Auvergne, Corse, Provence-Alpes-Côte-d'Azur and Rhône-Alpes
GR	Greece	
IE	Ireland	
IT-N	Italy - North	Emilia-Romagna, Friuli-Venezia-Giulia, Liguria, Lombardy, Piemonte, Province di Trento e Bolzano, Val d'Aosta and Veneto
IT-C	Italy - Central	Abruzzo, Lazio, Marche, Molise, Tuscany, Umbria and Sardinia

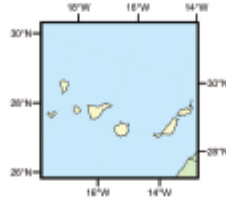
Country	Geographical region	Detailed description
IT-S	Italy - South	Basilicata, Calabria, Campania, Puglia and Sicily
LU	Luxembourg	
NL	Netherlands	
PT	Portugal	
SE-N	Sweden - North	Norland, Norrbotten, Västerbotten and Västernorrland
SE-S	Sweden - South	Älvsborg, Blekinge, Bohus, Gävleborg, Gotland, Halland, Jönköping, Kalmar, Kopparberg, Kronoberg, Malmöhus, Örebro, Östergötland, Skåne, Skåne, Södermanland, Stockholm, Uppsala, Värmland and Västmanland.
UK-EN	United Kingdom - England	East Anglia, Northern England, North-West England, South-East England, South-West England, East Midlands, West Midlands and North-East England
UK-SC	United Kingdom - Scotland	
UK-WL	United Kingdom - Wales	
UK-NI	United Kingdom - Northern Ireland	



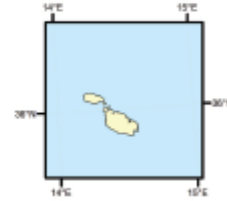
Azores and Madeira (Portugal)



Canary Islands (Spain)



Malta



The dense network

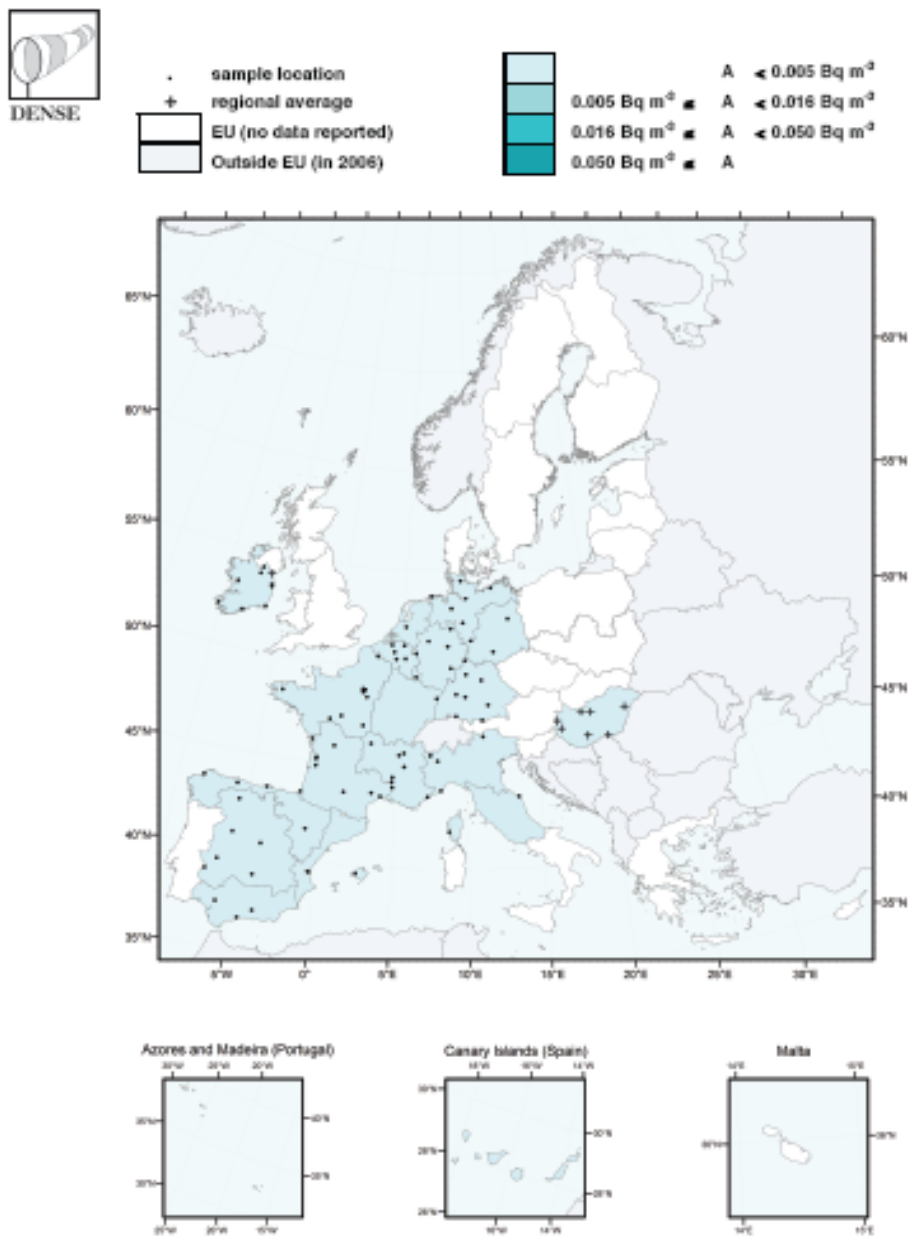
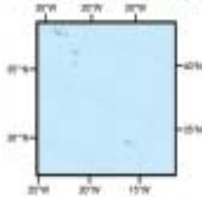


Fig. A1
Sampling locations and geographical averages by year for gross-β in airborne particulates, 2004

The sparse network



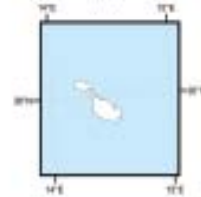
Azores and Madeira (Portugal)



Canary Islands (Spain)



Malta



Annex III

Sample type	Nuclide category	EDC [2] (Sv/Bq)	Annual consumption	Reporting level (rounded values)
Air	gross beta (based on Sr-90)	6.0 10 ⁻⁸	8030 m ³ [3]	2.10 ⁻³ Bq/m ³
	Cs-137	8.6 10 ⁻⁹	8030 m ³ [3]	1.10 ⁻² Bq/m ³
Surface water	residual beta (based on Sr-90)	3.5 10 ⁻⁸	60 l *	5.10 ⁻¹ Bq/l
	Cs-137	1.3 10 ⁻⁸	60 l *	1.10 ⁰ Bq/l
Drinking water	H-3	1.6 10 ⁻¹¹	600 l [4]	1.10 ⁺² Bq/l
	Sr-90	3.5 10 ⁻⁸	600 l [4]	5.10 ⁻² Bq/l
	Cs-137	1.3 10 ⁻⁸	600 l [4]	1.10 ⁻¹ Bq/l
Milk	H-3	4.0 10 ⁻¹¹	200 l [4]	1.10 ⁺² Bq/l
	Sr-90	3.5 10 ⁻⁸	200 l [4]	1.10 ⁻¹ Bq/l
	Cs-137	1.3 10 ⁻⁸	200 l [4]	5.10 ⁻¹ Bq/l
Mixed diet	Sr-90	3.5 10 ⁻⁸	365 d	8.10 ⁻² Bq/d.p
	Cs-137	1.3 10 ⁻⁸	365 d	2.10 ⁻¹ Bq/d.p

ANNEX IV

LIST OF MINIMUM REQUIREMENTS PER DATA RECORD

1. REQUIREMENTS FOR SAMPLING DATA

A. Sample characteristics

Sample type

Sample treatment (e.g. chemical treatment, delay of five days, etc.)

B. Date and time

Sampling date

Date type (e.g. begin date, end date, etc.)

Sampling time⁽¹⁾

Time system⁽¹⁾ (e.g. GMT)

Duration of sampling (in hours)

C. Location

Locality name

NUTS-Code

Latitude, longitude specified in degrees, minutes or in decimal degrees

Catchment⁽¹⁾ (for surface waters: name of river, lake, reservoir or sea)

2. REQUIREMENTS FOR MEASUREMENT DATA

Laboratory name

Nuclide category

Apparatus type

Activity value

Uncertainty

Uncertainty type

Value unit

Value type

Reference date⁽¹⁾ (date for which the activity value is given)

Flow rate⁽¹⁾ (in case of river water)

Production rate⁽¹⁾ (for milk and drinking water)

Volume produced or distributed in a year (for drinking water).

ΕΝΟΤΗΤΑ Β: «ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

1. Γενικά χαρακτηριστικά ανιχνευτικών συστημάτων

Οι ανιχνευτές είναι συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που προσπίπτει στο εσωτερικό τους. Ένας ανιχνευτής είναι ένα όργανο που μετατρέπει το γεγονός της διέλευσης ενός ενεργητικού φωτονίου ή ενός φορτισμένου σωματιδίου σε ένα ορατό ή αναγνώσιμο φαινόμενο.

Οι πρώτες ανιχνευτικές διατάξεις που παρασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των μετρήσεων της φυσικής υψηλών ενεργειών. Επιστημονικές ανάγκες αλλά και η επιτυχία που γνώρισαν οι πρώτες γενιές ανιχνευτών ήταν οι λόγοι που οδήγησαν στη δημιουργία πιο προηγμένων ανιχνευτών με όσο το δυνατόν μικρότερο όγκο και κόστος. Οι πρώτοι ανιχνευτές προσδιορισμού τροχιάς και θέσης σωματιδίων που αναπτύχθηκαν περίπου τη δεκαετία του 1920, ήταν οι θάλαμοι νεφών (cloud chambers), οι θάλαμοι φυσαλίδων (bubble chambers) και τα πυρηνικά φωτογραφικά γαλακτώματα (nuclear emulsions) και χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη μεσονίων, νετρίνων, μιονίων και άλλων στοιχειωδών σωματιδίων.

Οι ανιχνευτές χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για να καταγράψουν την τροχιά της ακτινοβολίας, ανάλογα με το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας που μπορούν να ανιχνεύσουν ή ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται. Έτσι λοιπόν έχουμε τους ανιχνευτές αέριας, υγρής και στερεάς κατάστασης, ανιχνευτές άλφα, βήτα και γάμμα ακτινοβολίας, ανιχνευτές τροχιών μεγάλης ακρίβειας (vertex and track detectors), ανιχνευτές μέτρησης ενέργειας αδρονίων (αδρονικά καλορίμετρα), ανιχνευτές μέτρησης της ενέργειας ηλεκτρονίων, φωτονίων και ουδέτερων μεσονίων (ηλεκτρομαγνητικά καλορίμετρα), ανιχνευτές μιονίων, νετρονίων και αναγνώρισης των φορτισμένων σωματιδίων (Cerenkov, RICH) και τέλος

ανιχνευτές ειδικούς για εφαρμογές όπως στην Ιατρική (PET, ακτίνων-Χ για αξονικούς τομογράφους).

Οι ανιχνευτικές διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για κάθε ακτινοβολία που αλληλεπιδρά με συγκεκριμένο υλικό και παράγει ανιχνεύσιμο σήμα το οποίο είναι περαιτέρω επεξεργάσιμο. Τα ανιχνευτικά συστήματα αποτελούνται από ένα θάλαμο που καλείται ευαίσθητος θάλαμος και αποτελεί το υλικό ανίχνευσης της ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόδια συλλογής του παραγόμενου φορτίου από την ακτινοβολία, το οποίο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, καθώς και διατάξεις ελέγχου των παραμέτρων της διάταξης. Καθώς οι ανιχνεύσιμες ποσότητες των πιο ισχυρά αλληλεπιδρώντων ακτινοβολιών είναι αρκετά μικρές, απαιτείται μελέτη για να βρεθεί η κατάλληλη διάταξη που θα επιτρέψει στην ακτινοβολία να διαπεράσει τον ευαίσθητο θάλαμο χωρίς την αλλοίωση των χαρακτηριστικών της.

Κατά τη σχεδίαση ενός ανιχνευτή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής σημεία:

- Οι ιδιότητες της ακτινοβολίας που πρόκειται να μελετηθούν, σχετικά με την ενέργεια και το είδος της
- Η εκτίμηση της έντασης της ακτινοβολίας καθώς και η επαγόμενη ροή και ο ρυθμός παραγωγής των δεδομένων
- Η εύρεση του κατάλληλου μέσου αλληλεπίδρασης και το είδος του ανιχνευτή
- Ο καθορισμός της γεωμετρίας και το μέγεθος του ανιχνευτή
- Η μελέτη των πιθανών άλλων ακτινοβολιών στις οποίες είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής, ώστε να μειωθεί ο παρασιτικός θόρυβος
- Ο καθορισμός του τρόπου μέτρησης των γεγονότων, δηλαδή αν τα γεγονότα θα μετρούνται άμεσα ή θα μετράται ο μέσος όρος τους
- Η βαθμονόμηση του οργάνου χρησιμοποιώντας απόλυτη ή σχετική κλίμακα σε σχέση με τη γεωμετρία του ανιχνευτή.

2. Ανιχνευτές αερίων

2.1 Γενικά

Οι ανιχνευτές αερίων είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές. Οι θάλαμοι ιοντισμού, οι αναλογικοί μετρητές και οι απαριθμητές Geiger-Muller είναι μερικά παραδείγματα. Οι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας στηρίζουν τη λειτουργία τους στην συλλογή των ιόντων συνολικά, που παράγονται εντός του ειδικού ευαίσθητου θαλάμου ιοντισμού του ανιχνευτή, που είναι γεμάτος με αέριο, εξ' αιτίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει στο θάλαμο αλληλεπιδρά με το αέριο και παράγει ένα ζεύγος ιόντων. Η διαδικασία αυτή καλείται **ιοντισμός**. Το ζεύγος των ιόντων είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα τροχιακά ηλεκτρόνια του αερίου. Η ακτινοβολία που παράγει άμεσα ιοντισμό μέσω των αλληλεπιδράσεων με το αέριο καλείται *άμεση ιοντίζουσα ακτινοβολία*. Η ακτινοβολία γάμμα είναι παράδειγμα *έμμεσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας*, η οποία αλληλεπιδρά με τα μόρια του αερίου και τα μόρια των τοιχωμάτων του θαλάμου παράγοντας και με αυτόν τον τρόπο ιοντισμό. Οι αλληλεπιδράσεις γάμμα κυρίως οι διεργασίες φωτοηλεκτρισμού και Compton θεωρούνται φαινόμενα ιοντισμού. Στους ανιχνευτές αερίου, οι ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν κυρίως με τα τοιχώματα του θαλάμου σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι με το αέριο.

Οι αλληλεπιδράσεις γίνονται στην περιοχή γύρω από την τροχιά της δέσμης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπου και παράγονται τα ζεύγη των ιόντων που τελικά ανιχνεύονται. Για βαριά σωματίδια (π.χ. σωματίδια άλφα), η τροχιά της δέσμης ιόντων είναι σχεδόν ευθεία και η πυκνότητά τους κατά μήκος της τροχιάς είναι αρκετά υψηλή. Οι τροχιές των παραγόμενων ηλεκτρονίων δεν είναι ευθείες λόγω των μεγάλων αριθμών σκεδάσεων που αντιμετωπίζουν. Αρκετά από τα ηλεκτρόνια

που παράγονται, προσκολλούνται στα μόρια του αερίου δημιουργώντας αρνητικά ιόντα. Έτσι κατάλληλα αέρια για τον ανιχνευτή είναι αυτά που έχουν χαμηλή ικανότητα ηλεκτρονιακής απορρόφησης. Τα αρνητικά ιόντα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο εισάγουν ποσοστά σφαλμάτων στις μετρήσεις. Ένα άλλο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα είναι η ένωση των ζευγών των ιόντων τα οποία παράγουν αφόρτιστα μόρια. Με αυτόν το μηχανισμό έχουμε ελάττωση του παραγόμενου ρεύματος των ιόντων, άρα μείωση της πραγματικής τιμής των μετρούμενων μεγεθών. Η ένταση του φαινομένου είναι ανάλογη της έντασης των ιόντων. Εάν δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του ανιχνευτή, τότε αυτό το φαινόμενο τείνει να γίνει ισχυρότερο του φαινομένου του ιοντισμού. Ο αριθμός των ιόντων που παράγονται στο θάλαμο του ανιχνευτή και καταφθάνουν στα ηλεκτρόδια συλλογής, είναι συνάρτηση του σχεδιασμού του θαλάμου, του αερίου πλήρωσης και της εφαρμοζόμενης τάσης.

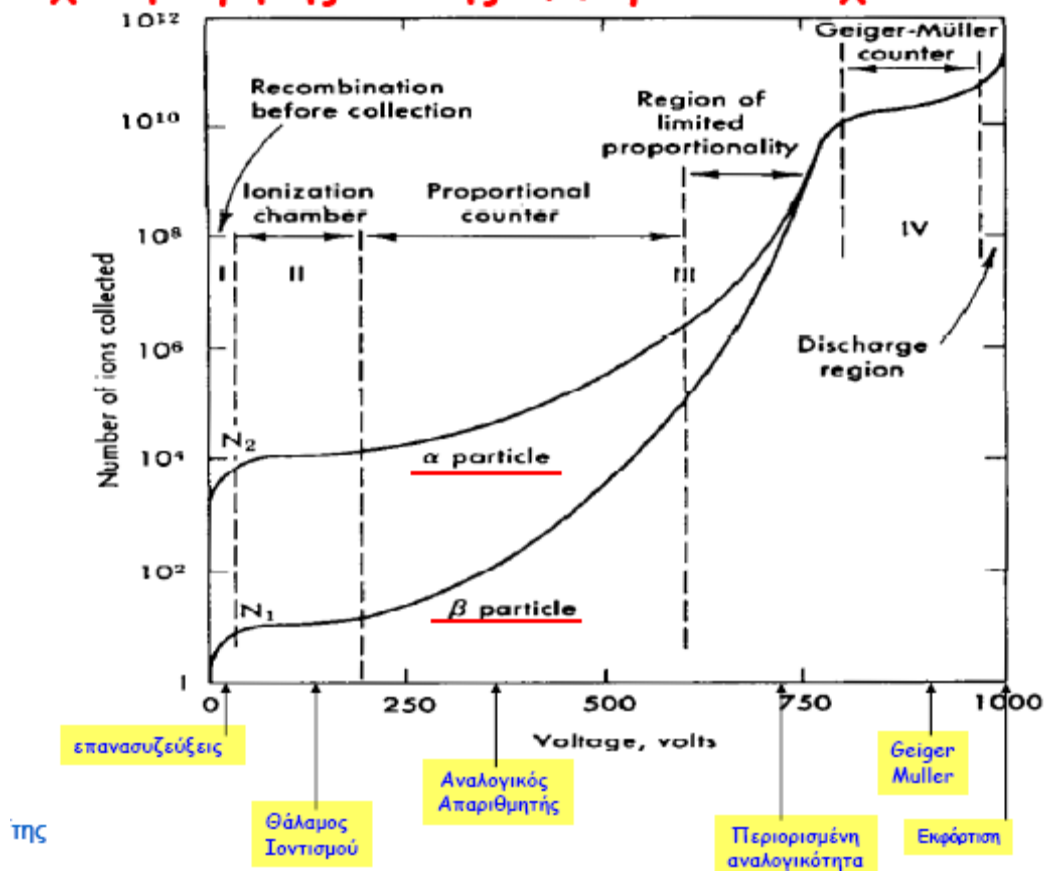
Στο σχεδιάγραμμα παρακάτω παρατηρούμε πέντε περιοχές. Η πρώτη περιοχή (*περιοχή I*) δεν είναι περιοχή λειτουργίας γιατί γίνεται επανασύνδεση ιόντων σε αφόρτιστα μόρια πριν γίνει η συλλογή τους από τα ηλεκτρόδια του θαλάμου. Ο αριθμός των ιόντων που καταφέρνουν να συλληθούν είναι αρκετά μικρός.

Η δεύτερη περιοχή (*περιοχή II*) είναι μια περιοχή όπου ο αριθμός των ιόντων που συλλέγονται είναι σταθερός ανεξάρτητα από την τάση που εφαρμόζουμε για να εξαναγκάσουμε τα ιόντα να κινηθούν προς τα ηλεκτρόδια. Η τάση για να παραμείνουμε σε αυτήν την περιοχή είναι 50-250V.

Η τρίτη περιοχή (*περιοχή III*) εκτείνεται από τάσεις 200-600V και ο αριθμός των ιόντων που συλλέγονται είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσης. Για τάσεις μέχρι τα 800V η περιοχή είναι οριακά αναλογική και ανήκει και αυτή στην περιοχή III.

Η τέταρτη περιοχή (περιοχή IV) είναι αυτή η οποία ονομάζεται περιοχή Geiger-Muller. Σε αυτή την περιοχή παρατηρούμε έναν κορεσμό στα ζεύγη των παραγόμενων ιόντων που συλλέγονται. Η περιοχή εκτείνεται μέχρι τα 950V. Η πέμπτη περιοχή είναι η περιοχή απορρόφησης.

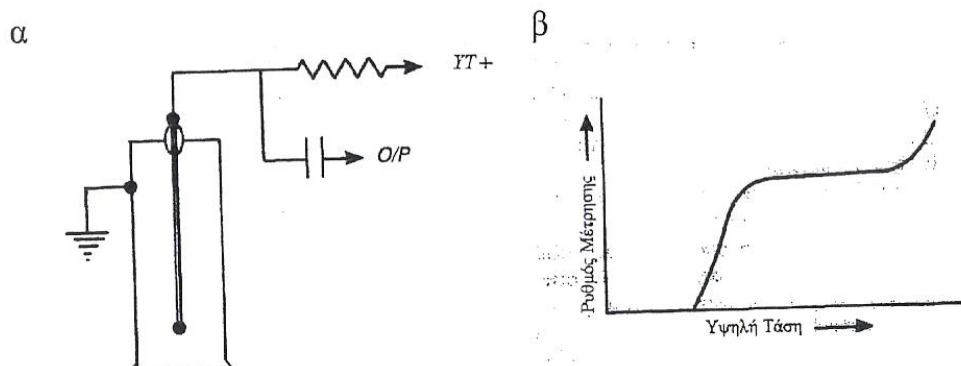
Σχέση Υψηλής Τάσης & Φορτίου Ανιχνευτών



Οι ανιχνευτές αερίων είναι εύκολο να κατασκευαστούν, χειρίζονται εύκολα και επιπλέον χρειάζονται μόνο λίγο εξοπλισμό για να λειτουργήσουν. Σε μερικούς ανιχνευτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αέρας. Πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα και είναι ευαίσθητοι σε μεγάλο φάσμα των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

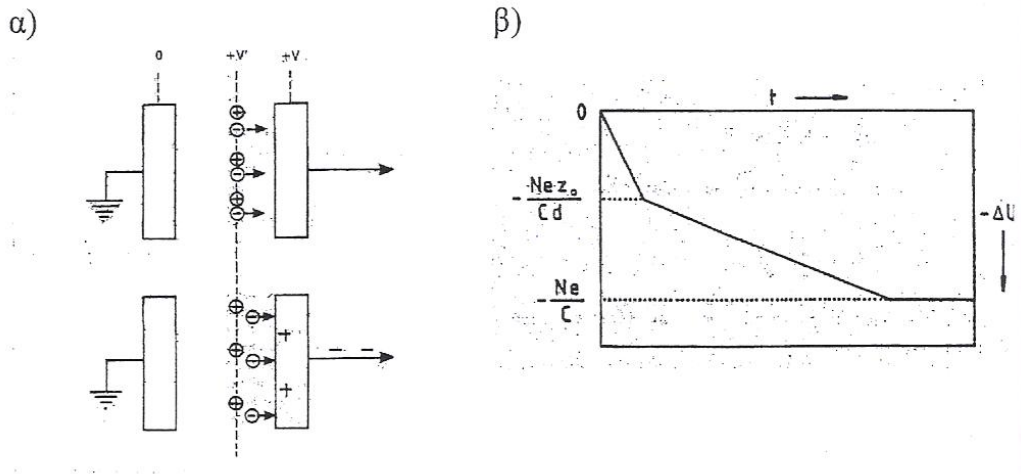
2.2 Ανιχνευτής ιοντισμού

Οι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα θάλαμο που καλείται θάλαμος ιοντισμού. Ο θάλαμος πληρώνεται με αδρανές αέριο (π.χ. Αργό) και έχει σχήμα ορθογώνιου ή κυλινδρικού σωλήνα. Περιέχει εσωτερικά δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία φαίνονται στο σχήμα παρακάτω. Η άνοδος είναι τοποθετημένη κατά μήκος του θαλάμου και ισαπέχει από τα πλευρικά τοιχώματα, ενώ είναι μονωμένη στα σημεία επαφής της με την κάθοδο και το σώμα του θαλάμου. Η κάθοδος είναι η μεταλλική εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου. Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από την πηγή τάσης και ένα σύστημα χωρητικών και ωμικών στοιχείων. Για να μελετήσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία εφαρμόζουμε διαφορά δυναμικού V_0 στο σύστημα πυκνωτή-αντίστασης, δηλαδή εφαρμόζουμε διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο.



Σχήμα 5.2 : α) Ανιχνευτής Geiger με εξωτερική σύνδεση, β) Ρυθμός μέτρησης του ανιχνευτή Geiger συναρτήσει της υψηλής τάσης. Το επίπεδο μέρος της καμπύλης προσδιορίζει την περιοχή λειτουργίας του ανιχνευτή.

Αν ένα σωματίδιο διέλθει από το θάλαμο θα δημιουργήσει N θετικά και N αρνητικά φορτία, είτε αλληλεπιδρώντας με τα μόρια του θαλάμου, ή με τα μόρια του αερίου. Αυτά θα συλλέγονται από τις πλάκες, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου έντασης E που ασκείται επάνω τους:



Σχήμα 5.3 : α) Κίνηση φορτίων που παράγονται σε θάλαμο ιοντισμού αμέσως μετά τη διέλευση ακτινοβολίας, β) Παραγόμενος παλμός λόγω ολίσθησης των ηλεκτρονίων μέχρι την τιμή $(-Nez_0/Cd)$ και εν συνεχεία αύξηση του παλμού λόγω κίνησης των θετικών ιόντων.

$$|E| = E_z = V_0/d \quad (1)$$

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Το φορτίο που συσσωρεύεται στους οπλισμούς, σε ένα χρονικό διάστημα σταθερό και ίσο με περίπου $400\mu s$, διέρχεται από την αντίσταση R , στα άκρα της οποίας μετρείται ένας παλμός τάσης. Αυτός ο παλμός υπολογίζεται από το θεώρημα διατήρησης ενέργειας:

$$\frac{1}{2} C(V^2 - V_0^2)$$

$$\Delta V_{tot} = \Delta V_{max}^- + \Delta V_{max}^+ = -Ne(z_0 + d - z_0) = \Delta V = -Ne / C / C(-v_D^-) \Delta t / Cd$$

$$v_{drift} = \frac{dx}{dt} = \frac{\mu E}{\rho} = \frac{\mu V}{\rho d}$$

$$\Delta x = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_D(t) dt$$

(2)

, όπου C η χωρητικότητα ανόδου ως προς τη γη.

Ισχύει:

$$\frac{1}{2} C(V^2 - V_0^2) = (NqV_0 \int_{z_0}^z dz) / d \quad (3)$$

$$\Delta V = -Nq(z - z_0) / Cd \quad (4)$$

Για σταθερή ταχύτητα των θετικών ιόντων και των αρνητικών ηλεκτρονίων μέσα στο αέριο ισχύει:

$$\Delta V^+ = -Nev_D^+ \Delta t^+ / Cd \quad (5)$$

$$\Delta V^- = -N(-e)(-v_D^-) \Delta t^- / Cd \quad (6)$$

Εφόσον τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν πιο γρήγορα από τα θετικά ιόντα, ο παλμός αυξάνει λόγω της κίνησης ηλεκτρονίων μέχρι την τιμή:

$$\Delta V = -Nez_0 / Cd \quad (7)$$

Στη συνέχεια ο παλμός αυξάνει με μικρότερη κλίση λόγω της κίνησης των θετικών ιόντων προς την ασυμπτωτική τιμή:

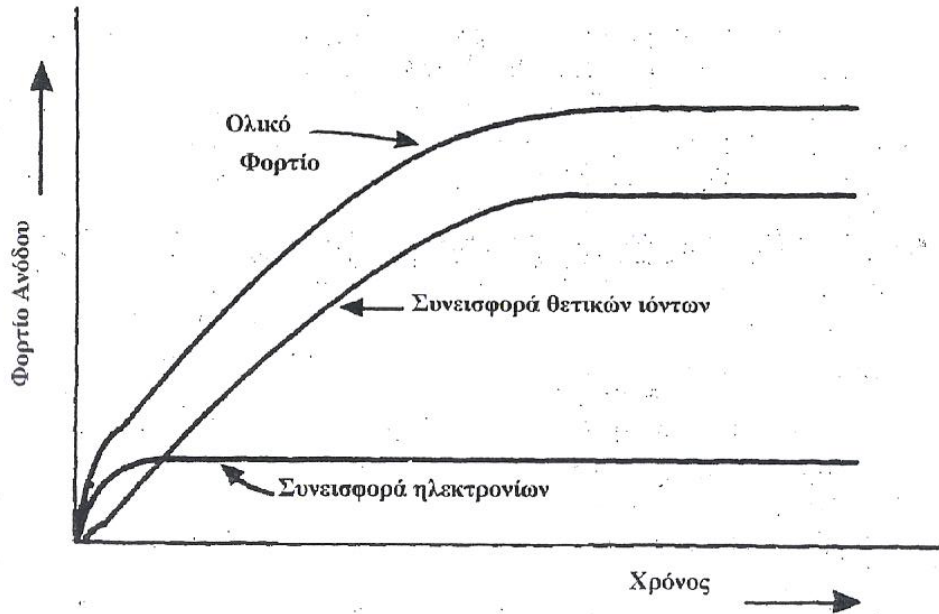
$$\Delta V = -Ne / C \quad (8)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι $R \rightarrow \infty$ τότε, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3 β) :

$$\Delta V_{tot} = \Delta V_{max}^- + \Delta V_{max}^+ = -Ne(z_0 + d - z_0) = \Delta V = -Ne / C \quad (9)$$

Οι θάλαμοι ιοντισμού λειτουργούν στην περιοχή II. Αν αρχίσουμε να αυξάνουμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ξεκινώντας από το μηδέν τότε θα παρατηρήσουμε μία καμπύλη όπως αυτή του σχήματος 1. Στην περιοχή I λαμβάνουν χώρα αρκετοί μηχανισμοί παραγωγής ιόντων, αλλά δημιουργείται έλλειψη ιόντων λόγω επανασύνδεσης και συλλογής από τα ηλεκτρόδια. Σε χαμηλές τάσεις δημιουργείται μία ροή φορτίων παράλληλη με τις δυναμικές γραμμές της δύναμης. Η ταχύτητα των φορτίων

εξαρτάται από τον τύπο του αερίου και είναι ευθέως ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου E και αντιστρόφως ανάλογη της πίεσης του αερίου P .



Σχήμα 5.4 : Είδος παλμού που μετρείται στον τερματισμό ανιχνευτή ιοντισμού.

Όταν ο θάλαμος είναι ορθογώνιος αντί για κυλινδρικός, τότε η ταχύτητα των ιόντων που κινούνται προς τα ηλεκτρόδια, η λεγόμενη **ταχύτητα ολίσθησης** είναι :

$$v_{drift} = \frac{dx}{dt} = \frac{\mu E}{p} = \frac{\mu V}{pd} \quad (10)$$

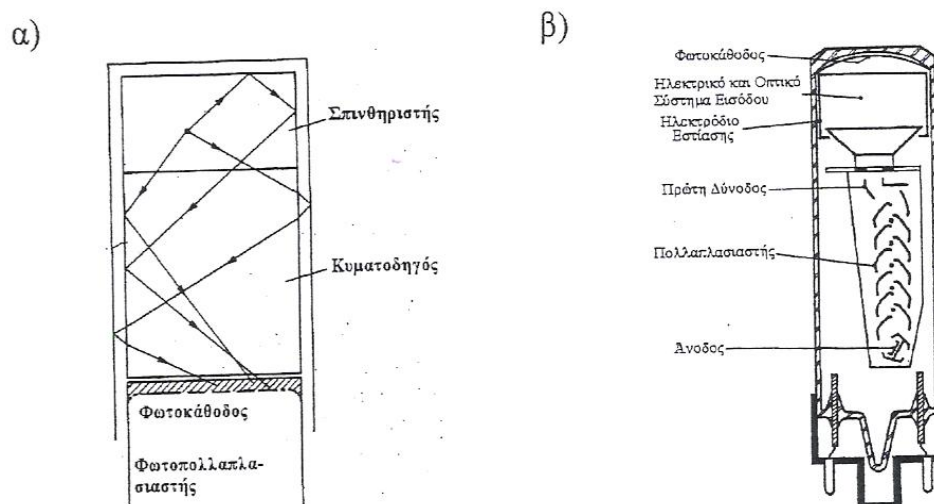
Καθώς η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται, αυξάνει σημαντικά η ταχύτητα των ιόντων με ταυτόχρονη μείωση του διαθέσιμου χρόνου επανασύνδεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση του αριθμού των ιόντων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια. Επιπλέον η εφαρμοζόμενη στα ιόντα δύναμη επιταχύνει τα ηλεκτρόνια περισσότερο από ότι τα βαρύτερα θετικά ιόντα με συνέπεια η ταχύτητα των ηλεκτρονίων να είναι μεγαλύτερη.

Αυξάνοντας την τάση το σύστημα τείνει προς την πλήρη συλλογή των ιόντων που παράγονται στο θάλαμο. Όταν ο αριθμός των ιόντων που συλλέγονται δεν αυξάνει, η τάση καλείται **τάση κορεσμού**, είναι η τάση των 50V περίπου, στην οποία αρχίζει η περιοχή II. Η περιοχή II ονομάζεται και **περιοχή ιοντισμού** και οι ανιχνευτές που λειτουργούν σε αυτή την περιοχή ανιχνευτές ιοντισμού. Και σε αυτή την περιοχή η τάση που χρειάζεται για να δημιουργηθεί κορεσμός εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου αερίου, την πίεση του και από τις διαστάσεις του θαλάμου. Το φορτίο του ιόντος είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και γι' αυτό το λόγο το ρεύμα που παράγεται από τον αρχικό ιοντισμό είναι πολύ μικρό. Συχνά χρησιμοποιείται ηλεκτρόμετρο ή ηλεκτρομετρικός σωλήνας με στάδια ενίσχυσης για να δώσει ένα ανιχνεύσιμο σήμα.

3. Ανιχνευτές σπινθηρισμών

3.1 Γενικά

Ο σπινθηριστής είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ακτινοβολία σε φωτόνια (σπινθήρες). Τα παραγόμενα με αυτή την διαδικασία φωτόνια οδηγούνται μέσω κυματοδηγών στους φωτοπολλαπλασιαστές (Photo-Multiplier-PM).



Σχήμα 5.10 : α) Διάταξη ανιχνευτή σπινθηρισμών, β) Λεπτομερή στοιχεία του φωτοπολλαπλασιαστή.

Οι φωτοπολλαπλασιαστές μετατρέπουν το εισερχόμενο φως σε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα.

Πιθανότατα η πρώτη εφαρμογή των σπινθηριστών για ανίχνευση σωματιδίων, ήταν το σπινθηροσκόπιο που εφευρέθηκε από τον Crookes το 1903. Αυτή η συσκευή αποτελούνταν από ένα πέτασμα (οθόνη) Θειούχου Ψευδαργύρου (ZnS), που παρήγαγε ασθενείς σπινθήρες κατά την κρούση με άλφα σωματίδια. Παρατηρούμενοι με μικροσκόπιο σε σκοτεινό δωμάτιο, οι σπινθήρες αυτοί ήταν ορατοί με γυμνό μάτι έπειτα βέβαια από κάποια εξάσκηση. Προφανώς με την ανακάλυψη των ανιχνευτών ιοντισμού αερίου, το σπινθηροσκόπιο έπαψε να χρησιμοποιείται στην πράξη. Το 1944 οι Curran και Baker εκσυγχρόνισαν τη

συσκευή, με την αντικατάσταση της διαδικασίας της όρασης δια γυμνού οφθαλμού, με το σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή. Έτσι οι ασθενείς σπινθήρες μπορούσαν πλέον να μετρηθούν με έναν πιο αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο, παρόμοιο με αυτόν των ανιχνευτών ιοντισμού αερίων.

Για να παρέχει το σύστημα του σπινθηριστή ικανοποιητικές μετρήσεις πρέπει να παράγει φθορίζον φως με ένταση και πυκνότητα ώστε να είναι εύκολο να ανιχνευθεί και ακόμη να είναι διαφανής στο επαγόμενο φως και να μην το διασκορπίζει. Ο ανιχνευτής σπινθηρισμών πρέπει να έχει δείκτη διάθλασης ίσο με τον κυματοδηγό που στέλνει το φως στο παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες κατά τη μεταφορά του σήματος, καθώς επίσης να έχει φυσική και μηχανική σταθερότητα. Οι διαστάσεις του πρέπει να είναι ικανές να σταματήσουν την περισσότερη παραγόμενη ακτινοβολία (γεωμετρική απόδοση) και επιπλέον πρέπει να διαθέτει ένα κάλυμμα προστασίας.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους σπινθηριστές είναι ανόργανα ή οργανικά, στερεής ή υγρής φύσεως. Τα ευγενή αέρια παρουσιάζουν φαινόμενα φθορισμού, αλλά δεν έχουν πρακτικά πλεονεκτήματα. Σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμών ύστερα, δεν πρέπει να υπάρχει κενό ύλης ανάμεσα στις συνδέσεις σπινθηριστή-κυματοδηγού-φωτοπολλαπλασιαστή γιατί θα δημιουργούνταν οπτικά φαινόμενα ανακλάσεων, πρέπει δηλαδή οι τρεις βασικές μονάδες του ανιχνευτή να έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους. Εάν υπάρχει θωράκιση του θαλάμου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κυματοδηγός φωτός. Οι απευθείας συνδέσεις γίνονται με ζελέ καθαρής σιλικόνης, οι ιδιότητες της οποίας είναι παρόμοιες με εκείνες του γυαλιού. Εάν ο φωτοπολλαπλασιαστής βρίσκεται εντός χώρου ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που επηρεάζουν τη λειτουργία του, τότε ο κυματοδηγός μπορεί να επιμηκυνθεί ούτως ώστε ο φωτοπολλαπλασιαστής να μεταφερθεί σε χώρο άνευ πεδίων. Ο κυματοδηγός πρέπει να έχει εσωτερική

αντανάκλαση για να αποφεύγονται απώλειες μεταφοράς. Ο κυματοδηγός συνήθως κατασκευάζεται από χαλαζία και λουσίτη.

Γενικά το σήμα ενός σπινθηριστή είναι ικανό να παρέχει ποικιλία πληροφοριών. Ανάμεσα σε αυτές οι πλέον αξιοσημείωτες είναι οι εξής:

Ευαισθησία στην ενέργεια: Πάνω από μία συγκεκριμένη ενέργεια, οι περισσότεροι σπινθηριστές συμπεριφέρονται γραμμικά σε σχέση με την απόθεση ενέργειας, δηλαδή το εκπεμπόμενο φως του σπινθηριστή είναι ευθέως ανάλογο της ενέργειας αυτής. Εφόσον ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι μία επίσης γραμμική συσκευή, τουλάχιστον όταν λειτουργεί σωστά, το πλάτος του τελικού ηλεκτρικού σήματος του σπινθηριστή θα είναι ανάλογο της ενέργειας της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

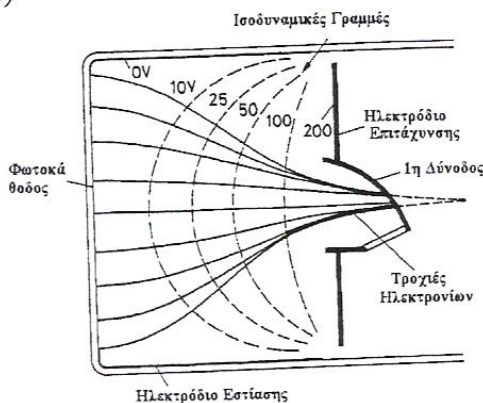
Μικρός χρόνος απόκρισης: Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών είναι γρήγορες συσκευές, με την έννοια ότι οι χρόνοι απόκρισης και αποκατάστασής τους είναι σχετικά μικροί σε σύγκριση με άλλου τύπου ανιχνευτές. Αυτό βέβαια έχει σαν συνέπεια την μέτρηση με καλύτερη χρονική ακρίβεια του διαστήματος μεταξύ δύο γεγονότων. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο αποκατάστασης επιτρέπει σε ένα σύστημα σπινθηριστή να παίρνει μετρήσεις με μεγαλύτερο ρυθμό, αφού ο νεκρός χρόνος μειώνεται.

Διευκρινιστής σχήματος παλμού: Με συγκεκριμένους σπινθηριστές είναι δυνατός ο διαχωρισμός μεταξύ διαφορετικών σωματιδίων, μέσω της ανάλυσης του σχήματος των παλμών του εκπεμπόμενου φωτός. Αυτό οφείλεται στη διέγερση διαφορετικών μηχανισμών φθορισμού, από σωματίδια με διαφορετική ιοντίζουσα ισχύ.

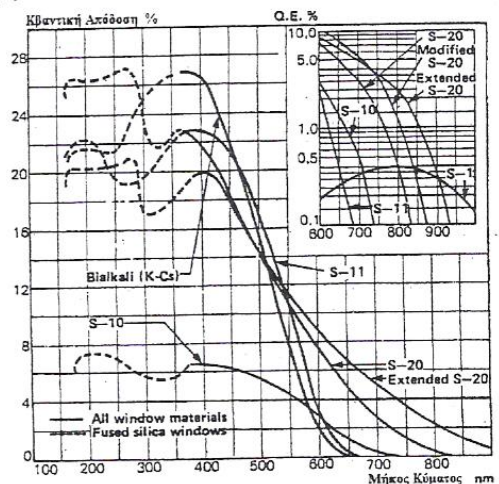
3.2 Φωτοπολλαπλασιαστές

Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι συστήματα τα οποία χρησιμεύουν κυρίως στην μετατροπή της οπτικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό σήμα, με ικανοποιητικό μέγεθος ώστε να καταστεί ανιχνεύσιμο από τα συστήματα καταγραφής. Τοποθετούνται μετά τον σπινθηριστή για την ανίχνευση των ακτινοβολιών που προκύπτουν. Αποτελούνται από μία κενή λυχνία η οποία περιέχει μία άνοδο, ένα ευαίσθητο ηλεκτρόδιο σε οπτική ακτινοβολία (φωτοκάθοδος) και έναν αριθμό από καθόδους εκπομπής (δυνακαθόδους), οι οποίες έχουν αυξημένο δυναμικό σε σχέση με την φωτοκάθοδο. Η φωτοκάθοδος είναι ένα λεπτό στρώμα αλκαλικού μετάλλου που έχει εξαχνωθεί στο εσωτερικό της γυάλινης λυχνίας. Οι φωτοπολλαπλασιαστές που χρησιμοποιούνται στην πράξη έχουν συνήθως έως και δώδεκα ηλεκτρόδια.

α)



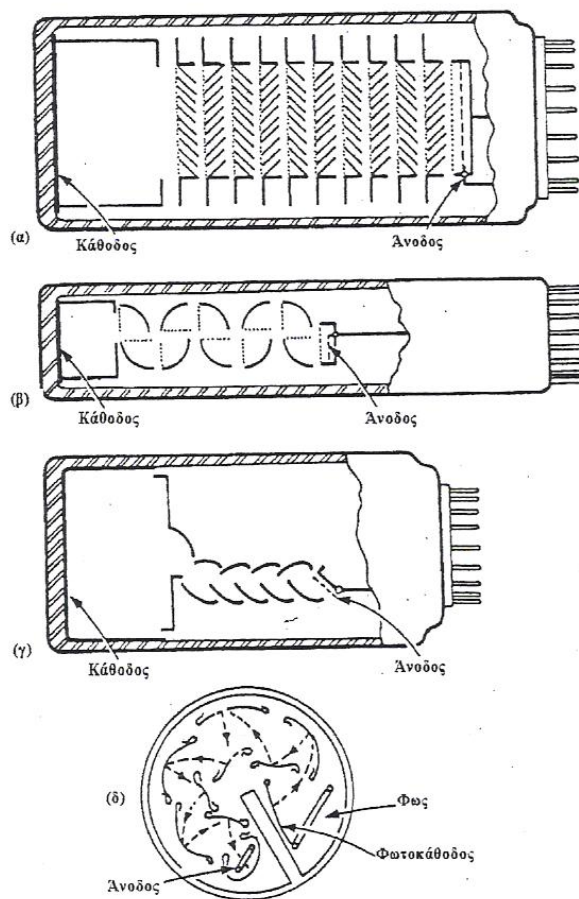
β)



Σχήμα 5.12 : α) Λεπτομέρεια φωτοκαθόδου, ηλεκτροστατικού φακού και πρώτης δυνόδου, β) Κβαντική απόδοση φωτοπολλαπλασιαστή συναρτήσει του μήκους κύματος.

Ένα ηλεκτρόνιο που απελευθερώνεται από την φωτοκάθοδο, λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, έλκεται μέχρι την πρώτη δυνοδίδο, όπου και προσκρούει έχοντας αποκτήσει κινητική ενέργεια ανάλογη με την βαθμίδα του δυναμικού. Το

δυναμικό θα πρέπει να είναι ικανό να δώσει την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να δημιουργηθούν δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Κατά την πρόσκρουση απελευθερώνονται τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται με τη σειρά τους και παράγουν επιπλέον ηλεκτρόνια και ούτω καθ' εξής, ενισχύοντας το φαινόμενο. Κάθε πρωτογενές ηλεκτρόνιο παράγει τρία έως πέντε δευτερογενή. Τυπική τάση για τη δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρονίων σε κάθε ζεύγος δυνόδων είναι 50-250V. Η διάταξη των δυνόδων ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή του φωτοπολλαπλασιαστή, όπως φαίνεται και σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 5.13 : Διατάξεις δυνόδων φωτοπολλαπλασιαστή α) Venetian Blind, β) Box and Grid, γ) Γραμμική Εστίαση, δ) Κυκλική.

Η απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή $\eta(\lambda)$, εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση, ονομάζεται **κβαντική απόδοση** ή **κβαντική ικανότητα** της φωτοκαθόδου και

ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται προς τον αριθμό των φωτονίων που εισέρχονται στην κάθοδο:

$$n(\lambda) = Amr^k \quad (12)$$

, όπου r είναι ο ρυθμός δευτερευόντων ηλεκτρονίων, k ο αριθμός των δυνόδων και m ο ρυθμός εκπομπής της κάθε δυνόδου χωριστά. Ο ολικός χρόνος διέλευσης των ηλεκτρονίων μέσα από τον φωτοπολλαπλασιαστή είναι 40-50ns. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στο οποίο λειτουργεί ο φωτοπολλαπλασιαστής εξαρτάται από την ευαισθησία του στρώματος της καθόδου και από το παράθυρο του σωλήνα. Οι καλοί φωτοπολλαπλασιαστές μπορούν να μετρήσουν ροές ακτινοβολίας από 10^6 έως 10^{11} lm.

Ένα ισοδύναμο μέγεθος με την κβαντική απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή είναι η **ευαισθησία ακτινοβολούμενης καθόδου** $S(\lambda)$ η οποία ορίζεται:

$$S(\lambda) = \frac{I_k}{P(\lambda)} \quad (13)$$

, όπου I_k είναι το ρεύμα φωτοηλεκτρικής εκπομπής της καθόδου και $P(\lambda)$ είναι η εισερχόμενη ισχύς της ακτινοβολίας. Η ευαισθησία ακτινοβολούμενης καθόδου $S(\lambda)$ κυμαίνεται από 10-100 A/W και το μέγιστο ρεύμα φθάνει τα 10μΑ. Συνδέεται με την κβαντική απόδοση και δίδεται σε μονάδες A/W όταν το μήκος κύματος είναι σε nm:

$$S(\lambda) = \lambda n(\lambda) \frac{e}{hc} = \frac{\lambda n(\lambda)}{1240} [A/W] \quad (14)$$

Εάν με μία συγκεκριμένη ενίσχυση έχουμε εκπομπή περισσότερης ακτινοβολίας έτσι ώστε το ρεύμα να υπερβεί τα 10μΑ τότε το παραγόμενο σήμα θα ελαττωθεί ταχύτατα. Σε συνθήκες όπου δεν έχουμε ροή φωτονίων μπορούμε να παρατηρήσουμε το λεγόμενο **ρεύμα διαρροής** (dark current), το οποίο οφείλεται στην υψηλή τάση. Το αυτό φαινόμενο

παράγει έναν θόρυβο διαρροής, ο οποίος σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να αποτελέσει σοβαρό παράγοντα σφαλμάτων. Για να αντιμετωπίσουμε τον θόρυβο, που αυξάνει καθώς αυξάνει η τάση, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ένταση ακτινοβολίας και να διαλέξουμε τον κατάλληλο για το φάσμα φωτοπολλαπλασιαστή. Η ευαισθησία τους εξαρτάται από την ικανότητα τους να μετατρέπουν τα φωτόνια σε ηλεκτρόνια και από τον αριθμό των παραγόμενων ηλεκτρονίων ανά φωτόνιο. Η ευαισθησία της καθόδου παίζει καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστή γιατί η χαμηλή ευαισθησία οδηγεί σε απώλεια ενέργειας, κατά τη μετατροπή του φωτονικού ρεύματος σε ηλεκτρικό, καθώς και σε υψηλό θόρυβο διαρροής.

3.3 Ανιχνευτές σπινθηρισμών ανόργανων υλικών

Η ανιχνευτική αυτή διάταξη αποτελείται από ένα θάλαμο μέσα στον οποίο έχουν τοποθετηθεί κρύσταλλοι υλικού ικανού μόλις δεχτεί ακτινοβολία να φωσφορίζει έτσι ώστε να παράγεται η απαιτούμενη φωτεινή ενέργεια για την ανίχνευση της ακτινοβολίας. Επομένως οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν σε αυτόν τον ανιχνευτή είναι η ικανότητα φωσφορισμού και η έξοδος του φωτός. Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το σουλφίδιο του ψευδαργύρου (ZnS), σε τεχνητή ή φυσική μορφή. Το σουλφίδιο εκπέμπει στη μπλε ως την πράσινη περιοχή του ορατού. Συνήθως εμποτίζεται με Άργυρο ή Χαλκό για να εκπέμπει στην πράσινη έως την κίτρινη περιοχή. Το μειονέκτημά του είναι ότι δεν παράγεται σε μεγάλους κρυστάλλους και δεν είναι εύκολα διαπερατό στη δική του ακτινοβολία. Χρησιμεύει για ανίχνευση πρωτονίων και σωματιδίων άλφα, τα οποία έχουν μεγάλο μέγεθος έτσι ώστε να τα σταματάει ένα λεπτό φύλλο σουλφιδίου του ψευδαργύρου. Για να εξασφαλιστεί ότι το φως από το

εξωτερικά εκτιθέμενο στρώμα φτάνει στη φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή, το στρώμα πρέπει να είναι αρκετά λεπτό ώστε να μην εμποδίζει την ακτινοβολία να περάσει και αρκετά παχύ ώστε να μην αφήνει τα σωματίδια να διαφεύγουν, για τα σωματίδια άλφα, τυπικό πάχος είναι τα 20μm. Το στρώμα του σπινθηριστή είναι αρκετά εύθραυστο και δεν πρέπει να αγγίζεται με γυμνά χέρια.

Για να αποφύγουμε τα μειονεκτήματα του σουλφιδίου του ψευδαργύρου χρησιμοποιούνται υλικά υψηλής αντίστασης Z, που μορφοποιούνται σε μεγάλους κρυστάλλους, όπως είναι τα NaI, KI, LiI και τα παράγωγά τους. Σε μεγάλους θαλάμους χρησιμοποιείται πλήθος από μεγάλους κρυστάλλους ενώ στους μικρούς μόνο ένας κρύσταλλος. Οι κρύσταλλοι έχουν το μειονέκτημα ότι είναι υγροσκοπικοί και αλλοιώνονται με την υγρασία. Για να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα κάνουμε προσμίξεις στους κρυστάλλους κατά την διάρκεια μορφοποίησής τους, εισάγοντας υλικά όπως το Θάλιο (Tl) στο NaI.

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σπινθηρισμών εξαρτάται από τον αριθμό N των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται από την φωτοκάθοδο και από την στατιστική διακύμανση της διαδικασίας ενίσχυσης. Θεωρητικά έχει βρεθεί ότι η ενεργειακή διακριτική ικανότητα είναι :

$$\frac{\sigma_p}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (15)$$

η οποία είναι ανάλογη με την $E_\gamma^{-1/2}$. Στον κρύσταλλο του NaI αναμένονται κατά μέσο όρο 70eV για κάθε παραγόμενο φωτόνιο με αντίστοιχη ποσότητα W ίση με 350eV, οπότε:

$$\frac{\sigma_p}{\rho} = 0.6 E_\gamma^{-1/2} \quad (E \text{ σε keV}) \quad (16)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 1.4 E_\gamma^{-1/2} \quad (E \text{ σε keV}) \quad (17).$$

3.4 Εσωτερική ανιχνευτική απόδοση

Κατ' αρχάς πρέπει να πούμε ότι ένας ανιχνευτής σπινθηρισμών θα αντιδράσει σε οποιαδήποτε ακτινοβολία έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει άμεσα ή έμμεσα το φωσφορισμό των μορίων ή των ατόμων του υλικού του σπινθηριστή. Παρόλ' αυτά, για ένα συγκεκριμένο τύπο ακτινοβολίας και δοσμένου ενός σπινθηριστή, δεν είναι εξασφαλισμένο ότι θα παραχθεί ένα αξιοποιήσιμο και ευδιάκριτο ηλεκτρικό σήμα. Προφανώς, θα πρέπει να αξιολογήσουμε τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα μόρια του υλικού του ανιχνευτή σπινθηρισμών, την πιθανότητα να συμβούν αυτές οι αλληλεπιδράσεις στον όγκο του ανιχνευτή και την φωτονική απόκριση του συστήματος. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να μελετήσουμε εάν είναι επιθυμητό να υπάρχει ενεργειακή πληροφορία στο επαγόμενο σήμα του ανιχνευτή. Σε αυτή την περίπτωση οι απαιτήσεις για το σύστημα γίνονται περισσότερες, καθώς το φορτισμένο σωματίδιο δεν αρκεί να χάνει μέρος της ενέργειάς του, αλλά όλο το ποσόν αυτής.

3.4.1 Βαριά ιόντα

Τα βαριά ιόντα είναι ικανά να ιονίσουν τις φωσφορίζουσες ουσίες ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών, αλλά είναι αλήθεια ότι οι σπινθηριστές δεν είναι οι πλέον κατάλληλες συσκευές ανίχνευσης για αυτά τα σωματίδια, εξ' αιτίας της μειωμένης φωτονικής τους απόκρισης. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει με την πολύ υψηλή ιοντίζουσα ισχύ των βαρέων ιόντων και για παράδειγμα, για σωματίδια άλφα, ένας οργανικός σπινθηριστής έχει μόλις το ένα δέκατο της φωτονικής απόκρισης που παρουσιάζει για ένα ηλεκτρόνιο της ίδιας ενέργειας. Επίσης παρουσιάζονται μη γραμμικές ανωμαλίες στους δημιουργούμενους παλμούς. Σε

ανόργανα υλικά, η απόκριση είναι επίσης μειωμένη, αλλά παραμένει υψηλότερη από των οργανικών, ενώ εμφανίζεται μεγαλύτερη γραμμικότητα στις μετρήσεις των παλμών.

Συμπερασματικά, όταν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί ανιχνευτής σπινθηρισμών για βαρέα ιόντα, ανόργανοι κρύσταλλοι, όπως NaI, είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή. Όσον αφορά στα άλφα σωματίδια, χρησιμοποιείται επίσης το σουλφίδιο του ψευδαργύρου (ZnS) αν και έχει φτωχή ενεργειακή διακριτική ικανότητα και είναι κατάλληλο μόνο για μετρήσεις χαμηλού ρυθμού, εξ' αιτίας του μεγάλου χρόνου αποδιέγερσης που παρουσιάζει.

3.4.2 Ηλεκτρόνια

Η απόδοση των περισσότερων ανιχνευτών σπινθηρισμών για ηλεκτρόνια είναι της τάξης του 100%, υπό την έννοια ότι πολύ λίγα ηλεκτρόνια που θα καταφέρουν να εισέλθουν στο θάλαμο του ανιχνευτή δεν θα καταφέρουν να δημιουργήσουν ανιχνεύσιμο σήμα. Παρ' όλ' αυτά, εξ' αιτίας της μικρής του μάζας, το ηλεκτρόνιο υπόκειται σε σκεδάσεις μεγάλων γωνιών μέσα στην ύλη. Αυτό μπορεί να αναγκάσει ένα ηλεκτρόνιο σε οπισθοσκέδαση ή πλευρική σκέδαση εκτός των ορίων του ανιχνευτή, πριν να αποθέσει όλη του την ενέργεια.

Το φαινόμενο της οπισθοσκέδασης εξαρτάται ισχυρά από τον ατομικό αριθμό του υλικού και αυξάνει σημαντικά με την αύξησή του Z. Αφού οι οργανικοί σπινθηριστές έχουν τον χαμηλότερο ενεργό ατομικό αριθμό, έχουν το πλεονέκτημα της μικρότερης οπισθοσκέδασης ηλεκτρονίων. Για παράδειγμα, σε μία συσκευή με πηγή βήτα σωματιδίων, σε μικρή απόσταση από ένα επίπεδο κρύσταλλο NaI, το 80 έως 90% των

εισερχόμενων ηλεκτρονίων θα σκεδαστεί κατά 180° , ενώ αυτό το ποσοστό είναι περίπου 8% στην περίπτωση ενός σπινθηριστή πλαστικού υλικού. Βέβαια αυτό τα φαινόμενα μπορούν να αντιμετωπιστούν δημιουργώντας συνθήκες 4π γεωμετρίας μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή.

Σε πολύ υψηλές ενέργειες, η χρήση ανόργανων σπινθηριστών παύει να μειονεκτεί. Η απώλεια ενέργειας είναι κύρια από επιβραδύνσεις (bremsstrahlung) και ηλεκτρονικό καταγισμό, οπότε απαιτείται ένα υλικό υψηλού Z, για τη διευκόλυνση των φαινομένων αυτών. Έχοντας υψηλότερη πυκνότητα και ατομικό αριθμό, οι ανόργανοι σπινθηριστές προτιμούνται σε αυτή τη ζώνη ενεργειών.

3.4.3 Ακτίνες γάμμα

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια, οι ακτίνες γάμμα είναι ανιχνεύσιμες αποδοτικότερα από υλικά υψηλού ατομικού αριθμού. Αυτή η διαφορά εξηγείται εύκολα εάν θυμηθούμε τους τρεις μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη:

- A) φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- B) σκέδαση Compton
- Γ) δίδυμος γένεση

Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τη δίδυμο γένεση οι ακτίνες γάμμα απορροφούνται πλήρως και μετατρέπονται σε φορτισμένο σωματίδιο ή σωματίδια, ενώ στη σκέδαση Compton οι ακτίνες γάμμα διατηρούν την ταυτότητά τους μεταφέροντας μόνο μέρος της ενέργειάς τους. Επομένως για τη δημιουργία ενός αποδοτικού ανιχνευτή σπινθηρισμών είναι απαραίτητη η χρήση υλικού που να εξασφαλίζει ότι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η δίδυμος γένεση θα υπερισχύουν σαν διαδικασίες της σκέδασης Compton,

προκειμένου τα ηλεκτρόνια να αποθέτουν όλη τους την ενέργεια πριν αφήσουν το υλικό. Επειδή η εξάρτηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της διδύμου γένεσης από τον ατομικό αριθμό είναι Z^5 και Z^2 αντίστοιχα, ενώ η σκέδαση Compton είναι ανάλογη του Z , οι ανόργανες φωσφορίζουσες ουσίες υψηλού Z είναι οι πλέον προτιμητέες για ανίχνευση ακτινών γάμμα.

7.7 Intrinsic Detection Efficiency for Various Radiations

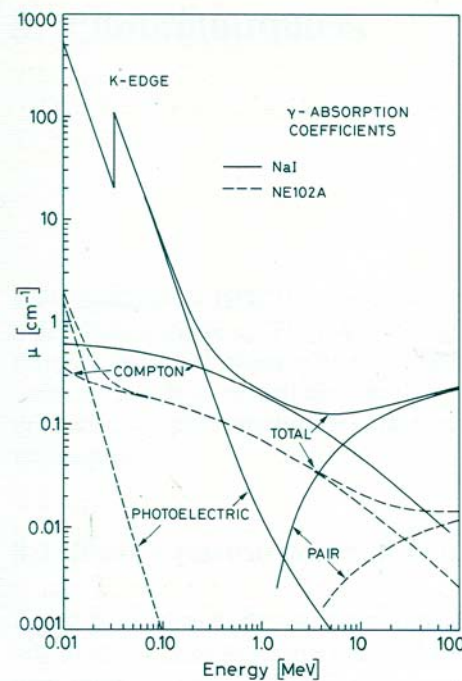


Fig. 7.13. Gamma-ray absorption coefficients for NaI and NE102A plastic scintillator. Note the difference in the relative magnitudes of the photoelectric and Compton cross sections

4. Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης

Οι ανιχνευτές ημιαγωγών, όπως υποδεικνύει και το όνομά τους, βασίζονται στη χρήση κρυσταλλικών ημιαγωγίμων υλικών, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το πυρίτιο(Silicon) και το γερμάνιο(Germanium). Οι ανιχνευτές αυτοί αναφέρονται και ως ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, που είναι ένας παλαιός όρος από την περίοδο που συσκευές στερεάς κατάστασης χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Ραγδαία εξέλιξη των συστημάτων αυτών υπήρξε τη δεκαετία του 1950, και τα πρώτα πρότυπα που τέθηκαν σε διάθεση στην αγορά ήταν κατά τη δεκαετία του 1960. Οι συσκευές αυτές παρείχαν τις πρώτες υψηλής ανάλυσης ενεργειακές μετρήσεις και γρήγορα ενσωματώθηκαν στην έρευνα της πυρηνικής φυσικής φορτισμένων σωματιδίων και γάμμα φασματοσκοπία. Πιο πρόσφατα όμως οι ανιχνευτές ημιαγωγών κέρδισαν και το επιστημονικό πεδίο της φυσικής υψηλών ενεργειών, σαν ανιχνευτές τροχιάς σωματιδίων.

Η βασική αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών στερεάς κατάστασης είναι ίδια με αυτή των ανιχνευτών αερίων (ιοντισμού). Το μέσο αντί του αερίου όμως είναι ένα ημιαγώγιμο στερεό υλικό. Όταν ιοντίζουσα ακτινοβολία διέλθει από τον ανιχνευτή, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που συλλέγονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το πλεονέκτημα στην όλη διαδικασία είναι ότι η μέση απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής είναι περίπου δέκα φορές μικρότερη απ' ότι για ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ιόντος σε έναν ανιχνευτή αερίου. Έτσι το ποσό του ιοντισμού που δημιουργείται για μία δοσμένη ενέργεια είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη και αποτυπώνεται στην αυξημένη ενεργειακή ανάλυση. Επίσης, εξ' αιτίας της μεγαλύτερης τους πυκνότητας, οι ανιχνευτές ημιαγωγών έχουν μεγαλύτερη ανασχετική ισχύ. Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης είναι εργονομικοί και έχουν πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης. Απαιτούν για τη λειτουργία τους (εκτός από τους ανιχνευτές πυριτίου) ένα σύστημα ψύξης, γι' αυτό και ένα ανοικτό πρόβλημα

στην σύγχρονη έρευνα των ανιχνευτών ημιαγωγών είναι η ανάπτυξη υλικών που θα λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου. Τέλος, σαν κρυσταλλικά υλικά, έχουν μεγάλη ευαισθησία στην καταστροφή από την ακτινοβολία, κάτι που περιορίζει την μακρόχρονη χρήση τους.

4.1 Αρχές λειτουργίας ανιχνευτών στερεάς κατάστασης

Η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται σε καθαρούς ημιαγωγούς, που είναι επίσης γνωστοί και ως εσωτερικοί (intrinsic) ημιαγωγοί. Προφανώς ο όρος «καθαρός» είναι σχετικός, καθώς στην πραγματικότητα κανείς ημιαγωγός δεν είναι απαλλαγμένος από προσμίξεις στο κρυσταλλικό του πλέγμα.

4.1.1 Δομή ενεργειακών ζωνών

Οι ημιαγωγοί είναι κρυσταλλικά υλικά των οποίων οι εξωτερικοί ατομικοί φλοιοί επιδεικνύουν δομή ενεργειακών ζωνών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

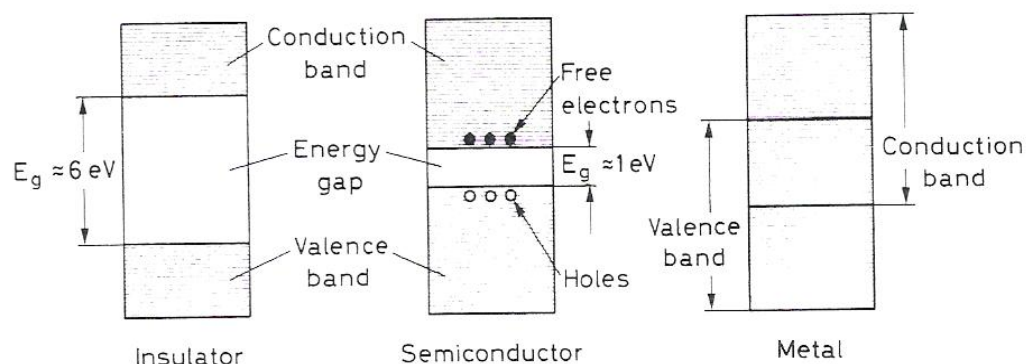


Fig. 10.1. Energy band structure of conductors, insulators and semiconductors

Η δομή αυτή αποτελείται από τη **ζώνη σθένους**, το ενεργειακό χάσμα και τη **ζώνη αγωγιμότητας**. Οι ενεργειακές ζώνες είναι πρακτικά διακριτά ενεργειακά επίπεδα (καταστάσεις), που είναι τόσο κοντά τοποθετημένα ώστε να θεωρούνται συνεχή, ενώ το ενεργειακό χάσμα είναι μία περιοχή όπου δεν υπάρχουν

διαθέσιμες καταστάσεις. Αυτή η δομή οφείλεται στην κοντινή, περιοδική τοποθέτηση των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού που προκαλεί επικάλυψη των κυματοσυναρτήσεων των ηλεκτρονίων. Επειδή η αρχή του Pauli απαγορεύει την ύπαρξη παραπάνω του ενός ηλεκτρονίου σε μία ενεργειακή κατάσταση, αίρεται ο εκφυλισμός στους εξωτερικούς φλοιούς, με το σχηματισμό πολλών διακριτών καταστάσεων σε πολύ κοντινές ενέργειες. Αφού δύο ηλεκτρόνια αντιπαράλληλου spin μπορεί να καταλαμβάνουν το ίδιο ενεργειακό επίπεδο, υπάρχουν τόσες ενεργειακές καταστάσεις όσα και τα ζεύγη των ηλεκτρονίων στον κρύσταλλο. Ο εκφυλισμός αυτός δεν επηρεάζει τα ενδότερα στρώματα των ηλεκτρονίων, τα οποία είναι πιο ισχυρά συζευγμένα.

Η υψηλότερη ενεργειακή ζώνη είναι η ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια σε αυτή την περιοχή είναι αποκομμένα από τα μητρικά τους άτομα και είναι ελεύθερα να κινούνται σε όλον τον κρύσταλλο. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους είναι πιο περιορισμένα και παραμένουν συσχετισμένα με τα γειτονικά τους άτομα.

Το πλάτος του κενού και των ζωνών αποσαφηνίζεται από τις αποστάσεις των ατόμων στο πλέγμα. Αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση. Στους αγωγούς το κενό δεν υπάρχει ενώ στους μονωτές το κενό είναι πολύ μεγάλο. Σε φυσιολογικές θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια σε έναν μονωτή είναι όλα στη ζώνη σθένους και η ενέργεια εξ' αιτίας της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων δεν είναι ικανή να διεγείρει τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Για ένα αγωγό αντίθετα, η απουσία κενού διευκολύνει αρκετά τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων προς τη ζώνη αγωγιμότητας, όπου θα είναι ελεύθερα να κινούνται σε ολόκληρο τον κρύσταλλο. Έτσι εάν εφαρμόσουμε

ηλεκτρικό πεδίο, θα εμφανιστεί ηλεκτρικό ρεύμα, κάτι που δεν συμβαίνει με έναν μονωτή. Σε ένα ημιαγωγό, το ενεργειακό κενό έχει ενδιάμεση τιμή, έτσι ώστε μόνο μερικά ηλεκτρόνια διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας λόγω της θερμικής τους ενέργειας. Έτσι με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, εμφανίζεται ρεύμα έστω και μικρής τιμής.

4.1.2 Φορείς φορτίων στους ημιαγωγούς

Στους 0° K, στην χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση ενός ημιαγωγού, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους συμμετέχουν όλα σε ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων του πλέγματος. Αυτό επιδεικνύεται στο σχήμα παρακάτω.

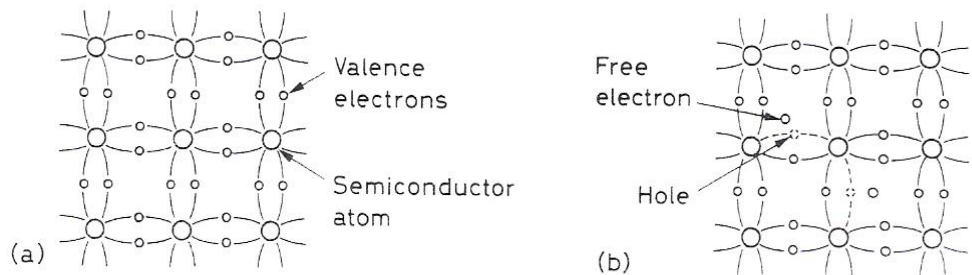


Fig. 10.2. Covalent bonding of silicon: (a) at 0 K, all electrons participate in bonding, (b) at higher temperatures some bonds are broken by thermal energy leaving a *hole* in the valence band

Το πυρίτιο και το γερμάνιο έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, έτσι ώστε να σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς. Σε φυσιολογικές θερμοκρασίες, λόγω της θερμικής ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να διεγερθεί και να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας μία οπή στην προηγούμενη θέση του. Έτσι είναι εύκολο για τα γειτονικά ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους να γεμίσουν το κενό αυτό, αφήνοντας τους δεσμούς στους οποίους συμμετέχουν και δημιουργώντας νέες οπές και έτσι η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Έτσι φαίνεται σαν να υπάρχει «κίνηση» των οπών κατά μήκος του κρυστάλλου και επειδή η οπή εμφανίζεται θετικά

φορτισμένη σε σχέση με τα ηλεκτρόνια, δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Λοιπόν σε έναν ημιαγωγό δημιουργείται ρεύμα από δύο πηγές: την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και την «κίνηση» των οπών στη ζώνη σθένους.

4.1.3 Συγκέντρωση και «ευκινησία» φορέων στους ημιαγωγούς

Στη μόνιμη κατάσταση εντός ενός ημιαγωγίμου κρυστάλλου, η συγκέντρωση n_i των ηλεκτρονίων (αντίστοιχα των οπών), είναι:

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (18)$$

, όπου T η θερμοκρασία, k η σταθερά του Boltzmann και A μία σταθερά που εξαρτάται από τον αριθμό των ενεργειακών καταστάσεων των ζωνών.

Υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου E , η ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων και των οπών σε έναν ημιαγωγό μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{aligned} u_e &= \mu_e E \\ u_h &= \mu_h E \end{aligned} \quad (19)$$

, όπου μ είναι η ευκινησία των φορέων που για συγκεκριμένο υλικό είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του ηλεκτρικού πεδίου. Ενσωματώνοντας τη σχέση για την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος $J = \rho u$ και τη σχέση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας $\sigma = J/E$, προκύπτει $\sigma = en_i(\mu_e + \mu_h)$.

4.1.4 Επανασύνδεση και παγίδευση

Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επανασυνδεθεί με μία οπή, πηδώντας από τη ζώνη αγωγιμότητας σε μία κενή ενεργειακή κατάσταση στη ζώνη σθένους, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως ευθεία **επανασύνδεση**, και είναι η ακριβώς αντίθετη διαδικασία της δημιουργίας του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Αφού η ενέργεια και η ορμή διατηρούνται, το ηλεκτρόνιο και η οπή πρέπει να έχουν τις κατάλληλες τιμές για να συμβεί η επανασύνδεση, γι' αυτό και τέτοιου είδους διαδικασίες σπανίζουν. Εάν η επανασύνδεση ήταν η μόνη διαδικασία που συνέβαινε στον κρύσταλλο, τότε τα ηλεκτρόνια και οι οπές έχει υπολογιστεί θεωρητικά ότι θα είχαν χρόνους ζωής τη τάξης του ενός δευτερολέπτου. Πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν την ύπαρξη και άλλων μηχανισμών.

Ο πιο σημαντικός μηχανισμός είναι μέσω **κέντρων επανασύνδεσης** που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της ύπαρξης προσμίξεων στην κρυσταλλική δομή. Αυτά τα κέντρα διαταράσσουν την ενεργειακή δομή των ζωνών, προσθέτοντας επιπλέον ενεργειακά επίπεδα στη μέση του ενεργειακού χάσματος, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.

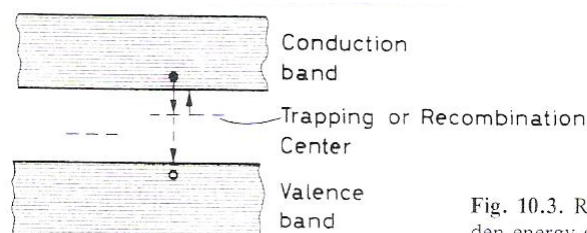


Fig. 10.3. Recombination and trapping sites in the forbidden energy gap

Σε αυτές τις καταστάσεις είναι πιθανό να συλληφθούν ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και ύστερα υπάρχουν δύο εναλλακτικές επιλογές: 1) μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά επιστρέφουν στη ζώνη αγωγιμότητας ή 2) κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στα επίπεδα αυτά, είναι

πιθανό να συλληφθεί και μία οπή που αργότερα θα αλληλεπιδράσει με το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στο επίπεδο που συνέλαβε τον οπή αυτή. Κάθε τέτοιο κέντρο επανασύνδεσης μπορεί να συμμετέχει σε πολλές διαδικασίες επανασύνδεσης.

Όσον αφορά στην ανίχνευση ακτινοβολίας, η ύπαρξη προσμίξεων επανασύνδεσης παίζει επιζήμιο ρόλο αφού μειώνουν το μέσο χρόνο όπου οι φορείς φορτίου παραμένουν ελεύθεροι. Ο χρόνος αυτός, φυσικά, πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για τη συλλογή των φορτίων, αλλιώς το φορτίο χάνεται, με ακόλουθη μείωση της ανάλυσης. Γι' αυτό τον λόγο οι ανιχνευτές ημιαγωγών απαιτούν σχετικά καθαρούς κρυστάλλους. Παραδείγματος χάριν για έναν ανιχνευτή μεγάλου όγκου, η συγκέντρωση προσμίξεων δεν μπορεί να υπερβαίνει τις 10^{10} προσμίξεις ανά κυβικό εκατοστό (cm^3).

Η δεύτερη επίδραση που έχουν οι προσμίξεις είναι η **παγίδευση (trapping)**. Κάποιες προσμίξεις μπορούν να συλλάβουν μόνο ένα είδος φορέα φορτίου, δηλαδή είτε ηλεκτρόνια ή οπές. Τέτοια κέντρα απλά συγκρατούν το ηλεκτρόνιο ή την οπή και έπειτα από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τα ελευθερώνουν. Εάν ο χρόνος παγίδευσης είναι της τάξης του χρόνου συλλογής του φορτίου, τότε προφανώς πολλά φορτία δεν θα μετρηθούν και θα δημιουργηθεί ελλιπής συλλογή φορτίου. Εάν ο χρόνος παγίδευσης είναι πολύ πιο μικρός, τότε έχει μικρή επίδραση στη συλλογή φορτίου. Τα κέντρα επανασύνδεσης είναι και αυτά κέντρα παγίδευσης.

Παρ' ότι οι προσμίξεις είναι η κύρια αιτία δημιουργίας της επανασύνδεσης και της παγίδευσης, ωστόσο και οι δομικές ανωμαλίες του υλικού ίσως έχουν την ίδια δράση. Αυτές οι ανωμαλίες μπορεί να περιλαμβάνουν απλές **σημειακές ανωμαλίες**, όπως κενά στο ατομικό

πλέγμα ή άτομα που καταλαμβάνουν θέσεις στον χώρο ανάμεσα στα σημεία του πλέγματος και κρυσταλλικές μετατάξεις ή δυστοπίες (dislocations), στις οποίες μία ολόκληρη γραμμή ατόμων (δομικός λίθος) απουσιάζει. Οι ανωμαλίες αυτές ίσως έχουν προέλθει από θερμική δόνηση, πλαστική παραμόρφωση, μηχανική καταπόνηση ή βομβαρδισμό από ακτινοβολία.

4.2 Ενισχυμένοι ημιαγωγοί

Σε έναν καθαρό ημιαγωγίμο κρύσταλλο, ο αριθμός των οπών και των ηλεκτρονίων είναι ίσος στην ζώνη αγωγιμότητας. Η ισορροπία αυτή μπορεί εύκολα να μεταβληθεί εάν εισάγουμε μία μικρή ποσότητα προσμίξεων ατόμων, που διαθέτουν ένα περισσότερο ή λιγότερο ηλεκτρόνιο στους εξωτερικές τους στιβάδες, σε σχέση πάντα με το υλικό του κρυστάλλου. Για το πυρίτιο και το γερμάνιο που είναι τετρασθενή υλικά, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εισάγουμε είτε τρισθενείς ή πεντασθενείς προσμίξεις. Οι κρύσταλλοι αυτοί με τις ενσωματωμένες προσμίξεις, δημιουργούν αυτό που ονομάζουμε **ενισχυμένους ημιαγωγούς**.

Εάν το υλικό των προσμίξεων είναι πεντασθενές, τότε εμφανίζεται η κατάσταση που παρουσιάζεται στην εικόνα παρακάτω.

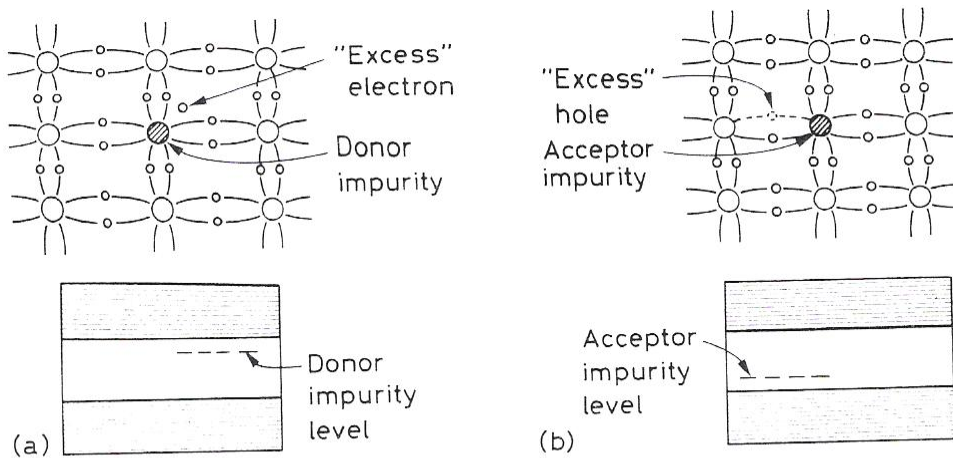


Fig. 10.4. (a) Addition of donor impurities to form n-type semiconductor materials. The impurities add excess electrons to the crystal and create donor impurity levels in the energy gap. (b) Addition of acceptor impurities to create p-type material. Acceptor impurities create an excess of holes and impurity levels close to the valence band

Στη θεμελιώδη κατάσταση, τα ηλεκτρόνια γεμίζουν τη ζώνη σθένους η οποία χωράει μονάχα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους ανά άτομο. Αφού το άτομο του υλικού πρόσμιξης έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους, ένα ηλεκτρόνιο σθένους περισσεύει στη ζώνη. Το ηλεκτρόνιο αυτό καταλαμβάνει μία διακριτή ενεργειακή κατάσταση που δημιουργείται στη ζώνη του ενεργειακού χάσματος από την παρουσία της πρόσμιξης. Σε αντίθεση με τις καταστάσεις που δημιουργούν τα φαινόμενα της επανασύνδεσης και της παγίδευσης, η ενεργειακή κατάσταση αυτή είναι εξαιρετικά κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, καθώς στο πυρίτιο απέχει μόλις 0,05eV. Σε φυσιολογικές θερμοκρασίες, για το λόγο αυτό, το περισσεύον ηλεκτρόνιο διεγείρεται εύκολα προς τη ζώνη αγωγιμότητας, όπου και επαυξάνει την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Επιπρόσθετα, τα υπόλοιπα περισσεύοντα ηλεκτρόνια θα γεμίσουν τις υπάρχουσες οπές του κρυστάλλου, μειώνοντας έτσι την συγκέντρωση αυτών (των οπών). Τέτοιου είδους υλικά λοιπόν, όπου το επαγόμενο ρεύμα οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων ονομάζονται **ημιαγωγοί n-τύπου**. Στην περίπτωση τρισθενούς υλικού προσμίξεων, θα υπάρχει περίσσεια μίας οπής στον κρύσταλλο. Η διαταραχή στην ενεργειακή δομή θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας ζώνης εξαιρετικά κοντά στη ζώνη σθένους, στην οποία θα μεταπηδούν τα ηλεκτρόνια σθένους, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τέτοιου είδους υλικά, όπου η πλειοψηφία των φορέων φορτίου που κινούνται και επάγουν ρεύμα είναι οι οπές, ονομάζονται **ημιαγωγοί p-τύπου**. Στην πράξη, υλικά δότες όπως το αρσενικό, ο φώσφορος και το αντιμόνιο χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ημιαγωγών n-τύπου, ενώ το γάλλιο, το βορόνιο και το ίνδιο χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ημιαγωγών p-τύπου, με συγκεντρώσεις πρόσμιξης που δεν ξεπερνά τα μόλις λίγα μέρη στο δισεκατομμύριο(ppb). Για το διαχωρισμό των ισχυρά ενισχυμένων ημιαγωγών, οι προσμίξεις των οποίων μπορεί να

έχουν συγκεντρώσεις της τάξης των 10^{20} άτομα/cm³, από τα απλά ενισχυμένα υλικά, χρησιμοποιείται το σύμβολο «+» μετά τον τύπο του ημιαγωγού, δηλαδή γράφουμε p⁺ ή n⁺. Ανάλογα με τον τύπο της πρόσμιξης του ημιαγωγού, η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των οπών, ακολουθεί έναν απλό νόμο για το θερμικό ισοζύγιο. Εάν n είναι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και p των οπών, έχουμε:

$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (20)$$

Αφού ο ημιαγωγός είναι ουδέτερος, οι πυκνότητες θετικού και αρνητικού φορτίου πρέπει να είναι ίσες, οπότε ισχύει:

$$N_D + p = N_A + n \quad (21)$$

, όπου N_D και N_A είναι οι συγκεντρώσεις του δότη και του αποδέκτη αντίστοιχα. Σε ένα ημιαγωγό n-τύπου όπου N_A=0 και n>>p, η ηλεκτρονιακή πυκνότητα είναι

$$n \approx N_D \quad (22)$$

, επομένως έχουμε

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (23)$$

ενώ η αγωγιμότητα του ημιαγωγού δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{\rho} = \sigma \approx eN_D \mu_e \quad (24).$$

4.3 Η np ημιαγώγιμη επαφή

Η λειτουργία όλων των υπαρχόντων ανιχνευτών ημιαγωγών, βασίζεται στο σχηματισμό μιας ημιαγώγιμης επαφής. Οι επαφές αυτές είναι γνωστές στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ως διορθωτικές δίοδοι, αν και δεν χρησιμοποιούνται κατ' αυτόν τον τρόπο στα ανιχνευτικά συστήματα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνδεσης τέτοιων διόδων και είναι προφανές ότι

τέτοιες επαφές δεν μπορούν να δημιουργηθούν απλώς συμπιέζοντας δύο υλικά p και n τύπου.

Ο σχηματισμός μίας ηρ-επαφής δημιουργεί μία ειδική ζώνη στη διεπιφάνεια των δύο υλικών (σχήμα κάτωθεν). Εξ' αιτίας της διαφορετικής συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και των οπών στα δύο υλικά, υπάρχει μία αρχική διάχυση ηλεκτρονίων προς την p-περιοχή και μία αντίστοιχη διάχυση των οπών προς την n-περιοχή. Σαν συνέπεια, ηλεκτρόνια γεμίζουν οπές στην p-περιοχή, ενώ οπές «συλλαμβάνουν» ηλεκτρόνια στην n-περιοχή. Εάν θυμηθούμε ότι αρχικά τα δύο υλικά είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, η διάχυση των φορέων φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πόλων στις δύο πλευρές της επαφής.

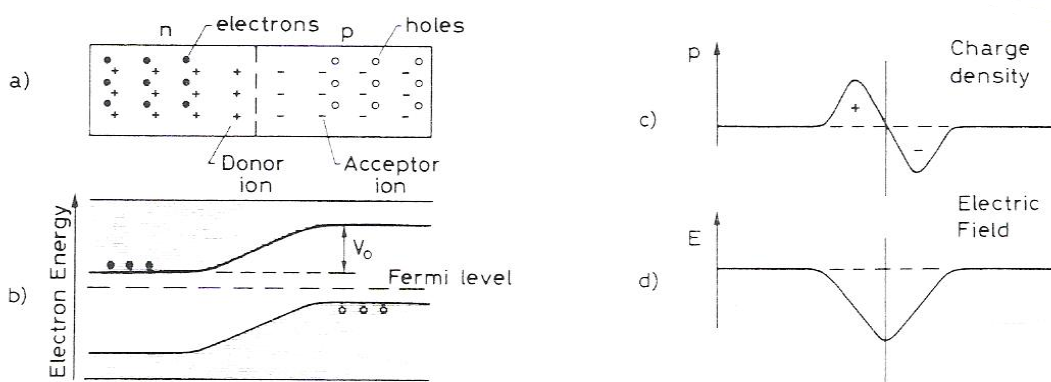


Fig. 10.5. (a) Schematic diagram of an np junction, (b) diagram of *electron* energy levels showing creation of a contact potential V_0 , (c) charge density, (d) electric field intensity

Αυτό δημιουργεί βαθμίδα ηλεκτρικού πεδίου στην επαφή, που τελικά διακόπτει τη διάχυση και δημιουργεί μία περιοχή ακίνητου διαστήματος φορτίου. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών της επαφής, που είναι γνωστή ως **δυναμικό επαφής**. Η ενεργειακή δομή φαίνεται στο σχήμα, ενώ αξίζει να σημειώσουμε ότι το δυναμικό επαφής είναι της τάξης του 1V. Η περιοχή αλλαγής του δυναμικού είναι γνωστή ως **κενή ζώνη** και έχει την χαρακτηριστική ιδιότητα να είναι άδεια (κενή) από κινητούς φορείς φορτίου. Στην πράξη εάν οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο ή οπή εισέλθει σε αυτή την περιοχή, τότε το ηλεκτρικό πεδίο θα τα απομακρύνει. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα αξιοποιήσιμο από τα ανιχνευτικά συστήματα.

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία που εισέρχεται σε αυτή την ζώνη, θα απελευθερώσει ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που στη συνέχεια θα απομακρυνθούν λόγω του ηλεκτρικού πεδίου. Εάν τοποθετήσουμε ηλεκτρικές επαφές σε κάθε άκρη της συσκευής, τότε θα λάβουμε ηλεκτρικό σήμα ανάλογο του ιονισμού που προκαλείται.

4.3.1 Το κενό βάθος

Το πλάτος της κενής ζώνης είναι γενικά μικρό και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των n και p προσμίξεων. Εάν η κατανομή της πυκνότητας φορτίου $\rho(x)$ στην κενή ζώνη, είναι γνωστή, αυτή υπακούει στην εξίσωση του Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (25)$$

, όπου ε η διηλεκτρική σταθερά.

Χρησιμοποιώντας για εποπτικούς λόγους μία ομοιόμορφη συνάρτηση πυκνότητας φορτίου $\rho(x)$ σαν την ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= -\frac{eN_D}{\varepsilon} x + C_n, \text{ για } 0 < x < x_n \\ \text{και } \frac{dV}{dx} &= -\frac{eN_A}{\varepsilon} x + C_p, \text{ για } -x_p < x < 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{προκύπτει } x_p = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right)^{1/2} \text{ και}$$

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)} \right)^{1/2} \quad (27)$$

, όπου $V_0 = \frac{e}{2\epsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$, το δυναμικό επαφής.

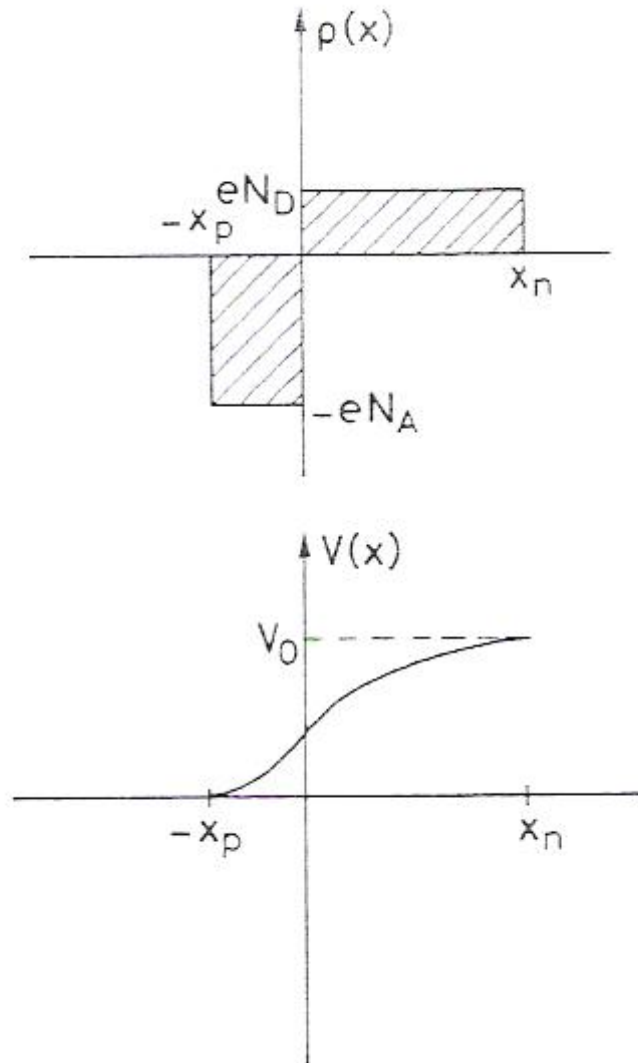


Fig. 10.6. Model for calculating the depletion depth of an np junction. For simplicity, assume a uniform charge distribution in the depletion zone

Έτσι το συνολικό πλάτος της κενής ζώνης είναι $d = x_n + x_p$ (28).

$$\text{Εάν } N_A \gg N_D, \text{ τότε } d \approx x_n = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D} \right)^{1/2}, \text{ ή}$$

χρησιμοποιώντας την έκφραση για την ειδική αντίσταση:

$$d \approx (2\varepsilon \rho_n \mu_e V_0)^{1/2} \quad (29).$$

Κάνοντας τους υπολογισμούς προκύπτει το εξής:

Πυρίτιο:

$$0.53(\rho_n V_0)^{1/2} \text{ m, n-type}$$

d=

$$0.32(\rho_p V_0)^{1/2} \text{ m, p-type}$$

και για τυπικές τιμές του $\rho=20.000 \Omega$ και $V_0=1 \text{ V}$, έχουμε $d=75 \mu\text{m}$.

Λαμβανομένης υπόψη της σχέσης για τη χωρητικότητα πυκνωτή επίπεδης γεωμετρίας, η χωρητικότητα του κενού στρώματος είναι:

$$2.2(\rho_n V_0)^{-1/2} \text{ pF/mm}^2, \text{ n-type}$$

C/A=

$$3.7(\rho_p V_0)^{-1/2} \text{ pF/mm}^2, \text{ p-type}$$

Για τη χρήση της επαφής ηρ σε ένα ανιχνευτικό σύστημα πρέπει να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι το εσωτερικό παραγόμενο ρεύμα δεν είναι αρκετά έντονο για να παρέχει αποδοτική συλλογή φορτίου και ότι το μικρό πάχος της κενής ζώνης θα μπορεί να σταματήσει μόνο τα χαμηλότερης ενέργειας σωματίδια. Μία λύση είναι η χρήση **αντίστροφου δυναμικού πόλωσης** (reverse-bias) στην επαφή, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο σχήμα παρακάτω.

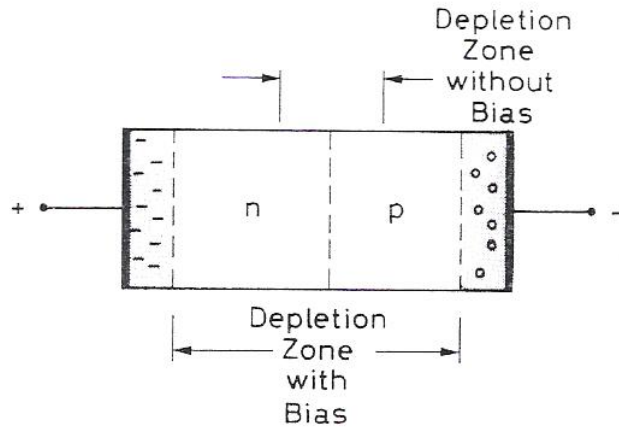


Fig. 10.7. Reversed-bias junction

Η εφαρμογή της τάσης αυτής θα έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των οπών από την επαφή προς την p-περιοχή και των ηλεκτρονίων από την επαφή προς την n-περιοχή. Σαν συνέπεια αυτής της διαδικασίας, υπάρχει διαπλάτυνση της νεκρής ζώνης και έτσι αυξάνει ο ευαίσθητος στην ιοντίζουσα ακτινοβολία όγκος της συσκευής. Μάλιστα, όσο πιο υψηλή είναι η εφαρμοζόμενη τάση, τόσο πλατύτερη γίνεται η νεκρή ζώνη και αποδοτικότερη η συλλογή του φορτίου. Το πλάτος της νεκρής ζώνης υπολογίζεται τώρα από τη σχέση (28), αντικαθιστώντας το V_0 , με $V_0 + V_B$, όπου V_B η εφαρμοζόμενη πόλωση δυναμικού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι εξ' αιτίας της διαφορετικής κινητικότητας των ηλεκτρονίων και των οπών, η ίδια εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση V_B θα προκαλέσει μεγαλύτερη πλάτυνση της νεκρής ζώνης σε ένα n-τυπρημιαγωγίμο υλικό. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε ότι το πλάτος της νεκρής ζώνης του πυριτίου είναι μεγαλύτερο από 1mm, για μία τάση V_B της τάξης των 300V.

4.4 Χαρακτηριστικά ανιχνευτών ημιαγωγών

Το επόμενο σχήμα επιδεικνύει τη βασική σύνθεση για τη χρήση μίας επαφής διόδου, ως ανιχνευτική διάταξη.

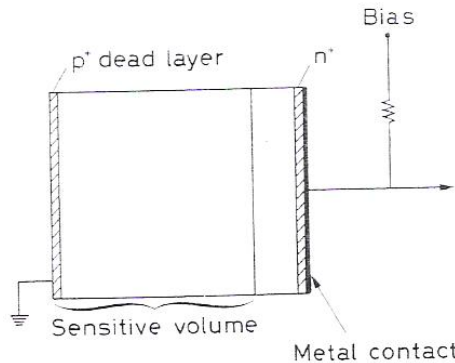


Fig. 10.8. Basic layout of a junction diode detector

Για να επιτύχουμε τη συλλογή του φορτίου που παράγεται από την ionτίζουσα ακτινοβολία, πρέπει να προσαρμόσουμε δύο ηλεκτρόδια στις άκρες της σύνδεσης. Στην περίπτωση των ημιαγωγών όμως, δεν είναι εφικτό ένας μεταλλικός αγωγός να σχηματιστεί αποθέτοντας απλά το μέταλλο στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Πράγματι, η επαφή ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας διορθωτικής σύνδεσης (τάσης), με την κενή ζώνη να εκτείνεται στον ημιαγωγό. Για να αποτρέψουμε αυτό το φαινόμενο, ένα στρώμα ισχυρά ενισχυμένου ημιαγωγίμου υλικού n^+ ή p^+ χρησιμοποιείται ανάμεσα στον ημιαγωγό και το μέταλλο. Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων των προσμίξεων, το πλάτος της νεκρής ζώνης είναι ουσιαστικά μηδενικό και έτσι συντίθεται η ωμική επαφή. Για λόγους απομόνωσης του σήματος, η εφαρμοζόμενη τάση στον ανιχνευτή, παρέχεται μέσω μίας σειράς αντιστάσεων και όχι άμεσα. Για τη συλλογή του σήματος του φορτίου από τον ανιχνευτή, χρησιμοποιείται ένας προ-ενισχυτής, ο οποίος πρέπει να έχει χαρακτηριστικά χαμηλού θορύβου, λόγω του χαμηλού επιπέδου του σήματος.

4.4.1 Μέση ενέργεια ανά ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα των ανιχνευτών ημιαγωγών έναντι των υπολοίπων συστημάτων είναι, όπως έχουμε πει, το μικρό ποσό της μέσης ενέργειας που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Η μέση ενέργεια για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη του τύπου και της ενέργειας της ακτινοβολίας και εξαρτάται μόνο από το είδος του υλικού. Ο πίνακας παρακάτω συγκεντρώνει αυτές τις τιμές για διάφορους ημιαγωγούς και θερμοκρασίες.

	Si	Ge
300 K	3,62 eV	-
77 K	3,81 eV	2,96 eV

Για την ίδια ενέργεια ακτινοβολίας, ο αριθμός των φορέων φορτίου που θα δημιουργηθεί είναι περίπου μία τάξη μεγαλύτερος σε ημιαγωγικά υλικά σε σχέση με τους ανιχνευτές αερίων. Συγκρινόμενος με τον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων ενός σπινθηριστή, είναι δύο τάξεις μεγαλύτερος. Είναι προφανές ότι οι ανιχνευτές ημιαγωγών παρέχουν καλύτερη ενεργειακή ανάλυση.

Εάν συγκρίνουμε τις τιμές του παραπάνω πίνακα με τις τιμές του ενεργειακού χάσματος ενός ημιαγωγού (περίπου 1eV), είναι ξεκάθαρο ότι μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας που αποτίθεται από την ιοντίζουσα ακτινοβολία, ξοδεύεται για τη δημιουργία ζευγών. Το υπόλοιπο ποσό της ενέργειας, εγείρει τις δονήσεις του κρυσταλλικού πλέγματος.

4.4.2 Γραμμικότητα

Υποθέτοντας ότι το πλάτος της κενής ζώνης είναι αρκούντως μεγάλο ώστε να μπορεί να σταματήσει όλα τα σωματίδια, η απόκριση του ανιχνευτή ημιαγωγού θα έπρεπε να είναι γραμμική με την ενέργεια της ακτινοβολίας. Εάν E είναι η ενέργεια της ακτινοβολίας, τότε E/w ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών θα έπρεπε να δημιουργούνται, όπου w η απαιτούμενη ενέργεια ανά ζεύγος. Υποθέτοντας επίσης απόδοση συλλογής του ανιχνευτή η , τότε στα ηλεκτρόδια συλλέγεται φορτίο ίσο με $Q = \eta E/w$. Εφόσον είπαμε ότι η κενή περιοχή είναι χωρητικότητας C , η παρατηρούμενη τάση στα ηλεκτρόδια θα είναι ίση με $V = Q/C = \eta E/wC$, και έχει γραμμική εξάρτηση από την ενέργεια. Ύστερα, αφού η ενέργεια ανά μονάδα ζεύγους είναι ανεξάρτητη του τύπου του σωματιδίου, τότε και η απόκριση θα είναι κατ' αρχήν ανεξάρτητη του είδους της ακτινοβολίας. Αυτό όμως αποδεικνύεται αληθές μόνο για ελαφρώς ιοντίζουσες ακτινοβολίες, όπως τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια. Για βαρύτερα ιόντα, λαμβάνουν χώρα **φαινόμενα πλάσματος** που επηρεάζουν την απόδοση συλλογής και οδηγούν σε αποκλίσεις στο ύψος του παλμού για διαφορετικά σωματίδια της ίδιας ενέργειας. Εάν η κενή ζώνη είναι μικρότερη από το εύρος της ακτινοβολίας, τότε είναι προφανές ότι αναμένεται μη γραμμική απόκριση του συστήματος, από τη στιγμή που δεν αποτίθεται όλο το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας στον ευαίσθητο όγκο του ανιχνευτή. Για μία δεδομένη κενή περιοχή λοιπόν, η απόκριση είναι γραμμική, μέχρις ότου το εύρος της ακτινοβολίας ξεπεράσει το πλάτος της ζώνης.

4.4.3 Ο παράγοντας Fano στην εσωτερική ενεργειακή ανάλυση

Η εσωτερική ενεργειακή ανάλυση εξαρτάται από τον αριθμό των φορέων φορτίου και τον παράγοντα Fano. Παρά τα πολυάριθμα πειραματικά δεδομένα, ο παράγων Fano δεν είναι ακόμη καλά καθορισμένος για το πυρίτιο και το γερμάνιο. Πάντως είναι γνωστό ότι το F είναι μικρό και της τάξης του 0,12. Αυτό φυσικά, συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της ανάλυσης του ανιχνευτή, που είναι εξ' αρχής μεγάλη λόγω της μικρής ενέργειας w , της δημιουργίας ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.

Η αναμενόμενη ανάλυση έχει τιμή ίση με:

$$R = 2,35 \sqrt{\frac{Fw}{E}} \quad (30)$$

Για ένα σωματίδιο άλφα, ενέργειας 5MeV, η εσωτερική ενεργειακή ανάλυση για έναν ανιχνευτή πυριτίου είναι $R=0,07\%$ ή δηλαδή 3,5keV.

4.4.4 Ρεύμα διαρροής

Αν και μία αντίστροφα πολωμένη δίοδος (reversed biased diode) είναι ιδανικά μη αγώγιμη, ένα μικρό ρεύμα διακυμάνσεων διαπιστώνεται, μέσω των επαφών του ημιαγωγού, όταν εφαρμόζεται εξωτερική τάση. Αυτό το ρεύμα εμφανίζεται σαν θόρυβος στον ανιχνευτή και θέτει ένα όριο για το μικρότερο ύψος παλμού που μπορεί να παρατηρηθεί. Το ρεύμα διαρροής έχει ποικίλες πηγές. Μία είναι η κίνηση των μειοψηφούντων φορέων φορτίου, δηλαδή οπών από την n-περιοχή που έλκονται από την άλλη πλευρά της σύνδεσης και ηλεκτρονίων από την p-περιοχή που παρομοίως εκτελούν την αντίθετη κίνηση. Αυτό το ρεύμα είναι

αρκετά μικρό και αγγίζει τα μερικά nA/cm². Μία δεύτερη πηγή είναι η θερμική δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που προέρχονται από τα κέντρα επανασύνδεσης και παγίδευσης της νεκρής ζώνης. Τα κέντρα αυτά δεν μπορούν να συλλάβουν ηλεκτρόνια ή οπές αφού έχουν όλα εκδιωχθεί από την ζώνη, αλλά έχουν την δυνατότητα να καταλύουν τη δημιουργία ηλεκτρονίων και οπών από τη ζώνη σθένους, λειτουργώντας ως ενδιάμεσες ενεργειακές καταστάσεις. Η συνεισφορά από αυτή την πηγή εξαρτάται από τον απόλυτο αριθμό των «παγίδων» στην νεκρή περιοχή και άρα από τη συγκέντρωσή τους και τον όγκο της ζώνης. Γενικά, ρεύματα πυκνότητας των μερικών μA/cm² αναμένονται. Η τρίτη και σαφώς μεγαλύτερη πηγή ρεύματος διαρροής, είναι μέσω επιφανειακών καναλιών. Αυτό το συστατικό του ρεύματος είναι πολύπλοκο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το επιφανειακό χημικό περιβάλλον, την ύπαρξη προσμίξεων, την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα., κλπ.

4.4.5 Ευαισθησία και εσωτερική απόδοση

Για φορτισμένα σωματίδια, η εσωτερική ανιχνευτική απόδοση είναι αρκετά κοντά στο 100%, αφού πολύ λίγα σωματίδια θα αποτύχουν να δημιουργήσουν κάποιο ποσό ιονισμού στον ευαίσθητο όγκο του ανιχνευτή. Η ευαισθησία είναι ο θόρυβος από τα ρεύματα διαρροής στο ανιχνευτή και τα συνεργαζόμενα ηλεκτρονικά του, που θέτουν ένα κατώτατο όριο στο πλάτος του παλμού που μπορεί να μετρηθεί. Παρακάτω δίνεται γράφημα του εύρους διείδυσης διάφορων σωματιδίων σαν συνάρτηση της ενέργειάς τους.

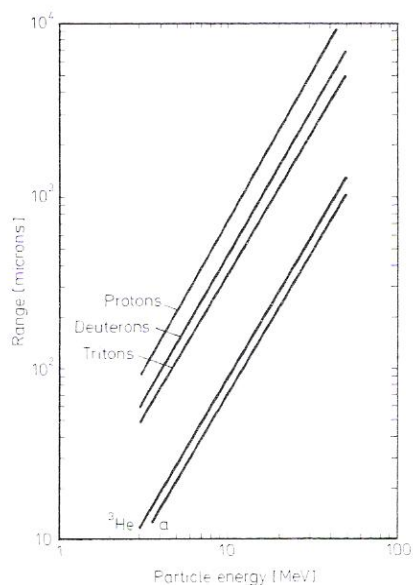


Fig. 10.9. Range of various particles in silicon (from *Skyrme* [10.10])

Για ανίχνευση γάμμα ακτίνων προτιμάται ο ανιχνευτής γερμανίου αντί του πυριτίου, εξ' αιτίας του μεγαλύτερου του ατομικού αριθμού. Παρ' όλα αυτά, λόγω του μικρότερου ενεργειακού χάσματος, το ρεύμα διαρροής στο γερμάνιο είναι αρκετά υψηλό σε κανονικές θερμοκρασίες για να είναι αποδεκτό και πρέπει να ψηχθεί σε θερμοκρασία υγρού αζώτου ($T=77\text{K}$). Για χαμηλών ενεργειών ακτίνες-Χ, κάτω των 30keV προτιμάται ο ανιχνευτής πυριτίου, εξ' αιτίας της Κ-ακμής που παρουσιάζει το γερμάνιο στα 11keV .

4.4.6 Σχήμα παλμών και χρόνος ανόδου

Επειδή ο χρόνος συλλογής ηλεκτρονίων και οπών εξαρτάται από τη θέση των φορέων φορτίου σε σχέση με τα ηλεκτρόδια, το σχήμα των παλμών από έναν ημιαγωγό ποικίλλει στη μορφή και το χρόνο ανόδου τους. Όπως και σε ένα ανιχνευτή αερίου, ο ηλεκτρικός παλμός στα ηλεκτρόδια δημιουργείται από επαγωγή λόγω της κίνησης των φορτίων, παρά από την συλλογή φορτίου αυτή καθ' αυτή. Υποθέτοντας δύο παράλληλα ηλεκτρόδια, η μεταβολή στη δυναμική ενέργεια από την μετακίνηση ενός φορτίου q κατά dx είναι :

$dQ=qdx/d$, όπου d η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Για παράδειγμα θα μελετήσουμε έναν ανιχνευτή pn -επαφής, ο οποίος φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα και του οποίου η νεκρή ζώνη κείται κυρίως προς τη μεριά της p -περιοχής.

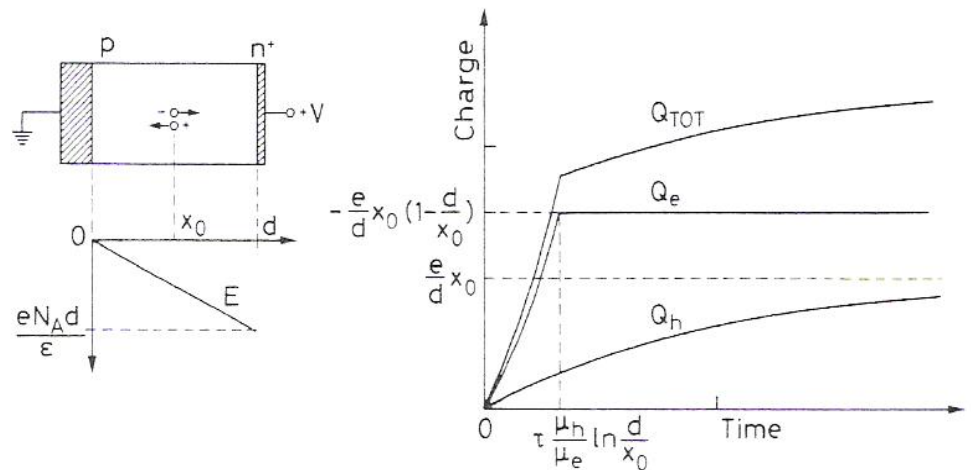


Fig. 10.10. Signal pulse shape due to a single electron-hole pair in an np junction

Χρησιμοποιώντας το σύστημα συντεταγμένων του σχήματος, το ηλεκτρικό πεδίο είναι ίσο με:

$E = -eN_A x / \epsilon$, ή $E = -x / (\mu_h \tau)$, όπου $\tau = \epsilon / \sigma = \epsilon \rho$ και ρ είναι η ειδική αντίσταση.

Υποθέτοντας τώρα ότι ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής δημιουργείται σε ένα σημείο x της κενής ζώνης, το ηλεκτρόνιο θα ξεκινήσει να ολισθαίνει προς το n^+ στρώμα και οι οπές προς το p ηλεκτρόδιο. Από τον ορισμό της ευκινησίας έχουμε (για ηλεκτρόνια):

$$u = \frac{dx}{dt} = -\mu_e E = \frac{\mu_e x}{\mu_h t} \quad (31)$$

, που επιφέρει τη λύση για την θέση:

$$x(t) = x_0 \exp\left(\frac{\mu_e t}{\mu_h \tau}\right) \quad (32)$$

Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρόνιο να φτάσει στο ηλεκτρόδιο συλλογής, δηλαδή στο $x=d$, είναι:

$$t = \tau \frac{\mu_h}{\mu_e} \ln\left(\frac{d}{x_0}\right) \quad (33)$$

Το επαγόμενο φορτίο είναι συνάρτηση του χρόνου, οπότε έχουμε:

$$Q_e(t) = -\frac{e}{d} \int \frac{dx}{dt} dt = \frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp\left(\frac{\mu_e t}{\mu_h \tau}\right)\right) \quad (34).$$

Ακριβώς όμοια εξάγουμε τις σχέσεις για μία οπή:

$$u = \frac{dx}{dt} = \mu_h E = -\frac{x}{\tau} \quad (35)$$

$$\Rightarrow x(t) = x_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (36)$$

και

$$Q_h(t) = -\frac{e}{d} \int \frac{dx}{dt} dt = -\frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp\left(\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (37).$$

Το σχήμα του παλμού δίνεται από το συνολικό συλλεγόμενο φορτίο όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα. Το συνολικό φορτίο είναι $Q_{\text{tot}} = -e$, όπως μπορεί να δειχθεί παίρνοντας τα όρια των (34) και (37). Ο παράγοντας τ , καθορίζει τον χρόνο ανόδου του σήματος. Στο πυρίτιο, ο παράγοντας αυτός έχει τιμή $\tau = \rho \cdot 10^{-12} \text{s}$. Για τυπική τιμή της ειδικής

αντίστασης 1000 Ωcm, ο χρόνος ανόδου του παλμού είναι της τάξης του 1 ns.

Βέβαια οι ανωτέρω υπολογισμοί είναι για ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Για την προσέγγιση του φαινομένου στην πράξη, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την τροχιά του σωματιδίου, την πυκνότητα του ιονισμού κατά μήκος της τροχιάς, την διακύμανση των ευκινήσιών των φορέων και τη συνεισφορά του ηλεκτρικού πεδίου.

4.5 Ανιχνευτές διόδων πυριτίου

Για ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων, το πυρίτιο είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο ημιαγώγιμο υλικό. Όπως έχουμε τονίσει, έχει το πλεονέκτημα της λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου, και ευρεία διαθεσιμότητα. Ένα από τα μειονεκτήματα των ανιχνευτών πυριτίου είναι το σχετικά μικρό τους μέγεθος. Οι τρέχουσες συσκευές που κυκλοφορούν στην αγορά έχουν περιορισμένα εμβαδά επιφανειών, της τάξης των λίγων δεκάδων τετραγωνικών εκατοστών. Οι ανιχνευτές πυριτίου μπορεί να κατασκευαστούν με διάφορους τρόπους, όπως περιγράψουμε παρακάτω.

4.5.1 Δίοδοι διαχυμένης επαφής

Οι δίοδοι διαχυμένης επαφής (diffused junction diodes) ήταν οι πρώτες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για ανίχνευση ακτινοβολίας. Αυτές οι δίοδοι κατασκευάζονται συνήθως διαχύνοντας προσμίξεις n-τύπου, όπως άτομα φωσφόρου στη μία άκρη ενός ομογενούς ημιαγώγιμου υλικού p-τύπου, σε υψηλή θερμοκρασία (~1273° K). Προσαρμόζοντας τις συγκεντρώσεις και το χρόνο διάχυσης, παράγονται

επαφές που κείτονται σε βάθη του ημιαγωγού, από μερικά δέκατα του μm έως ένα, δύο μm.

Με τη διαδικασία διάχυσης, τα επιφανειακά στρώματα του υλικού γίνονται ισχυρά ενισχυμένα, ώστε η κενή ζώνη εκτείνεται κυρίως προς τη μεριά της p-περιοχής. Αυτό δυστυχώς δημιουργεί ένα σχετικά στενό κενό στρώμα, μέσω του οποίου η ακτινοβολία πρέπει να περάσει, πριν εισέλθει στον ευαίσθητο όγκο του ανιχνευτή. Συνέπεια αυτού είναι ότι η ενέργεια που χάνεται στο στρώμα αυτό, δεν καταγράφεται. Ένα άλλο μειονέκτημα των συσκευών αυτών είναι ότι η διαδικασία διάχυσης πρέπει να πραγματοποιηθεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που τείνει να μειώσει το χρόνο ζωής των φορέων φορτίου και αυξάνει τον θόρυβο. Πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η τραχύτητα, σχετικά με άλλα ημιαγωγά ανιχνευτικά συστήματα και η μεγάλη τους αντίσταση στη ρύπανση της επιφάνειας του ανιχνευτή.

4.5.2 Δίοδοι εμφυτευμένων ιόντων

Οι συνδέσεις εμφυτευμένων ιόντων σχηματίζονται από το βομβαρδισμό του κρυστάλλου του ημιαγωγού με μία δέσμη ιόντων προσμίξεων, από έναν επιταχυντή.

Προσαρμόζοντας την ενέργεια της δέσμης ώστε να έχει συγκεκριμένο εύρος διείσδυσης στον ημιαγωγό, η συγκέντρωση των προσμίξεων μπορεί να ελεγχθεί.

Επειδή κατά τη διαδικασία συμβαίνουν καταστροφές από την ακτινοβολία, ο ημιαγωγός πρέπει να έχει πυρακτωθεί στους 500° C πριν τη χρήση, θερμοκρασία που δεν επηρεάζει κατά πολύ το χρόνο ζωής των φορέων φορτίου. Οι ανιχνευτές αυτού του είδους, είναι γενικά σταθερότεροι των συσκευών επιφανειακών φραγμάτων και έχουν παράθυρο εισόδου από πυρίτιο, αρκετά λεπτό, ίσο περίπου με 34nm. Προς το παρόν,

προσφέρουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα από όλους τους ανιχνευτές πυριτίου, αλλά σε συνδυασμό με το υψηλότερο κόστος κατασκευής.

4.5.3 Δίοδοι ολίσθησης-Λιθίου Si(Li)

Ένα από τα πρωταρχικά προβλήματα στη δημιουργία ανιχνευτών ημιαγωγών ήταν το αντιπαραγωγικά μικρό πλάτος της νεκρής περιοχής. Προκειμένου να επιτύχουμε λεπτότητα μεγαλύτερη των μερικών mm, απαιτείται πολύ υψηλές αντιστάσεις, που μπορούν να συμβούν μόνο στις περιπτώσεις των εσωτερικών (intrinsic) υλικών ή τελικά των αντισταθμισμένων ημιαγωγών.

Το πρόβλημα λύθηκε με την διαδικασία ολίσθησης λιθίου για το σχηματισμό αντισταθμισμένων ημιαγωγών. Συνδέσεις που κατασκευάζονται με τέτοια υλικά είναι γνωστές με το όνομα p-i-n επαφές, με ιδιότητες διαφορετικές από τις απλές συνδέσεις pn. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία στη ζώνη αντιστάθμισης, κάτι που υποδεικνύει σχεδόν σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.

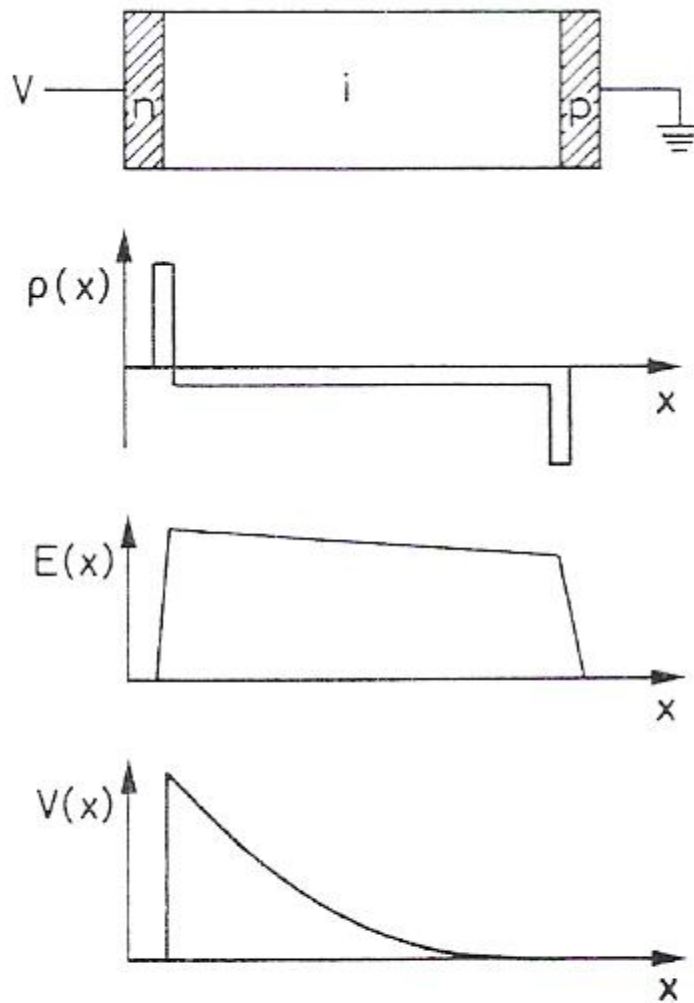


Fig. 10.13. Characteristics of p-i-n junctions. There is no space charge in the compensated zone so that the electric field is essentially constant

Το πλάτος της ζώνη αντιστάθμισης είναι 10-15 mm, κάτι που την κάνει κατάλληλη για σωματίδια βήτα και ακτίνες-X χαμηλής ενέργειας. Εξ' αιτίας της μεγάλης ευαίσθητης περιοχής, η συνεισφορά του θορύβου από θερμικά ηλεκτρόνια και οπές είναι αυξημένη, ώστε να απαιτείται ψύξη σε χαμηλές θερμοκρασίες για λειτουργία με υψηλή ανάλυση.

5. Φασματοσκοπία

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, η διαθεσιμότητα του NaI(Tl) σαν υλικό σπινθηρισμών, έθετε τις απαρχές του σύγχρονου επιστημονικού πεδίου της φασματοσκοπίας γ-ακτινών. Με την εισαγωγή του στην παραγωγή, δημιουργήθηκε ένας πρακτικός ανιχνευτής με υψηλή ανιχνευτική απόδοση για ακτίνες γάμμα και την ίδια στιγμή, μία συσκευή με καλή ενεργειακή ανάλυση, χρήσιμη στο διαχωρισμό της συνεισφοράς πολυενεργειακών πηγών γ-ακτινών. Η φασματοσκοπία με χρήση σπινθηριστών έχει έκτοτε εξελιχθεί σε ώριμη επιστήμη με εντυπωσιακές εφαρμογές σε διάφορα τεχνικά πεδία.

Η εκπληκτική επιτυχία της χρήσης του κρυστάλλου NaI(Tl), ως υλικού για αυτή τη διαδικασία, οφείλεται στην άκρως καλή του παραγωγή φωτός, την εξαιρετική του απόδοση και τον υψηλό ατομικό αριθμό των ιωδιούχων συστατικών του.

5.1 Γενικά περί φασματοσκοπίας γ-ακτινών

Ένα φωτόνιο ακτίνας-Χ ή γάμμα, είναι αφόρτιστο και δεν δημιουργεί άμεσο ιονισμό ή διέγερση στο υλικό το οποίο διαπερνά. Για το λόγο αυτό η ανίχνευση ακτινών-γάμμα εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις που θα έχει η ακτινοβολία με την ύλη στο πέρασμά της από αυτή. Τα αρχικά φωτόνια είναι «αόρατα» για τον ανιχνευτή και μόνο τα γρήγορα ηλεκτρόνια που παράγονται από τις φωτονικές αλληλεπιδράσεις παρέχουν πληροφορία για την ακτινοβολία. Τα ηλεκτρόνια αυτά χάνουν την ενέργειά τους μέσω ιονισμού και διέγερσης των ατόμων του υλικού του απορροφητή και μέσω εκπομπής ακτινοβολίας Bremsstrahlung. Για να μπορεί ένας ανιχνευτής να χρησιμοποιηθεί σε φασματοσκοπία γ-ακτινών, πρέπει να πληροί τα εξής δύο κριτήρια:1) να δρα ως μέσο μετατροπής στο οποίο τα εισερχόμενα φωτόνια έχουν λογική πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν και να παράγουν ένα ή περισσότερα

γρήγορα ηλεκτρόνια και 2) να λειτουργεί σαν ανιχνευτής μετατροπής για αυτά τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια.

Η απαίτηση για πλήρη απορρόφηση των δευτερευόντων ηλεκτρονίων, αποκλείει τους ανιχνευτές αερίων από τη φασματοσκοπία γ-ακτινών. Οι ανιχνευτές ημιαγωγών έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ευρέως στη φασματοσκοπία γ-ακτινών την τελευταία τριακονταετία. Στη συνέχεια θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στη φασματοσκοπία σπινθηριστών, όμως η ανάλυση μπορεί να γενικευθεί όχι μόνο σε άλλα υλικά σπινθηρισμού, εκτός του NaI(Tl), αλλά και σε ανιχνευτές στερεάς ή υγρής κατάστασης.

5.2 Ιδιότητες σπινθηριστών φασματοσκοπίας γ-ακτινών

5.2.1 Συνάρτηση απόκρισης

Το ιωδιούχο νάτριο έχει μεγάλη απήχηση εξ' αιτίας του σχετικά υψηλού ατομικού αριθμού των ιωδιούχων συστατικών του, που διασφαλίζουν πως η φωτοηλεκτρική απορρόφηση θα είναι κυρίαρχη διαδικασία μεταξύ των αλληλεπιδράσεων των ηλεκτρονίων με το υλικό του ανιχνευτή. Ακόμη ο κρύσταλλος του NaI(Tl) έχει υψηλή φωτεινή απόδοση και μικρούς χρόνους αποδιέγερσης, κάτι που τον κάνει να ξεχωρίζει των άλλων κρυστάλλων σπινθηρισμού (BGO, CsI) στην φασματοσκοπική πρακτική.

Έχει εκδοθεί ένας μακρύς κατάλογος με πειραματικές μετρήσεις της συνάρτησης απόκρισης περίπου 300 ραδιονουκλιδίων, με ανιχνευτή NaI(Tl), χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

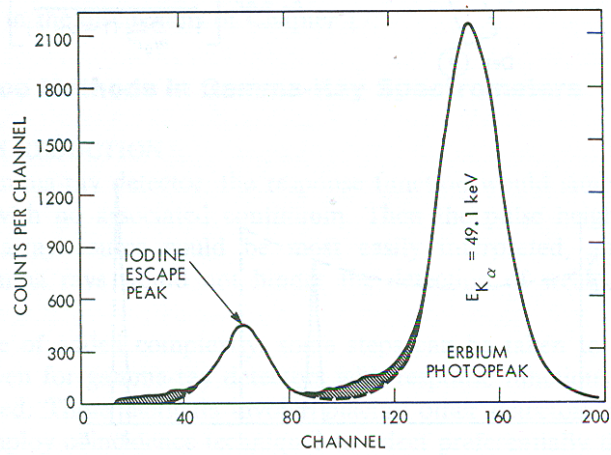


Figure 10-10 A low-energy spectrum from a NaI(Tl) scintillator for incident 49.1 keV X-rays from erbium. The iodine characteristic X-ray escape peak lies 25 keV below the photopeak. (From Dell and Ebert.¹³)

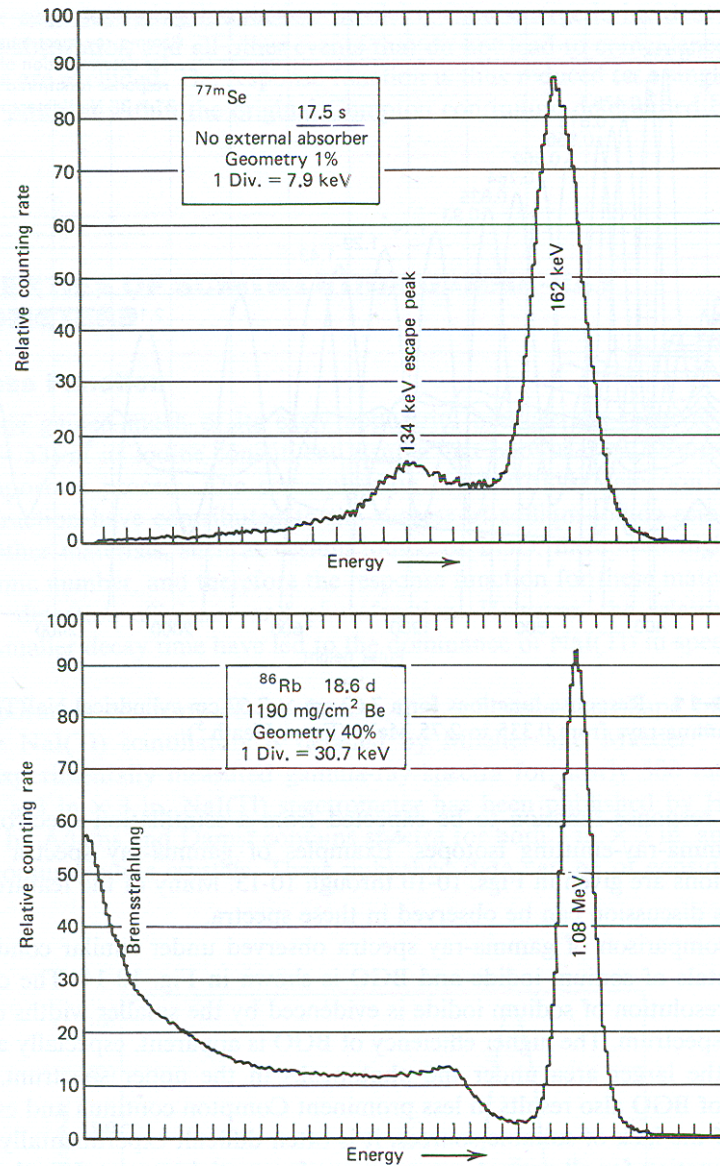


Figure 10-12 Experimentally measured pulse height spectra in NaI(Tl) scintillators for two radioisotopes emitting monoenergetic gamma rays. The top spectrum shows the iodine X-ray escape peak, which can be evident for gamma rays of relatively low energy. The bottom spectrum, for a higher-energy gamma ray, shows the bremsstrahlung generated by stopping the beta particles within the source, in addition to the Compton continuum and photopeak. (From F. Adams and R. Dams, *Applied Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd ed. Copyright 1970 by Pergamon Press, Ltd. Used with permission.)

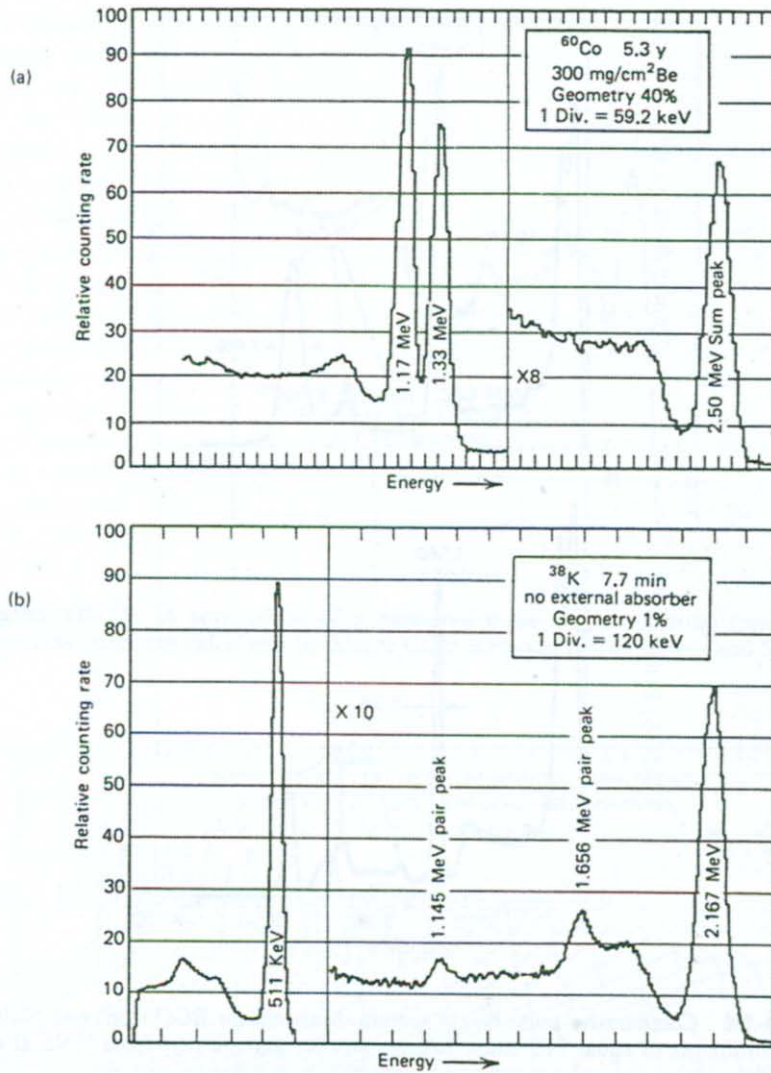


Figure 10-13 (a) Experimentally measured pulse height spectrum for ^{60}Co (1.17 and 1.33 MeV gamma rays) from a 10.16 cm \times 10.16 cm cylindrical NaI(Tl) scintillator. The large fractional solid angle of 40% subtended by the detector enhances the sum peak intensity. (b) Spectrum from ^{38}K (2.167 MeV gamma ray plus positron annihilation photons) from a 7.62 cm \times 7.62 cm NaI(Tl) scintillator. The single and double escape peaks for the high-energy gamma ray are evident, as well as a backscatter peak at \sim 200 keV. (From F. Adams and R. Dams, *Applied Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd ed. Copyright 1970 by Pergamon Press, Ltd. Used with permission.)

Λόγω της έλλειψης των κατάλληλων πηγών , συχνά είναι δύσκολη η πειραματική μέτρηση της συνάρτησης απόκρισης όλων των ενεργειών των γ-ακτινών και συνήθως χρησιμοποιείται η υπολογιστική μέθοδος Monte-Carlo για την εύρεση των αποτελεσμάτων.

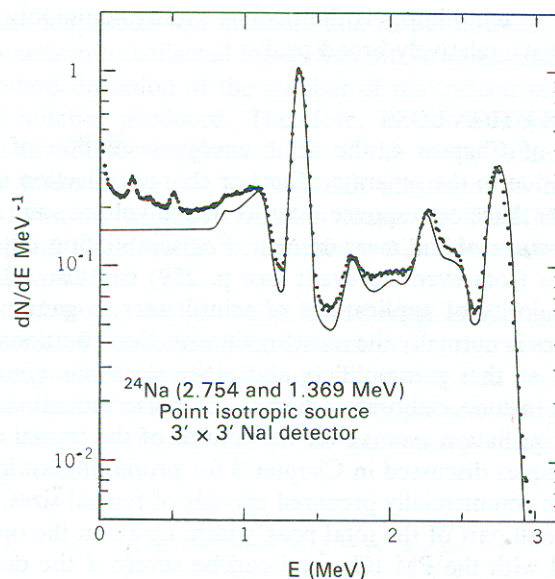


Figure 10-15 A comparison of a measured pulse height spectrum (points) with a theoretical spectrum calculated by Monte Carlo methods. (From Berger and Seltzer.¹⁵)

5.2.2 Ενεργειακή ανάλυση

Σε αντίθεση με τα θεωρητικά φάσματα απόθεσης ενέργειας, οι πειραματικές μετρήσεις για την συνάρτηση απόκρισης περιέχουν πληροφορίες που προκαλούν σύγχυση, λόγω της περιορισμένης ενεργειακής ανάλυσης του ανιχνευτή. Η πλέον φανερή διαφορά είναι ότι οι πειραματικές κορυφές έχουν ένα κάποιο πεπερασμένο πλάτος και δεν εμφανίζονται τόσο λεπτές και αιχμηρές.

Η ενεργειακή ανάλυση δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (38)$$

, όπου FWHM είναι το πλάτος στο μισό του μεγίστου της υψηλότερης κορυφής και H_0 το μέσο ύψος του παλμού που αναφέρεται στην ίδια κορυφή.

Οι στατιστικές διακυμάνσεις είναι ο πιο σημαντικός λόγος της πλάτυνσης των κορυφών των φασμάτων των σπινθηριστών. Η εξάρτηση της ανάλυσης από την

ενέργεια των γ -ακτινών μπορεί να προβλεφθεί διαπιστώνοντας ότι το FWHM της κορυφής είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειας και το H_0 ευθέως ανάλογο της ενέργειας. Έτσι από τον παραπάνω ορισμό έχουμε:

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = K \frac{\sqrt{E}}{E} = \frac{K}{\sqrt{E}} \quad (39)$$

, δηλαδή η ανάλυση είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειας. Εάν πάρουμε το λογάριθμο της σχέσης αυτής, τότε είναι:

$$\ln R = \ln K - \frac{1}{2} \ln E \quad (40)$$

, οπότε ένα γράφημα του $\ln R$ συναρτήσει του $\ln E$, πρέπει να είναι γραμμικό με κλίση $-1/2$.

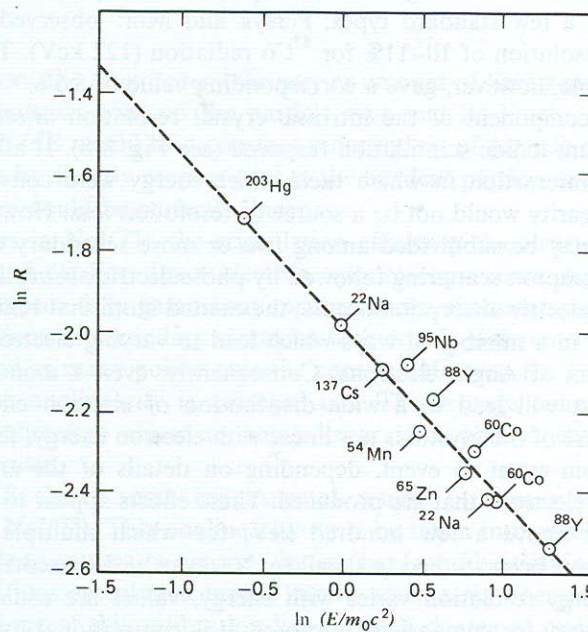


Figure 10-17 Experimentally measured resolution R from a NaI(Tl) scintillation detector for various gamma-ray energies E . (From Beattie and Byrne.¹⁶)

5.2.3 Γραμμικότητα

Για όλους τους σπινθηριστές, η απόδοση σπινθηρισμού ή ποσό του φωτός που δημιουργείται ανά μονάδα απώλειας ενέργειας, (dL/dE), εξαρτάται από τον τύπο του σωματιδίου και την κινητική του ενέργεια. Για ένα ιδανικό φασματόμετρο, η ποσότητα dL/dE θα έπρεπε να είναι σταθερή και ανεξάρτητη της ενέργειας του φωτονίου. Η συνολική παραγωγή φωτός τότε θα ήταν ευθέως ανάλογη της εισερχόμενης ενέργειας και η απόκριση του σπινθηριστή απόλυτα γραμμική.

Σε μετρήσεις γάμμα φασματοσκοπίας, οι μονοενεργειακές ακτίνες-γάμμα δημιουργούν ποικίλους συνδυασμούς δευτερευόντων ηλεκτρονίων διαφορετικών ενεργειών. Πρακτικά πριν τη χρήση του ανιχνευτή, γίνεται πρώτα βαθμονόμηση, για να παρθούν υπόψη τυχούσες μη γραμμικότητες.

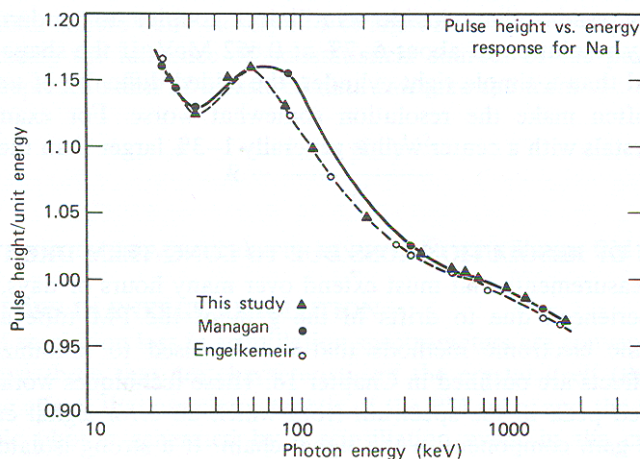


Figure 10-18 The differential linearity measured for a NaI(Tl) scintillator. (From Heath.⁵)

5.2.4 Ανιχνευτική απόδοση

Ένα από τα ισχυρά πλεονεκτήματα τη χρήσης σπινθηριστών στη φασματοσκοπία γ-ακτινών είναι το γεγονός ότι, πολλοί ανιχνευτές μπορούν να παραχθούν μαζικά, με εικονικά ιδανικές ιδιότητες. Επειδή οι

φυσικές διαστάσεις αυτών των κρυστάλλων μπορούν να ελεγχθούν με πολύ μικρές αποκλίσεις, η πιθανότητα αλληλεπίδρασης για γ-ακτίνες είναι ίδια για κρυστάλλους ίδιου σχήματος και μεγέθους.

Μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές του σπινθηριστή ιωδιούχου νατρίου, είναι η μέτρηση της απόλυτης έντασης μίας δοσμένης πηγής ακτινών-γ, κάτι που προϋποθέτει την εξ' αρχής γνώση της ανιχνευτικής απόδοσης της συσκευής. Ο αριθμός κρυστάλλων ιωδιούχου νατρίου, διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών, είναι συνήθως περιορισμένος στην αγορά, οπότε ολοκληρωμένα δεδομένα μπορούν να ληφθούν από τη σύνθεση πληροφοριών.

ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: «ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ»

1. Δίκτυο μέτρησης ραδιενέργειας περιβάλλοντος

1.1 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)-Τμήμα Μέτρησης Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος

Το Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της ΕΕΑΕ, που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, συντονίζει το πρόγραμμα ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος, τόσο σε τακτική βάση όσο και σε έκτακτες καταστάσεις σε όλη τη χώρα και τηρεί το εθνικό αρχείο μετρήσεων. Ο έλεγχος ραδιενέργειας περιβάλλοντος περιλαμβάνει:

- **Το Τηλεμετρικό Δίκτυο Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος**, το οποίο αποτελείται από 24 σταθμούς μέτρησης του ρυθμού δόσης της ολικής-γ στον αέρα, 4 σταθμούς μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων στα ποτάμια της Βόρειας Ελλάδας και 3 σταθμούς μέτρησης του αεροζόλ της ατμόσφαιρας.
- **Εργαστηριακές μετρήσεις σε:**
 - πόσιμο νερό, φίλτρα αέρα, δείγματα χώματος
 - ποτάμια και λίμνες
 - υλικά με τεχνητά αυξημένη φυσική ραδιενέργεια σε βιομηχανικά κατάλοιπα
 - εισαγόμενα τρόφιμα (ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»)
 - αεροζόλ, γάλα, μικτή διαίτα, εναπόθεση σωματιδίων (ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»)
 - εισαγόμενα υλικά που εντάσσονται στον Πράσινο Κατάλογο Αποβλήτων

- **Επιτόπιους ελέγχους σε:**
 - εισαγόμενα παλαιά μέταλλα
 - μέρη με αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας.



Το τηλεμετρικό δίκτυο ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος στην Ελλάδα αποτελείται συνολικά από 31 σταθμούς μέτρησης:



24 σταθμοί περιλαμβάνουν ανιχνευτές μέτρησης του ρυθμού δόσης της ολικής-γ ακτινοβολίας στον αέρα,



4 είναι σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων στα ποτάμια της Βόρειας Ελλάδας και



3 είναι ανιχνευτικά συστήματα ραδιενέργειας του αεροζόλ της ατμόσφαιρας.

Το τηλεμετρικό δίκτυο χρησιμοποιείται για την συνεχή καταγραφή των μετρήσεων, αλλά και ως σύστημα συναγερμού σε περίπτωση υπέρβασης των προκαθορισμένων φυσιολογικών επιπέδων.

Η κατανομή των σταθμών του τηλεμετρικού δικτύου μέτρησης ραδιενέργειας περιβάλλοντος έγινε κατά τρόπο που εξασφαλίζει τη συνεχή επίπτωση των επιπέδων ραδιενέργειας στην Ελλάδα, την έγκαιρη ειδοποίηση σε

περίπτωση ραδιενεργού ρύπανσης στο περιβάλλον και τη δυνατότητα εκτίμησης της εναπόθεσης ραδιενεργών ρύπων. Η μέση απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση, είναι περίπου 60 km. Για κάθε ένα από τα τρία επιμέρους συστήματα, κατάλληλο λογισμικό συλλέγει τις μετρήσεις κάθε 10 λεπτά και τις καταχωρεί σε βάση δεδομένων. Η βάση αυτή είναι συνδεδεμένη με την ιστοσελίδα της ΕΕΑΕ, όπου δημοσιεύονται οι μέσες ημερήσιες τιμές σε πίνακες τιμών.

Μετά την καταχώρησή τους στην κεντρική βάση δεδομένων μετρήσεων ραδιενέργειας της ΕΕΑΕ, οι μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής - γ ακτινοβολίας στον αέρα ανά σταθμό δημοσιεύονται και στα Δελτία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας.

1.2 Σταθμοί μέτρησης αεροζόλ της ατμόσφαιρας

Στην Ελλάδα έχουν τοποθετηθεί και λειτουργούν τρεις αυτόματοι σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας του αεροζόλ της ατμόσφαιρας, στις εξής περιοχές:

- Αλεξανδρούπολη
- Σέρρες
- Πτολεμαΐδα

Για την συλλογή δειγμάτων αεροζόλ, χρησιμοποιούνται:

- ✓ Δύο τύποι φίλτρων: κανονικά και φίλτρα με ενεργό άνθρακα
- ✓ Σύστημα άντλησης αέρα : $\sim 6\text{m}^3/\text{h}$
- ✓ Ανιχνευτικό σύστημα : PIPS (alpha/beta detector) και τρεις μετρητές NaI(Tl) (ένας για Φασματοσκοπία-γ και δύο για I-131).

Διεξάγονται επίσης μετεωρολογικές μετρήσεις της θερμοκρασίας, βροχής, ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου.

1.3 Σύστημα συνεχούς μέτρησης αεροζόλ-AMS 02

Το σύστημα μέτρησης του αεροζόλ AMS-02 (Air Monitoring System), φέρει δύο διαδοχικά στατικά φίλτρα, το πρώτο εκ των οποίων χρησιμοποιείται για σωματίδια αεροζόλ και το δεύτερο για μόρια ιωδίου. Η παρουσία μη φυσικής ραδιενέργειας σε ένα από τα φίλτρα, διαπιστώνεται με ανιχνευτές άλφα, βήτα και γάμμα ακτινοβολίας. Εάν παραχθεί προειδοποιητικός συναγερμός, τότε μία τρίτη διαδοχική μονάδα δειγματοληψίας και μέτρησης συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα. Μετά την έξοδο του από το φίλτρο του μοριακού Ιωδίου, ο αέρας οδηγείται σε μία κατάλληλη κάνη, η οποία περιέχει ειδικό απορροφητή ούτως ώστε να διαχωρίζει οργανικές ενώσεις Ιωδίου που μπορεί να είχαν ξεφύγει από τις δύο πρώτες συσκευές.

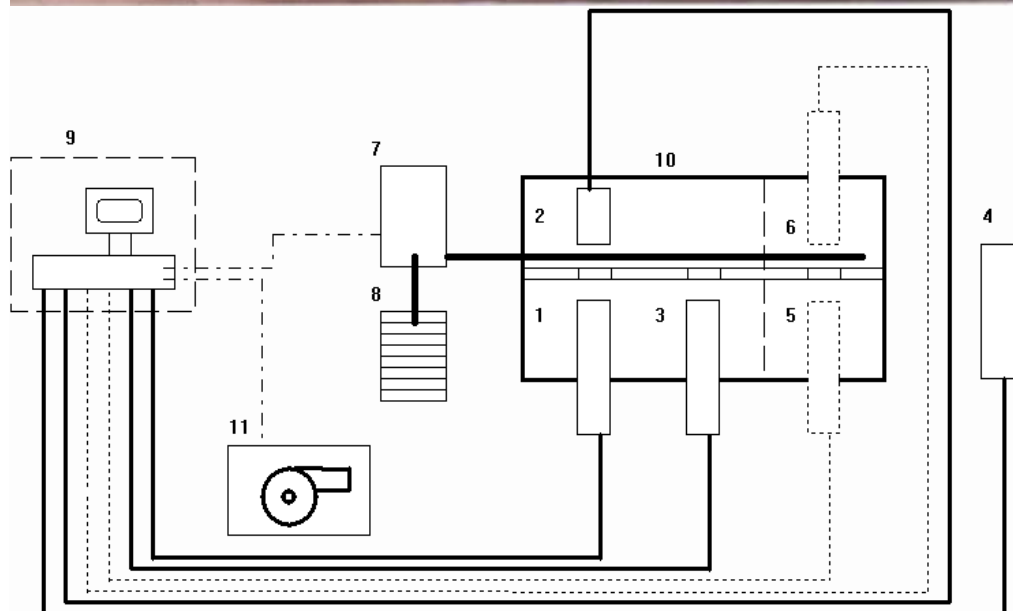
1.3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος

Το σύστημα έχει διαστάσεις 73x92x152 cm, ζυγίζει περίπου 415 χιλιόγραμμα, λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -30°C έως +40°C και αποτελείται από τις εξής συνεργαζόμενες μονάδες:

- ✓ Ανιχνευτές: Διαστάσεων 2''x2'' ανιχνευτής σπινθηρισμού NaI(Tl), (τρεις ανιχνευτές αυτού του είδους), αποτελούμενος από κρύσταλλο και σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 2''(5.06 cm). Το ενεργειακό εύρος του σπινθηριστή είναι 0.04-2 MeV το οποίο αυξάνεται με τη θέρμανση του φωτοπολλαπλασιαστή και η ανάλυσή του κατ' ελάχιστο στο 8,5%, βαθμονομημένη στην κορυφή των 662keV του ¹³⁷Cs. Ο ανιχνευτής έχει peak-to-total ratio μεγαλύτερο από 30% (¹³⁷Cs) και υπόβαθρο 4cps (γεγονότα το δευτερόλεπτο). Οι ανιχνευτές αυτοί είναι διαχωρισμένοι από το υπόλοιπο σύστημα δειγματοληψίας, μέσω του πλαστικού τους καλύμματος. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σπινθηριστών και της επιφάνειας των φίλτρων είναι 15mm.
Ένας ανιχνευτής PIPS εμβαδού ενεργού επιφανείας 1700mm², με ανάλυση στα 55keV για

σωματίδια άλφα (βαθμονομημένο στην κορυφή του ^{239}Pu) και στα 30keV για σωματίδια βήτα.

- ✓ Επεξεργαστές: Βιομηχανικό PC Pentium, με κάρτες Microcontroller: HDD των 10GB και FDD των 1.44MB.
- ✓ Αντλία: Ονομαστικός ρυθμός άντλησης $6\text{m}^3/\text{h}$.
- ✓ Φίλτρα: Φίλτρο αεροζόλ (glass fiber) μεταξύ ενός ανιχνευτή NaI(Tl) και του ανιχνευτή PIPS, διαμέτρου 60 mm τύπου Schleicher&Schull 10, με ελάχιστη χωρητικότητα φιλτραρίσματος 99%, για σωματίδια διαμέτρου άνω των $0.5\mu\text{m}$ (DIN 24 184). Φίλτρο που τοποθετείται απέναντι από τον δεύτερο ανιχνευτή σπινθηρισμού, κατά την πορεία του αέρα εντός του συστήματος, διαμέτρου 60 mm, ειδικό για κατακράτηση (ανόργανων) μορίων Ιωδίου, χωρητικότητας άνω του 95%. Το φίλτρο αυτό περιλαμβάνει ένα λεπτό ενισχυμένο στρώμα ειδικά εμποτισμένο με ενεργό άνθρακα. Φίλτρο μέτρησης οργανικά συνδεδεμένων ιωδιούχων συστατικών, που ενεργοποιείται έπειτα από συνεργασία με το δεύτερο φίλτρο. Το σύστημα του φίλτρου αυτού και του τρίτου ανιχνευτή NaI(Tl), υπακούει στη γεωμετρία Marinelli. Το φίλτρο είναι εμποτισμένο με κόκκους αργύρου (Ag).



Γενική διάταξη συστήματος AMS02

Το όλο δειγματοληπτικό και μετρητικό σύστημα, περιβάλλεται από θωράκιση μολύβδου. Οι θέσεις εργασίας των στοιχείων (slots) διαχωρίζονται με τοιχία μολύβδου των 20mm πάχους. Το υπόβαθρο της

εξωτερικής ολικής ακτινοβολίας-γάμμα εξασθενεί κατ' αυτόν τον τρόπο τουλάχιστον περί τη μία τάξη μεγέθους. Ο αέρας προσρροφάται μέσω ενός θερμαινόμενου σωλήνα εισόδου. Ο σωλήνας εισόδου της αντλίας προστατεύεται από τις κατακρημνίσεις και άλλες διαδικασίες ή κινδύνους (π.χ. έντομα). Η εκροή του αέρα μπορεί να μετρηθεί, αλλά όχι να κανονικοποιηθεί. Ο ονομαστικός ρυθμός όγκου της άντλησης χωρίς φορτίο είναι $10\text{m}^3/\text{h}$. Η εκροή του αέρα μετράται εμμέσως, μέσω των αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας και μετατρέπεται σε «κανονικά κυβικά μέτρα» (20°C , 1 bar pressure). Όλες οι τιμές των διαδικασιών μέτρησης καταχωρούνται στην ίδια μονάδα (Bq/m^3).

Τα φίλτρα αφαιρούνται, αποθηκεύονται και ανακτώνται μέσω ενός αυτόματα ενεργοποιημένου και ελεγχόμενου καθοδηγητή (manipulator).

Τα ράφια αποθήκευσης και ανάκτησης των νέων ή των χρησιμοποιημένων φίλτρων, είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη απόσταση από τη θωράκιση μολύβδου. Ο αριθμός των φίλτρων επιλέγεται, ούτως ώστε να διασφαλίζεται η λειτουργία της συσκευής για ένα εξάμηνο τουλάχιστον.

Τα φίλτρα του αεροζόλ είναι προς χρήση ξανά, εάν χρησιμοποιήθηκαν σε κανονική-λειτουργία, επειδή η ακτινοβολία που προέρχεται από τις ραδιενεργές σειρές του Ραδονίου, αποδιεγείρεται γρήγορα. Το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής ($T=10,6\text{h}$) μεταξύ των στοιχείων, τον κατέχει το ^{212}Pb (από τη σειρά του ^{220}Rn). Το ^{212}Pb αποδιεγείρεται πρακτικά εντός τεσσάρων ημερών. Ένας άλλος λόγος για την αλλαγή ενός φίλτρου είναι μία πιθανή ακαθαρσία ή κάποια μηχανική καταπόνηση. Φυσικά, φίλτρα τα οποία έχουν κατακρατήσει στοιχεία κατά τη διάρκεια μη κανονικής (off-normal) λειτουργίας του συστήματος, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου. Για το λόγο αυτό δημιουργείται βάση δεδομένων με πληροφορίες για την κατάσταση των φίλτρων.

1.3.1.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτικών διατάξεων και ενίσχυση

Η ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή ημιαγωγών (PIPS) καθώς και των σπινθηριστών NaI(Tl) που βρίσκονται απέναντι από το φίλτρο του αεροζόλ και του Ιωδίου, γίνεται μέσω της μέτρησης των κορυφών των δοκιμαστικών πηγών ^{239}Pu και ^{137}Cs . Τα μεμονωμένα κανάλια διαχωρίζονται σε μερικές περιοχές (6 τον αριθμό για τον PIPS και 8 για τους ανιχνευτές NaI(Tl)). Η κατάλληλη ενίσχυση που πρέπει να επιτευχθεί για έναν σπινθηριστή, αναδεικνύεται από το ρυθμό (πηλίκο) των γεγονότων στη γειτονιά της κορυφής προς τα γεγονότα στην περιοχή της ίδιας της ακμής της δοκιμαστικής πηγής, δηλαδή:

$$\frac{YM[j] - YB[j]}{YM[p] - YB[p]} \leq FG_{13}[j], \quad j=p-1 \text{ ή } j=p+1$$

, όπου ο δείκτης p υποδηλώνει της περιοχή της ακμής της δοκιμαστικής πηγής, με YM συμβολίζουμε τα μετρούμενα γεγονότα της πηγής, YB είναι οι μετρήσεις υποβάθρου και FG_{13} είναι ο παράγοντας ελέγχου ενίσχυσης. Το παραγόμενο μήνυμα από το σύστημα είναι "OK" ή "FAILED". Η μέτρηση διαρκεί 2×100 s (για υπόβαθρο και δείγμα, αντίστοιχα) και επαναλαμβάνεται δις, σε διαδοχικούς κύκλους μετρήσεων των 100s, εάν ο έλεγχος αποτύχει. Επειδή όμως οι πηγές είναι ηθελημένα εξασθενημένες (θα πρέπει να είναι αρκούτως χαμηλότερα από το ραδιενεργό επίπεδο απόρριψης), τα στατιστικά δεδομένα είναι μάλλον φτωχά, ούτως ώστε το πρόγραμμα που κάνει ανάλυση κορυφών (peak analysis) ενίοτε να παραβλέπει κάποια αποκλίνουσα πλήρη ενεργειακή κορυφή.

Η δοκιμαστική πηγή του ανιχνευτή PIPS είναι το ^{239}Pu . Το άνω όριο της πρώτης ενεργειακής

περιοχής του ΡΙΡΣ έχει τεθεί έτσι, ούτως ώστε, να υπερβαίνει το ύψος όλων των παλμών των πιθανών βήτα σωματιδίων. Η κορυφή του ^{239}Pu εμπίπτει στην δεύτερη περιοχή. Έτσι, ο ρυθμός μεταξύ των γεγονότων της πρώτης περιοχής και της δεύτερης, συγκρίνονται με το συντελεστή ελέγχου ενίσχυσης:

$$\frac{SM[1] - SB[1]}{SM[2] - SB[2]} \leq FG_4$$

, όπου με SM εννοούμε τα μετρούμενα γεγονότα της δοκιμαστικής πηγής, το SB υποδηλώνει τα γεγονότα υποβάθρου και FG_4 είναι ο συντελεστής ελέγχου ενίσχυσης.

1.3.2 Hardware και software συστήματος

1.3.2.1 Software του συστήματος


Στην καινούρια έκδοση του AMS, δόθηκε μεγάλη βαρύτητα στην ανανέωση του λογισμικού του συστήματος. Η έκδοση αυτή περιλαμβάνει ένα βιομηχανικό ηλεκτρονικό υπολογιστή με δύο συνεργαζόμενα προγράμματα DDE, ένα που χρησιμεύει στον έλεγχο των συσκευών (AMS Control Software of Bitt Scada) και ένα για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των δεδομένων (University of Budapest).

Το πρόγραμμα ελέγχου που επιτηρεί όλες τις διεργασίες των μηχανημάτων, ανιχνευτών και αισθητήρων, είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε Microsoft Windows και χρησιμοποιεί μία βιομηχανική σειριακή διαπροσωπεία RS422. Το άλλο πρόγραμμα που είναι επίσης σχεδιασμένο για λειτουργικό Windows, δεν ελέγχει άμεσα το hardware, αλλά επικοινωνεί με το πρόγραμμα ελέγχου μέσω της διαπροσωπείας DDE.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε από την BittScada είναι εύχρηστο και με αρκετά φιλικό προγραμματιστικό περιβάλλον. Το πρόγραμμα

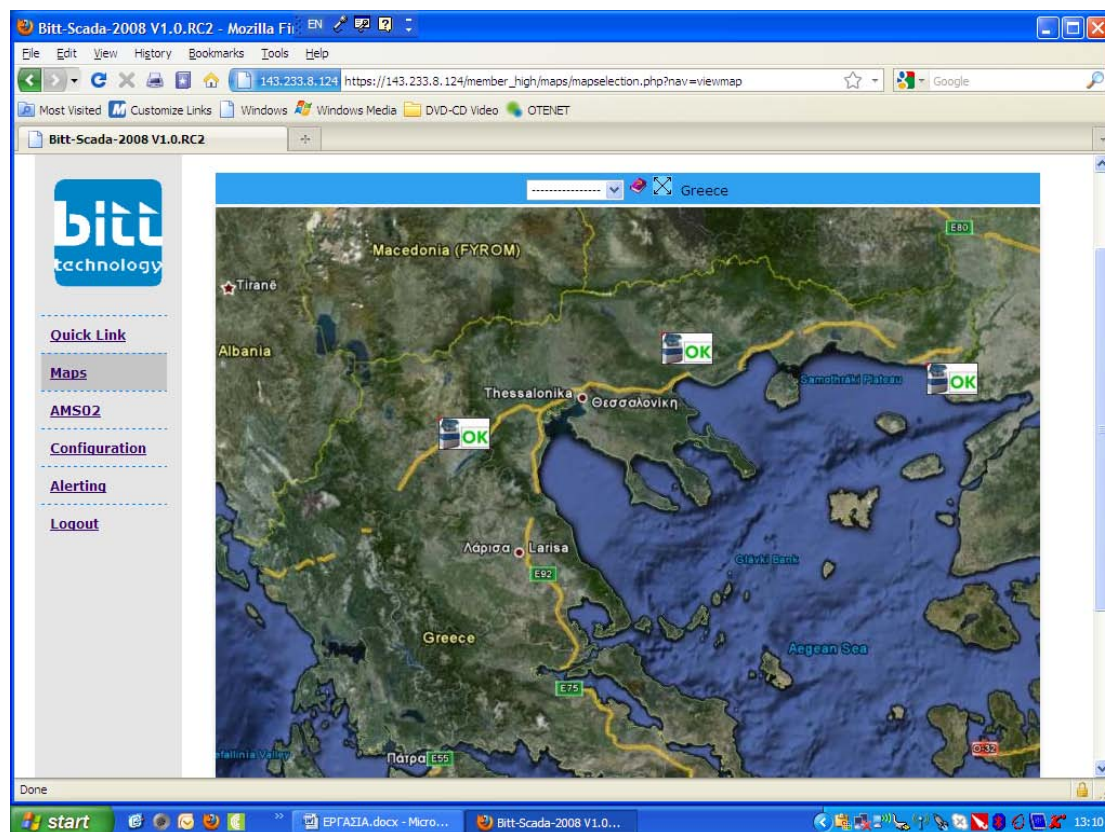
αυτό παρέχει μία σειρά από λειτουργίες επιτήρησης των διεργασιών του δικτύου τηλεμετρίας καθώς και δυνατότητα παρουσίασης και γραφικής απεικόνισης των δεδομένων αυτών. Η είσοδος στο λογισμικό γίνεται μόνο διαδικτυακά και κατά κανόνα από το δίκτυο της ΕΕΑΕ.

Η αρχική του σελίδα (η πρόσβαση στην οποία απαιτεί τη δημιουργία λογαριασμού και κωδικού πρόσβασης από την εταιρία-πάροχο), έχει την παρακάτω μορφή.

Picture	Station	Status	Date
	0016 Serres	Normal	2010-09-29 08:10:52
	0017 Alexandroupoli	Normal	2010-09-29 08:04:27
	0018 Ptolemaida	Normal	2010-09-29 07:55:18

Το περιβάλλον αυτό, έχει την εξής δομή: Στα αριστερά της ιστοσελίδας βρίσκεται η κύρια λίστα πεδίων και μετά την επιλογή κάποιου συγκεκριμένου κλειδιού, οι παρεχόμενες δυνατότητες καθορίζονται από τη γραμμή εργαλείων στην κορυφή της σελίδας.

Για παράδειγμα, με την επιλογή του πεδίου “Maps”, εμφανίζεται η παρακάτω σελίδα, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε το χάρτη της χώρας, από το δίκτυο της οποίας, ο εκάστοτε χρήστης έχει πρόσβαση (εν προκειμένω της Ελλάδας). Στο χάρτη αυτό φαίνονται οι σταθμοί του τηλεμετρικού δικτύου στην Πτολεμαΐδα, τις Σέρρες και την Αλεξανδρούπολη.

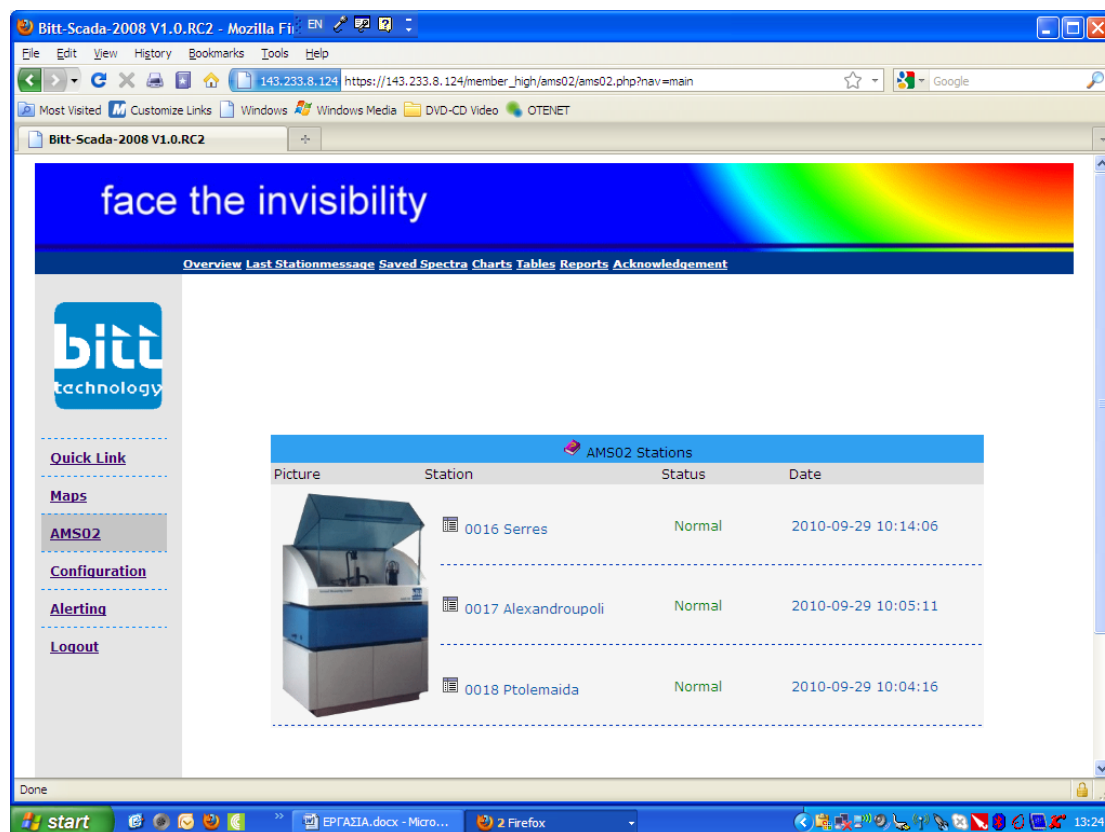


Επί του χάρτη αυτού, υπάρχει η πρόσθετη δυνατότητα της εμφάνισης των βασικών μετρήσεων του κάθε σταθμού (ολική εξωτερική δόση, τεχνητή άλφα και βήτα ακτινοβολία, επίπεδα ραδονίου, ένδειξη φίλτρου μοριακού Ιωδίου), πατώντας απλώς το αντίστοιχο εικονίδιο. Ακόμη, δίπλα από κάθε σταθμό αναγράφεται η ένδειξη λειτουργίας (mode), όπου μπορούμε με μία ματιά να ελέγξουμε εάν υπάρχει κάποια ανησυχητική κατάσταση.

The screenshot shows the Bitt-Scada-2008 V1.0.RC2 web interface. The browser window displays the URL https://143.233.8.124/member_high/maps/mapselection.php?nav=viewmap&mapname=Greece. The main content area features a map of Greece with several monitoring stations marked with 'OK' icons. A data popup window is open for station 'AMS02: 0018 Ptolemaida', displaying the following data:

AMS02: 0018 Ptolemaida		Status: Normal
<u>Meteorological data:</u>		
Temperature 2m:	17.5 °C	2010-09-29 09:45
Wind strength:	0.00 m/s	2010-09-29 09:45
<u>Doserate + Radon:</u>		
Doserate:	85.4 nSv/h	2010-09-29 09:45
Radon 222 EEC:	1.06 Bq/m3 ± 32.7%	2010-09-29 09:33
Radon 220 EEC:	111 mBq/m3 ± 41.4%	2010-09-29 09:33
<u>Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS) - Detector, Aerosol filter</u>		
Artificial alpha LD:	6.51 mBq/m3	2010-09-29 09:33
Artificial beta LD:	25.4 mBq/m3	2010-09-29 09:33
<u>NaI(Tl)-Detector, inorganic iodine filter</u>		
Inorganic iodine I-131 LD:	11.1 mBq/m3	2010-09-29 09:33

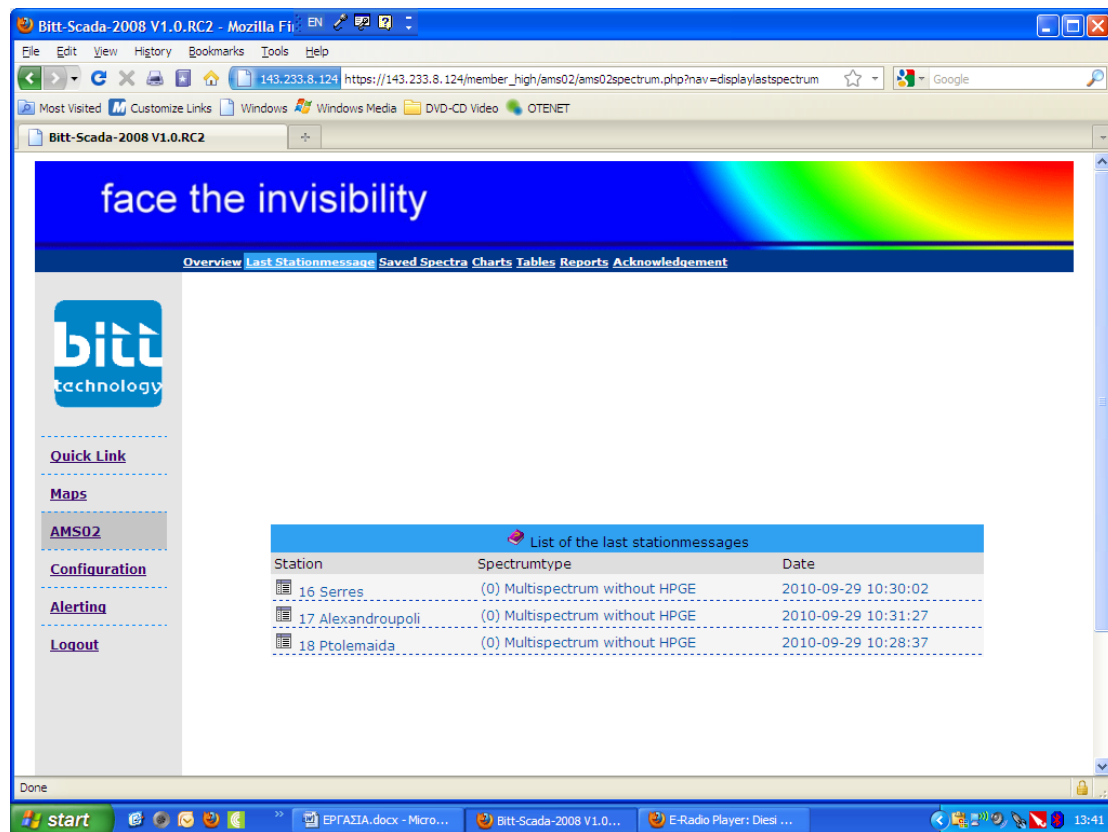
Επιλέγοντας το πεδίο “AMS02”, που είναι και το κύριο πεδίο εργασίας του χρήστη, εμφανίζεται η παρακάτω σελίδα.



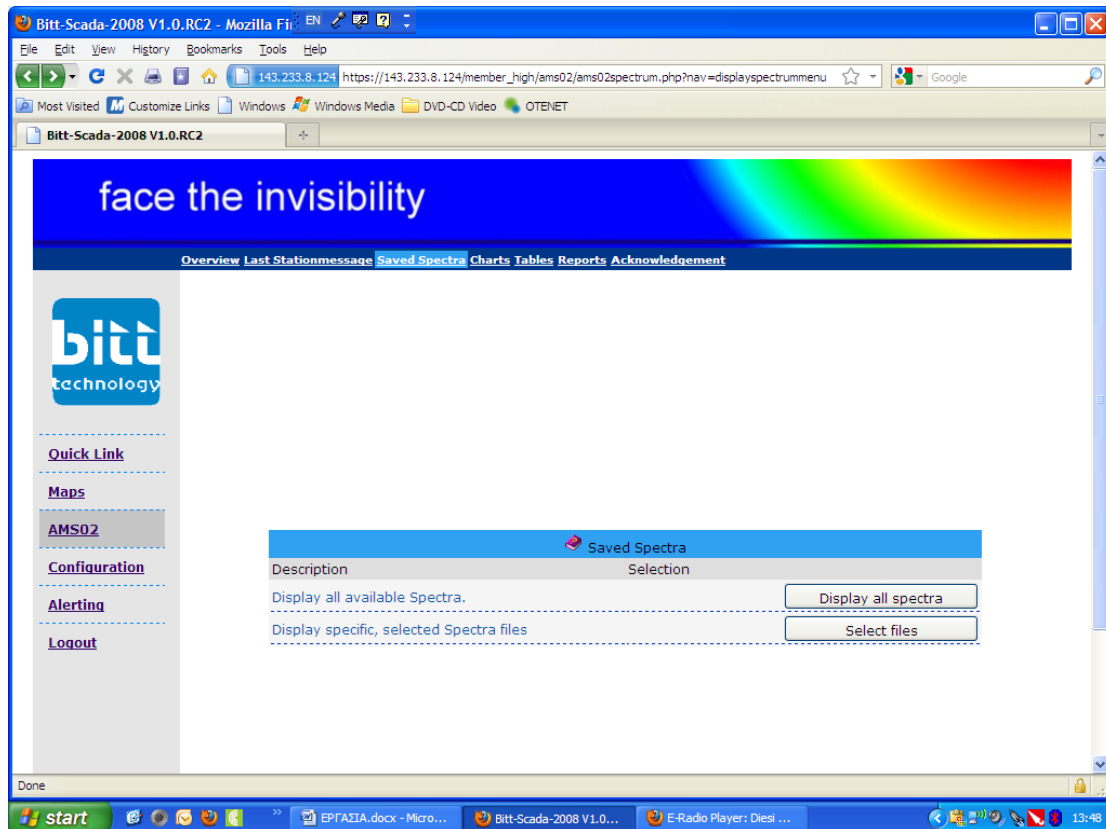
Στη σελίδα αυτή μας δίνεται η δυνατότητα εισόδου στον κάθε σταθμό, όπου μπορούμε να δούμε την πλήρη περιγραφή του και όλα τα στοιχεία των τελευταίων μετρήσεων. Στην σειρά εργαλείων, στην κορυφή της σελίδας, επιλέγοντας το κλειδί “Overview”, εμφανίζεται η σελίδα με όλες τις κατηγορίες των μετρήσεων που λαμβάνονται από τους τρεις υποσταθμούς και βέβαια οι πλέον πρόσφατες μετρήσεις της κάθε κατηγορίας. Αξίζει να αναφέρουμε ότι περιλαμβάνονται μετεωρολογικές μετρήσεις, μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος και πληροφορίες των σταθμών χρήσιμες για τους υπολογισμούς μας (όπως ο όγκος του αντλούμενου αέρα, προκειμένου να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση των διαφόρων νουκλιδίων).

	Serres	Alexa...	Ptole...
Meteorological data:			
Rain	m/10min 0.0 m	0.0 m	0.10 m
Rain Status	_0/1 0.00	0.00	1.00
Temperature 2m	°C 24.0	33.3	17.6
Temperature 5m	°C 23.9	24.4	16.9
Wind strength	m/s 0.00	2.60	0.00
Wind direction	° 300	270	120
Doserate + Radon:			
Doserate	Sv/h 129 n	81.4 n	87.6 n
Radon 222 EEC	Bq/m3 4.97 ±22.3%	361 m ±21.7%	1.05 ±27%
Radon 222 LD	Bq/m3 ---	---	---
Radon 220 EEC	Bq/m3 317 m ±25.5%	36.6 m ±36.2%	120 m ±37.5%
Radon 220 LD	Bq/m3 ---	---	---
Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS) - Detector, Aerosol filter:			
Artificial alpha min. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Artificial alpha max. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Artificial alpha LD	Bq/m3 14.2 m	42.9 m	6.10 m
Artificial beta min. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Artificial beta max. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Artificial beta LD	Bq/m3 50.4 m	135 m	24.6 m
NaI(Tl)-Detector, Aerosol filter:			
Nuclide of Contamination	---	---	---
Artificial min. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Artificial max. concentration	Bq/m3 ---	---	---
Cs-137 LD	Bq/m3 ---	---	---
High Purity Germanium (HPGE) - Detector, Aerosol filter:			
Cs-137 LD	Bq/m3 ---	---	---
Cs-134 LD	Bq/m3 ---	---	---
I-131 LD	Bq/m3 ---	---	---
I-132 LD	Bq/m3 ---	---	---
I-133 LD	Bq/m3 ---	---	---
Co-60 LD	Bq/m3 ---	---	---

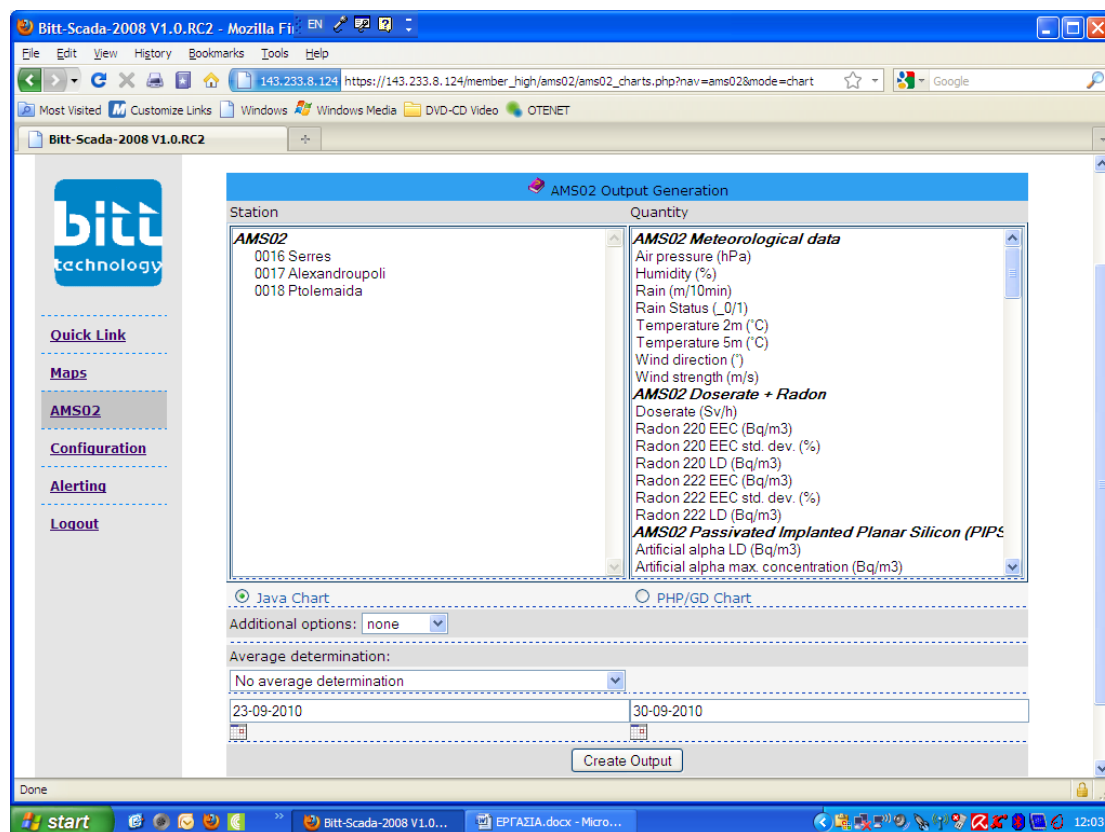
Επιλέγοντας το πεδίο “Last Stationmessage”, εμφανίζεται η λίστα των σταθμών και δίπλα σε αυτούς, το τελευταίο φάσμα που εξήχθη από τα δεδομένα τους, καθώς και η αντίστοιχη ημερομηνία έκδοσης.



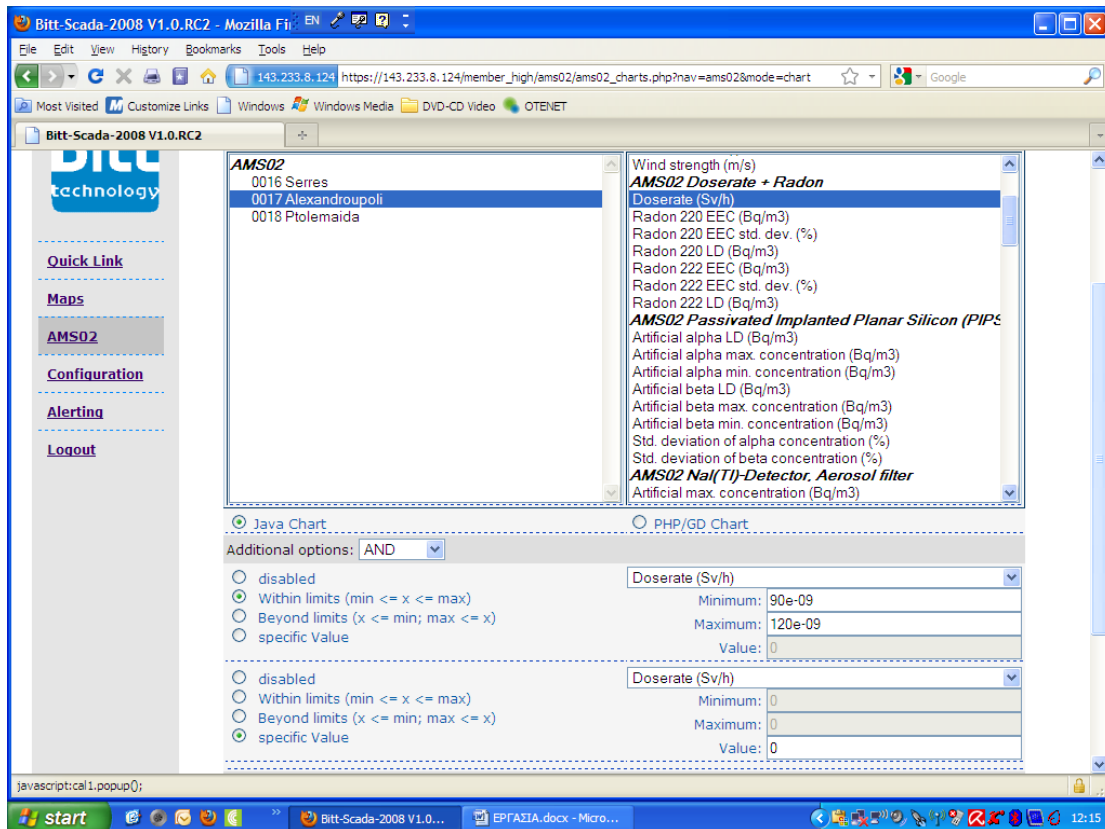
Με την επιλογή του κλειδιού “Saved Spectra”, οδηγούμαστε στη σελίδα που υπάρχουν οι σύνδεσμοι για να παρατηρήσουμε είτε όλα τα διαθέσιμα αποθηκευμένα φάσματα (οπότε επιλέγουμε “Display all Spectra”), ή κάποια ειδικά επιλεγμένα (επιλέγουμε “Select files”).



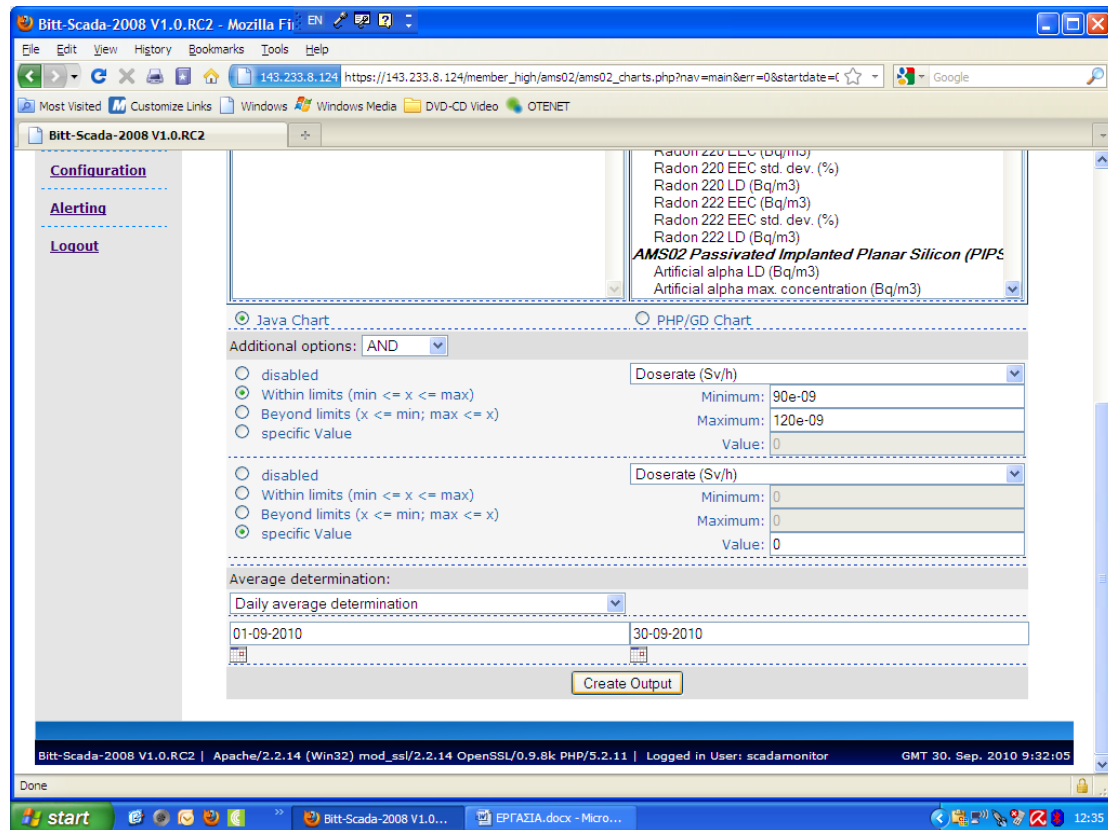
Συνεχίζοντας στο κύριο πεδίο εργασίας και πατώντας το κλειδί “Charts”, εμφανίζεται η σελίδα δημιουργίας γραφημάτων. Η σελίδα αυτή, μας παρέχει τη δυνατότητα της πλήρους αποτύπωσης οποιασδήποτε μέτρησης πραγματοποιεί ένας υποσταθμός, κατά οποιαδήποτε περίοδο λειτουργίας του.



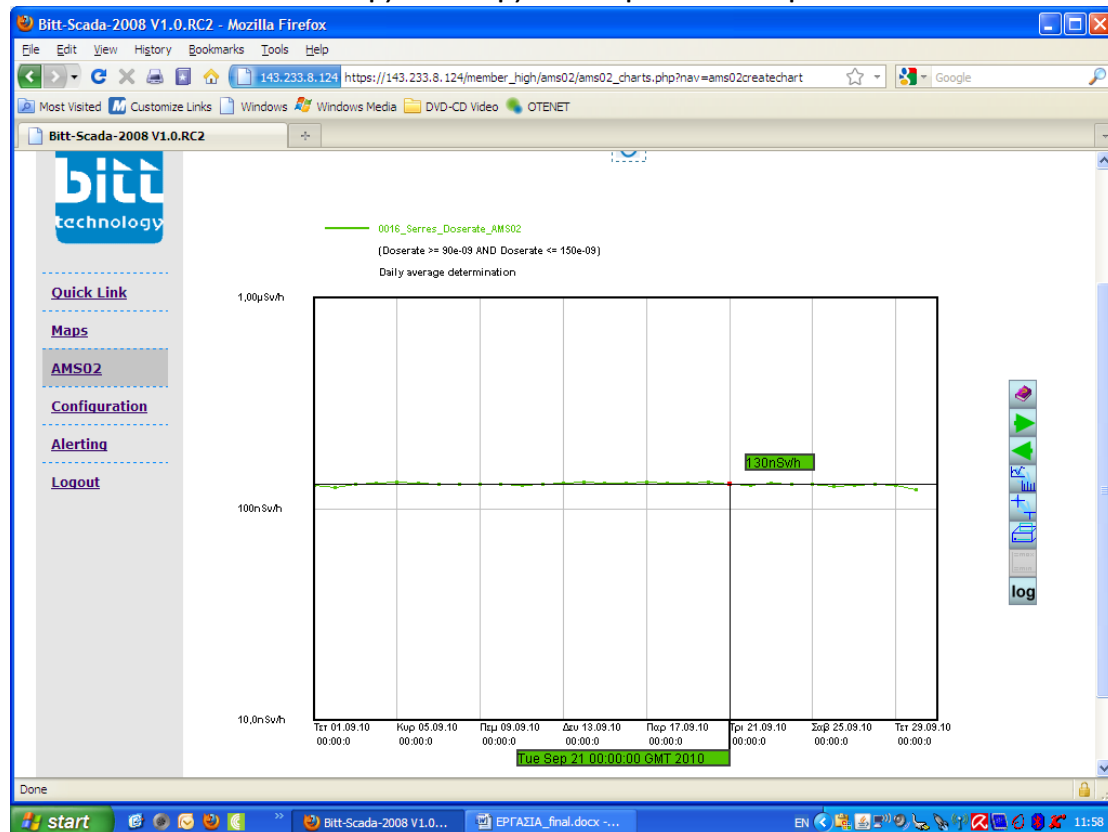
Υπάρχει δυνατότητα επιλογής του σταθμού μέτρησης και της ποσότητας που θα χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί το διάγραμμα, μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μέτρησης. Ακόμη, παρέχονται πρόσθετες λειτουργίες ειδικών φίλτρων δεδομένων, έτσι ώστε να θεωρείται αποδεκτό προς απεικόνιση μόνο ένα σύνολο μετρήσεων που ικανοποιεί μία σειρά κριτηρίων. Παραδείγματος χάριν, μπορούμε να επιλέξουμε να δημιουργήσουμε διάγραμμα με δεδομένα από το σταθμό των Σερρών για την εξωτερική δόση (“Doserate(Sv/h)”), σαν εφαρμογή της Java (υπάρχει και η επιλογή “PHP/GD Chart”), με την πρόσθετη λειτουργία του κριτηρίου “AND” (παρέχεται και η επιλογή “OR”), όπου ορίζουμε να απεικονιστούν στο διάγραμμα μονάχα οι μετρήσεις εκείνες που βρίσκονται μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων ορίων (επιλέξαμε εδώ $90\text{nSv/h} < x < 120\text{nSv/h}$) και εκείνες που έχουν μία συγκεκριμένη τιμή (ορίσαμε εδώ την τιμή 0).



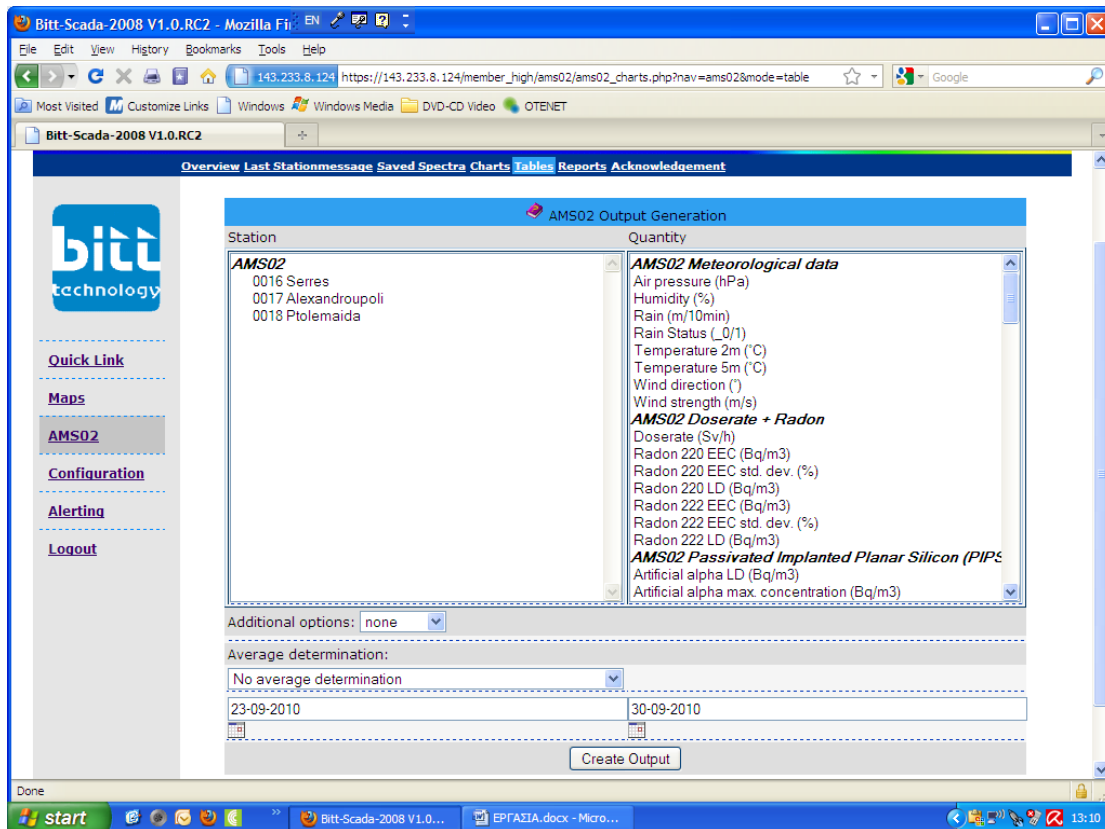
Υστερα, παρέχεται η δυνατότητα της επιλογής μέσω τιμών, αντί όλων των μετρήσεων που εξάγει ο κάθε σταθμός (θυμίζουμε ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται με συχνότητα 5 λεπτών) και συγκεκριμένα μπορούμε να διαλέξουμε ανάμεσα σε ετήσιους, μηνιαίους, ημερήσιους και ωριαίους μέσους όρους μετρήσεων. Το διάγραμμα παράγεται μέσω της εντολής “Create Output”.



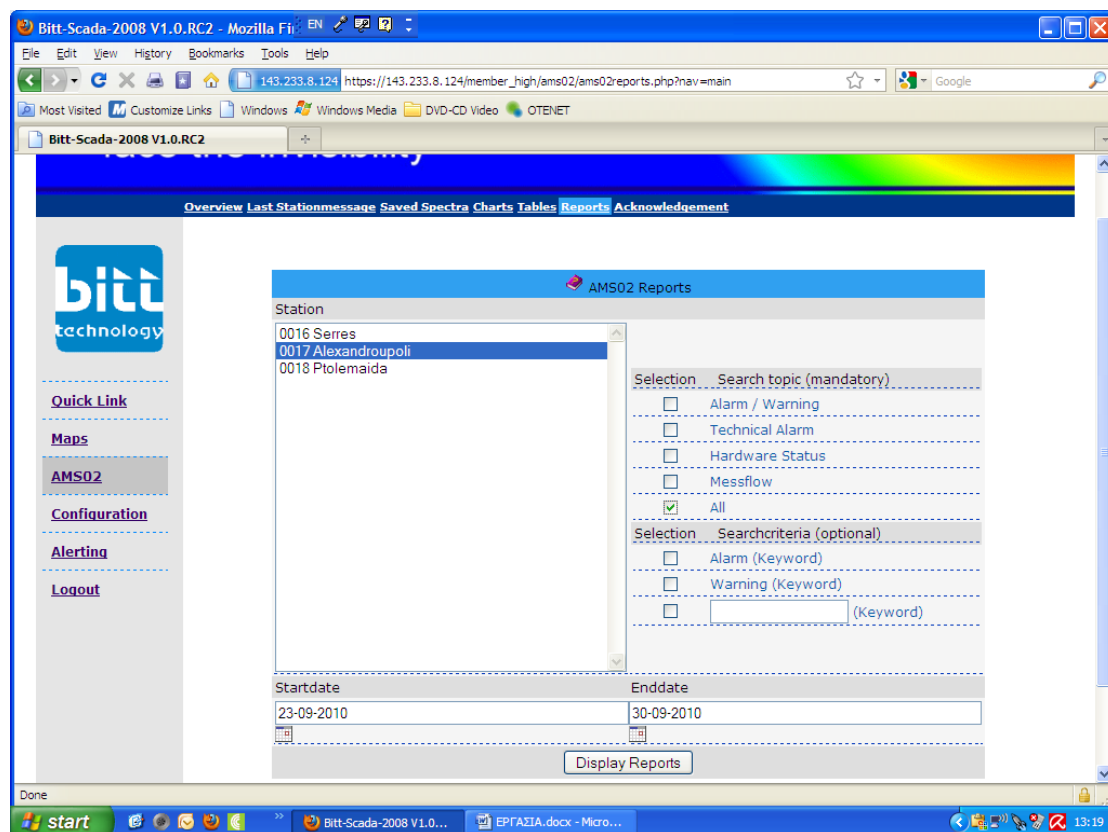
Η εικόνα που παρουσιάζεται μετά την εκτέλεση της εντολής είναι η ακόλουθη:



Το επόμενο κλειδί που μας παρέχεται προς χρήση στο βασικό μενού εργασίας του περιβάλλοντος είναι το “Tables”. Όπως φανερώνει και το όνομά του, η επιλογή αυτού του κλειδιού, εμφανίζει μία σελίδα που παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πινάκων δεδομένων.



Η λειτουργία αυτή έχει ακριβώς τις ίδιες επιλογές με αυτήν των διαγραμμάτων (“Charts”). Επόμενα, επιλέγοντας το κλειδί “Reports”, ξετυλίγεται η δυνατότητα της εμφάνισης όλων των εκπεμπόμενων εκθέσεων (Alarm/Warning, Technical Alarm, Hardware Status, Messflow,), από κάθε σταθμό.



Η εμφάνιση των εκθέσεων μπορεί να γίνει με κριτήριο διάφορους κωδικούς συναγερμού (“Search criteria”) και μπορούν να καθοριστούν επίσης τα χρονικά όρια εκπομπής τους από τους υποσταθμούς.

Επιλέγοντας τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης και πατώντας “Display Reports”, εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα που παρουσιάζει πλήρως τις εκθέσεις για τις ημερομηνίες που ορίσαμε.

AMS02 Reports

Date	Station	Type	Report	Ackn. name	Ackn. date
2010-09-29 08:32:08	0017 Alexandroupoli	mf	Start measurement (PresetCycleTime= 259200 s; PresetLiveTime=300 s)	x	x
2010-09-29 08:32:06	0017 Alexandroupoli	mf	Start air pump	x	x
2010-09-29 08:16:42	0017 Alexandroupoli	mf	Background measurement (PresetLiveTime=900 s)	x	x
2010-09-29 08:15:52	0017 Alexandroupoli	mf	(MOVE 84 -> 601)	x	x
2010-09-29 08:15:49	0017 Alexandroupoli	mf	START NORMAL MODE	x	x
2010-09-29 08:15:48	0017 Alexandroupoli	mf	END NORMAL MODE	x	x
2010-09-29 08:14:50	0017 Alexandroupoli	mf	(MOVE 601 -> 72)	x	x
2010-09-29 08:14:47	0017 Alexandroupoli	mf	Stop air pump	x	x
2010-09-29 00:45:43	0017 Alexandroupoli	mf	Start measurement (PresetCycleTime= 259200 s; PresetLiveTime=300 s)	x	x
2010-09-29 00:45:41	0017 Alexandroupoli	mf	Start air pump	x	x
2010-09-29 00:30:19	0017 Alexandroupoli	mf	Background measurement (PresetLiveTime=900 s)	x	x
2010-09-29 00:29:26	0017 Alexandroupoli	mf	(MOVE 72 -> 601)	x	x
2010-09-29 00:29:22	0017 Alexandroupoli	mf	START NORMAL MODE	x	x
2010-09-29 00:29:21	0017 Alexandroupoli	mf	END NORMAL MODE	x	x
2010-09-29 00:28:23	0017 Alexandroupoli	mf	(MOVE 601 -> 78)	x	x

Επιλέγουμε τώρα το κλειδί “Acknowledgement” και εμφανίζεται η παρακάτω σελίδα.

face the invisibility

Overview Last Stationmessage Saved Spectra Charts Tables Reports **Acknowledgement**

AMS02 Reports Acknowledge Selection

Selection Search topic (mandatory)

Alarm / Warning

Technical Alarm

Hardware Status

Messflow

All

Selection Searchcriteria (optional)

Alarm (Keyword)

Warning (Keyword)

(Keyword)

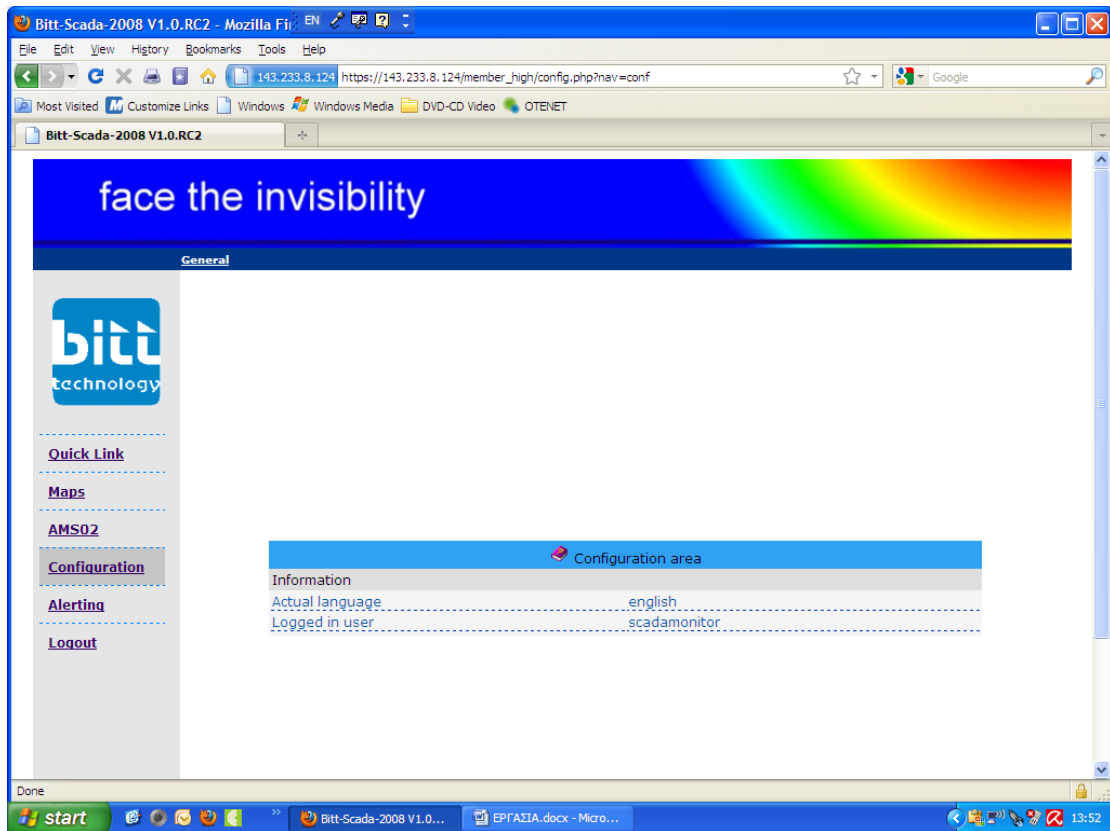
Select Reports

Η περιοχή αυτή μας επιτρέπει αφού επιλέξουμε τις εκθέσεις των σταθμών που θέλουμε να εμφανιστούν, να τις «αναγνωρίσουμε». Έτσι για παράδειγμα, εάν επιλέξουμε να εμφανιστούν όλοι οι συναγερμοί για τεχνικούς λόγους, δημιουργείται η εξής εικόνα:

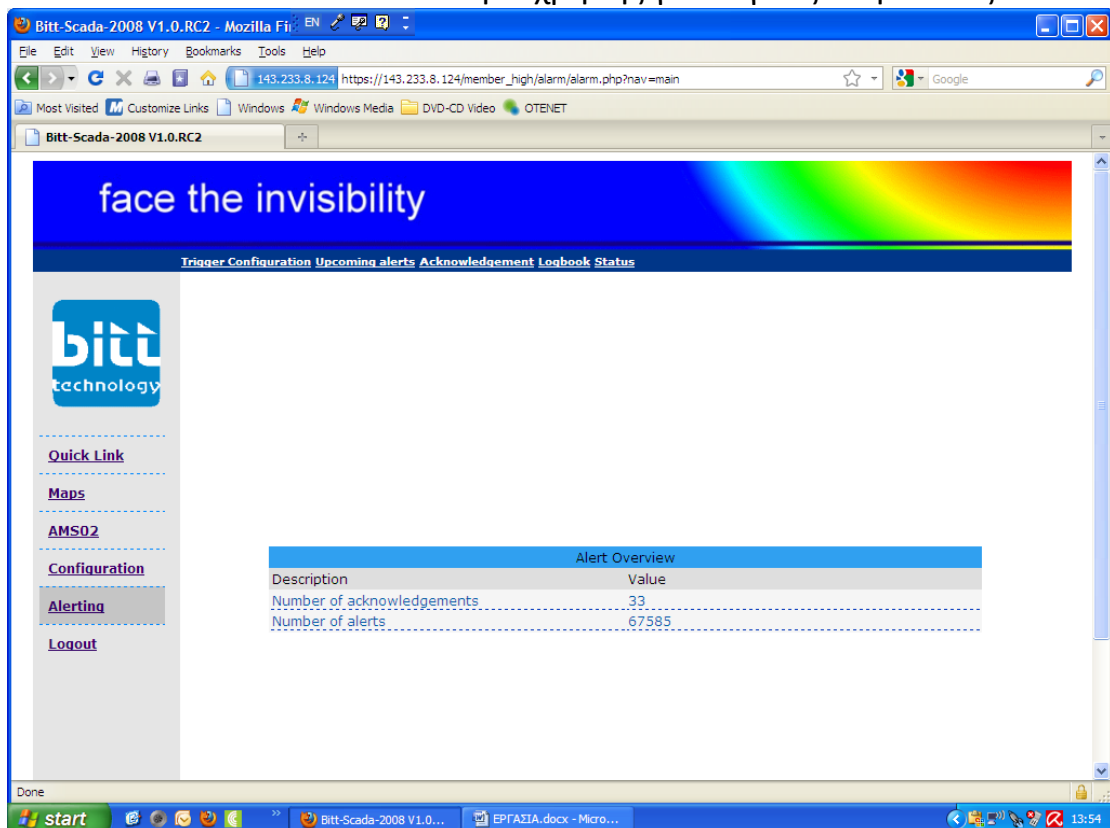
Date	Station	Type	Report	Ackn.
2010-09-27 11:29:56	0016 Serres	ta	UPS Status: AC Power again	<input type="checkbox"/>
2010-09-27 11:29:23	0016 Serres	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input type="checkbox"/>
2010-09-26 16:38:01	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: AC Power again	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-26 11:28:08	0016 Serres	ta	UPS Status: AC Power again	<input type="checkbox"/>
2010-09-26 11:27:35	0016 Serres	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-26 11:13:56	0016 Serres	ta	UPS Status: AC Power again	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-26 11:13:23	0016 Serres	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-26 09:01:51	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: AC Power again	<input type="checkbox"/>
2010-09-26 09:01:18	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input type="checkbox"/>
2010-09-22 06:04:07	0016 Serres	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-11 08:40:11	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: AC Power again	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-11 08:39:38	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input type="checkbox"/>
2010-09-11 05:23:55	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input checked="" type="checkbox"/>
2010-09-10 12:05:22	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: AC Power again	<input type="checkbox"/>
2010-09-10 12:04:49	0018 Ptolemaida	ta	UPS Status: On battery for more than 5 minutes !	<input type="checkbox"/>

Στα δεξιά της σελίδας αυτής, βρίσκονται οι θέσεις επικύρωσης της «αναγνώρισης».

Το επόμενο πεδίο εργασίας είναι το “Configuration”, όπου δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δει βασικές πληροφορίες για το πρόγραμμα, όπως είναι η γλώσσα που χρησιμοποιεί και το όνομα σύνδεσης του λογαριασμού του χρήστη.



Το τελευταίο πεδίο εργασίας είναι το “Alerting”. Στο πεδίο αυτό υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα χρήσης για λόγους ασφαλείας.



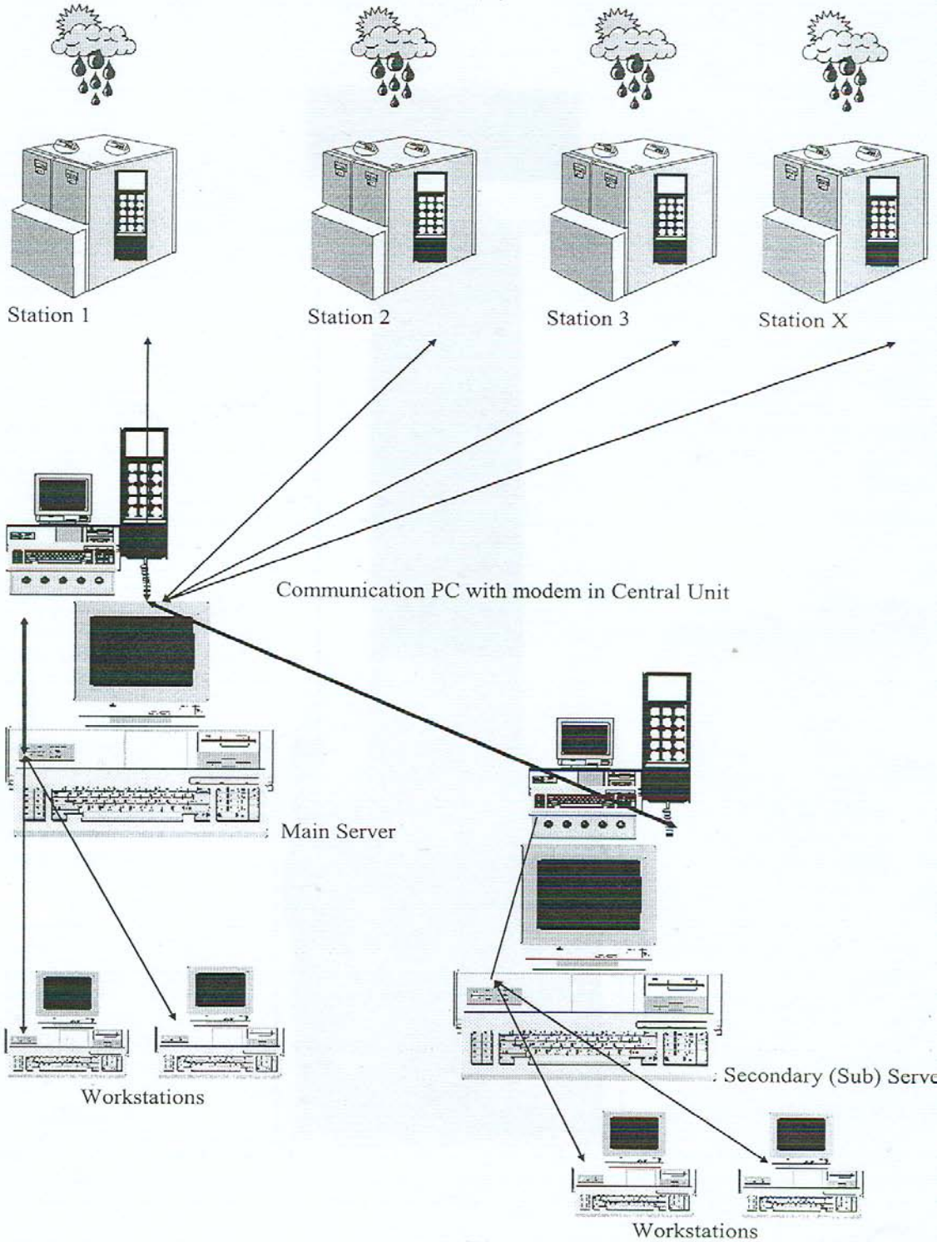
Παρέχεται η δυνατότητα εμφάνισης και επεξεργασίας της κατάστασης του δικτύου επικοινωνίας. Τέλος, υπάρχει και το πεδίο αποσύνδεσης με την χαρακτηριστική ένδειξη “Logout”.

1.3.2.2 Hardware του συστήματος

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής του συστήματος είναι απ’ ευθείας συνδεδεμένος με το hardware μέσω ενός RS422 bus. Στο bus αυτό, εγκαθίστανται κάρτες πολυκαναλικών αναλυτών (MCA cards) για τη μέτρηση των γεγονότων, stepper cards για τις manipulator-stepper μηχανές και μία AD10 κάρτα ελέγχου για τις υπόλοιπες ηλεκτρονικά ελεγχόμενες συσκευές του AMS. Οι παλμοί από τους συνεχής λειτουργίας ανιχνευτές, δέχονται επεξεργασία από τις MCA cards, με κανάλια εύρους 1k (1024). Όλες οι κάρτες είναι κάρτες Microcontroller. Η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

2 SYSTEM DESCRIPTION

2.1 SYSTEM ARCHITECTURE



Η κεντρική μονάδα αποτελείται από δύο ηλεκτρονικούς υπολογιστές: Τον **υπολογιστή επικοινωνίας (Communication PC)** και τον **κύριο Server**. Ο υπολογιστής επικοινωνίας εκτελεί τις εξής διεργασίες:

- Λαμβάνει δεδομένα από τους σταθμούς μέτρησης μέσω modem και κάνει χρήση ειδικού λογισμικού επικοινωνίας
- Μεταφέρει δεδομένα στον κύριο Server για επεξεργασία
- Μεταφέρει επεξεργασμένα δεδομένα από τον κύριο Server στον ή στους SubServer(s)
- Μεταφέρει εντολές συστήματος (αρχικοποίηση παραμέτρων, αλλαγή φίλτρων) στους μετρητικούς σταθμούς
- Μεταβάλλει την ώρα του συστήματος, όπως χρειάζεται

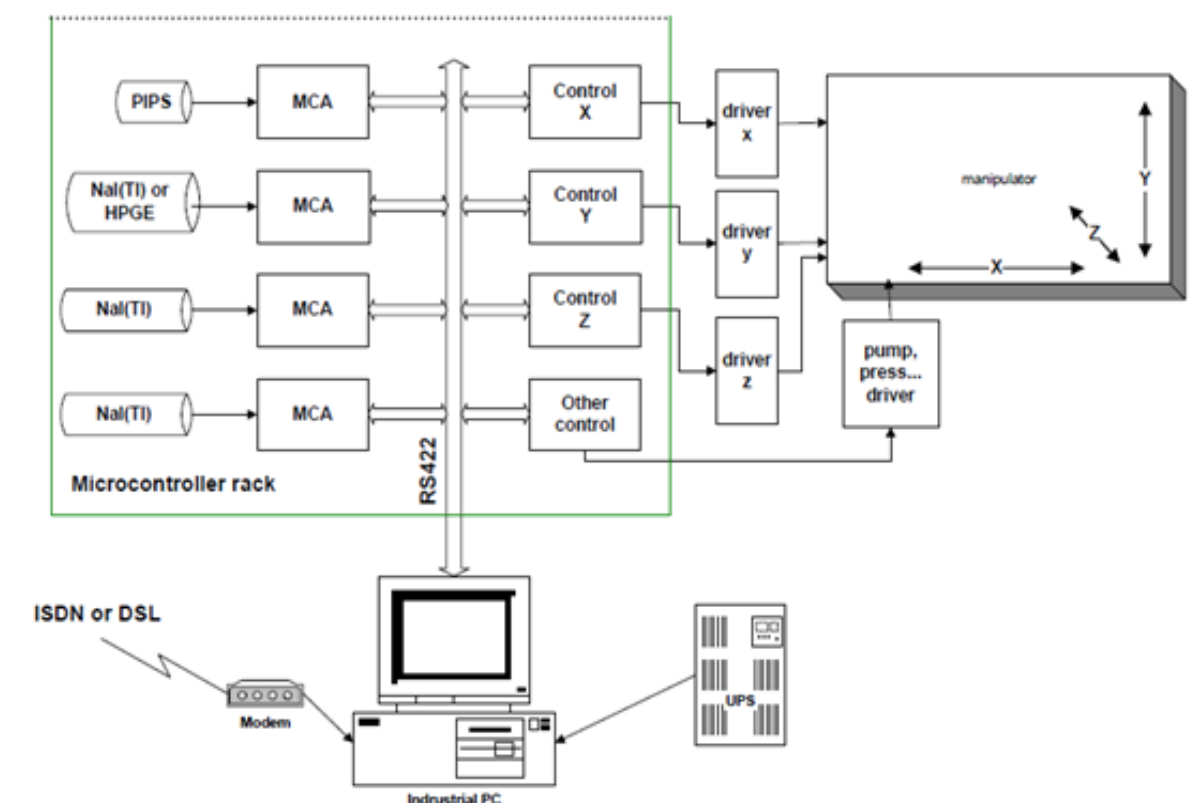
Ο κεντρικός υπολογιστής επιτελεί διάφορες λειτουργίες, όπως:

- Περιέχει και ελέγχει τις κάρτες ανάκτησης δεδομένων (data acquisition cards) των ανιχνευτών
- Τρέχει τα προγράμματα αξιολόγησης δεδομένων
- Συνεπικουρεί τη λειτουργία του manipulator και της αντλίας αέρος
- Αρχαιοποιεί τα μετρούμενα αποτελέσματα και επικοινωνεί με το απομακρυσμένο κέντρο ελέγχου (remote control center), στέλνοντας προειδοποιητικά μηνύματα και ανταλλάσσοντας επιπρόσθετες πληροφορίες
- Συλλέγει δεδομένα από τις πρόσθετες συσκευές (μετεωρολογικές μετρήσεις)
- Ελέγχει τα πλέον σημαντικά δεδομένα κατάστασης, όπως την τάση εφοδιασμού και την πτώση πίεσης
- Δημιουργεί τις τοπικές συναρτήσεις απόκρισης.

Οι μετρητικοί σταθμοί ελέγχουν αδιαλείπτως τα επίπεδα ραδιενέργειας του αεροζόλ και της ολικής ακτινοβολίας γάμμα, συλλέγουν και

επανεπεξεργάζονται τα δεδομένα. Η διαδικασία μέτρησης περιλαμβάνει συνεχή βαθμονόμηση του συστήματος, διόρθωση σφαλμάτων και αυτοδιάγνωση. Τα δεδομένα που συλλέγονται, μεταφέρονται αυτόματα, σε μορφή κώδικα, μέσω του modem του Communication PC στον Main Server, ανά συγκεκριμένα και τακτά χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται προκειμένου να αρχειοποιηθούν. Εκτός από τις μετρήσεις, στον Main Server στέλνονται κατά τις κανονικές περιόδους μεταφοράς (δηλαδή κατά την κανονική περίοδο λειτουργίας) και οι υπόλοιπες πληροφορίες συστήματος.

Ακολούθως φαίνεται η δομή και η σύνδεση μέσω GSM των διαφόρων κομματιών hardware-bus interface (RS422) και ανίχνευσης του συστήματος.



1.3.3 Λειτουργία συστήματος και διαδικασία μέτρησης

Αναφορικά με τη θέση του συστήματος, αυτό θα πρέπει να τοποθετείται σε έναν κλειστό κλωβό που κείται σε πεδινό περιβάλλον. Ο εσωτερικός σωλήνας της αντλίας αέρος πρέπει να είναι τοποθετημένος στην κατάλληλη θέση, ούτως ώστε να μην εισέρχονται σε αυτόν ιζήματα. Η άκρη του σωλήνα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 1,5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Ακόμη, πρέπει να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός μη χρησιμοποιημένων φίλτρων αεροζόλ και ιωδίου στα ράφια αποθήκευσης και επανάκτησης. Τα ράφια πρέπει ύστερα να περιέχουν και υλικά βαθμονόμησης των ανιχνευτών (^{137}Cs για τους ανιχνευτές Na(Tl) και ^{239}Pu για τον ανιχνευτή PIPS).

1.3.3.1 Μετρήσεις υποβάθρου

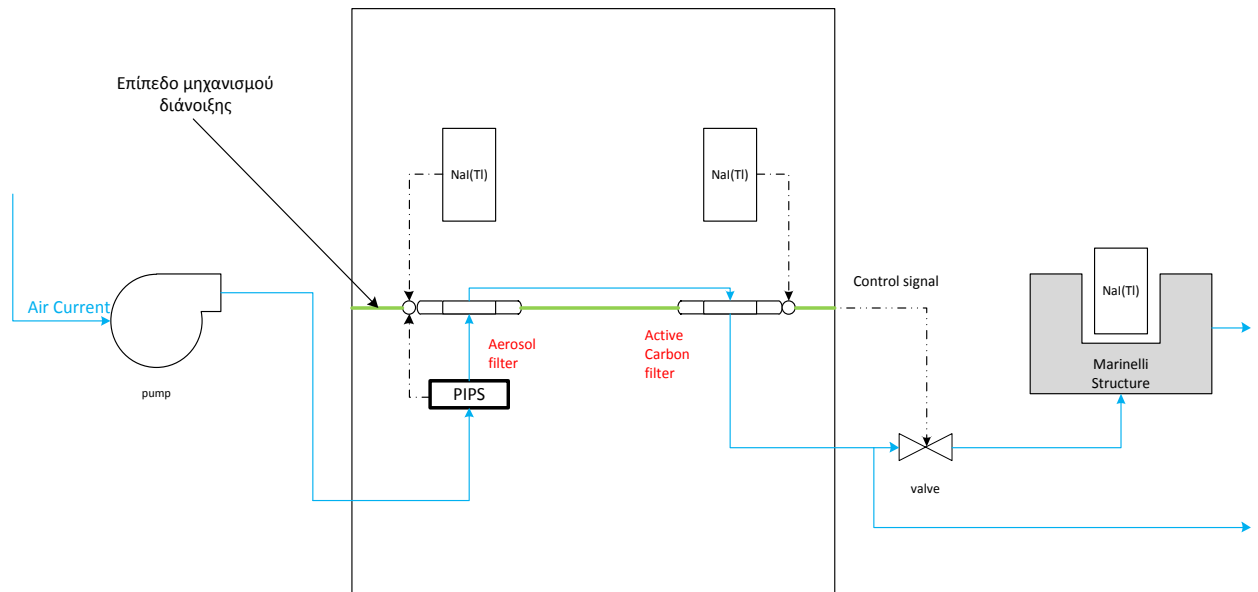
Πριν την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας, πρέπει να διενεργήσουμε μετρήσεις του υποβάθρου ακτινοβολίας με κενά φίλτρα τοποθετημένα στις κατάλληλες θέσεις εργασίας. Αν και το εξωτερικό υπόβαθρο υπόκειται σε ημερήσιες, εποχιακές και μετεωρολογικές αλλαγές, είναι απαραίτητο να θέσουμε ένα ανώτατο όριο, πάνω από το οποίο, δεν πρέπει να ξεκινούν οι συνεχείς μετρήσεις. Από τη διαδικασία αυτή μπορούμε να εξαιρέσουμε την παρουσία των νουκλιδίων βαθμονόμησης που είναι πηγές σφαλμάτων.

Οι μετρήσεις υποβάθρου λαμβάνονται για 900s (15 λεπτά) για κάθε ανιχνευτή. Οι μετρήσεις αυτές επαναλαμβάνονται κάθε φορά που αλλάζεται ένα φίλτρο σε περίοδο κανονικής λειτουργίας του σταθμού. Σε μη κανονική (off-normal) περίοδο λειτουργίας δεν πρέπει να μετρηθεί το υπόβαθρο.

1.3.3.2 Κανονική λειτουργία σταθμού (normal operation)

Η άντληση αέρα ξεκινά, μετά τη διακοπή της διαδικασίας λήψης μετρήσεων υποβάθρου. Ο αέρας εισέρχεται στο slot του φίλτρου αεροζόλ, όπου και κατακρατούνται πιθανόν ραδιενεργά σωματίδια διαμέτρου άνω των 0.5 μ m (με μόλις 1% διαπερατότητα) και ελέγχεται εάν είναι πηγές άλφα ή βήτα ακτινοβολίας από τον ανιχνευτή PIPS, ή εάν εκπέμπουν γάμμα ακτινοβολία από τον σπινθηριστή NaI(Tl). Όπως προείπαμε, οι δύο ανιχνευτές κείνται κατά μέτωπο του φίλτρου αεροζόλ. Έτσι ο αέρας φθάνει πρώτα στον ανιχνευτή ημιαγωγών PIPS, έπειτα στο φίλτρο του αεροζόλ και ακολούθως στον σπινθηριστή, ειδάλως το φίλτρο του αεροζόλ πιθανώς να παρακρατούσε ραδιενεργά σωματίδια άλφα και βήτα, πριν αυτά προλάβουν να μετρηθούν. Ακολούθως ο αέρας φθάνει στο φίλτρο ιωδίου, που βρίσκεται απέναντι από τον δεύτερο ανιχνευτή σπινθηρισμού, έχει διάμετρο 60 mm και είναι ειδικά σχεδιασμένο για κατακράτηση (ανόργανων) μορίων Ιωδίου (περίπου το 30% του φυσικού ^{131}I), με διαπερατότητα περί το 5%. Το φίλτρο αυτό περιλαμβάνει ένα λεπτό ενισχυμένο στρώμα ειδικά εμποτισμένο με ενεργό άνθρακα. Εάν παραχθεί προειδοποιητικός συναγερμός ("warning message"), τότε μία τρίτη διαδοχική μονάδα δειγματοληψίας και μέτρησης συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα. Έτσι, μετά την έξοδο του από το φίλτρο του μοριακού Ιωδίου, ο αέρας οδηγείται σε μία κατάλληλη κάνη, η οποία περιέχει ειδικό απορροφητή (φίλτρο εμποτισμένο με κόκκους αργύρου) ούτως ώστε να διαχωρίζει οργανικές ενώσεις Ιωδίου που μπορεί να είχαν ξεφύγει από τις δύο πρώτες συσκευές (περίπου το 70% του φυσικού ^{131}I). Απέναντι από το φίλτρο αυτό, βρίσκεται ο τρίτος ανιχνευτής σπινθηρισμών προς μέτρηση (κυρίως) της γάμμα κορυφής ενεργείας 365keV του ^{131}I .

Οι παλμοί συλλέγονται για 5 λεπτά διαδοχικά. Τα γεγονότα εκτιμώνται για την αναγνώριση της παρουσίας μη φυσικών ραδιενεργών ρύπων. Εάν συμβαίνει αυτό, δημιουργείται ένα σήμα προειδοποίησης. Απαιτούνται τρία μεταγενέστερα σήματα για την επιβεβαίωση μίας κατάστασης προειδοποίησης (“warning status”). Το μήνυμα συναγερμού (“alarm message”) μπορεί να δημιουργηθεί μόνο από κάποια μέτρηση που ξεπερνά κατά 10 φορές από το επίπεδο ειδοποίησης. Το πρόγραμμα εκτίμησης καταγράφει τον όγκο του επεξεργασμένου αέρα, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορίσει τη μέγιστη και ελάχιστη συγκέντρωση για έναν επικίνδυνο ρύπο. Εάν δημιουργηθεί μήνυμα προειδοποίησης, το αντίστοιχο φίλτρο αντικαθίσταται και αποθηκεύεται στα ράφια αποθήκευσης με την ετικέτα «ύποπτο» (“suspect”). Ένα ή δύο επισημασμένα φίλτρα αποθηκεύονται μετά από κάθε προειδοποιητικό μήνυμα. Πρέπει να αναφέρουμε ότι τα φίλτρα του αεροζόλ και του ενεργού άνθρακα, καλύπτονται από έναν συγκεκριμένο μηχανισμό, ο οποίος ανοίγει στη μέση όποτε απαιτείται η αντικατάσταση ενός από αυτά τα δύο φίλτρα. Με το άνοιγμα του μηχανισμού, το ρομπότ που είναι υπεύθυνο για την αντικατάσταση και αποθήκευση των φίλτρων, ενεργοποιείται αυτόματα.



Σχηματική περιγραφή λειτουργίας συστήματος ανίχνευσης

Παρεβάλλουμε πραγματικές εικόνες των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στο μετρητικό σύστημα.



Ανιχνευτής PIPS



Σπινθηριστής NaI(Tl)

Το φάσμα που λαμβάνεται από τον πρώτο σπινθηριστή NaI(Tl), δεν διαγράφεται ούτε ανανεώνεται σε κάθε πεντάλεπτη περίοδο μέτρησης, αλλά φυλάσσεται, ενώ τα γεγονότα διαδοχικών κύκλων προστίθενται. Έτσι, το όριο ανίχνευσης για τεχνητά παρασκευασμένα ραδιοϊσότοπα βελτιώνεται εμμέσως, επειδή οι προσμίξεις αυτές υποτίθενται ότι έχουν χρόνους ημιζωής μεγαλύτερους από αυτούς των στοιχείων της σειράς του ραδονίου. Επίσης, σε περίπτωση χαμηλής αλλά σταθερής συγκέντρωσης τους στον αέρα, η έντασή τους (γεγονότα στο σύνολο του χρόνου δειγματοληψίας) θα παραμένει σταθερή ενώ αυτή των στοιχείων της σειράς του Ραδονίου θα μειώνεται. Από την άλλη μεριά όμως, ο σπινθηριστής δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις

γρήγορες εναλλαγές στα επίπεδα του ραδονίου. Για το ζήτημα αυτό χρησιμοποιείται ο πιο κατάλληλος ανιχνευτής PIPS.

Η κανονική απόκριση της μονάδας του συστήματος των ανιχνευτών PIPS και NaI(Tl), δίνει μία εκτίμηση της τρέχουσας συγκέντρωσης ισοδύναμου ισοζυγίου του ραδονίου (σε Bq/m³) στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από το φίλτρο του αεροζόλ. Σε αυτό το μήνυμα φαίνεται και το επίπεδο της ακτινοβολίας υποβάθρου του φίλτρου Ιωδίου.

Έπειτα από 12-24 ώρες κανονικής λειτουργίας του σταθμού, το φίλτρο αεροζόλ αντικαθίσταται από ένα νέο απαλλαγμένο από φυσική ραδιενέργεια, αλλιώς θα υπήρχε συνεισφορά του Ραδονίου (στοιχείο της σειράς του Θορίου) στους μετρούμενους παλμούς του φίλτρου αεροζόλ, κάτι που μπορεί να επέφερε εσφαλμένα προειδοποιητικά μηνύματα. Ο νέος κύκλος εργασίας του σταθμού ξεκινά με την αντικατάσταση του φίλτρου, ακολουθούμενη από ένα τεστ ενίσχυσης και τη μέτρηση της ακτινοβολίας υποβάθρου.

Οι ενεργοί χρόνοι ημιζωής των στοιχείων των σειρών του ²³⁸U και του ²³²Th είναι περίπου 30 λεπτά και 10 ώρες, αντίστοιχα. Λόγω του χρόνου των 10 ωρών, ένα χρησιμοποιημένο φίλτρο αεροζόλ, αφήνεται να υπόκειται την αποδιέγερση για περίπου 84 ώρες (7 κανονικοί δειγματοληπτικοί κύκλοι), προκειμένου να αποβάλλει την ραδιενέργεια του Θορονίου. Έπειτα, το φίλτρο μπορεί να θεωρηθεί απαλλαγμένο από εξωτερική ραδιενέργεια, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί εκ νέου μέχρι η αντίσταση ροής του να φτάσει κάποια ελάχιστη επιτρεπτή τιμή. Ο ρυθμός της ροής του αέρα ελέγχεται έπειτα από κάθε εκτίμηση δεδομένων.

1.3.3.3 Μη κανονική λειτουργία σταθμού (off normal operation)

Η ακολουθία της μη κανονικής περιόδου λειτουργίας δημιουργείται από τρία διαδοχικά προειδοποιητικά μηνύματα του σταθμού, ή από ένα σήμα συναγερμού και έτσι η απόκριση σε αυτή την κατάσταση έκτακτης ανάγκης είναι των λίγων λεπτών μετά την ένδειξη μη φυσικής ραδιενέργειας. Τότε, αμφότερα τα φίλτρα του αεροζόλ και του Ιωδίου θα συλλεχθούν για μία ώρα, ενώ οι δειγματοληψίες (εκτίμηση δεδομένων) συνεχίζονται με τον ίδιο ρυθμό (ανά 5 λεπτά). Στην κατάσταση αυτή, ο εισερχόμενος αέρας της μονάδας 4 συνδέεται με τον εξερχόμενο της μονάδας 3, ούτως ώστε να μετρηθεί και το περιεχόμενο σε αυτόν, οργανικά συνδεδεμένο Ιώδιο. Η σύνδεση αυτή παραμένει ενεργή μέχρι να πάψουν τα σήματα συναγερμού και από τους δύο ανιχνευτές για την ίδια μέτρηση. Τα μολυσμένα φίλτρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά, έπειτα από την περίοδο ψύξης. Οι μετρήσεις υποβάθρου σταματούν στην μη κανονική περίοδο λειτουργίας, ενώ αντίθετα οι έλεγχοι ενίσχυσης διενεργούνται τακτικά, ακολουθώντας κάθε αλλαγή στην κατάσταση του σταθμού.

Σε κάθε τοποθεσία μέτρησης μπορεί να μετρηθούν διαφορετικά δείγματα, εξαρτώμενα από την συνάρτηση απόκρισης του σταθμού στο κάθε μέρος, αλλά χωρίς χρήση της αντλίας. Έπειτα από την απαραίτητη εντολή, η αντλία σταματά να λειτουργεί και το επιλεγμένο φίλτρο με το αντίστοιχο δείγμα συλλέγεται. Η διαδικασία της καταγραφής δεδομένων δεν διακόπτεται.

1.3.4 Αξιολόγηση και αποθήκευση δεδομένων στη βάση δεδομένων

Η διαδικασία λήψης και αξιολόγησης των μετρήσεων, ξεκινά με έναν έλεγχο ενίσχυσης των μονάδων των ανιχνευτών και συνεχίζει με τη μέτρηση της ακτινοβολίας υποβάθρου. Κατά τη διάρκεια της συνεχούς δειγματοληψίας του σταθμού σε κανονική ή μη κανονική περίοδο λειτουργίας του, μπορεί να συμβούν δύο καταστάσεις:

- Το άθροισμα των παρατηρούμενων γεγονότων δεν διαφέρει σημαντικά από το συνολικό υπόβαθρο (συνήθως αυτή η κατάσταση επικρατεί στο φίλτρο του Ιωδίου)
- Το άθροισμα των παρατηρούμενων γεγονότων είναι σημαντικά υψηλότερο από το συνολικό εξωτερικό υπόβαθρο (η συνήθης κατάσταση στο φίλτρο του αεροζόλ, σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου των μετρήσεων).

Η μέση τιμή και η διασπορά των γεγονότων, δίνεται από τις σχέσεις:

$$SN = \sum_{i=1}^8 YM[i] - \sum_{i=1}^8 BG[i]$$

$$VSN = \sum_{i=1}^8 VYM[i] + \sum_{i=1}^8 VBG[i]$$

$$SN \geq 2\sqrt{VSN},$$

όπου SN είναι το άθροισμα των γεγονότων (αυτό που προκύπτει σαν η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων γεγονότων YM και του υποβάθρου BG, για κάθε ζώνη) και VSN είναι η διασπορά του μεγέθους. Εάν ικανοποιείται το κριτήριο για το άθροισμα των γεγονότων, τότε οι υπολογισμοί συνεχίζονται με την υπόθεση ότι το περιβάλλον έχει υπό του φυσιολογικού επίπεδα ραδιενέργειας Ραδονίου (Subroutine TEST). Εάν η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται, το δείγμα θεωρείται ότι δεν είναι ραδιενεργό και τα γεγονότα χρησιμοποιούνται σαν επέκταση των μετρήσεων υποβάθρου.

Έπειτα από την αξιολόγηση των δεδομένων, ακολουθεί η αποθήκευσή τους στη βάση δεδομένων (database) με

πολύ συγκεκριμένη μορφή που περιγράφεται παρακάτω. Αξίζει να σημειώσουμε ότι σαν προγραμματιστικό περιβάλλον της βάσης δεδομένων χρησιμοποιείται η MySQL.

Για τα δεδομένα του AMS02, η κωδικοποίηση αυτή είναι η εξής:

A) Τα μετεωρολογικά δεδομένα, αποθηκεύονται σε αρχεία με κωδικό ηηΜΕ____.D00 , όπου ηη είναι ο αύξων αριθμός του μετρητικού σταθμού, η ένδειξη ΜΕ συμβολίζει τα μετεωρολογικά στοιχεία, ακολουθεί το όνομα του αρχείου και τέλος το αρχείο είναι της μορφής .D00. Τα αρχεία αυτά περιέχουν τις μετρήσεις του συστήματος με την εξής κωδικοποίηση:

Codenames of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Doserate (Sv/h) n.nnE-n	Rain (mm) nn.n	Rain Status n	Temperature (?C) nn.n	Temperature (?C) nn.n	Direction of Wind nn.n	Velocity of Wind (m/s) nn.n
----------------------------	-----------------	--------------	----------------------------	-------------------	------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------------

Για παράδειγμα, μία μετεωρολογική μέτρηση του συστήματος στη βάση δεδομένων έχει τη μορφή: 01,090101,1200,1.11E-7,0.0,0,12.7,12.7,120.1,12.5

B) Τα δεδομένα της άλφα και βήτα ακτινοβολίας, αποθηκεύονται σε αρχεία με κωδικό ηηΑΒ____.D00 , όπου πάλι με ηη συμβολίζουμε τον αύξοντα αριθμό του μετρητικού σταθμού, η ένδειξη ΑΒ χαρακτηρίζει το είδος των μετρήσεων, ακολουθεί το όνομα του αρχείου και τέλος η μορφή αποθήκευσής του (.D00). Τα αρχεία αυτά περιέχουν τις μετρήσεις σε μορφή γραμμών πίνακα, με την εξής κωδικοποίηση:

Codenames of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Artificial α min. Concentration n.nnE+n	Artificial α max. Concentration n.nnE+n	Deviation of α Concentration n.nnE+n	Artificial α LD n.nnE+n	Artificial β Concentration min n.nnE+n	Artificial β Concentration max n.nnE+n	Deviation of β Concentration n.nnE+n	Artificial β LD n.nnE+n
----------------------------	-----------------	--------------	---	---	--	-----------------------------------	---	---	---	----------------------------------

Για παράδειγμα:

Καμία τεχνητή ραδιενέργεια

01,960101,1200,,,,0.00E+0,,,,0.00E+01

Τεχνητή α ραδιενέργεια

01,960101,1200,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,,,,,0.00E+01

Τεχνητή β ραδιενέργεια

01,960101,1200,,,,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+01,0.00E+01,

Τεχνητή α και β ραδιενέργεια

01,960101,1200,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0 .

Γ) Τα αρχεία των μετρήσεων του επιπέδου του ραδονίου της ατμόσφαιρας, αποθηκεύονται στη βάση ως nnRN____.D00 , με την προφανή σημασία. Οι μετρήσεις αυτές καθ' εαυτές παρουσιάζονται στην παρακάτω μορφή:

Codenames of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Radon EEC n.nnE+n	Radon EEC n.nnE+n	Radon LD n.nnE+n	Thoron EEC n.nnE+n	Thoron EEC n.nnE+n	Thoron LD n.nnE+n
----------------------------	-----------------	--------------	----------------------	----------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------

Για παράδειγμα, τυπική μορφή των μετρήσεων στη βάση δεδομένων για το ραδόνιο είναι οι εξής:

No Alarm/Warning and no Radon and Thoron

01,960101,1200,,,0.00E+0,,,0.00E+01

No Alarm/Warning and no Thoron, only Radon

01,960101,1200,0.00E+0,0.00E+0,,,,,0.00E+01

No Alarm/Warning and no Radon, only Thoron

01,960101,1200,,,0.00E+0,0.00E+01,0.00E+01,

No Alarm/Warning, Radon and Thoron

01,960101,1200,0.00E+0,0.00E+0,,0.00E+0,0.00E+0,

Alarm/Warning

01,960101,1200,,,,,,

Δ) Τα δεδομένα με τις μετρήσεις της εξωτερικής ακτινοβολίας γάμμα, αποθηκεύονται σε αρχεία με κωδικό nnGA____.D00 , με την προφανή σημασία. Οι

μετρήσεις στη βάση δεδομένων καταχωρούνται σε μορφή γραμμών πίνακα, όπου η κάθε στήλη έχει την εξής πληροφορία:

Codenames of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Nuclide of Contamination	Artificial min. Concentration n.nnE+n	Artificial max. Concentration n.nnE+n	Deviation of Concentration n.nnE+n	Cs-137 LD n.nnE+n	Cs-137 Equ..Conc.. min. n.nnE+n	Cs-137 Equ. Conc. max. n.nnE+n
----------------------------	-----------------	--------------	--------------------------	--	--	---------------------------------------	----------------------	------------------------------------	-----------------------------------

Ως παράδειγμα παραθέτουμε:

No Alarm/Warning

01,960101,1200,,,,,0.00E+0,

Alarm/Warning

01,960101,1200,CS-

137,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,,0.00E+0,0.00E+0

Ε) Τα δεδομένα με τις μετρήσεις της γάμμα ακτινοβολίας από το φίλτρο του Ιωδίου (μοριακό), αποθηκεύονται σε αρχεία με την κωδικοποίηση nnGI____.D00 , με την προφανή σημασία. Οι μετρήσεις εξ' άλλου, καταγράφονται σε πίνακες με την παρακάτω μορφή:

Codenames of Station nn	Datum YYMMD D	Time HHMM	Nuklid of Contaminatio n	Artificial min. Concentration n.nnE+n	Artificial max. Concentration n.nnE+n	Deviation of Concentration n.nnE+n	I-131 LD. n.nnE+n	I-131 Equ. Conc. min. n.nnE+n	I-131 Equ.. Conc. max. n.nnE+n
----------------------------	---------------------	--------------	-----------------------------	--	--	---------------------------------------	----------------------	----------------------------------	-----------------------------------

Παραδείγματος χάριν:

No Alarm/Warning

01,960101,1200,,,,,0.00E+0,

Alarm/Warning

01,960101,1200,I-

131,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0

Ζ) Τα δεδομένα των μετρήσεων της γάμμα ακτινοβολίας από το φίλτρο του Ιωδίου (οργανικό), αποθηκεύονται με την εξής κωδικοποίηση :) nnOI____.D00 , με την

προφανή σημασία. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στη βάση με την πιο κάτω μορφή:

Codenames of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Nuklideof Contamination	Artificial min. Concentration n.nnE+n	Artificial max. Concentration n.nnE+n	Deviation of Concentration n n.nnE+n	I-131 LD. n.nnE+n	I-131 Equ. Conc. min. n.nnE+n	I-131 Equ. Conc. max. n.nnE+n
----------------------------	-----------------	--------------	-------------------------	--	--	--	----------------------	----------------------------------	----------------------------------

Σαν παράδειγμα παραθέτουμε τις μετρήσεις:

No Alarm/Warning

01,960101,1200,,,,,0.00E+0,

Alarm/Warning

01,960101,1200,I-

131,0.00E+0,0.00E+0,0.00E+0,,0.00E+0,0.00E+0 .

Ύστερα, τα αρχεία των εκθέσεων (report files)

αποθηκεύονται με την εξής δομή:

A) Για τα αρχεία συναγερμού, χρησιμοποιείται η εξής κωδικοποίηση:

Alarm/Warning: nnAW____.R00

Technical Alarm (Hardware-Error) nnTA____.R00

B) Για τα αρχεία ειδικής κατάστασης:

Hardware Status nnHW____.R00

Messflow nnMF____.R00

Γ) Για τα αρχεία κατάστασης συστήματος:

Status report nnST____.R00

Τα δεδομένα της κατάστασης συστήματος

αποθηκεύονται σε μορφή πινάκων όπως πιο κάτω:

Codename of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Code of Staus n
---------------------------	-----------------	--------------	--------------------

Code Status	0	normal
	1	WARNING
	2	ALARM
	3	ERROR (No acquisition)
	4	Maintains
	5	Out of communication
	6	Intensive
	10	Limited Normal
	11	Limited WARNING
	12	Limited ALARM

Έπειτα, τα αρχεία των φασμάτων έχουν την εξής κωδικοποίηση κατά την αποθήκευσή τους:

A) Για την ονομασία των αρχείων φασμάτων ισχύει (με την προφανή σημασία):

nnP____.H00 PIPS Spectrum-Header File

nnA____.H00 Aerosol NaI(Tl) Spectrum-Header File

nnI____.H00 Iodine NaI(Tl) Spectrum-Header File

nnO____.H00 Organic Iodine NaI(Tl) Spectrum-Header File

Τα δεδομένα των αρχείων φασμάτων αποθηκεύονται σε πίνακες της μορφής:

Codename of Station nn	Datum YYMMDD	Time HHMM	Detector ID n	Filter ID n	Filter ID Number nnnnn	Live Time (s) nnnnnnn	Pumped air (m ³) nnnn.n
---------------------------	-----------------	--------------	------------------	----------------	------------------------------	--------------------------	--

, όπου για τις ανιχνευτικές διατάξεις και τα φίλτρα, οι αύξοντες αριθμοί είναι:

Detector ID:

0 → NaI(Tl)

1 → PIPS

Filter ID:

0 → Aerosol

1 → Iodine

2 → Organic Iodine Patron

Ως παράδειγμα δίνουμε:

01,960101,1200,1,1,00100,86400,189.3

B) Για τα αρχεία των φασμάτων η κωδικοποίηση είναι η εξής:

nnP____.S00

PIPS Spectrum files

nnA____.S00

Aerosol NaI(Tl) Spectrum files

nnI____.S00

Iodine NaI(Tl) Spectrum files

nnO____.S00
files

Organic Iodine NaI(Tl) Spectrum

Ακόμη, η δομή αποθήκευσης ενός αρχείου ρυθμίσεων (setup files) είναι η εξής:

Mode		unit	Normal			Alarm/Warning		
			Standard	Max.	Min	Standard	Max.	Min.
Filter change cycle		Hours	24			1		
Evaluation cycle		Min.	5	30	5	5	10	5
Gain-Test Period		cycles	14			0		
Background measuring		Min.	15	30	15	0	10	0
Organic Iodine measuring at WARNING			FALSE			FALSE		
Organic Iodine measuring at ALARM			FALSE			TRUE		
Storage period of data	Meteorological data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	α,β data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	Radon data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	Gamma Aerosol data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	Gamma Iodine data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	Gamma organic Iodine data	Period	2	cycle	0	2	cycle	0
	PIPS Spectrum	Period	cycle	cycle	0	2	cycle	0
	Aerosol NaI(Tl) Spectrum	Period	cycle	cycle	0	2	cycle	0
	Iodine NaI(Tl) Spectrum	Period	cycle	cycle	0	2	cycle	0
Organic Iodine NaI(Tl) Spectrum	Period	0	cycle	0	2	cycle	0	

, όπου το αρχείο αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων με τον κωδικό nnST____.100 .

Τα αρχεία με τα κατώφλια συναγερμού αποθηκεύονται με τον κωδικό nnTH____.100 και περιέχουν δεδομένα της μορφής:

	Unit	Warning			Alarm		
		Standard	Max	Min	Standard	Max	Min
Dosrate	Sv/h	3.00E-7			1.00E-6		
Artificial alpha (Pu-239 Equ.)	Bq/m ³	0			1		
Artificial beta (Sr-90 Equ.)	Bq/m ³	0			1		
Aerosol Gamma (Cs-137)	Bq/m ³	0			1		
Iodine Gamma (I-131)	Bq/m ³	0			1		
Organic Iodine g (I-131)	Bq/m ³	0			1		

Τέλος, τα αρχεία που περιέχουν δεδομένα της περιόδου λειτουργίας και της αλλαγής των φίλτρων (command files), αποθηκεύονται με την εξής κωδικοποίηση:

A) nnAW____.C00 OFF-NORMAL mode,
με τα στοιχεία τους να περιέχονται σε πίνακες της παρακάτω μορφής

Codename of Station nn	Date YYMMDD	Time HHMM	ID Number nnnnnn
---------------------------	----------------	--------------	---------------------

B) nnFC____.C00 Filter change,
 με τα δεδομένα να βρίσκονται στη βάση με την
 παρακάτω μορφή πίνακα :

Codename of Station nn	Date YYMMDD	Time HHMM	ID Number nnnnnn
---------------------------	----------------	--------------	---------------------

1.3.4.1 Υπορουτίνα “TEST”

❖ Εκτίμηση γεγονότων ακτινοβολίας γάμμα

Η συνεισφορά των διαφορικών γεγονότων (όχι σαν άθροισμα πλέον) για τις διάφορες ενεργειακές ζώνες, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ND[i] = YM[i] - BQ[i] \quad i = 1, \dots, R$$

$$RNQ[i] = \sqrt{\frac{YM[i] + SBG[i]^2}{ND[i] + \frac{VSN}{SN^2}}}$$

, όπου ND είναι τα συνδυαστικά (διαφορικά) γεγονότα του δικτύου, NQ είναι οι ρυθμοί του δικτύου, RNQ είναι οι σχετικές τυπικές αποκλίσεις και R είναι ο αριθμός των ενεργειακών ζωνών. Το βαθμονομημένο, σχετικό διαφορικό φάσμα των προϊόντων του Ραδονίου, CQ[i], συγκρίνεται με τους πειραματικά μετρούμενους ρυθμούς, μέσω ενός συντελεστή ποιότητας QF[i]:

$$QF[i] = NQ[i] / CQ[i] \quad i = 1, \dots, R$$

$$RQF[i] = \sqrt{RNQ[i]^2 + RCQ[i]^2},$$

όπου RQF[i] είναι η σχετική τυπική απόκλιση του ποιοτικού παράγοντα, RCQ[i] είναι η πειραματική τυπική απόκλιση του βαθμονομητή CQ, στην ζώνη. Προφανώς, αναμένεται τιμή του παράγοντα ίση με 1,

εάν δεν υπάρχει ραδιενεργός πηγή στο φίλτρο. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η σχετική συνεισφορά στο φάσμα της πραγματικής σύστασης των προϊόντων αποδιέγερσης του Ραδονίου, εξαρτάται από το ισοζύγιο μεταξύ των διαδοχικών αποδιεγέρσεων όπως επίσης από την παρουσία (ή την απουσία) σημαντικής συγκέντρωσης στοιχείων της σειράς του 220-Rn.

$$Q[i] = \frac{QF[i] - 1}{RQ[i]}$$

$$Q[i] > SF$$

, όπου $Q[i]$ η τελική ποιοτική παράμετρος για την i ζώνη, που συγκρίνει τη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των αναμενόμενων τιμών του ποιοτικού παράγοντα με την υπολογισμένη τυπική τους απόκλιση. Το μέγεθος SF είναι μία ημι-εμπειρική παράμετρος με τιμή 2 ή 3. Εάν ικανοποιείται το κριτήριο, η υψηλή τιμή του $Q[i]$ υποδεικνύει την παρουσία μη φυσικού ραδιενεργού στοιχείου. Ο αριθμός της ζώνης με την μεγαλύτερη τιμή για το $Q[i]$, μπορεί να μας οδηγήσει σε μία πρόχειρη υπόθεση για την ταυτότητα του ραδιονουκλιδίου. Ο επόμενος πίνακας δείχνει τα νουκλίδια που πιθανά να απαρτίζουν τη ραδιενεργό ρύπανση.

Ζώνη	Κύρια κορυφή γάμμα (keV)	Εμφανιζόμενο μήνυμα	Ραδιονουκλίδιο
1	Bremsstrahlung	BETA	⁹⁰ Sr, ⁹⁰ Y
2	81-250	NOBLE GAS	¹³³ Xe, ^{133m} Xe, ¹³⁵ Xe
3	365	I-131	¹³¹ I
4	530	I-133	¹³³ I
5	662	Cs-137	¹³⁷ Cs
6	700-1100	MIXED	¹³⁴ Cs, ^{110m} Ag
7	1100-1500	MIXED	⁶⁰ Co, ⁵⁹ Fe
8	1500-1800	MIXED	⁴² K, ²⁴ Na

Η απόκλιση των ποιοτικών παραγόντων από την αναμενόμενη τιμή 1, αναδεικνύει την ύπαρξη ενός ραδιενεργού συστατικού στο φίλτρο παρά ενός θυγατρικού στοιχείου του Ραδονίου. Εάν τα κριτήρια των ποιοτικών παραμέτρων δεν ικανοποιούνται για καμία ενεργειακή ζώνη, επιβεβαιώνεται η ύπαρξη θυγατρικών στοιχείων του Ραδονίου.

Σε περίπτωση ενός γεγονότος με σημαντικά υψηλή τιμή, όχι μόνο θα εκπεμφθεί προειδοποιητικό μήνυμα, αλλά θα αποσαφηνιστεί και η ραδιενεργός παρουσία στο φίλτρο χρησιμοποιώντας μία πρόχειρη εκτίμηση της μετρητικής απόδοσης:

$$AC = \frac{YM[im] - BG[im]}{\frac{t}{EFF[im]}}$$

, όπου i_m είναι ο αριθμός της ζώνης με τη μεγαλύτερη ή και σημαντικότερη ποιοτική παράμετρο $Q[i]$, t_m είναι ο χρόνος διάρκειας της μέτρησης και $EFF[i]$ η μέση μετρητική απόδοση της κάθε ζώνης.

Σε περίπτωση κανονικής λειτουργίας, μόνο οι επουσιώδεις τιμές της ατμοσφαιρικής ραδιενέργειας μπορούν να υπολογισθούν. Εφαρμόζονται οι εξής υποθέσεις:

- ✓ Η ελάχιστη συγκέντρωση του αεροζόλ ACCN, καθορίζεται κάνοντας χρήση του ολικού όγκου του επεξεργασμένου αέρα και έτσι πρόκειται για το μέγιστο όγκο, VOLX.
- ✓ Η μέγιστη συγκέντρωση του αεροζόλ ACCX, καθορίζεται χρησιμοποιώντας τον όγκο του αέρα που αντλήθηκε μέσω του φίλτρου κατά την τελευταία περίοδο μέτρησης, οπότε αυτός είναι ο ελάχιστος όγκος, VOLN.

$$ACCN = AC / VOLX$$

$$ACCX = AC / VOLN$$

Σε περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας, ο όγκος του αέρα (VOL) που ίσως περιέχει την απορροφημένη πρόσμιξη, αποφασίζεται να είναι ο επεξεργασμένος αέρας, έτσι η συγκέντρωση ραδιενέργειας ACC δίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τη σχέση:

$$ACC = AC / VOL.$$

❖ Εκτίμηση γεγονότων άλφα και βήτα

Η διαδικασία εκτίμησης του φάσματος άλφα και βήτα, είναι αρκετά όμοια με τη διαδικασία που περιγράφηκε

προηγούμενως. Υπάρχουν 6 ενεργειακές ζώνες στην περίπτωση αυτή. Παρακάτω δίνεται πίνακας με τους πλέον σημαντικούς πομπούς άλφα σωματιδίων:

Νουκλίδιο	Σειρά	Ενέργεια άλφα (MeV)	Ενεργειακή περιοχή
^{218}Po	^{222}Rn	6.00	3
^{214}Po	^{222}Rn	7.69	5
^{216}Po	^{220}Rn	6.78	4
^{212}Bi	^{220}Rn	6.07	3
^{212}Po	^{220}Rn	8.78	6

Τα πιο πιθανά τεχνητά νουκλίδια που είναι πομποί άλφα σωματιδίων είναι το ^{238}Pu , το ^{239}Pu , το ^{240}Pu και το ^{241}Am , που εμπίπτουν στην περιοχή 2 ($4.0 < E < 5.7 \text{ MeV}$). Η περιοχή 1 περιέχει όλους τους παλμούς βήτα ($< 4 \text{ MeV}$). Τα γεγονότα δικτύου υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$ND[i] = YM[i] - BQ[i], (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$N[6] = ND[6]$$

$$N[5] = ND[5] - CT_{65} N[6]$$

$$N[4] = ND[4] - CT_{64} N[6] - CT_{54} N[5]$$

, όπου N τα άλφα γεγονότα και CT η "crosstalk" συνιστώσα.

1.3.4.2 Φασματοσκοπία γάμμα

Τα φάσματα ακτινοβολίας γάμμα που συλλέγονται από τον σπινθηριστή NaI(Tl), αντιμετωπίζονται με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Επιλέγονται πλήρεις ενεργειακές κορυφές και ταυτοποιούνται. Η αναγνώριση των κορυφών γίνεται στη βάση της συμπεριφοράς της δεύτερης παραγώγου του φάσματος. Για την ανάλυση αυτή, απαιτείται η γνώση των δεδομένων του

αναμενόμενου πλάτους της βαθμονομημένης κορυφής (FWHM). Η βαθμονόμηση της ενέργειας με τα κανάλια του πολυκαναλικού αναλυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό και την ανάδειξη των ενεργειών των αναγνωρισμένων γάμμα κορυφών.

Η επιλογή της περιοχής των κορυφών γίνεται μέσω της εξέτασης της πρώτης παραγώγου και στις δύο άκρες του κέντρου της κορυφής, σύμφωνα με τη λεγόμενη μέθοδο του τραπεζοειδούς. Το κριτήριο που πρέπει να πληροί μία ενεργειακή κορυφή για να είναι αποδεκτή, είναι το εξής:

$$\frac{SDAMP[i]}{AMP[i]} \leq 0.8$$

, όπου SD η τυπική απόκλιση (Standard Deviation) του πλάτους της κορυφής.

Ύστερα, για την ταυτοποίηση των ραδιονουκλιδίων, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές, η πρώτη εκ των οποίων είναι η παραδοσιακή ανάλυση κορυφή-κορυφή (peak-by-peak analysis) και η δεύτερη ονομάζεται διαδικασία αναγνώρισης πίνακα (matrix identification).

Τα δεδομένα από το γράφημα της βαθμονόμησης της ενέργειας με την απόδοση ενέργειας κορυφής, είναι απαραίτητα για τον καθορισμό της ενεργότητας των αναγνωρισμένων ραδιονουκλιδίων. Η ενεργότητά τους δίνεται από τη σχέση:

$$ACT[i] = \frac{IP[i]}{EFF[i] \cdot GM[i]}$$

, όπου IP[i] είναι η ένταση της κορυφής i, EFF[i] είναι η απόδοση για την i κορυφή και GM[i] η γάμμα αφθονία (abundance) της κορυφής. Εάν η δειγματοληψία έγινε κατά τη διάρκεια περιόδου μη κανονικής λειτουργίας, μπορούν επίσης να υπολογισθεί η συγκέντρωση της ενεργότητας στην ατμόσφαιρα από τον τύπο:

$$ACC[i] = \frac{ACT[i]}{VOL}$$

, όπου ACC είναι η συγκέντρωση σε Bq/m³ και VOL είναι ο όγκος του αντλούμενου αέρα που διαπερνά το φίλτρο.

1.3.4.3 Ευαισθησία

Η μικρότερη δυνατή ανιχνεύσιμη ακτινοβολία υπολογίζεται και καθορίζεται για όλους τους ανιχνευτές του συστήματος, παίρνοντας υπόψη μόνο ρεαλιστικές δειγματοληψίες και μετρητικές καταστάσεις. Παραθέτουμε τον επόμενο πίνακα που αναφέρεται στο είδος των ανιχνευτών, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και στις υπορουτίνες επεξεργασίας που εφαρμόζονται μόνο στο σύστημα AMS02.

Ισότοπο	Φίλτρο/ανιχνευτής	Διάρκεια πριν το	φιλταρίσματος προειδοποιητικό	αέρα μήνυμα	Διάρκεια μέτρησης
		5 min	1 hour	12 hours	
Normal mode					
131I	aerosol/NaI(Tl)	5.4	0.8	0.066	300s
131I	iodine/NaI(Tl)	6.4	0.53	0.044	300s
137Cs	aerosol/NaI(Tl)	4.1	0.67	0.056	300s
a-activity	aerosol/PIPS	1.5	0.5	0.042	300s
137Cs(β)	aerosol/PIPS	2.5	0.7	0.052	300s
137Cs	aerosol/NaI(Tl)	6.7	0.77	0.061	300s
Off normal mode	organic iodine filter				
131I	iodine/NaI(Tl)	8.7	0.72	0.058	300s

Τα δεδομένα αντιστοιχούν σε υποτιθέμενη παρουσία φυσικού υποβάθρου ραδονίου ίσου με

20 Bq/m³ΕΕC, ενώ πρέπει να σημειώσουμε ότι ο ρυθμός ροής του αέρα είναι 10m³/h.

ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: «ΕΛΕΓΚΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ»

1. Ποιοτικός έλεγχος παραμέτρων λειτουργίας δικτύου

Ο ποιοτικός έλεγχος που θα διεξάγουμε προκειμένου να αποφανθούμε για την αρτιότητα και την εγκυρότητα του συστήματος, θα βασιστεί στην ομοιομορφία και στη συνέχεια των μετρήσεων κάθε παραμέτρου λειτουργίας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν, είναι προφανώς εκείνες για τις οποίες το τηλεμετρικό δίκτυο που είναι εγκατεστημένο στην Ελλάδα, παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης. Έτσι σκοπός μας είναι η αξιολόγηση των μετεωρολογικών δεδομένων (βροχή, θερμοκρασία, κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου), της ολικής εξωτερικής δόσης (doserate), των επιπέδων του Ραδονίου της ατμόσφαιρας, του κατώτερου ορίου ανίχνευσης τεχνητής άλφα και βήτα ακτινοβολίας και του ανόργανου (μοριακού) Ιωδίου-131, καθώς και άλλων παραμέτρων όπως ο όγκος του εισερχόμενου αέρα στην αντλία, η θερμοκρασία του περιβλήματος του υποσταθμού και ο χρόνος χρήσης του, ή το σύνολο των αποθεμάτων ραδιενέργειας ανά φίλτρο.

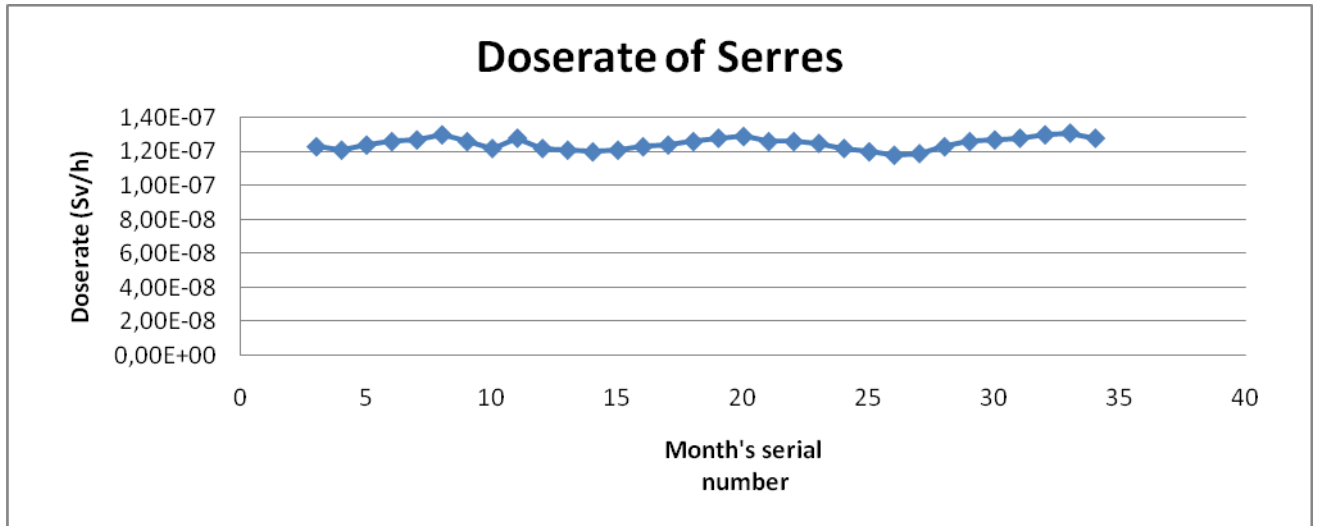
1.1 Ολική εξωτερική δόση (Doserate)

Προκειμένου να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για την κάθε παράμετρο, ελέγξαμε τις τιμές της για ένα αντιπροσωπευτικό χρονικό διάστημα. Η αναβάθμιση της βάσης δεδομένων του συστήματος έλαβε χώρα τον Φεβρουάριο του 2010, οπότε ορίσαμε σαν αντιπροσωπευτικό, ένα χρονικό διάστημα μετρήσεων το οποίο περιλαμβάνει τιμές των παραμέτρων τόσο πριν, όσο και μετά την αναβάθμιση αυτή. Για την ολική εξωτερική δόση, θεωρήσαμε το διάστημα από 1/1/2008 έως 1/10/2010, κοινό και για τους τρεις υποσταθμούς και κάναμε χρήση μέσων μηνιαίων τιμών. Πρέπει να αναφέρουμε ότι δεν λάβαμε υπόψη στην εξαγωγή των γραφημάτων μας,

λανθασμένες τιμές της δόσης ή άλλες που δεν έχουν καταχωρισθεί, γεγονός που οφείλεται σε επιπλοκές της ομαλής λειτουργίας του συστήματος (τεκμηριωμένα κακή απόδοση του ανιχνευτή), ή αναφέρονται σε διαστήματα όπου το σύστημα έπαυε να λειτουργεί. Η επιλογή των κατάλληλων τιμών παρέχεται, όπως αναφέραμε, από το λογισμικό με τη χρήση εξειδικευμένων κριτηρίων σύμφωνα με τα οποία, μία τιμή, θεωρείται έγκυρη μόνο εάν βρίσκεται μεταξύ ενός μεγίστου και ελαχίστου ορίου.

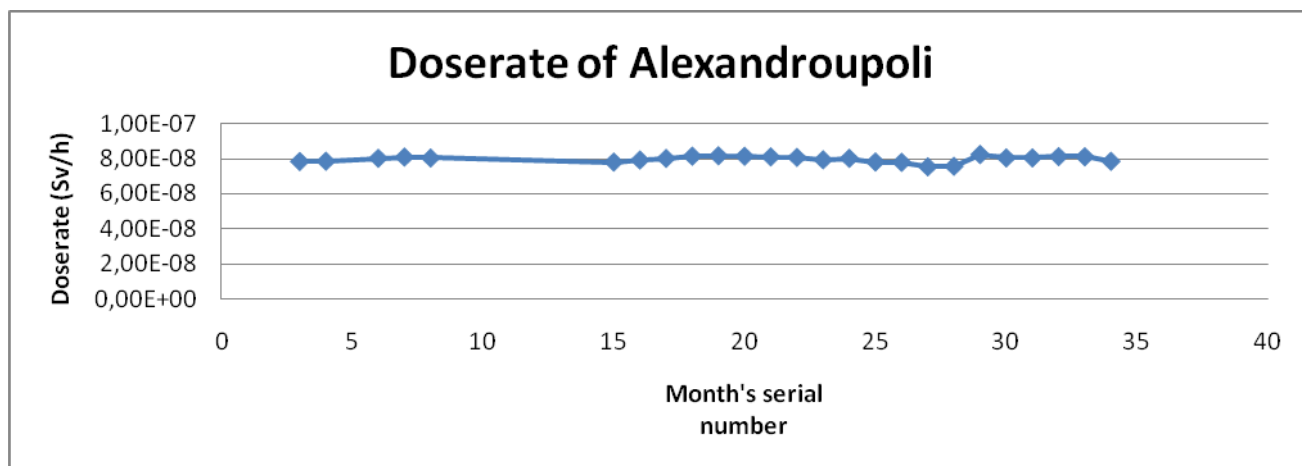
Για τον υποσταθμό των Σερρών παρουσιάζουμε το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο εξήχθη (όπως και όλα τα υπόλοιπα), με τη βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Microsoft Excel, καθώς και τις αντίστοιχες μετρήσεις από την επεξεργασία των οποίων προήλθε.

Date	AVG(doserate AMS02) (Sv/h) Serres	Month's serial number(1/2008=1)
1/10/2010 00:00	1.28E-07	34
1/9/2010 00:00	1.31E-07	33
1/8/2010 00:00	1.30E-07	32
1/7/2010 00:00	1.28E-07	31
1/6/2010 00:00	1.27E-07	30
1/5/2010 00:00	1.26E-07	29
1/4/2010 00:00	1.23E-07	28
1/3/2010 00:00	1.19E-07	27
1/2/2010 00:00	1.18E-07	26
1/1/2010 00:00	1.20E-07	25
1/12/2009 00:00	1.22E-07	24
1/11/2009 00:00	1.25E-07	23
1/10/2009 00:00	1.26E-07	22
1/9/2009 00:00	1.26E-07	21
1/8/2009 00:00	1.29E-07	20
1/7/2009 00:00	1.28E-07	19
1/6/2009 00:00	1.26E-07	18
1/5/2009 00:00	1.24E-07	17
1/4/2009 00:00	1.23E-07	16
1/3/2009 00:00	1.21E-07	15
1/2/2009 00:00	1.20E-07	14
1/1/2009 00:00	1.21E-07	13
1/12/2008 00:00	1.22E-07	12
1/11/2008 00:00	1.28E-07	11
1/10/2008 00:00	1.22E-07	10
1/9/2008 00:00	1.26E-07	9
1/8/2008 00:00	1.30E-07	8
1/7/2008 00:00	1.27E-07	7
1/6/2008 00:00	1.26E-07	6
1/5/2008 00:00	1.24E-07	5
1/4/2008 00:00	1.21E-07	4
1/3/2008 00:00	1.23E-07	3

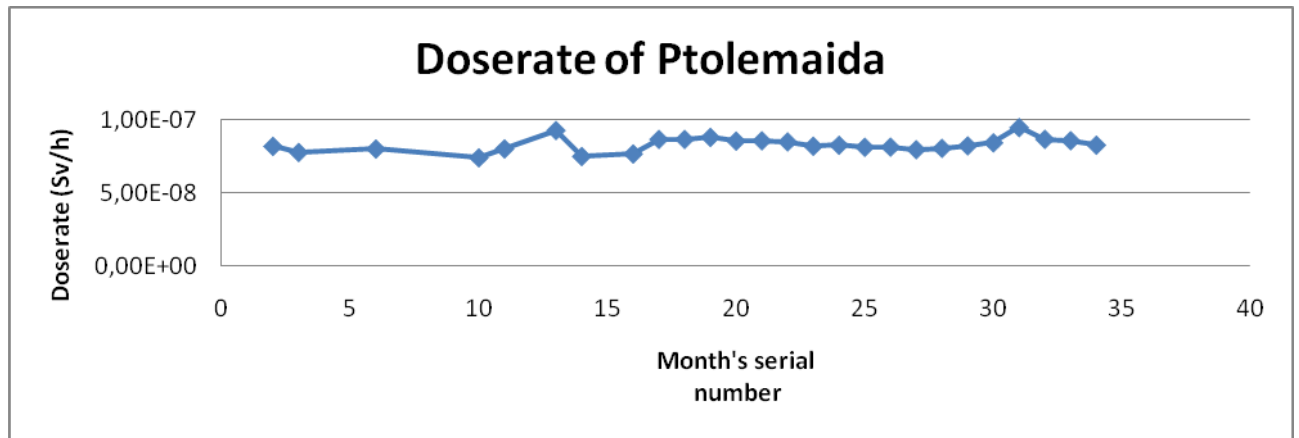


Αντίστοιχα, για τους υποσταθμούς της Αλεξανδρούπολης και της Πτολεμαΐδας έχουμε:

Date	AVG(Doserate AMS02) (Sv/h) Alex/poli	Month's serial number
1/10/2010 00:00	7.85E-08	34
1/9/2010 00:00	8.12E-08	33
1/8/2010 00:00	8.13E-08	32
1/7/2010 00:00	8.05E-08	31
1/6/2010 00:00	8.05E-08	30
1/5/2010 00:00	8.25E-08	29
1/4/2010 00:00	7.56E-08	28
1/3/2010 00:00	7.53E-08	27
1/2/2010 00:00	7.79E-08	26
1/1/2010 00:00	7.81E-08	25
1/12/2009 00:00	8.02E-08	24
1/11/2009 00:00	7.94E-08	23
1/10/2009 00:00	8.08E-08	22
1/9/2009 00:00	8.11E-08	21
1/8/2009 00:00	8.15E-08	20
1/7/2009 00:00	8.17E-08	19
1/6/2009 00:00	8.15E-08	18
1/5/2009 00:00	8.02E-08	17
1/4/2009 00:00	7.92E-08	16
1/3/2009 00:00	7.81E-08	15
1/8/2008 00:00	8.04E-08	8
1/7/2008 00:00	8.10E-08	7
1/6/2008 00:00	8.03E-08	6
1/4/2008 00:00	7.85E-08	4
1/3/2008 00:00	7.84E-08	3

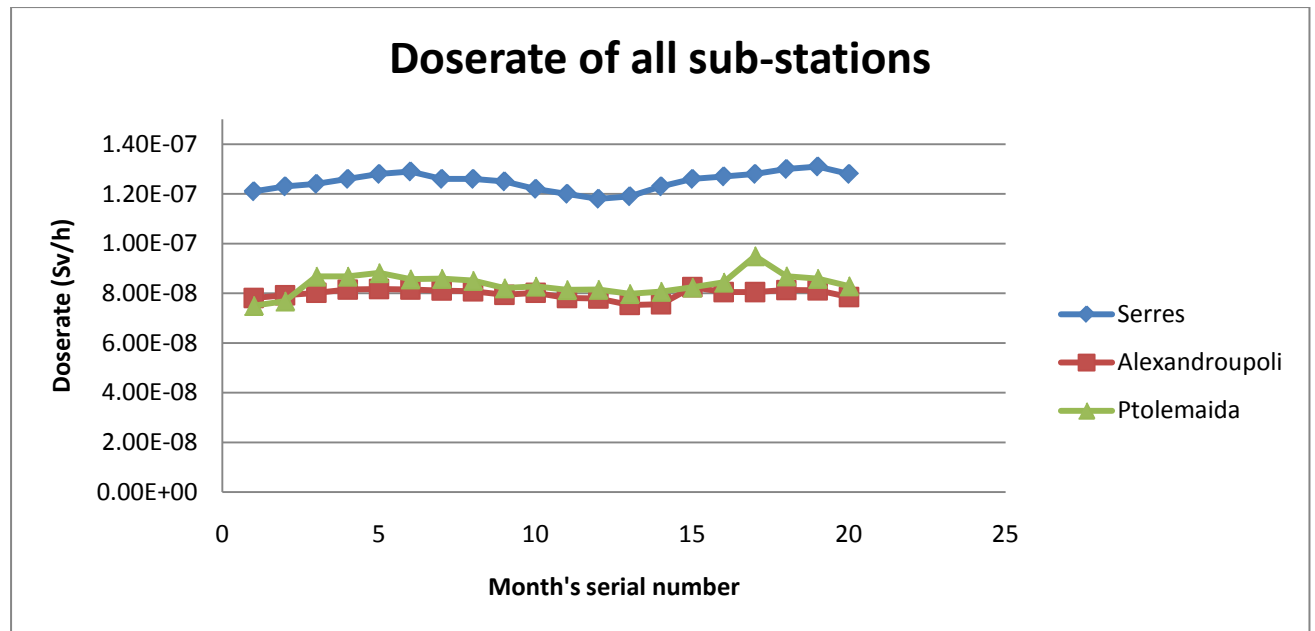


Date	AVG(Doserate AMS02) (Sv/h) Ptolemaida	Month's serial number
1/10/2010 00:00	8.29E-08	34
1/9/2010 00:00	8.59E-08	33
1/8/2010 00:00	8.69E-08	32
1/7/2010 00:00	9.50E-08	31
1/6/2010 00:00	8.44E-08	30
1/5/2010 00:00	8.24E-08	29
1/4/2010 00:00	8.07E-08	28
1/3/2010 00:00	7.98E-08	27
1/2/2010 00:00	8.15E-08	26
1/1/2010 00:00	8.14E-08	25
1/12/2009 00:00	8.28E-08	24
1/11/2009 00:00	8.21E-08	23
1/10/2009 00:00	8.51E-08	22
1/9/2009 00:00	8.59E-08	21
1/8/2009 00:00	8.57E-08	20
1/7/2009 00:00	8.82E-08	19
1/6/2009 00:00	8.68E-08	18
1/5/2009 00:00	8.68E-08	17
1/4/2009 00:00	7.68E-08	16
1/3/2009 00:00	7.50E-08	14
1/1/2009 00:00	9.30E-08	13
1/11/2008 00:00	8.03E-08	11
1/10/2008 00:00	7.41E-08	10
1/6/2008 00:00	8.02E-08	6
1/3/2008 00:00	7.78E-08	3
1/2/2008 00:00	8.20E-08	2

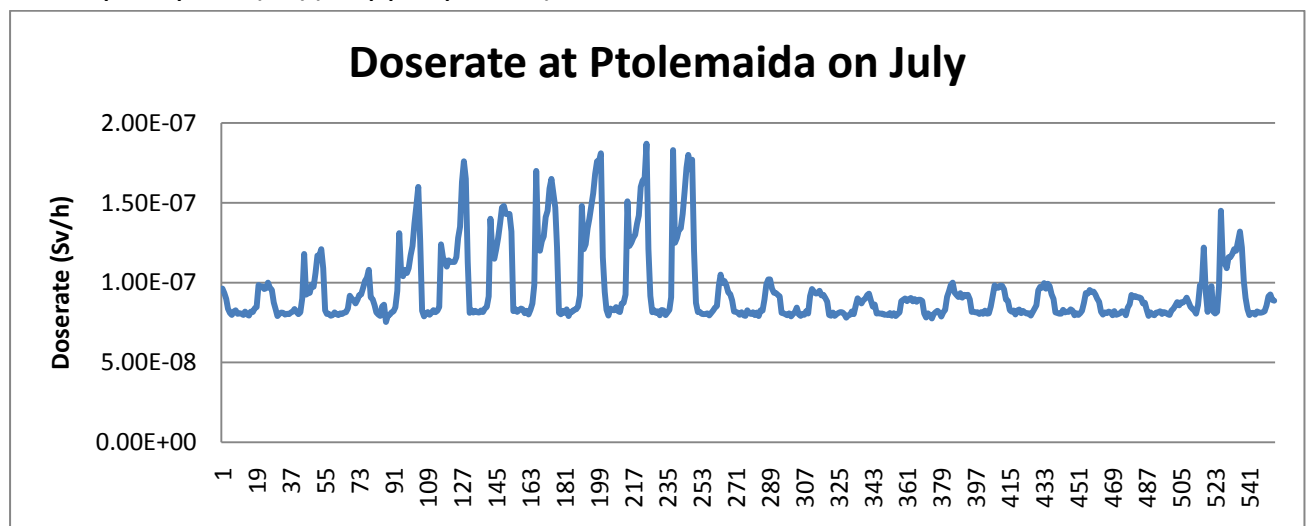


Για την παράμετρο αυτή του συστήματος, δημιουργήσαμε και έναν συγκεντρωτικό πίνακα στατιστικών δεδομένων με το αντίστοιχο διάγραμμα τους, για χρονικό διάστημα είκοσι μηνών (Μάρτιος 2009 έως σήμερα) και χρήση μέσω μηνιαίων τιμών.

Date	Serres	Alexandroupoli	Ptolemaida	Month's s.n.
1/10/2010	1,28E-07	7,85E-08	8,29E-08	20
1/9/2010	1,31E-07	8,12E-08	8,59E-08	19
1/8/2010	1,30E-07	8,13E-08	8,69E-08	18
1/7/2010	1,28E-07	8,05E-08	9,50E-08	17
1/6/2010	1,27E-07	8,05E-08	8,44E-08	16
1/5/2010	1,26E-07	8,25E-08	8,24E-08	15
1/4/2010	1,23E-07	7,56E-08	8,07E-08	14
1/3/2010	1,19E-07	7,53E-08	7,98E-08	13
1/2/2010	1,18E-07	7,79E-08	8,15E-08	12
1/1/2010	1,20E-07	7,81E-08	8,14E-08	11
1/12/2009	1,22E-07	8,02E-08	8,28E-08	10
1/11/2009	1,25E-07	7,94E-08	8,21E-08	9
1/10/2009	1,26E-07	8,08E-08	8,51E-08	8
1/9/2009	1,26E-07	8,11E-08	8,59E-08	7
1/8/2009	1,29E-07	8,15E-08	8,57E-08	6
1/7/2009	1,28E-07	8,17E-08	8,82E-08	5
1/6/2009	1,26E-07	8,15E-08	8,68E-08	4
1/5/2009	1,24E-07	8,02E-08	8,68E-08	3
1/4/2009	1,23E-07	7,92E-08	7,68E-08	2
1/3/2009	1,21E-07	7,81E-08	7,50E-08	1



Όπως παρατηρούμε, υπάρχει στα δεδομένα από τον υποσταθμό της Πτολεμαΐδας, μεγάλη απόκλιση στη μέτρηση του Ιουλίου του 2010. Ένας παράγοντας που είναι πιθανό να έπαιξε ρόλο στο σφάλμα αυτό, είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, επηρεάζει την απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μάλιστα, όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα που παρουσιάζει την ωριαία μεταβολή του ρυθμού δόσης για το μήνα Ιούλιο στην Πτολεμαΐδα, υπάρχει μία περιοδικότητα στις μετρήσεις του συστήματος (με υποτιθέμενη «περίοδο» 24 ωρών) που προφανώς εξηγείται, λαμβάνοντας υπόψη τις ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας.



Όπως παρατηρούμε, με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τις πρωινές ώρες, ο ρυθμός δόσης παίρνει χαμηλότερες τιμές και αντίστροφα για τις απογευματινές και τις βραδινές ώρες, όπου η θερμοκρασία μειώνεται. Αντιλαμβανόμαστε ότι η απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος πέφτει με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυτό συμβαίνει γιατί το τηλεμετρικό δίκτυο δεν διαθέτει αισθητήρες θερμότητας, ούτως ώστε να διορθώνουν τις αποκλίσεις των μετρήσεων από τις πραγματικές τιμές τους (heat or temperature compensation's sensors). Έτσι λοιπόν εξηγείται η ακμή στις μετρήσεις του ρυθμού δόσης για το μήνα Ιούλιο, όπου σαν καλοκαιρινός μήνας έχει μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

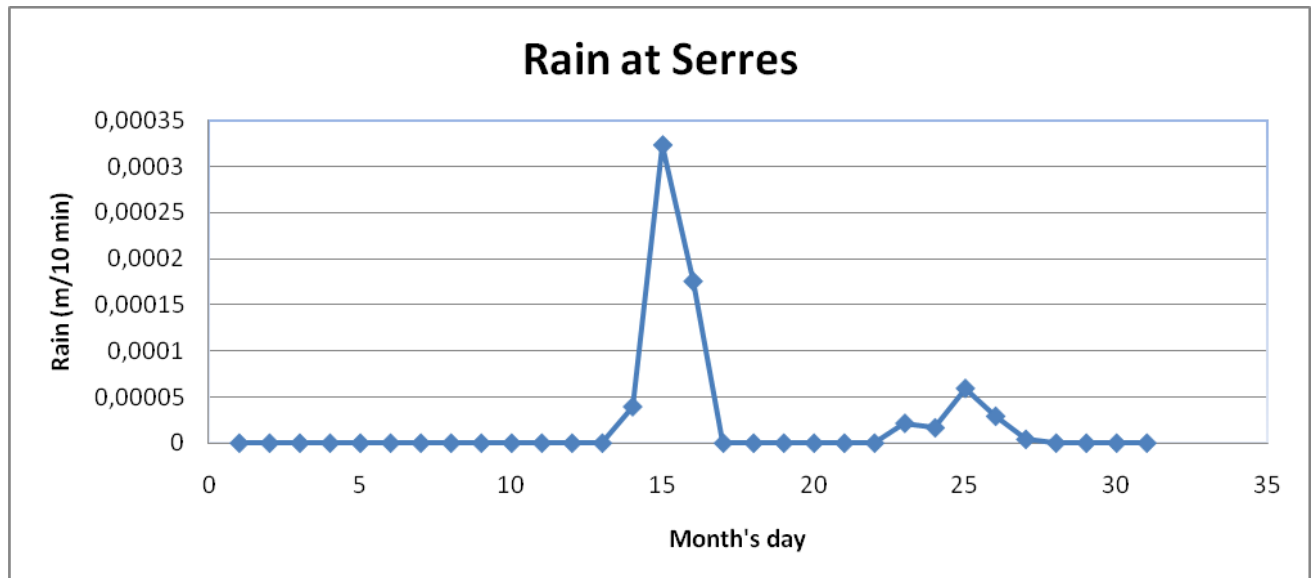
1.2 Μετεωρολογικά δεδομένα

A) Βροχή

Για την διεξαγωγή του ποιοτικού ελέγχου στα μετεωρολογικά δεδομένα, εξετάσαμε πρώτα την παράμετρο της βροχής. Θεωρήσαμε σαν αντιπροσωπευτικό διάστημα έναν φθινοπωρινό μήνα, ούτως ώστε να εξασφαλίσουμε την βροχόπτωση. Για κάθε υποσταθμό παρουσιάζουμε μετρήσεις της βροχόπτωσης για το μήνα Σεπτέμβριο δύο συναπτών ετών (2008 και 2009), δια να εξέλθουν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι χρησιμοποιήσαμε μέσες ημερήσιες τιμές και ότι οι μετρήσεις της βροχόπτωσης παρουσιάζονται σε μέτρα ανά δέκα λεπτά της ώρας. Παραδίδουμε αρχικά τα δεδομένα από τον υποσταθμό των Σερρών.

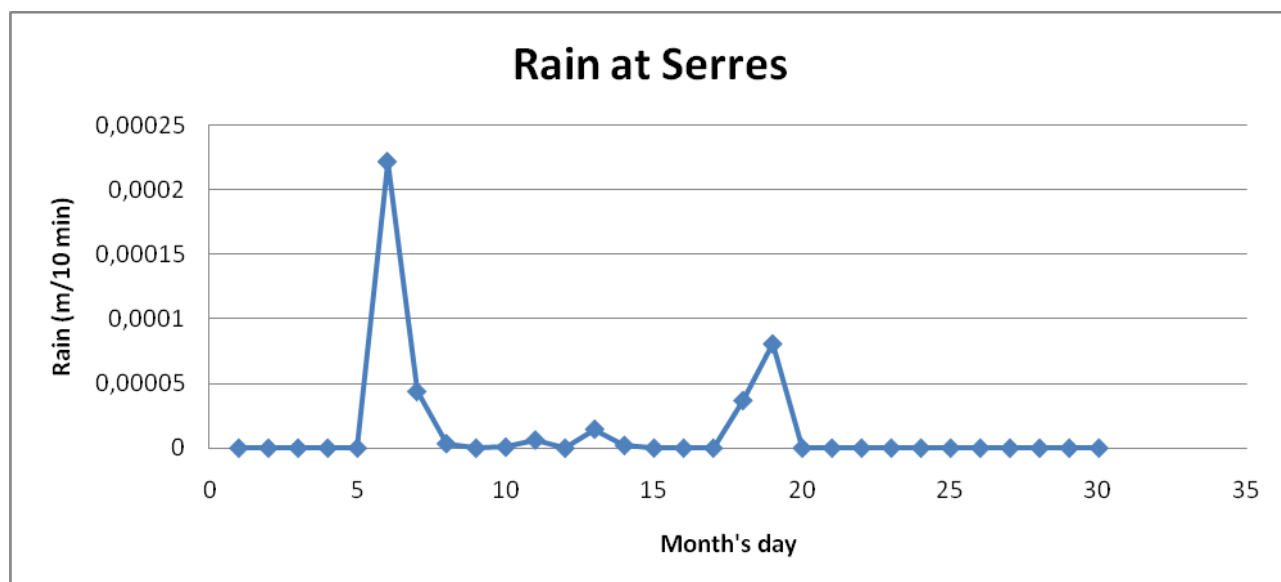
Σεπτέμβριος 2008

Date	AVG(rain) (m/10 min)	Month's day
30/9/2008 00:00	0	30
29/9/2008 00:00	0	29
28/9/2008 00:00	0	28
27/9/2008 00:00	4.17E-06	27
26/9/2008 00:00	2.92E-05	26
25/9/2008 00:00	5.94E-05	25
24/9/2008 00:00	1.67E-05	24
23/9/2008 00:00	2.15E-05	23
22/9/2008 00:00	0	22
21/9/2008 00:00	0	21
20/9/2008 00:00	0	20
19/9/2008 00:00	0	19
18/9/2008 00:00	0	18
17/9/2008 00:00	0	17
16/9/2008 00:00	0.000175694	16
15/9/2008 00:00	0.000323611	15
14/9/2008 00:00	3.96E-05	14
13/9/2008 00:00	0	13
12/9/2008 00:00	0	12
11/9/2008 00:00	0	11
10/9/2008 00:00	0	10
9/9/2008 00:00	0	9
8/9/2008 00:00	0	8
7/9/2008 00:00	0	7
6/9/2008 00:00	0	6
5/9/2008 00:00	0	5
4/9/2008 00:00	0	4
3/9/2008 00:00	0	3
2/9/2008 00:00	0	2
1/9/2008 00:00	0	1



Σεπτέμβριος 2009

Date	AVG(rain)(m/10')	Month's day
30/9/2009 00:00	0	30
29/9/2009 00:00	0	29
28/9/2009 00:00	0	28
27/9/2009 00:00	0	27
26/9/2009 00:00	0	26
25/9/2009 00:00	0	25
24/9/2009 00:00	0	24
23/9/2009 00:00	0	23
22/9/2009 00:00	0	22
21/9/2009 00:00	0	21
20/9/2009 00:00	0	20
19/9/2009 00:00	8.06E-05	19
18/9/2009 00:00	3.68E-05	18
17/9/2009 00:00	0	17
16/9/2009 00:00	0	16
15/9/2009 00:00	0	15
14/9/2009 00:00	2.08E-06	14
13/9/2009 00:00	1.46E-05	13
12/9/2009 00:00	0	12
11/9/2009 00:00	6.25E-06	11
10/9/2009 00:00	6.94E-07	10
9/9/2009 00:00	0	9
8/9/2009 00:00	3.47E-06	8
7/9/2009 00:00	4.38E-05	7
6/9/2009 00:00	0.000222	6
5/9/2009 00:00	0	5
4/9/2009 00:00	0	4
3/9/2009 00:00	0	3
2/9/2009 00:00	0	2
1/9/2009 00:00	0	1

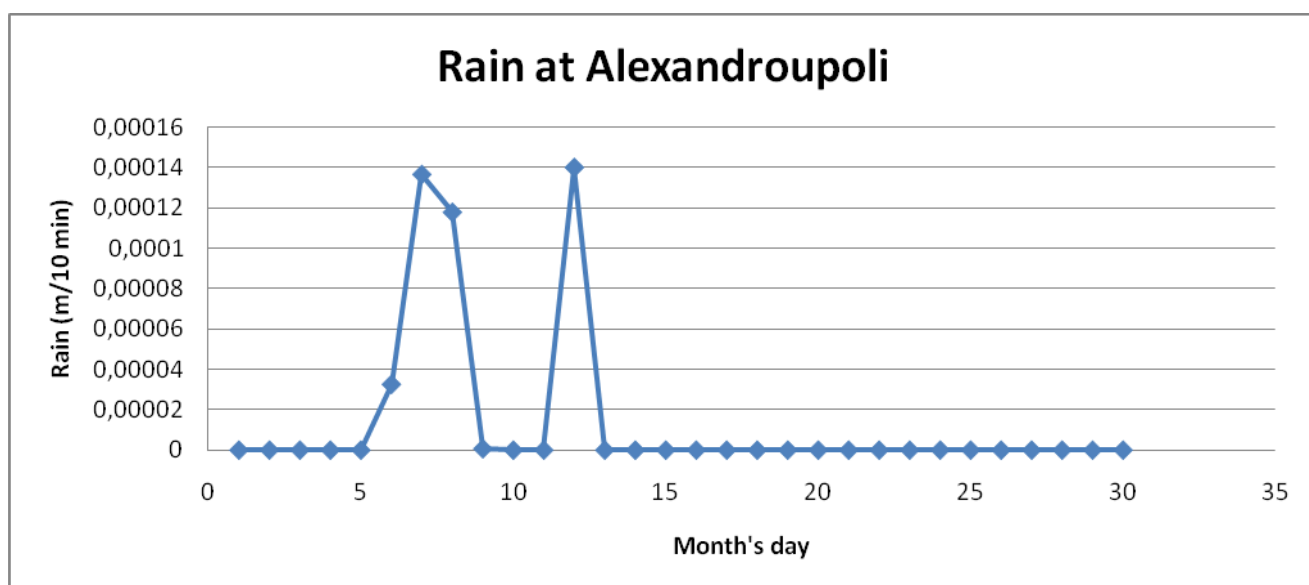


Όμοια, για τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης χρησιμοποιήσαμε δεδομένα που αντιστοιχούν στο

Σεπτέμβριο του 2009 και του 2010, καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις του δικτύου πριν τον Μάρτιο του 2009 για την βροχόπτωση. Παρουσιάζουμε πιο κάτω τα δεδομένα αυτά:

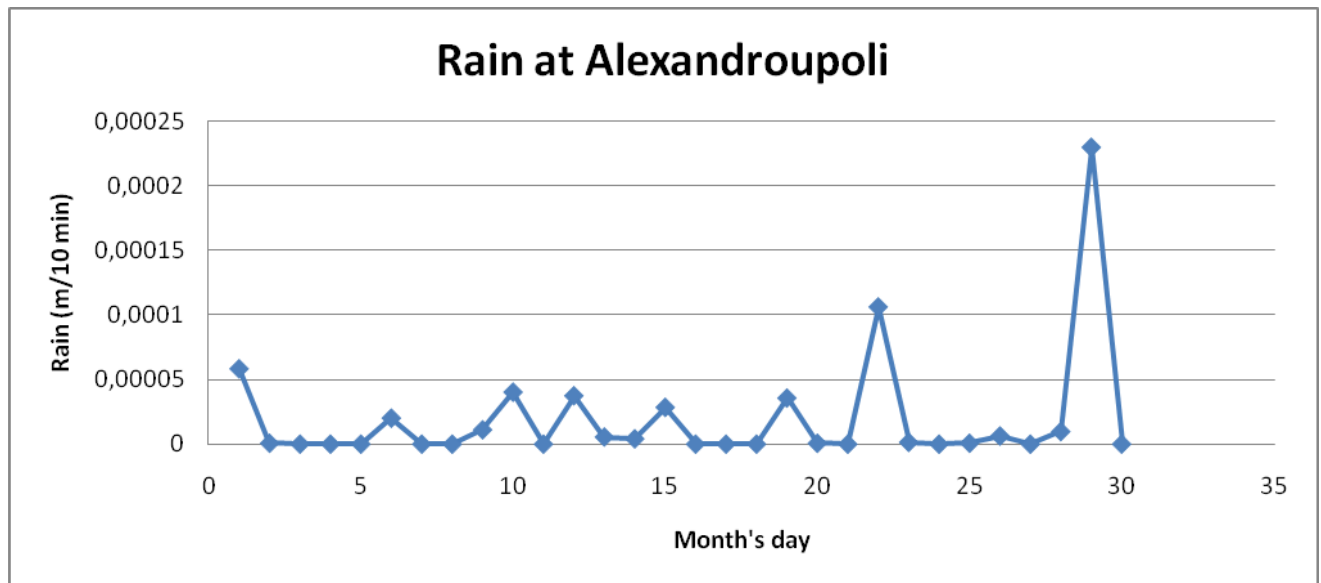
Σεπτέμβριος 2009

Date	AVG(rain) (m/10')	Month's day
30/9/2009 00:00	0	30
29/9/2009 00:00	0	29
28/9/2009 00:00	0	28
27/9/2009 00:00	0	27
26/9/2009 00:00	0	26
25/9/2009 00:00	0	25
24/9/2009 00:00	0	24
23/9/2009 00:00	0	23
22/9/2009 00:00	0	22
21/9/2009 00:00	0	21
20/9/2009 00:00	0	20
19/9/2009 00:00	0	19
18/9/2009 00:00	0	18
17/9/2009 00:00	0	17
16/9/2009 00:00	0	16
15/9/2009 00:00	0	15
14/9/2009 00:00	0	14
13/9/2009 00:00	0	13
12/9/2009 00:00	0.000140278	12
11/9/2009 00:00	0	11
10/9/2009 00:00	0	10
9/9/2009 00:00	6.99E-07	9
8/9/2009 00:00	0.000118056	8
7/9/2009 00:00	0.000136806	7
6/9/2009 00:00	3.26E-05	6
5/9/2009 00:00	0	5
4/9/2009 00:00	0	4
3/9/2009 00:00	0	3
2/9/2009 00:00	0	2
1/9/2009 00:00	0	1



Σεπτέμβριος 2010

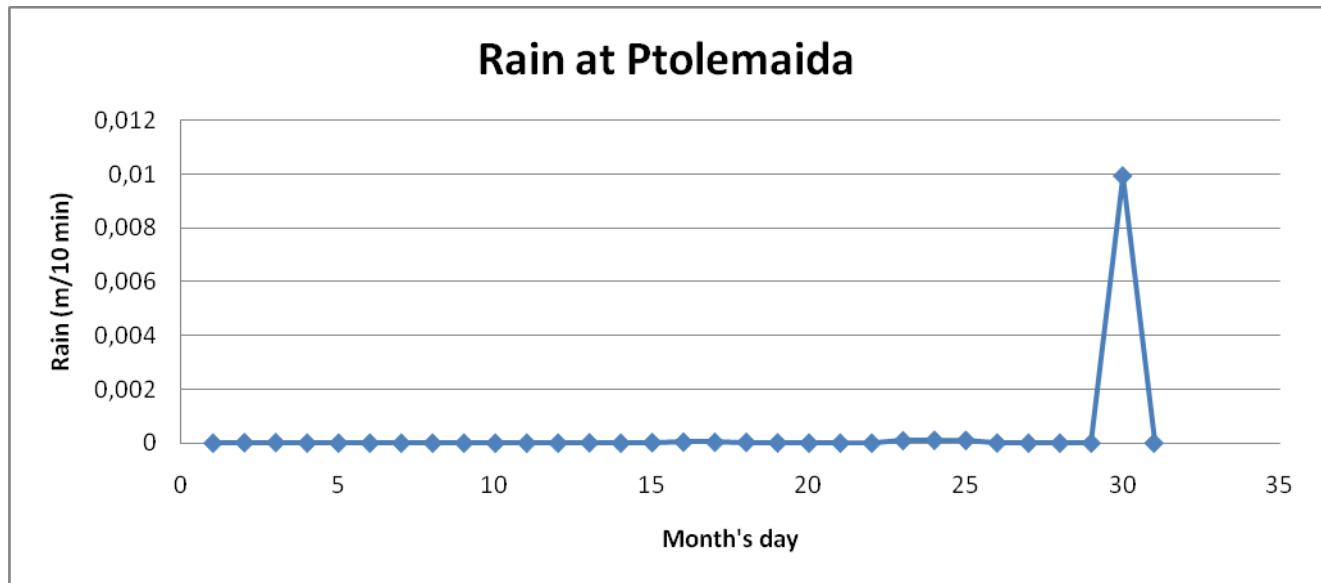
Date	AVG(rain) (m/10 min)	Month's day
30/9/2010 00:00	0	30
29/9/2010 00:00	0.000229861	29
28/9/2010 00:00	9.72E-06	28
27/9/2010 00:00	0	27
26/9/2010 00:00	6.29E-06	26
25/9/2010 00:00	6.94E-07	25
24/9/2010 00:00	0	24
23/9/2010 00:00	1.39E-06	23
22/9/2010 00:00	0.00010625	22
21/9/2010 00:00	0	21
20/9/2010 00:00	6.94E-07	20
19/9/2010 00:00	3.57E-05	19
18/9/2010 00:00	0	18
17/9/2010 00:00	0	17
16/9/2010 00:00	0	16
15/9/2010 00:00	2.85E-05	15
14/9/2010 00:00	4.17E-06	14
13/9/2010 00:00	5.56E-06	13
12/9/2010 00:00	3.75E-05	12
11/9/2010 00:00	0	11
10/9/2010 00:00	4.03E-05	10
9/9/2010 00:00	1.11E-05	9
8/9/2010 00:00	0	8
7/9/2010 00:00	0	7
6/9/2010 00:00	2.01E-05	6
5/9/2010 00:00	0	5
4/9/2010 00:00	0	4
3/9/2010 00:00	0	3
2/9/2010 00:00	6.99E-07	2
1/9/2010 00:00	5.83E-05	1



Τέλος, για τον σταθμό της Πτολεμαΐδας λάβαμε δεδομένα από το μήνα Οκτώβριο του 2009 και το Σεπτέμβριο του 2010, καθώς δεν υπήρχαν μετρήσεις για το διάστημα πριν τον Μάρτιο του 2009. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται κάτωθεν:

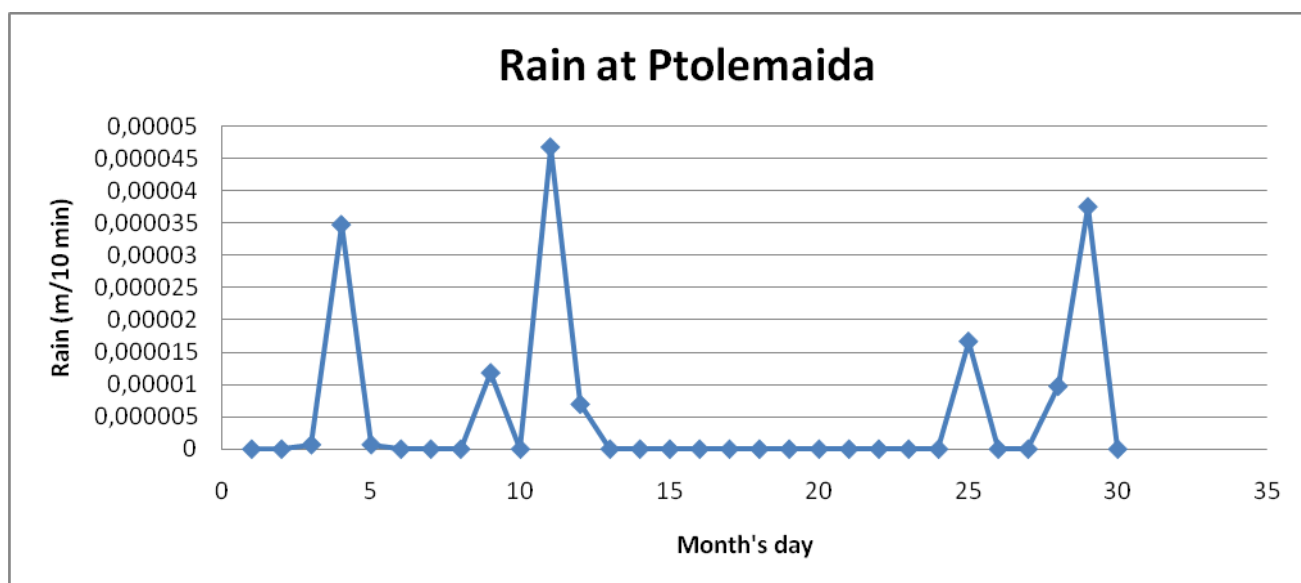
Οκτώβριος 2009

Date	AVG(rain)(m/10')	Month's day
31/10/2009 00:00	0	31
30/10/2009 00:00	0.00992	30
29/10/2009 00:00	0	29
28/10/2009 00:00	0	28
27/10/2009 00:00	0	27
26/10/2009 00:00	5.56E-06	26
25/10/2009 00:00	0.000100694	25
24/10/2009 00:00	0.000105556	24
23/10/2009 00:00	9.17E-05	23
22/10/2009 00:00	0	22
21/10/2009 00:00	0	21
20/10/2009 00:00	2.08E-06	20
19/10/2009 00:00	8.33E-06	19
18/10/2009 00:00	2.78E-05	18
17/10/2009 00:00	3.19E-05	17
16/10/2009 00:00	3.89E-05	16
15/10/2009 00:00	1.94E-05	15
14/10/2009 00:00	0	14
13/10/2009 00:00	1.11E-05	13
12/10/2009 00:00	0	12
11/10/2009 00:00	0	11
10/10/2009 00:00	0	10
9/10/2009 00:00	0	9
8/10/2009 00:00	0	8
7/10/2009 00:00	0	7
6/10/2009 00:00	0	6
5/10/2009 00:00	0	5
4/10/2009 00:00	1.39E-06	4
3/10/2009 00:00	2.08E-05	3
2/10/2009 00:00	1.74E-05	2
1/10/2009 00:00	0	1



Σεπτέμβριος 2010

Date	AVG(rain)	Month's day
30/9/2010 00:00	0	30
29/9/2010 00:00	3.75E-05	29
28/9/2010 00:00	9.72E-06	28
27/9/2010 00:00	0	27
26/9/2010 00:00	0	26
25/9/2010 00:00	1.67E-05	25
24/9/2010 00:00	0	24
23/9/2010 00:00	0	23
22/9/2010 00:00	0	22
21/9/2010 00:00	0	21
20/9/2010 00:00	0	20
19/9/2010 00:00	0	19
18/9/2010 00:00	0	18
17/9/2010 00:00	0	17
16/9/2010 00:00	0	16
15/9/2010 00:00	0	15
14/9/2010 00:00	0	14
13/9/2010 00:00	0	13
12/9/2010 00:00	6.94E-06	12
11/9/2010 00:00	4.67E-05	11
10/9/2010 00:00	0	10
9/9/2010 00:00	1.18E-05	9
8/9/2010 00:00	0	8
7/9/2010 00:00	0	7
6/9/2010 00:00	0	6
5/9/2010 00:00	6.94E-07	5
4/9/2010 00:00	3.47E-05	4
3/9/2010 00:00	6.94E-07	3
2/9/2010 00:00	0	2
1/9/2010 00:00	0	1

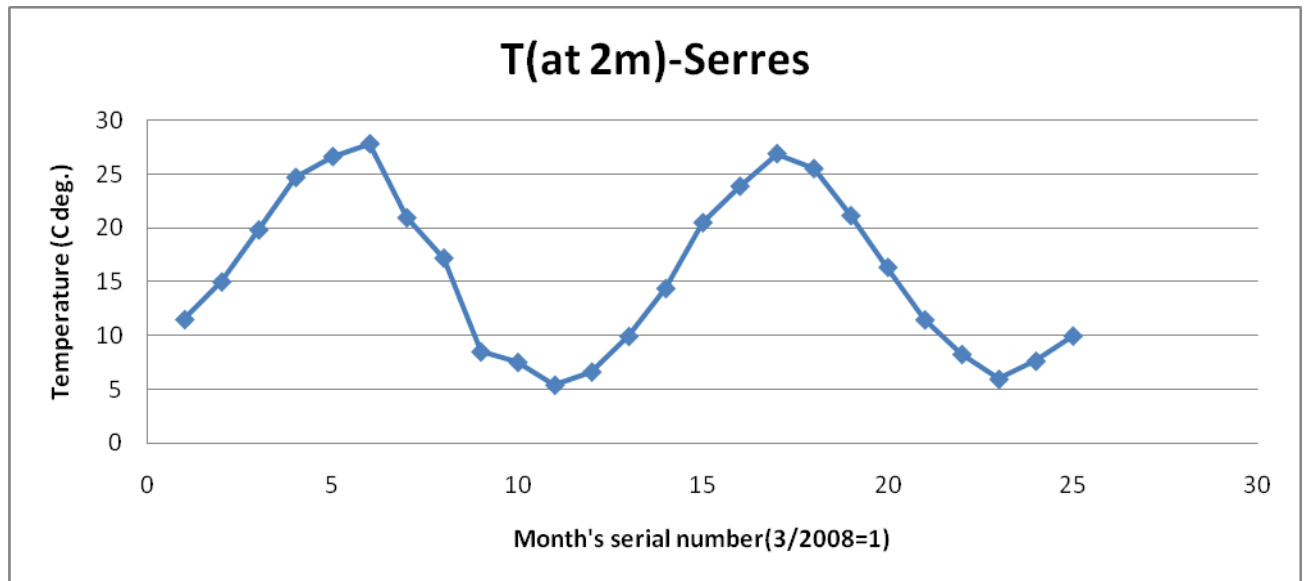


B) Θερμοκρασία σε υψόμετρο δύο μέτρων

Η δεύτερη παράμετρος του ελέγχου μας είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε υψόμετρο δύο μέτρων. Προκειμένου να εξάγουμε χρήσιμα αποτελέσματα, χρησιμοποιήσαμε δεδομένα χρονικού διαστήματος δύο ετών και μέσες μηνιαίες τιμές. Για τον υποσταθμό των Σερρών, θεωρήσαμε σαν αντιπροσωπευτικό το χρονικό διάστημα μεταξύ Μαρτίου του 2008 και Μαρτίου του 2010. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

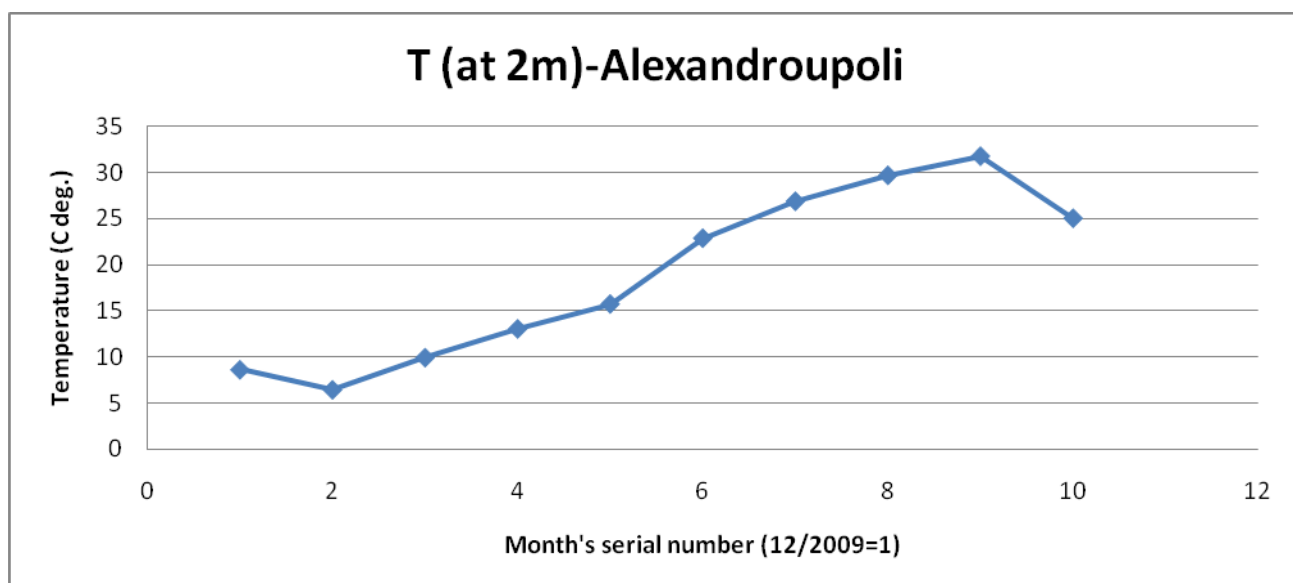
Date	AVG(temperature1) (C deg)	Month's s.n.
1/3/2010 00:00	9.972222222	25
1/2/2010 00:00	7.638848921	24
1/1/2010 00:00	5.966174094	23
1/12/2009 00:00	8.260043573	22
1/11/2009 00:00	11.46639629	21
1/10/2009 00:00	16.34128873	20
1/9/2009 00:00	21.13656786	19
1/8/2009 00:00	25.50993536	18
1/7/2009 00:00	26.88969003	17
1/6/2009 00:00	23.86667439	16
1/5/2009 00:00	20.49144073	15
1/4/2009 00:00	14.37837775	14
1/3/2009 00:00	9.937177574	13
1/2/2009 00:00	6.638261738	12
1/1/2009 00:00	5.422154746	11

1/12/2008 00:00	7.521025176	10
1/11/2008 00:00	8.504522792	9
1/10/2008 00:00	17.19556856	8
1/9/2008 00:00	20.94441354	7
1/8/2008 00:00	27.80616592	6
1/7/2008 00:00	26.62537548	5
1/6/2008 00:00	24.68115438	4
1/5/2008 00:00	19.8125731	3
1/4/2008 00:00	14.98733796	2
1/3/2008 00:00	11.4977138	1



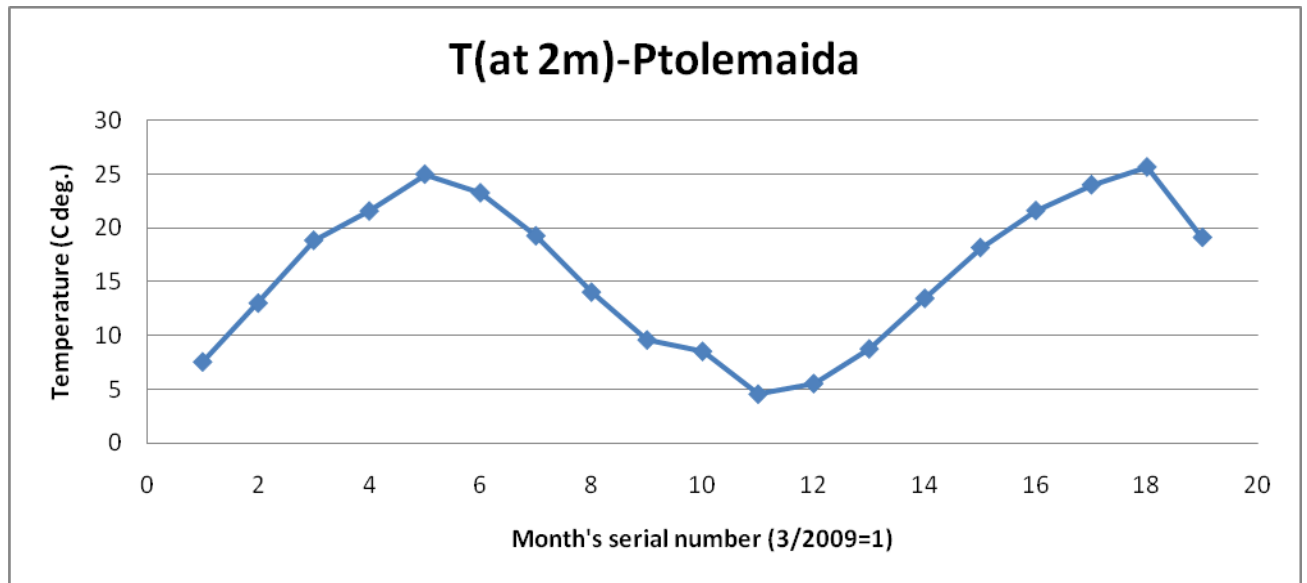
Όσον αφορά στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης, επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα μετρήσεων: Δεκέμβριος 2009 έως Σεπτέμβριος 2010, καθώς δεν υπήρχαν προγενέστερες μετρήσεις του συστήματος για την παράμετρο αυτή στο συγκεκριμένο υποσταθμό. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Date	AVG(temperature1) (C deg.)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	25.0033372	10
1/8/2010 00:00	31.70464022	9
1/7/2010 00:00	29.6432287	8
1/6/2010 00:00	26.83834185	7
1/5/2010 00:00	22.84402064	6
1/4/2010 00:00	15.73635731	5
1/3/2010 00:00	13.04700471	4
1/2/2010 00:00	9.939431002	3
1/1/2010 00:00	6.463063488	2
1/12/2009 00:00	8.621817343	1



Αναφορικά με τον σταθμό της Πτολεμαΐδας, το επιλεγόμενο χρονικό διάστημα ελέγχου, είναι : Μάρτιος 2009-Σεπτέμβριος 2010 (μας ενδιαφέρει κύρια η λειτουργία του συστήματος μετά την αναβάθμιση της βάσης δεδομένων του). Τα δεδομένα παρουσιάζονται παρακάτω:

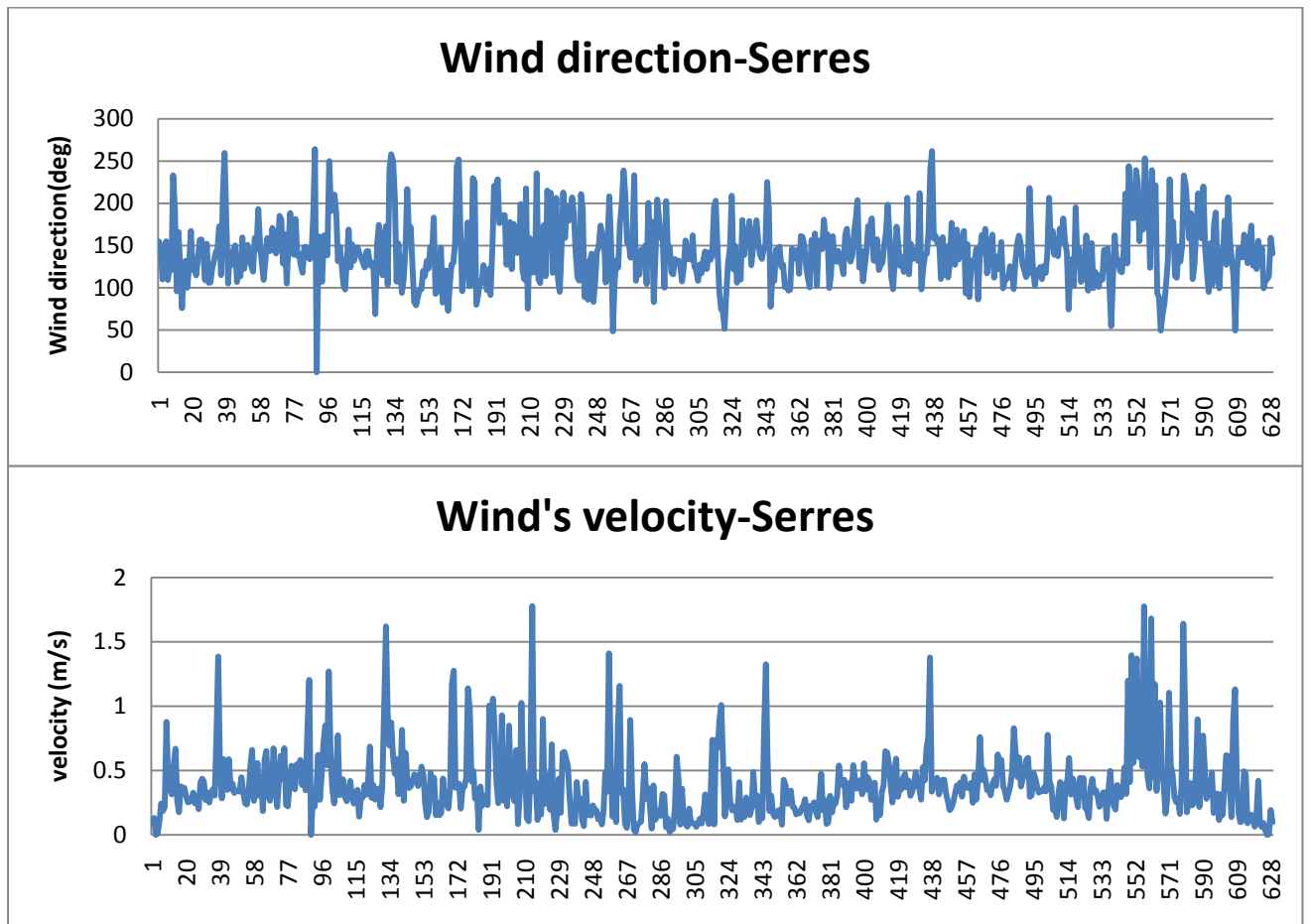
Date	Temperature1)(C deg.)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	19.108115	19
1/8/2010 00:00	25.61743894	18
1/7/2010 00:00	23.9773454	17
1/6/2010 00:00	21.57984827	16
1/5/2010 00:00	18.16151434	15
1/4/2010 00:00	13.45176139	14
1/3/2010 00:00	8.774456644	13
1/2/2010 00:00	5.562152778	12
1/1/2010 00:00	4.580802028	11
1/12/2009 00:00	8.544535147	10
1/11/2009 00:00	9.597801435	9
1/10/2009 00:00	14.02698768	8
1/9/2009 00:00	19.25025463	7
1/8/2009 00:00	23.22702824	6
1/7/2009 00:00	24.95293193	5
1/6/2009 00:00	21.54553571	4
1/5/2009 00:00	18.82557149	3
1/4/2009 00:00	13.01655476	2
1/3/2009 00:00	7.568831572	1



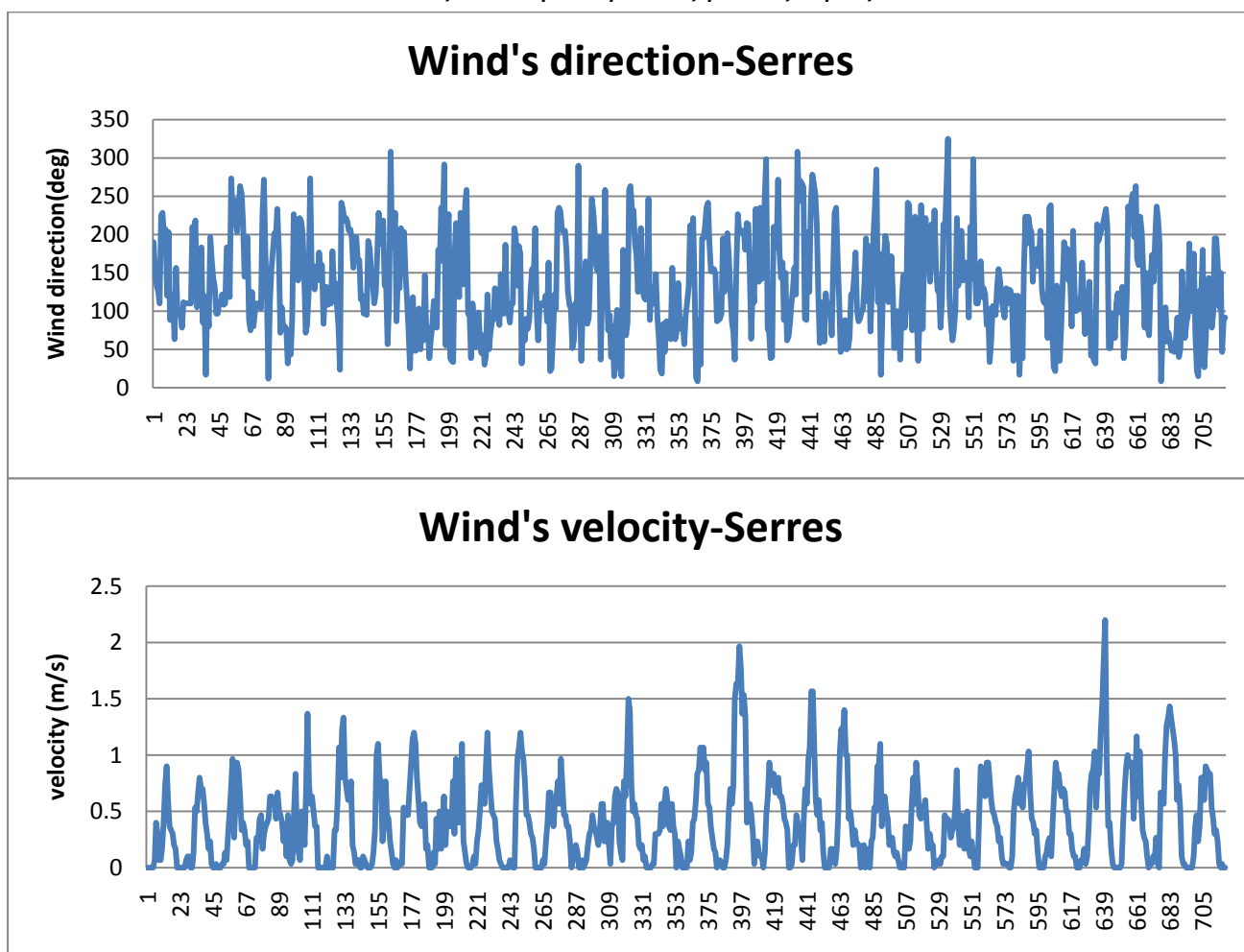
Γ) Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου

Η τρίτη και ίσως πιο σημαντική παράμετρος των μετεωρολογικών δεδομένων που εξετάσαμε είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος άλλωστε είναι απαραίτητο να έχουμε πληροφόρηση για την κατεύθυνση του ανέμου, για να μπορούμε να προβλέψουμε την κατεύθυνση του ραδιενεργού νέφους. Μελετήσαμε τα δεδομένα του υποσταθμού των Σερρών, για το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2009-Οκτώβριος 2010, με χρήση μέσων ημερήσιων τιμών. Επίσης παραθέτουμε τα δεδομένα της επεξεργασίας μας, για το μήνα Ιούνιο του 2009 με χρήση ωριαίων μέσων όρων.

Ιανουάριος 2009 έως σήμερα



Ιούνιος 2009 με ωριαίες μέσες τιμές

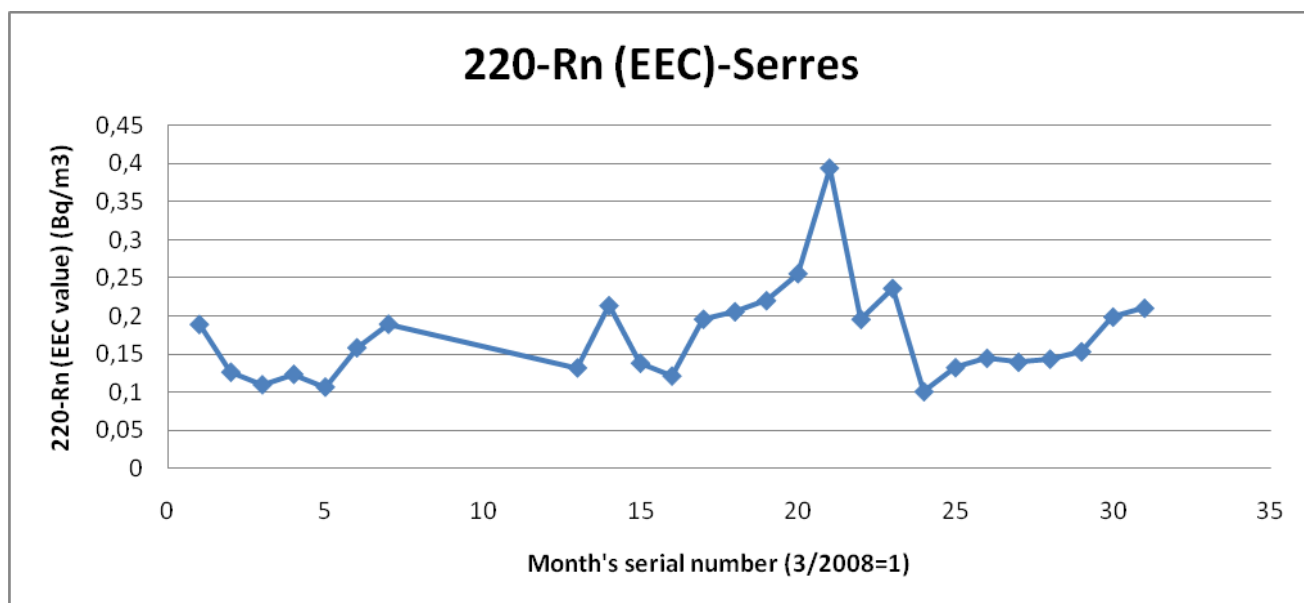


1.3 Ραδόνιο

Το τηλεμετρικό δίκτυο έχει τη δυνατότητα μέτρησης δύο ισωτόπων του Ραδονίου, του ^{220}Rn και του ^{222}Rn . Η παράμετρος που μετράται και εξετάσαμε, είναι το εξωτερικό ισοζύγιο ισοδύναμης συγκέντρωσης του Ραδονίου (**E**quilibrium **E**quivalent **C**oncentration).

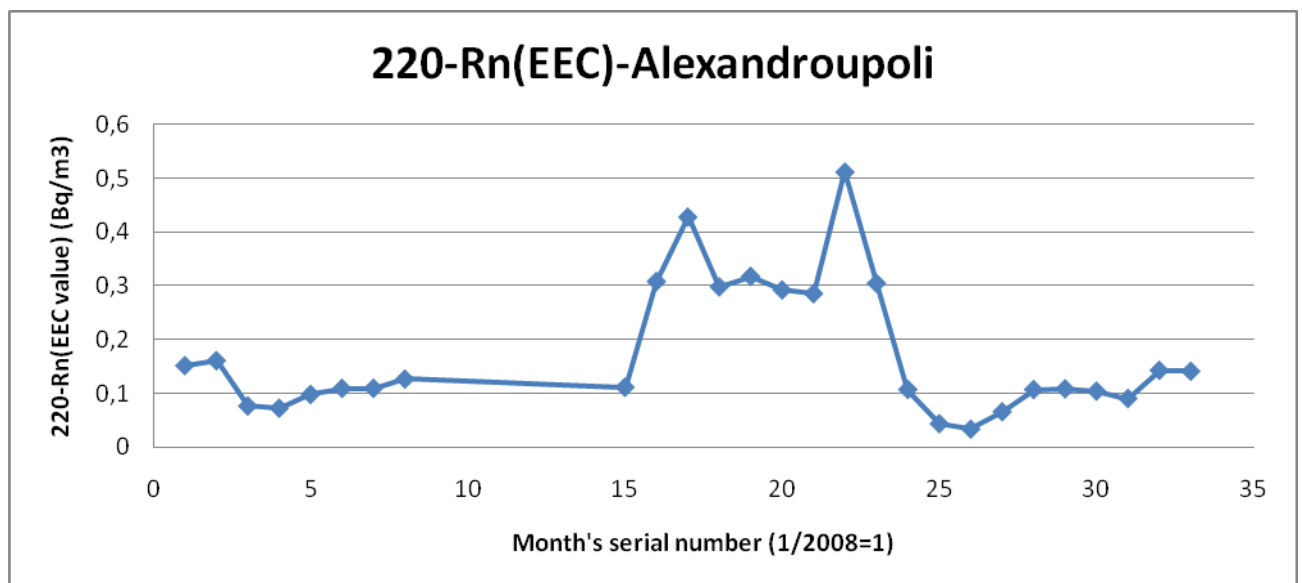
Αρχικά μελετήσαμε τα επίπεδα του ^{220}Rn και για τον υποσταθμό των Σερρών, κρίθηκε αντιπροσωπευτικό για τη λειτουργία του συστήματος το διάστημα Μάρτιος 2008-Σεπτέμβριος 2010, με χρήση μέσων μηνιαίων τιμών για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία ακολουθούν.

Date	Radon-220_EEC(Bq/m3)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.210399188	31
1/8/2010 00:00	0.198827105	30
1/7/2010 00:00	0.153345837	29
1/6/2010 00:00	0.143614826	28
1/5/2010 00:00	0.139529772	27
1/4/2010 00:00	0.144729327	26
1/3/2010 00:00	0.132382902	25
1/2/2010 00:00	0.10089732	24
1/1/2010 00:00	0.236483728	23
1/12/2009 00:00	0.195759621	22
1/11/2009 00:00	0.394397362	21
1/10/2009 00:00	0.255745524	20
1/9/2009 00:00	0.220387864	19
1/8/2009 00:00	0.205847212	18
1/7/2009 00:00	0.19597033	17
1/6/2009 00:00	0.121461732	16
1/5/2009 00:00	0.138221423	15
1/4/2009 00:00	0.213781157	14
1/3/2009 00:00	0.13212628	13
1/9/2008 00:00	0.189515464	7
1/8/2008 00:00	0.15849569	6
1/7/2008 00:00	0.106907875	5
1/6/2008 00:00	0.123726724	4
1/5/2008 00:00	0.109991492	3
1/4/2008 00:00	0.126508545	2
1/3/2008 00:00	0.189204808	1



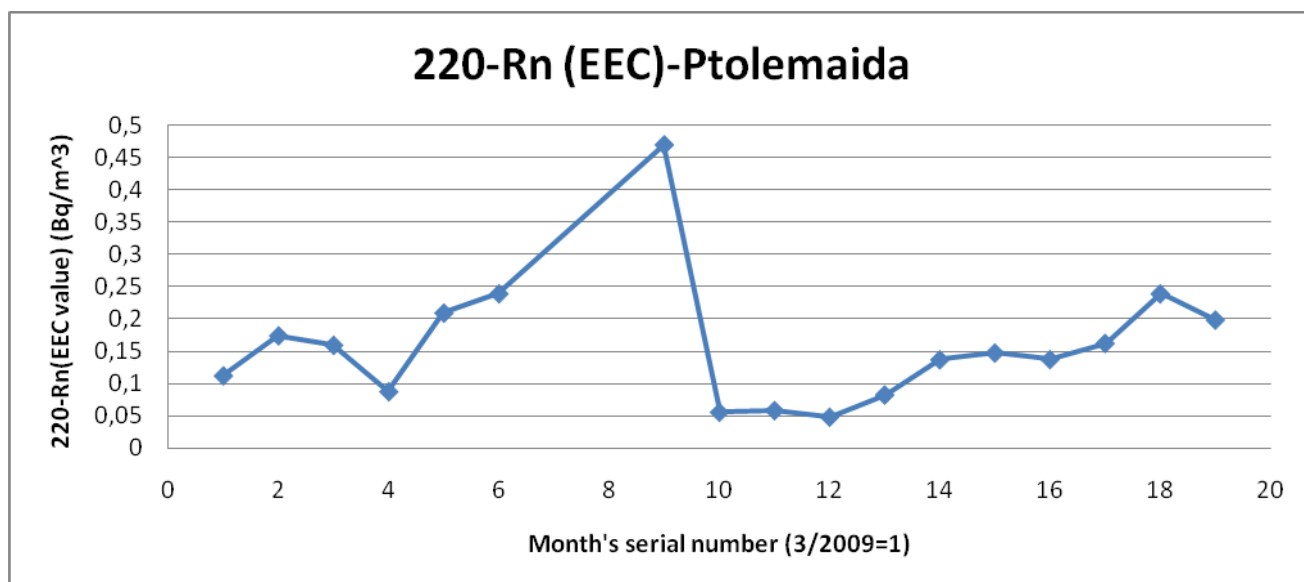
Ακολουθώντας την ίδια τακτική για τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης και για το χρονικό διάστημα 1/1/2008-30/9/2010, κάνοντας χρήση μέσων μηνιαίων τιμών, εξήγαμε τα εξής αποτελέσματα:

Date	AVG(Radon-220_EEC) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.140849831	33
1/8/2010 00:00	0.142608013	32
1/7/2010 00:00	0.09011689	31
1/6/2010 00:00	0.103939716	30
1/5/2010 00:00	0.108198503	29
1/4/2010 00:00	0.106750914	28
1/3/2010 00:00	0.065356122	27
1/2/2010 00:00	0.032989914	26
1/1/2010 00:00	0.043212361	25
1/12/2009 00:00	0.106905641	24
1/11/2009 00:00	0.304885041	23
1/10/2009 00:00	0.511817627	22
1/9/2009 00:00	0.285454707	21
1/8/2009 00:00	0.292427136	20
1/7/2009 00:00	0.317702082	19
1/6/2009 00:00	0.298118907	18
1/5/2009 00:00	0.428131313	17
1/4/2009 00:00	0.308081413	16
1/3/2009 00:00	0.111225802	15
1/8/2008 00:00	0.126235294	8
1/7/2008 00:00	0.109052003	7
1/6/2008 00:00	0.108976513	6
1/5/2008 00:00	0.097647129	5
1/4/2008 00:00	0.072009472	4
1/3/2008 00:00	0.076158512	3
1/2/2008 00:00	0.160606245	2
1/1/2008 00:00	0.151511538	1



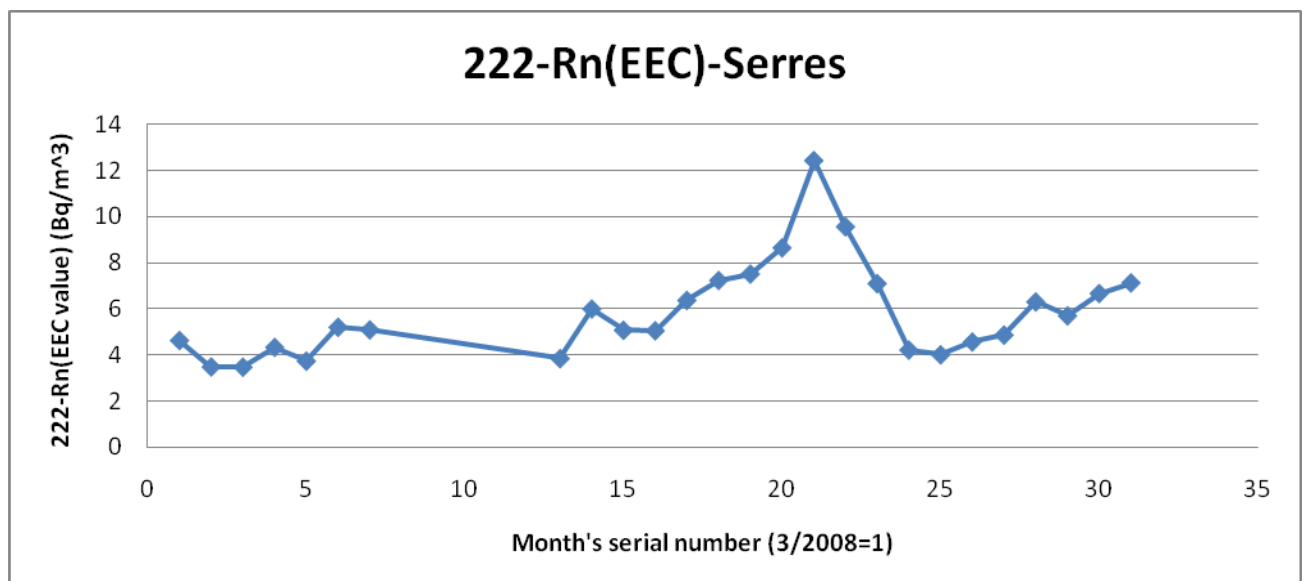
Για τον υποσταθμό της Πτολεμαΐδας, ορίζοντας σαν αντιπροσωπευτικό, το χρονικό διάστημα Μάρτιος 2009-Σεπτέμβριος 2010 (είναι άλλωστε και το μόνο διάστημα καταγραφής μετρήσεων), παρήγαμε τα εξής:

Date	AVG(Radon-220_eec) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.198675305	19
1/8/2010 00:00	0.239170755	18
1/7/2010 00:00	0.162586789	17
1/6/2010 00:00	0.137595909	16
1/5/2010 00:00	0.147733086	15
1/4/2010 00:00	0.137269102	14
1/3/2010 00:00	0.082849479	13
1/2/2010 00:00	0.048586238	12
1/1/2010 00:00	0.058689281	11
1/12/2009 00:00	0.056132062	10
1/11/2009 00:00	0.469497309	9
1/8/2009 00:00	0.239300283	6
1/7/2009 00:00	0.20939823	5
1/6/2009 00:00	0.087792776	4
1/5/2009 00:00	0.15961235	3
1/4/2009 00:00	0.174389485	2
1/3/2009 00:00	0.112489624	1



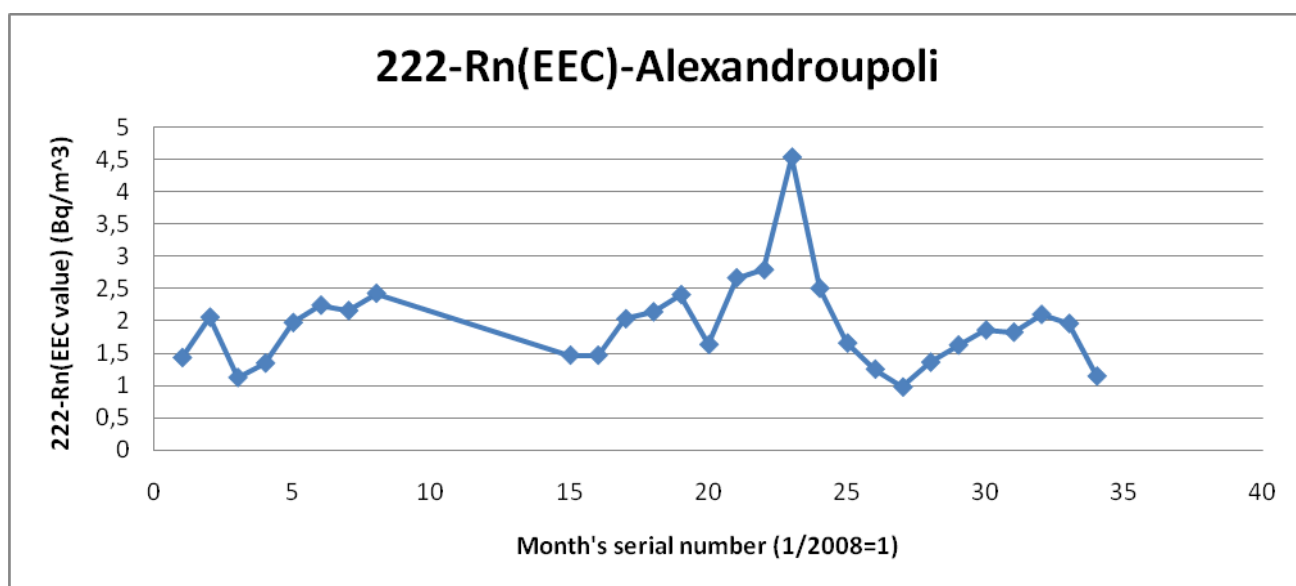
Ακολούθως ελέγχθηκε το επίπεδο του ισότοπου ²²²Rn της ατμόσφαιρας, για τους τρεις σταθμούς του δικτύου. Μελετώντας τα δεδομένα του υποσταθμού των Σερρών, υποθέσαμε σαν διάστημα μελέτης το: 1/3/2008 έως 30/9/2010 (με τις όποιες ελλείψεις στις μετρήσεις, που όπως έχουμε αναφέρει, οφείλονται σε τεκμηριωμένα κακή λειτουργία του συστήματος ή στην ολοκληρωτική παύση του) και χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία μέσες μηνιαίες τιμές. Έχουμε:

Date	AVG(222-Radon_eec) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	7.127604428	31
1/8/2010 00:00	6.670127389	30
1/7/2010 00:00	5.704533221	29
1/6/2010 00:00	6.302178233	28
1/5/2010 00:00	4.870545325	27
1/4/2010 00:00	4.572668639	26
1/3/2010 00:00	4.017041963	25
1/2/2010 00:00	4.224254702	24
1/1/2010 00:00	7.095804506	23
1/12/2009 00:00	9.554535861	22
1/11/2009 00:00	12.41762684	21
1/10/2009 00:00	8.644852196	20
1/9/2009 00:00	7.510831255	19
1/8/2009 00:00	7.231627196	18
1/7/2009 00:00	6.369637363	17
1/6/2009 00:00	5.057224278	16
1/5/2009 00:00	5.076462976	15
1/4/2009 00:00	5.99985905	14
1/3/2009 00:00	3.850455063	13
1/9/2008 00:00	5.093814433	7
1/8/2008 00:00	5.210323276	6
1/7/2008 00:00	3.741292719	5
1/6/2008 00:00	4.338954741	4
1/5/2008 00:00	3.47961788	3
1/4/2008 00:00	3.490122066	2
1/3/2008 00:00	4.634326923	1



Αντίστοιχα για τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης, σαν χρονικό διάστημα ορίστηκε το εξής: Ιανουάριος 2008 έως Σεπτέμβριος 2010, με μηνιαίες μέσες τιμές. Τα δεδομένα αυτά παραθέτουμε παρακάτω:

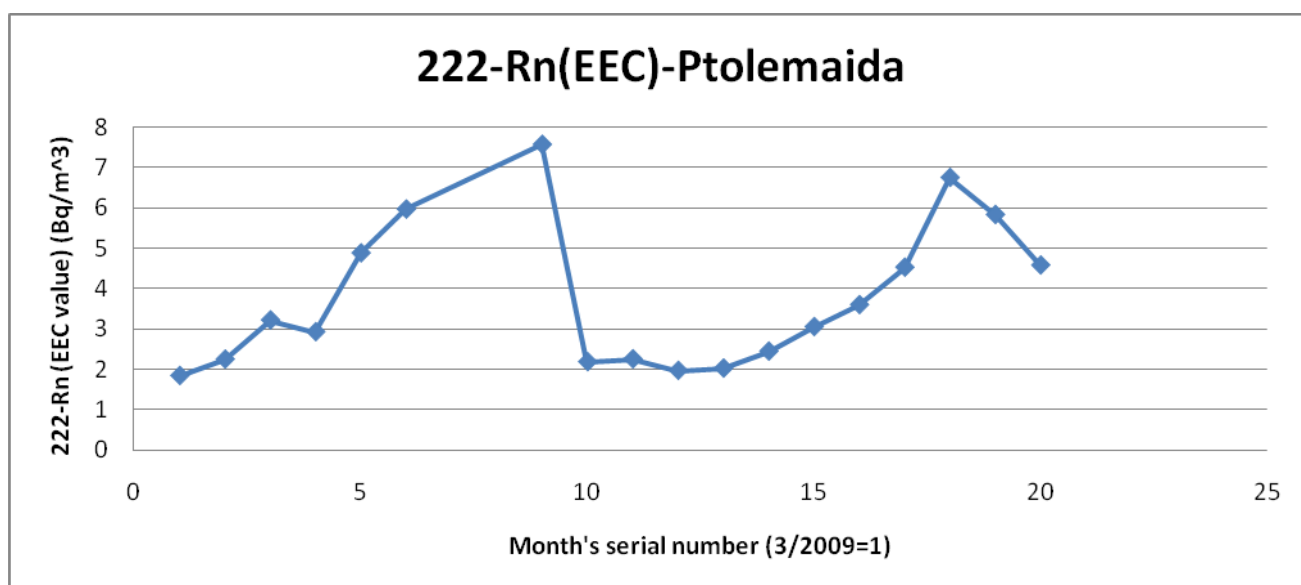
Date	AVG(222-Radon_eec) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	1.142970674	34
1/9/2010 00:00	1.95917168	33
1/8/2010 00:00	2.099200849	32
1/7/2010 00:00	1.824135286	31
1/6/2010 00:00	1.856967249	30
1/5/2010 00:00	1.623625802	29
1/4/2010 00:00	1.358342356	28
1/3/2010 00:00	0.972840253	27
1/2/2010 00:00	1.250434633	26
1/1/2010 00:00	1.655269908	25
1/12/2009 00:00	2.502792585	24
1/11/2009 00:00	4.535568902	23
1/10/2009 00:00	2.791963351	22
1/9/2009 00:00	2.665293073	21
1/8/2009 00:00	1.632555635	20
1/7/2009 00:00	2.405017947	19
1/6/2009 00:00	2.139423929	18
1/5/2009 00:00	2.031911977	17
1/4/2009 00:00	1.465791091	16
1/3/2009 00:00	1.467058824	15
1/8/2008 00:00	2.426392157	8
1/7/2008 00:00	2.15845397	7
1/6/2008 00:00	2.241796499	6
1/5/2008 00:00	1.973018207	5
1/4/2008 00:00	1.344410701	4
1/3/2008 00:00	1.120606581	3
1/2/2008 00:00	2.0558492	2
1/1/2008 00:00	1.429615385	1



Έπειτα, ελέγξαμε την ίδια παράμετρο για τον υποσταθμό της Πτολεμαΐδας. Το χρονικό διάστημα που το σύστημα παρέχει αξιόλογες μετρήσεις για το επίπεδο του ²²²Rn της ατμόσφαιρας, σε αυτόν το σταθμό του συστήματος, είναι από τον Μάρτιο του 2009 έως σήμερα. Κάναμε χρήση μέσω

μηνιαίων τιμών των δεδομένων και τα παρουσιάζουμε
ακολουθώς:

Date	AVG(222-Radon_eec) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	4.575363636	20
1/9/2010 00:00	5.829557678	19
1/8/2010 00:00	6.74841582	18
1/7/2010 00:00	4.522462705	17
1/6/2010 00:00	3.593434848	16
1/5/2010 00:00	3.048573128	15
1/4/2010 00:00	2.439585099	14
1/3/2010 00:00	2.017534884	13
1/2/2010 00:00	1.962275701	12
1/1/2010 00:00	2.247371811	11
1/12/2009 00:00	2.177877104	10
1/11/2009 00:00	7.56867713	9
1/8/2009 00:00	5.962917847	6
1/7/2009 00:00	4.878154235	5
1/6/2009 00:00	2.921749049	4
1/5/2009 00:00	3.212238422	3
1/4/2009 00:00	2.240481928	2
1/3/2009 00:00	1.83491353	1



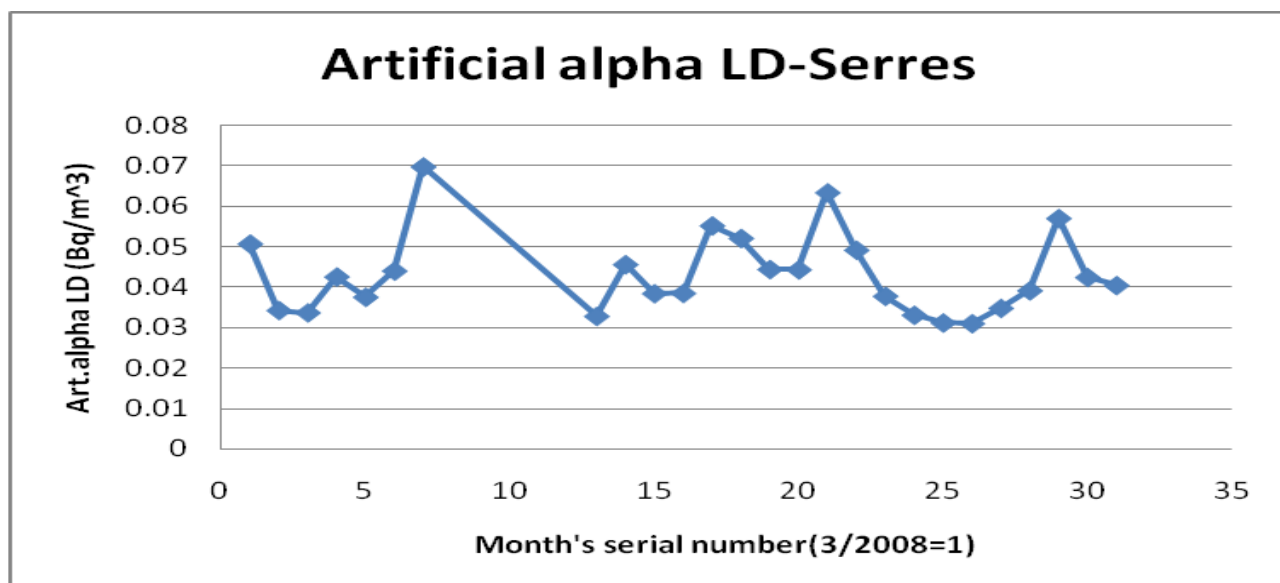
1.4 Ακτινοβολία άλφα και βήτα

Η επόμενη παράμετρος εξέτασης του ποιοτικού ελέγχου που διενεργήσαμε, είναι το όριο ανίχνευσης (Limit of Detection) τεχνητής ακτινοβολίας άλφα και βήτα. Η διαδικασία ξεκίνησε με τη μελέτη της τεχνητής άλφα ακτινοβολίας από τα δεδομένα του υποσταθμού των Σερρών, για το χρονικό

διάστημα Μάρτιος 2008 έως Σεπτέμβριος 2010 (δεν υπάρχουν άλλες καταγεγραμμένες μετρήσεις), με χρήση μέσων μηνιαίων τιμών, ως συνήθως.

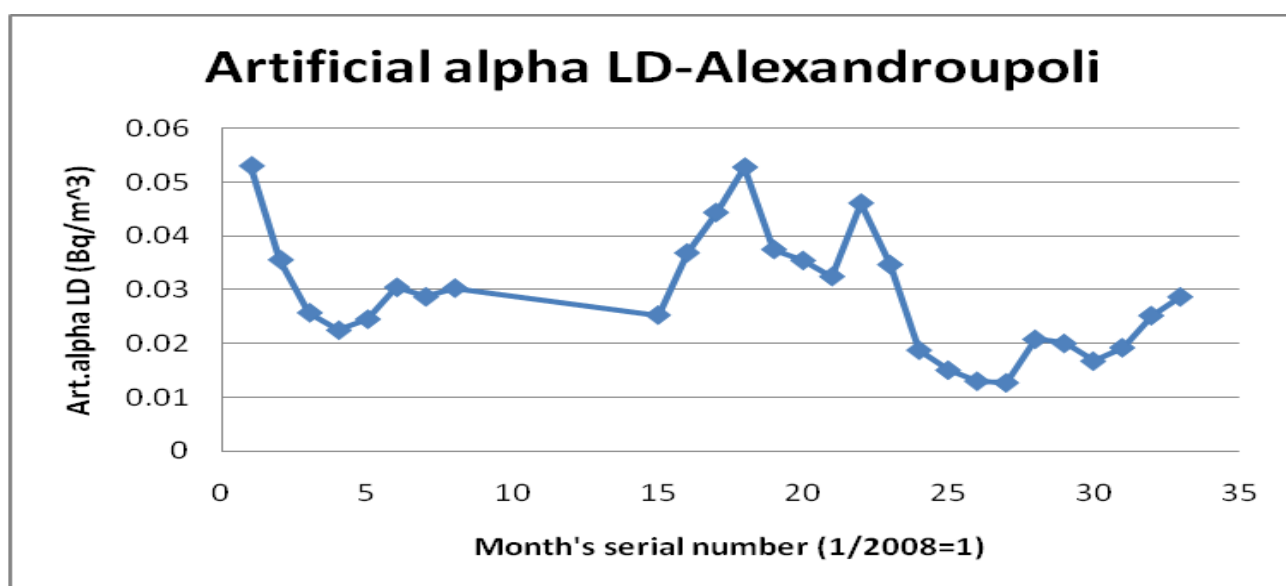
Παραθέτουμε τους αντίστοιχους πίνακες δεδομένων και το παραγόμενο διάγραμμα.

Date	AVG(art_alpha_ld)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.040509845	31
1/8/2010 00:00	0.042511881	30
1/7/2010 00:00	0.057102527	29
1/6/2010 00:00	0.039229689	28
1/5/2010 00:00	0.034868516	27
1/4/2010 00:00	0.031082003	26
1/3/2010 00:00	0.031256862	25
1/2/2010 00:00	0.03316407	24
1/1/2010 00:00	0.037851089	23
1/12/2009 00:00	0.049251383	22
1/11/2009 00:00	0.063469575	21
1/10/2009 00:00	0.04439117	20
1/9/2009 00:00	0.044481095	19
1/8/2009 00:00	0.052174658	18
1/7/2009 00:00	0.055267838	17
1/6/2009 00:00	0.038560693	16
1/5/2009 00:00	0.038502289	15
1/4/2009 00:00	0.045667136	14
1/3/2009 00:00	0.032883107	13
1/9/2008 00:00	0.069858586	7
1/8/2008 00:00	0.044098712	6
1/7/2008 00:00	0.037608767	5
1/6/2008 00:00	0.042641658	4
1/5/2008 00:00	0.033758429	3
1/4/2008 00:00	0.03434	2
1/3/2008 00:00	0.050785581	1



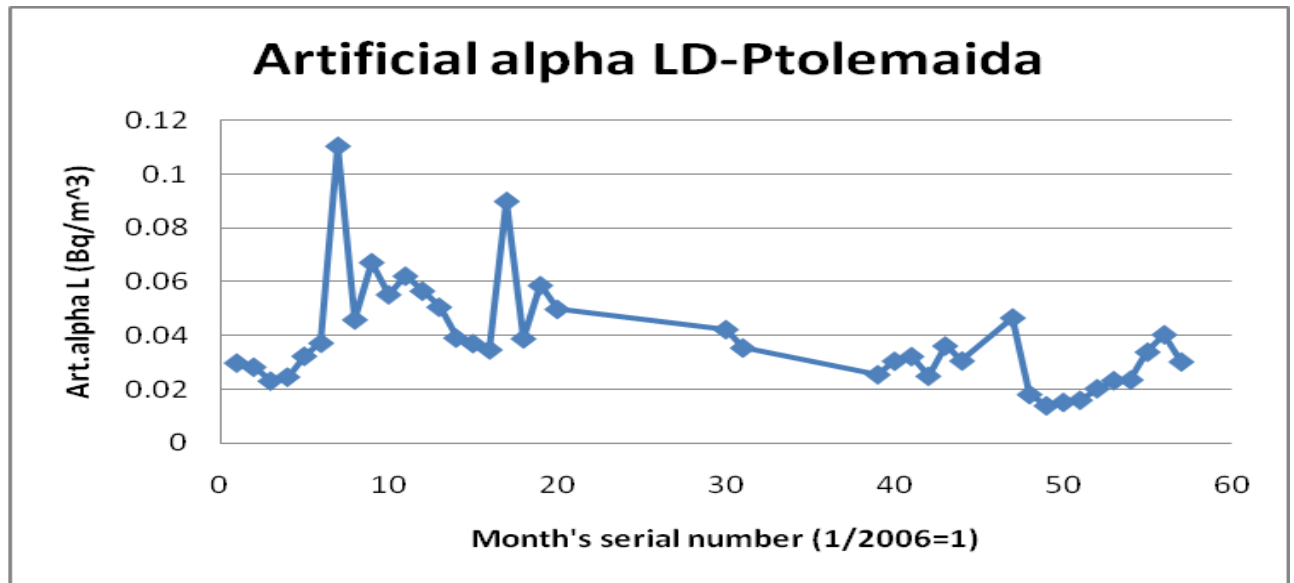
Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία για τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης και λαμβάνοντας σαν αντιπροσωπευτικό χρονικό διάστημα το Ιανουάριο 2008-Σεπτέμβριος 2010, με μηνιαίους μέσους όρους, εξήχθησαν τα εξής:

Date	AVG(art_alpha_ld)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.028602382	33
1/8/2010 00:00	0.025121001	32
1/7/2010 00:00	0.019157144	31
1/6/2010 00:00	0.016654663	30
1/5/2010 00:00	0.019953905	29
1/4/2010 00:00	0.020715004	28
1/3/2010 00:00	0.012626696	27
1/2/2010 00:00	0.012931855	26
1/1/2010 00:00	0.014977928	25
1/12/2009 00:00	0.018686653	24
1/11/2009 00:00	0.034599191	23
1/10/2009 00:00	0.046027003	22
1/9/2009 00:00	0.032391918	21
1/8/2009 00:00	0.035376112	20
1/7/2009 00:00	0.037419095	19
1/6/2009 00:00	0.052701478	18
1/5/2009 00:00	0.044287554	17
1/4/2009 00:00	0.036779831	16
1/3/2009 00:00	0.0252247	15
1/8/2008 00:00	0.030235294	8
1/7/2008 00:00	0.028613324	7
1/6/2008 00:00	0.030385339	6
1/5/2008 00:00	0.024453221	5
1/4/2008 00:00	0.0224047	4
1/3/2008 00:00	0.02565515	3
1/2/2008 00:00	0.035481721	2
1/1/2008 00:00	0.052942308	1



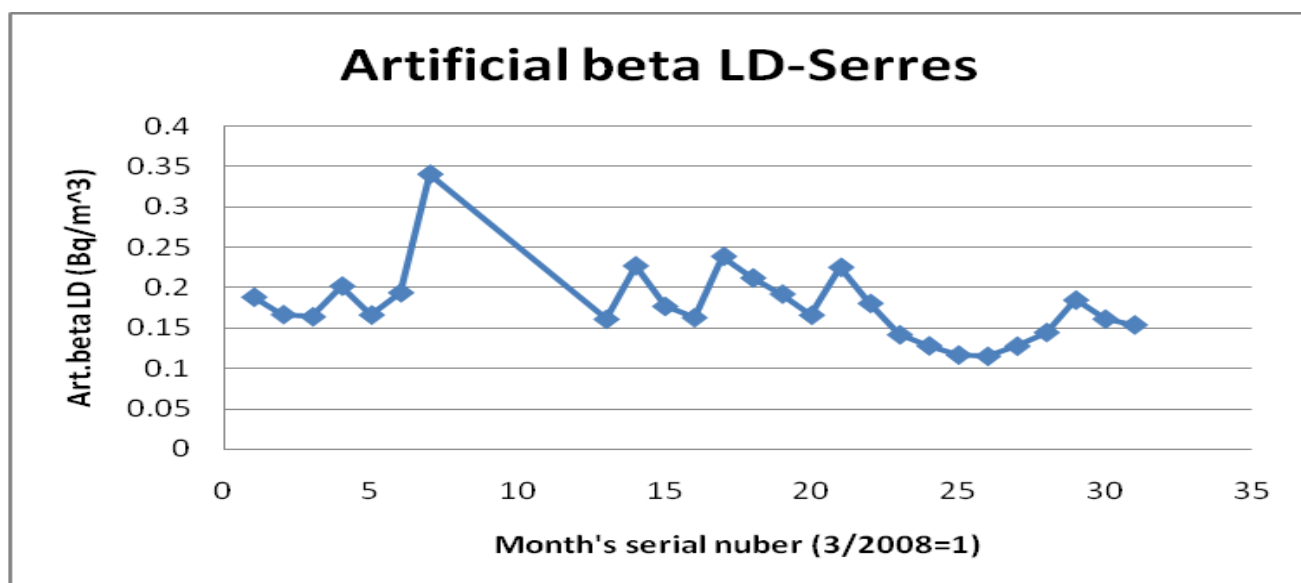
Ύστερα, από τα δεδομένα που προέκυψαν από το σταθμό της Πτολεμαΐδας, με βάση το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2006- Σεπτέμβριος 2010 (με πολλές ελλείψεις παρ' όλα αυτά) και χρήση μέσων μηναίων τιμών, εξάγαμε τα κάτωθι:

Date	AVG(art_alpha_Id)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.030398423	57
1/8/2010 00:00	0.040498074	56
1/7/2010 00:00	0.034031255	55
1/6/2010 00:00	0.023655067	54
1/5/2010 00:00	0.023405498	53
1/4/2010 00:00	0.020433311	52
1/3/2010 00:00	0.016135625	51
1/2/2010 00:00	0.015310081	50
1/1/2010 00:00	0.014094373	49
1/12/2009 00:00	0.018217839	48
1/11/2009 00:00	0.046723991	47
1/8/2009 00:00	0.030746369	44
1/7/2009 00:00	0.036310971	43
1/6/2009 00:00	0.025078137	42
1/5/2009 00:00	0.032381641	41
1/4/2009 00:00	0.030629258	40
1/3/2009 00:00	0.025634542	39
1/7/2008 00:00	0.035546724	31
1/6/2008 00:00	0.042415531	30
1/8/2007 00:00	0.049926064	20
1/7/2007 00:00	0.058787879	19
1/6/2007 00:00	0.038976834	18
1/5/2007 00:00	0.090079208	17
1/4/2007 00:00	0.034854275	16
1/3/2007 00:00	0.037211013	15
1/2/2007 00:00	0.039263652	14
1/1/2007 00:00	0.050735578	13
1/12/2006 00:00	0.05674036	12
1/11/2006 00:00	0.062260645	11
1/10/2006 00:00	0.055389768	10
1/9/2006 00:00	0.067327054	9
1/8/2006 00:00	0.046009909	8
1/7/2006 00:00	0.110586468	7
1/6/2006 00:00	0.037353641	6
1/5/2006 00:00	0.032490823	5
1/4/2006 00:00	0.024738941	4
1/3/2006 00:00	0.023272931	3
1/2/2006 00:00	0.028434351	2
1/1/2006 00:00	0.029983757	1



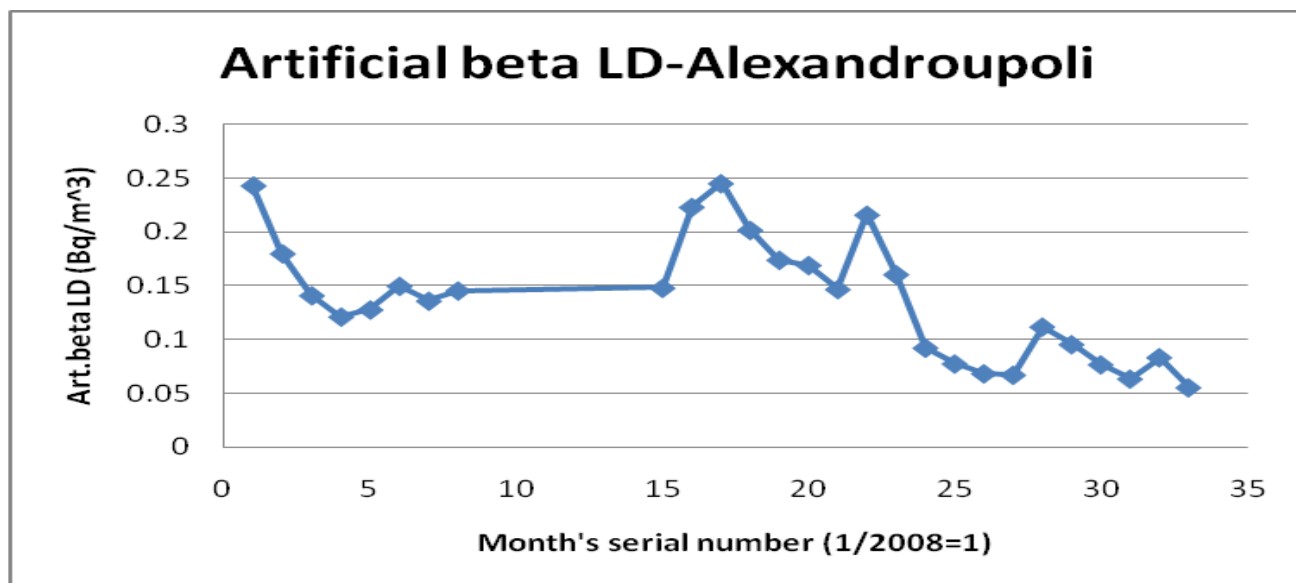
Εντελώς ανάλογη είναι και η διαδικασία που ακολουθείται για την τεχνητή βήτα ακτινοβολία. Αρχικά επεξεργαστήκαμε δεδομένα από τον σταθμό των Σερρών, για το διάστημα Μάρτιος 2008-Σεπτέμβριος 2010 και με χρήση μηνιαίων μέσων όρων βγάλαμε τα εξής αποτελέσματα:

Date	AVG(art_beta_ld)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.154184451	31
1/8/2010 00:00	0.161413013	30
1/7/2010 00:00	0.184904888	29
1/6/2010 00:00	0.144836447	28
1/5/2010 00:00	0.127907796	27
1/4/2010 00:00	0.115364154	26
1/3/2010 00:00	0.116990212	25
1/2/2010 00:00	0.128380188	24
1/1/2010 00:00	0.141993972	23
1/12/2009 00:00	0.180750307	22
1/11/2009 00:00	0.225363728	21
1/10/2009 00:00	0.166289899	20
1/9/2009 00:00	0.192298259	19
1/8/2009 00:00	0.212200913	18
1/7/2009 00:00	0.238909989	17
1/6/2009 00:00	0.16314233	16
1/5/2009 00:00	0.177108727	15
1/4/2009 00:00	0.22730638	14
1/3/2009 00:00	0.161201814	13
1/9/2008 00:00	0.340474747	7
1/8/2008 00:00	0.194042918	6
1/7/2008 00:00	0.166421991	5
1/6/2008 00:00	0.202198062	4
1/5/2008 00:00	0.164279539	3
1/4/2008 00:00	0.166975587	2
1/3/2008 00:00	0.188590698	1



Στη συνέχεια, ασχοληθήκαμε με την τεχνητή βήτα ακτινοβολία με δεδομένα από το σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Σαν αντιπροσωπευτικό χρονικό διάστημα, θεωρήσαμε το Ιανουάριος 2008-Σεπτέμβριος 2010 για ακόμη μία φορά και χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές, καταλήξαμε στα εξής:

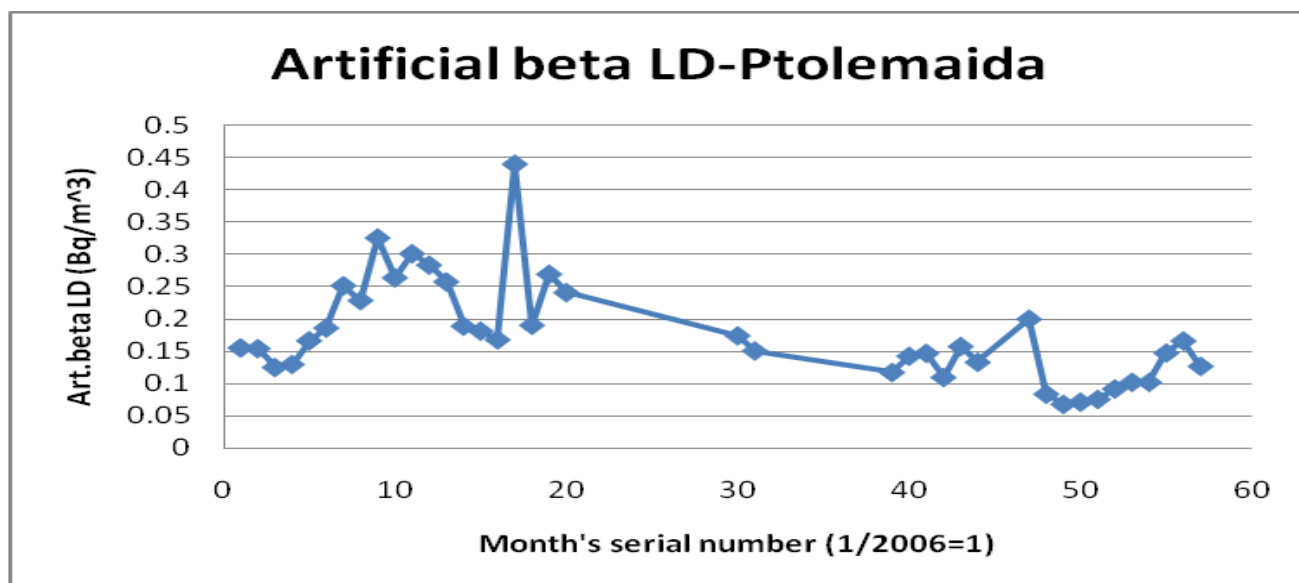
Date	AVG(art_beta_ld)(Bq/m³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.055419139	33
1/8/2010 00:00	0.083409903	32
1/7/2010 00:00	0.063547798	31
1/6/2010 00:00	0.07681323	30
1/5/2010 00:00	0.095536607	29
1/4/2010 00:00	0.111965222	28
1/3/2010 00:00	0.067146543	27
1/2/2010 00:00	0.068488128	26
1/1/2010 00:00	0.077562241	25
1/12/2009 00:00	0.092320441	24
1/11/2009 00:00	0.160559235	23
1/10/2009 00:00	0.21603223	22
1/9/2009 00:00	0.146812611	21
1/8/2009 00:00	0.169175753	20
1/7/2009 00:00	0.174043073	19
1/6/2009 00:00	0.20179803	18
1/5/2009 00:00	0.245259712	17
1/4/2009 00:00	0.223226994	16
1/3/2009 00:00	0.148010681	15
1/8/2008 00:00	0.145470588	8
1/7/2008 00:00	0.136030154	7
1/6/2008 00:00	0.14978337	6
1/5/2008 00:00	0.127887255	5
1/4/2008 00:00	0.121259581	4
1/3/2008 00:00	0.141022175	3
1/2/2008 00:00	0.180009139	2
1/1/2008 00:00	0.243192308	1



Τα δεδομένα από το σταθμό της Πτολεμαΐδας, αξιοποιήθηκαν με τις γνωστές μεθόδους, όπου θεωρήσαμε αντιπροσωπευτικό σαν δείγμα μετρήσεων αυτό που πάρθηκε κατά το διάστημα Ιανουάριος 2006 έως Σεπτέμβριος 2010(με αρκετές είναι η αλήθεια, ελλείψεις, λόγω τεκμηριωμένα κακής λειτουργίας του συστήματος). Χρησιμοποιώντας μέσους μηνιαίους όρους, εξήγαμε τα εξής:

Date	AVG(art_beta_ld)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.126479017	57
1/8/2010 00:00	0.165835192	56
1/7/2010 00:00	0.14713212	55
1/6/2010 00:00	0.101664678	54
1/5/2010 00:00	0.101695561	53
1/4/2010 00:00	0.091435427	52
1/3/2010 00:00	0.075109093	51
1/2/2010 00:00	0.070793843	50
1/1/2010 00:00	0.067556412	49
1/12/2009 00:00	0.083229792	48
1/11/2009 00:00	0.199553812	47
1/8/2009 00:00	0.13272905	44
1/7/2009 00:00	0.15715889	43
1/6/2009 00:00	0.109176806	42
1/5/2009 00:00	0.146579526	41
1/4/2009 00:00	0.142167576	40
1/3/2009 00:00	0.116731219	39
1/7/2008 00:00	0.150262108	31
1/6/2008 00:00	0.173865293	30
1/8/2007 00:00	0.240776596	20
1/7/2007 00:00	0.269272727	19
1/6/2007 00:00	0.190046332	18
1/5/2007 00:00	0.439980198	17
1/4/2007 00:00	0.167591359	16

1/3/2007 00:00	0.181041298	15
1/2/2007 00:00	0.188828014	14
1/1/2007 00:00	0.257502275	13
1/12/2006 00:00	0.283447482	12
1/11/2006 00:00	0.301143928	11
1/10/2006 00:00	0.263721519	10
1/9/2006 00:00	0.325628257	9
1/8/2006 00:00	0.228457317	8
1/7/2006 00:00	0.251590413	7
1/6/2006 00:00	0.185879552	6
1/5/2006 00:00	0.166002185	5
1/4/2006 00:00	0.1293314	4
1/3/2006 00:00	0.124784712	3
1/2/2006 00:00	0.15391471	2
1/1/2006 00:00	0.155098684	1

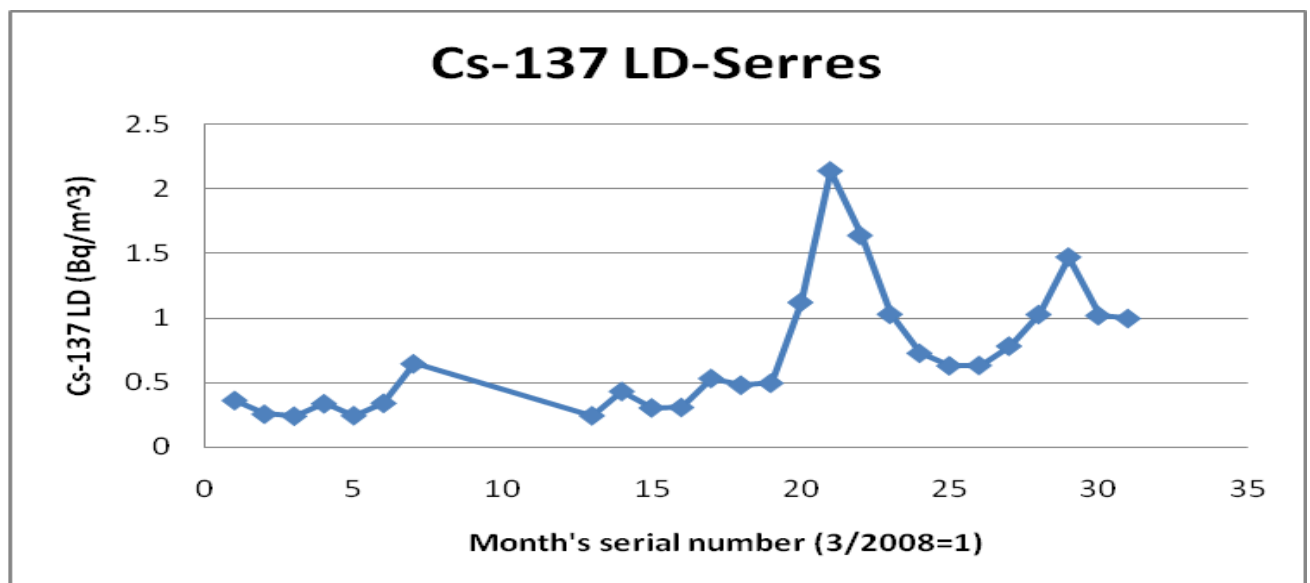


1.5 ¹³⁷Cs (LD)

Ο ανιχνευτής σπινθηρισμών NaI(Tl) που είναι εφοδιασμένος με το φίλτρο του αεροζόλ, δηλαδή το πρώτο φίλτρο που συναντά ο εισερχόμενος, στην καμπίνα του σταθμού, αέρας, καταγράφει τα επίπεδα του ισότοπου ¹³⁷Cs. Η παράμετρος που ανιχνεύεται όταν δεν υπάρχει οποιοδήποτε είδος τεχνητής ακτινοβολίας (κάτι που είναι προφανώς το επιθυμητό), είναι το όριο ανίχνευσης (**Limit of Detection**) LD. Ξεκινήσαμε τη διαδικασία επεξεργασίας για τον υποσταθμό των Σερρών, θεωρώντας αντιπροσωπευτικό των μετρήσεων, το διάστημα Μάρτιος 2008-Σεπτέμβριος 2010 και κάνοντας χρήση μέσων μηνιαίων τιμών.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου ακολουθούν:

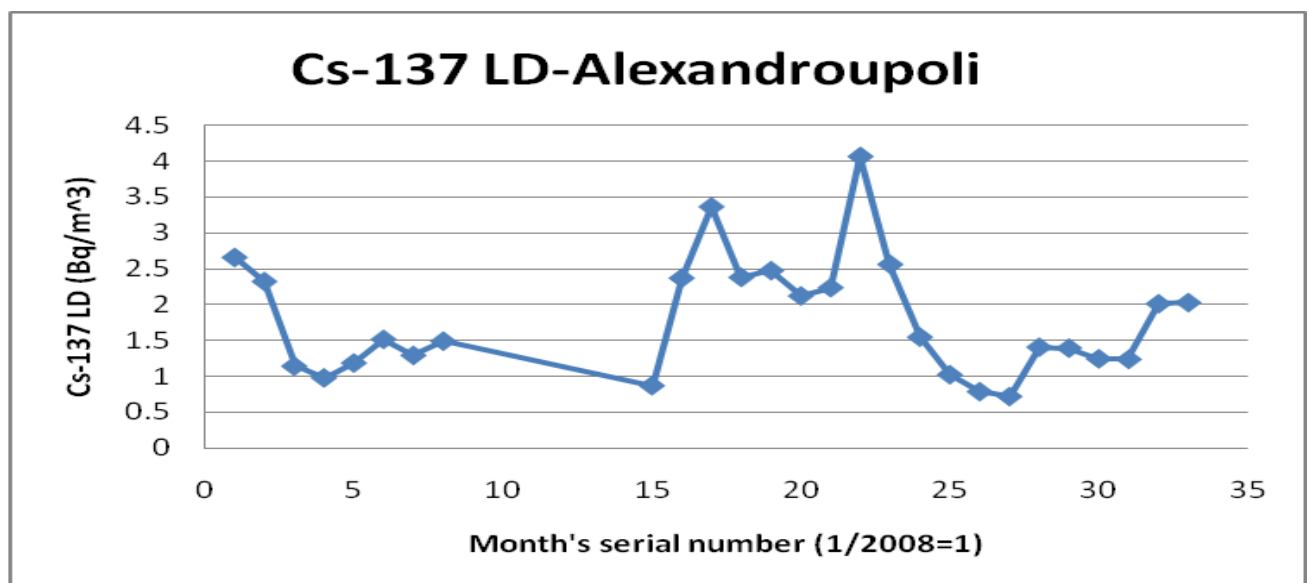
Date	AVG(Cs-137_Id)	Month's s.n
1/9/2010 00:00	0.998644363	31
1/8/2010 00:00	1.02135785	30
1/7/2010 00:00	1.474653107	29
1/6/2010 00:00	1.029719243	28
1/5/2010 00:00	0.784622896	27
1/4/2010 00:00	0.635242203	26
1/3/2010 00:00	0.632744099	25
1/2/2010 00:00	0.729301953	24
1/1/2010 00:00	1.031471169	23
1/12/2009 00:00	1.64191291	22
1/11/2009 00:00	2.142302707	21
1/10/2009 00:00	1.123084007	20
1/9/2009 00:00	0.497844942	19
1/8/2009 00:00	0.482907915	18
1/7/2009 00:00	0.534599341	17
1/6/2009 00:00	0.309688053	16
1/5/2009 00:00	0.306485694	15
1/4/2009 00:00	0.433980712	14
1/3/2009 00:00	0.245556689	13
1/9/2008 00:00	0.647878788	7
1/8/2008 00:00	0.342429185	6
1/7/2008 00:00	0.246086181	5
1/6/2008 00:00	0.338482239	4
1/5/2008 00:00	0.24209438	3
1/4/2008 00:00	0.257214085	2
1/3/2008 00:00	0.363893023	1



Η ανωτέρω διαδικασία ακολουθήθηκε κατά τα γνωστά και για τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης. Λάβαμε σαν χρονικό διάστημα ελέγχου της παραμέτρου το Ιανουάριος 2008-

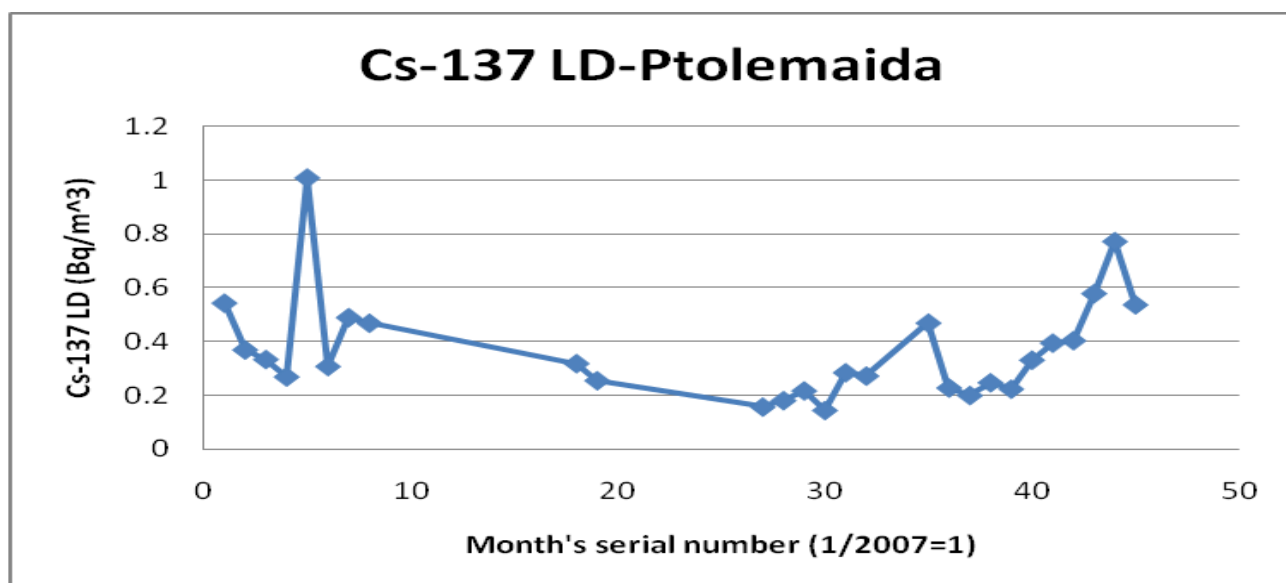
Σεπτέμβριος 2010 και χρησιμοποιήσαμε στην επεξεργασία μέσες μηνιαίες τιμές. Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα αποτελέσματα:

Date	AVG(Cs-137_Id)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	2.031045194	33
1/8/2010 00:00	2.01510421	32
1/7/2010 00:00	1.241727471	31
1/6/2010 00:00	1.249661839	30
1/5/2010 00:00	1.396814723	29
1/4/2010 00:00	1.410596937	28
1/3/2010 00:00	0.72417688	27
1/2/2010 00:00	0.792671763	26
1/1/2010 00:00	1.029068288	25
1/12/2009 00:00	1.550072144	24
1/11/2009 00:00	2.560847682	23
1/10/2009 00:00	4.061097561	22
1/9/2009 00:00	2.237415631	21
1/8/2009 00:00	2.123766141	20
1/7/2009 00:00	2.474587222	19
1/6/2009 00:00	2.381062632	18
1/5/2009 00:00	3.361834532	17
1/4/2009 00:00	2.370897239	16
1/3/2009 00:00	0.875597015	15
1/8/2008 00:00	1.49427451	8
1/7/2008 00:00	1.296767181	7
1/6/2008 00:00	1.519412108	6
1/5/2008 00:00	1.191295518	5
1/4/2008 00:00	0.98384671	4
1/3/2008 00:00	1.147470672	3
1/2/2008 00:00	2.323313024	2
1/1/2008 00:00	2.658846154	1



Έπειτα ασχοληθήκαμε με τα δεδομένα του σταθμού της Πτολεμαΐδας. Ορίσαμε σαν δειγματοληπτικά ικανοποιητικό, το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2007 έως Σεπτέμβριος 2010 και ως συνήθως, επεξεργαστήκαμε μέσες μηνιαίες τιμές. Ακολουθεί η επεξεργασία:

Date	AVG(Cs-137_Id)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.535761042	45
1/8/2010 00:00	0.771583201	44
1/7/2010 00:00	0.577619824	43
1/6/2010 00:00	0.402299626	42
1/5/2010 00:00	0.393326453	41
1/4/2010 00:00	0.329755361	40
1/3/2010 00:00	0.221652121	39
1/2/2010 00:00	0.245446297	38
1/1/2010 00:00	0.197875193	37
1/12/2009 00:00	0.225873815	36
1/11/2009 00:00	0.467656951	35
1/8/2009 00:00	0.270553073	32
1/7/2009 00:00	0.282749054	31
1/6/2009 00:00	0.142162357	30
1/5/2009 00:00	0.215201354	29
1/4/2009 00:00	0.178494105	28
1/3/2009 00:00	0.154856697	27
1/7/2008 00:00	0.253108262	19
1/6/2008 00:00	0.316679873	18
1/8/2007 00:00	0.467292553	8
1/7/2007 00:00	0.488151515	7
1/6/2007 00:00	0.305988417	6
1/5/2007 00:00	1.008316832	5
1/4/2007 00:00	0.267354635	4
1/3/2007 00:00	0.332056047	3
1/2/2007 00:00	0.367666667	2
1/1/2007 00:00	0.542121929	1



1.6 Inorganic Iodine ¹³¹I (LD)

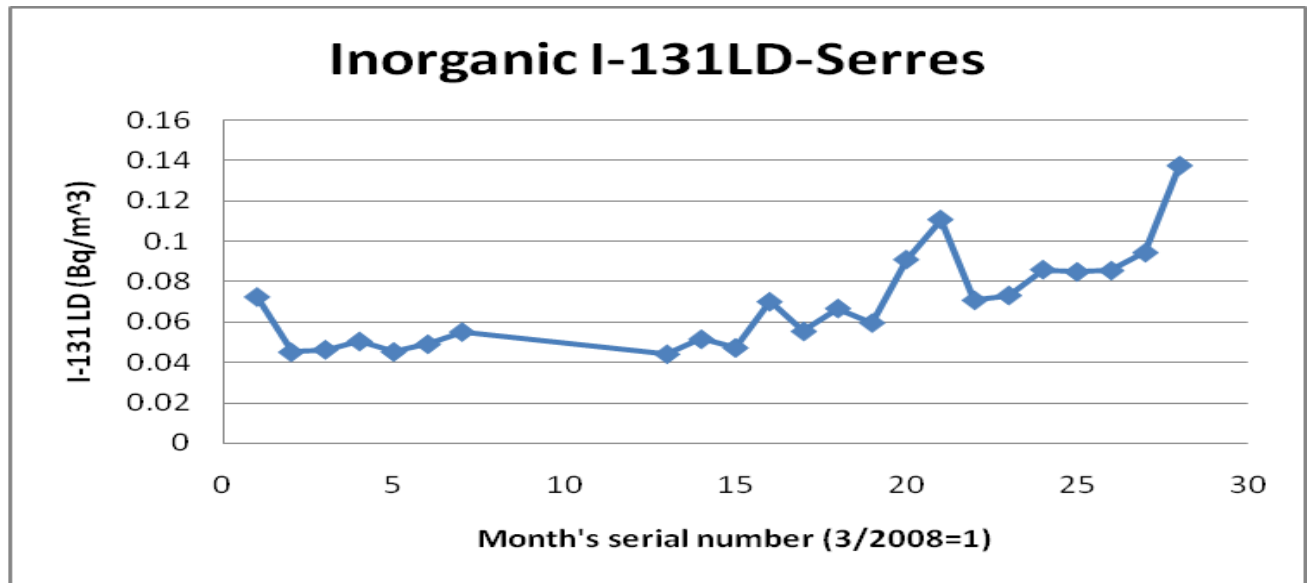
Ο δεύτερος σπινθηριστής NaI(Tl) του συστήματος του κάθε υποσταθμού μέτρησης του δικτύου, φέρει όπως έχουμε αναφέρει πολλάκις, φίλτρο ανόργανου (μοριακού) Ιωδίου. Το σύστημα κατά την κανονική περίοδο λειτουργίας του, καταμετρά τα επίπεδα του ορίου ανίχνευσης (Limit of Detection) LD του ¹³¹I (εκτός εάν προφανώς υπάρχει εξωτερικός παράγοντας τεχνητής ραδιενέργειας).

Επεξεργαστήκαμε, για τις ανάγκες του ποιοτικού ελέγχου, τα δεδομένα των υποσταθμών και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα πιο κάτω.

Αναφορικά με τον σταθμό μέτρησης των Σερρών, θεωρήσαμε δειγματοληπτικό το διάστημα Μάρτιος 2008-Ιούνιος 2010 (δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες πιο πρόσφατες μετρήσεις).

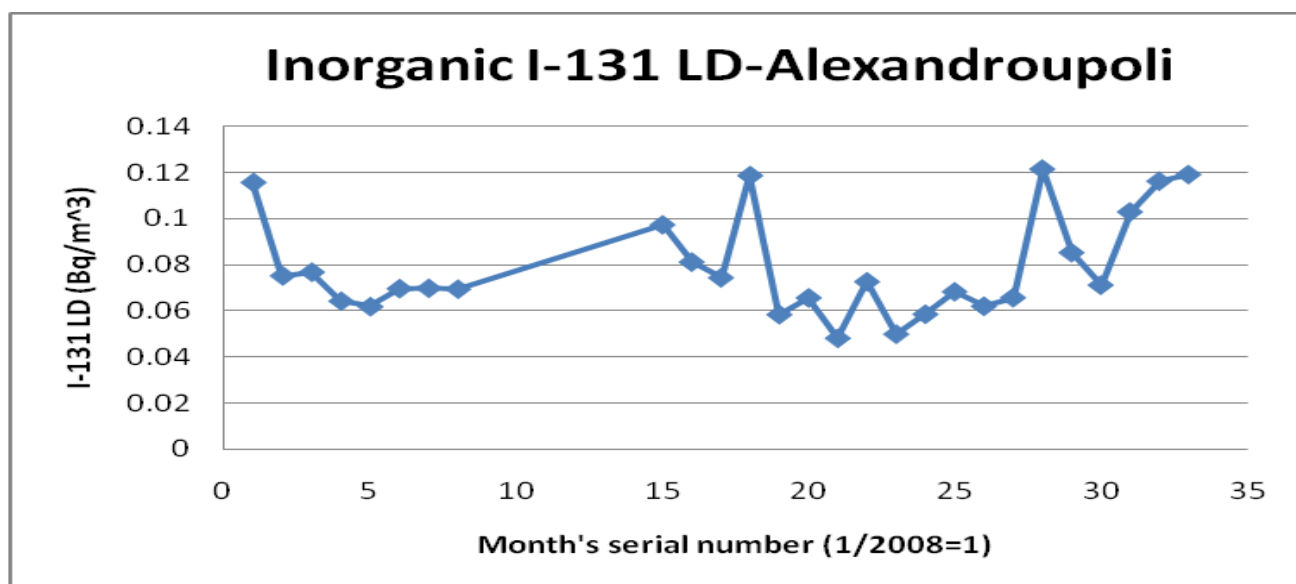
Έχουμε:

Date	AVG(I-131_Id)	Month's s.n.
1/6/2010 00:00	0.137709672	28
1/5/2010 00:00	0.094630977	27
1/4/2010 00:00	0.085723163	26
1/3/2010 00:00	0.085088905	25
1/2/2010 00:00	0.086190156	24
1/1/2010 00:00	0.073396049	23
1/12/2009 00:00	0.071009621	22
1/11/2009 00:00	0.111035847	21
1/10/2009 00:00	0.091170581	20
1/9/2009 00:00	0.059804561	19
1/8/2009 00:00	0.066975495	18
1/7/2009 00:00	0.055615917	17
1/6/2009 00:00	0.070293584	16
1/5/2009 00:00	0.047462375	15
1/4/2009 00:00	0.05173724	14
1/3/2009 00:00	0.044327098	13
1/9/2008 00:00	0.055312121	7
1/8/2008 00:00	0.049246567	6
1/7/2008 00:00	0.045452303	5
1/6/2008 00:00	0.050657804	4
1/5/2008 00:00	0.046545965	3
1/4/2008 00:00	0.045305728	2
1/3/2008 00:00	0.072665581	1



Με ανάλογη διαδικασία και πρακτική, επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα από τον υποσταθμό της Αλεξανδρούπολης και τα παρουσιάζουμε ευθύς αμέσως, με την σημείωση ότι χρησιμοποιήσαμε για το διάστημα Ιανουάριος 2008- Σεπτέμβριος 2010, μέσες μηνιαίες μετρήσεις.

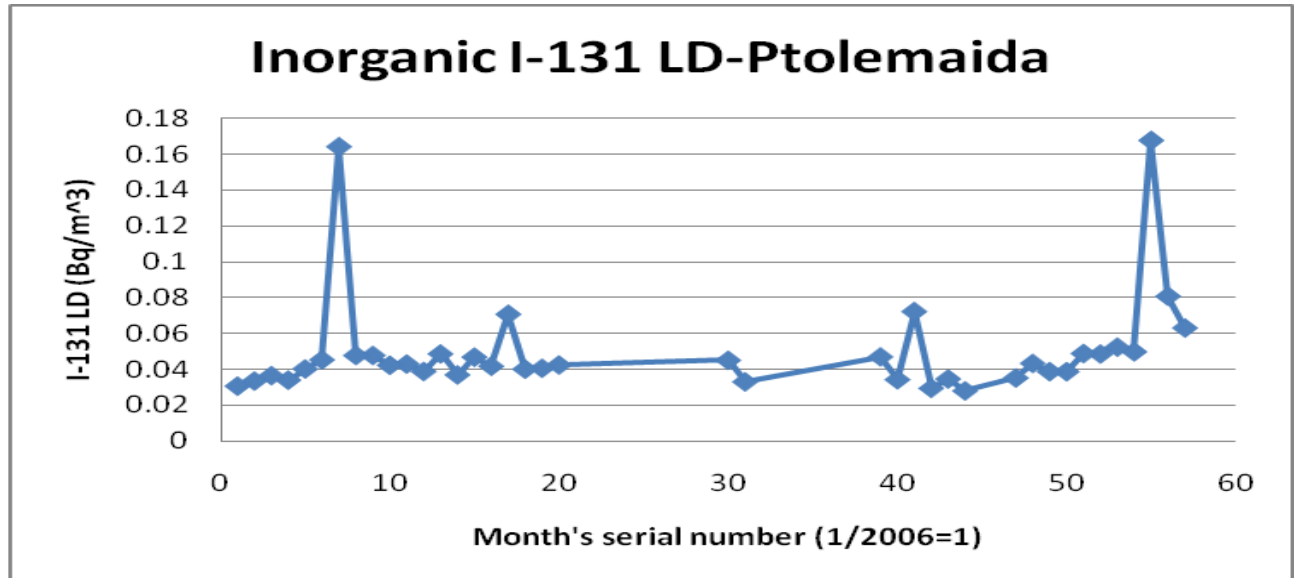
Date	AVG(I-131_ld)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.119062181	33
1/8/2010 00:00	0.116196508	32
1/7/2010 00:00	0.102883899	31
1/6/2010 00:00	0.071283588	30
1/5/2010 00:00	0.085327697	29
1/4/2010 00:00	0.121416115	28
1/3/2010 00:00	0.065863703	27
1/2/2010 00:00	0.062171576	26
1/1/2010 00:00	0.068438161	25
1/12/2009 00:00	0.058689549	24
1/11/2009 00:00	0.050108021	23
1/10/2009 00:00	0.072742334	22
1/9/2009 00:00	0.048311368	21
1/8/2009 00:00	0.065783572	20
1/7/2009 00:00	0.058558363	19
1/6/2009 00:00	0.118591414	18
1/5/2009 00:00	0.07443	17
1/4/2009 00:00	0.081240184	16
1/3/2009 00:00	0.097343124	15
1/8/2008 00:00	0.069541176	8
1/7/2008 00:00	0.069921459	7
1/6/2008 00:00	0.069779723	6
1/5/2008 00:00	0.0620007	5
1/4/2008 00:00	0.064357195	4
1/3/2008 00:00	0.07689421	3
1/2/2008 00:00	0.075272658	2
1/1/2008 00:00	0.115615385	1



Τέλος, παρουσιάζουμε την επεξεργασία των δεδομένων από τον σταθμό της Πτολεμαΐδας, για χρονικό διάστημα ελέγχου Ιανουάριος 2006-Σεπτέμβριος 2010 (με τις όποιες ελλείψεις, τις αιτίες των οποίων έχουμε προαναφέρει).

Date	AVG(I-131_Id)	Month's s.n.
1/9/2010 00:00	0.063112612	57
1/8/2010 00:00	0.080854417	56
1/7/2010 00:00	0.167895935	55
1/6/2010 00:00	0.049837994	54
1/5/2010 00:00	0.052398125	53
1/4/2010 00:00	0.048604048	52
1/3/2010 00:00	0.048874187	51
1/2/2010 00:00	0.038720148	50
1/1/2010 00:00	0.038768024	49
1/12/2009 00:00	0.043323259	48
1/11/2009 00:00	0.035188117	47
1/8/2009 00:00	0.027968436	44
1/7/2009 00:00	0.034602018	43
1/6/2009 00:00	0.029445057	42
1/5/2009 00:00	0.072290948	41
1/4/2009 00:00	0.034208952	40
1/3/2009 00:00	0.046985498	39
1/7/2008 00:00	0.033017236	31
1/6/2008 00:00	0.0450458	30
1/8/2007 00:00	0.042458511	20
1/7/2007 00:00	0.0406	19
1/6/2007 00:00	0.040113127	18
1/5/2007 00:00	0.070792079	17
1/4/2007 00:00	0.041743896	16
1/3/2007 00:00	0.046798623	15
1/2/2007 00:00	0.036900887	14
1/1/2007 00:00	0.048625091	13
1/12/2006 00:00	0.038830841	12
1/11/2006 00:00	0.042976912	11

1/10/2006 00:00	0.042304958	10
1/9/2006 00:00	0.04775521	9
1/8/2006 00:00	0.047772506	8
1/7/2006 00:00	0.164386408	7
1/6/2006 00:00	0.045307423	6
1/5/2006 00:00	0.04020976	5
1/4/2006 00:00	0.033978463	4
1/3/2006 00:00	0.03651648	3
1/2/2006 00:00	0.03349061	2
1/1/2006 00:00	0.030607962	1



1.7 Totals per filter

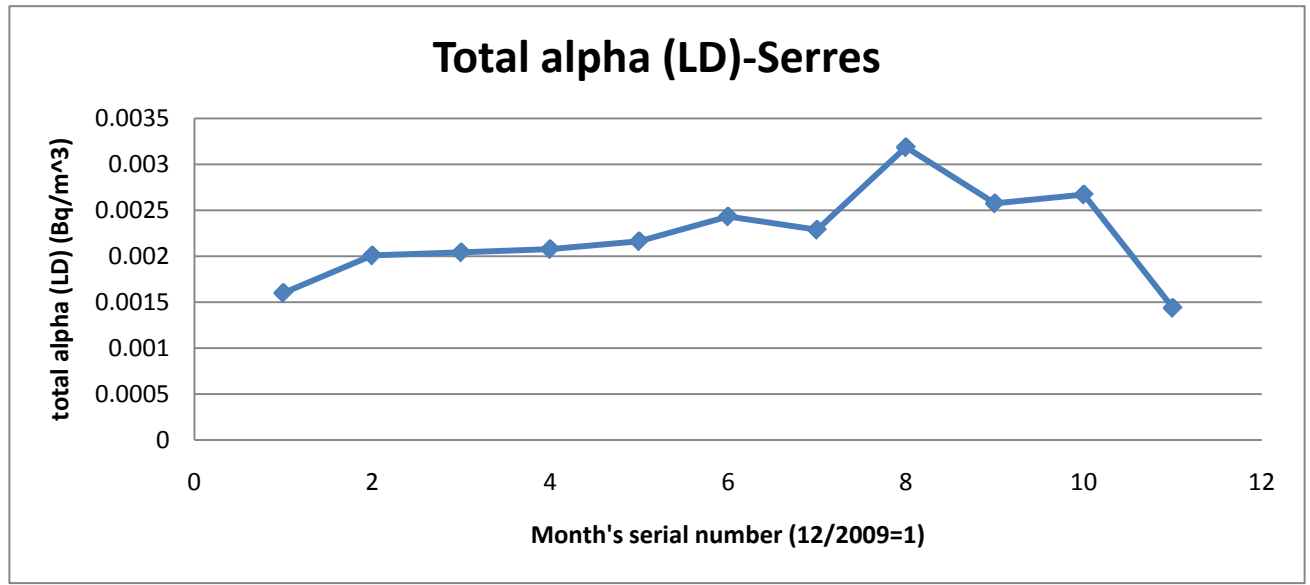
Το σύστημα του τηλεμετρικού δικτύου, AMS02, παρέχει τη δυνατότητα της καταγραφής και παρουσίασης, των συνολικών ποσών ραδιενέργειας στα οποία εκτίθεται κάθε φίλτρο (δηλαδή του αεροζόλ, του μοριακού Ιωδίου-ενεργού άνθρακα και του οργανικού Ιωδίου), καθώς δεν υπάρχει άμεση μέθοδος μέτρησης της τεχνητής ραδιενέργειας. Η μέθοδος που ακολουθείται είναι έμμεση, υπό την έννοια ότι, κατά την εξέταση ενός φίλτρου είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η φυσική ραδιενέργεια κάποιου είδους (π.χ άλφα), οπότε η τεχνητή ραδιενέργεια προκύπτει ως η διαφορά της συνολικής μέτρησης ενός φίλτρου, από την φυσική ραδιενέργεια του ίδιου φίλτρου.

A) Φίλτρο αεροζόλ

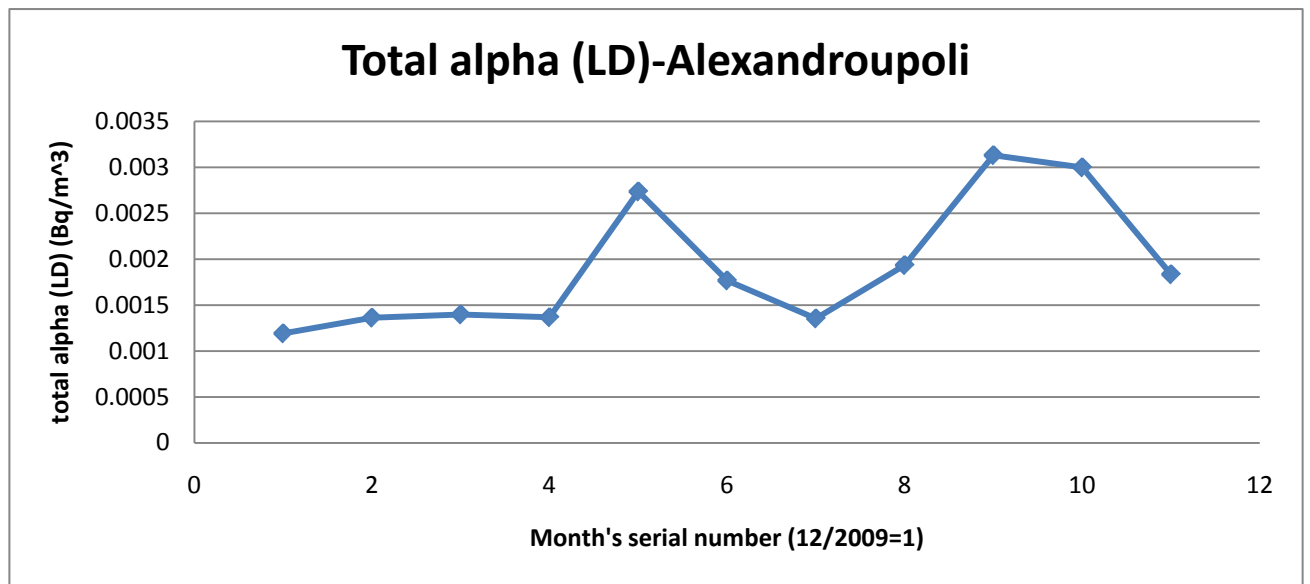
A.1) Συνολική άλφα ακτινοβολία (LD)

Η παράμετρος αυτή του συστήματος, εξάγεται προφανώς από τον ανιχνευτή PIP που κείται απέναντι από το φίλτρο αεροζόλ. Πρέπει να αναφέρουμε ότι το τηλεμετρικό δίκτυο, ξεκίνησε να λαμβάνει μετρήσεις αυτού του είδους και να τις καταγράφει στη βάση δεδομένων, μόλις τον περασμένο Δεκέμβριο(2009). Οπότε, υπάρχει σχετικά φτωχή συγκομιδή των δεδομένων αυτών στην επεξεργασία του ποιοτικού ελέγχου. Οι πίνακες μετρήσεων όλων των υποσταθμών του συστήματος που ακολουθούν, έχουν εξαχθεί από δεδομένα του ίδιου χρονικού διαστήματος, που είναι άλλωστε και το μοναδικό που παρέχει πληροφορίες μέτρησης (Δεκέμβριος 2009-Οκτώβριος 2010). Στην επεξεργασία χρησιμοποιήσαμε μηνιαίους μέσους όρους.

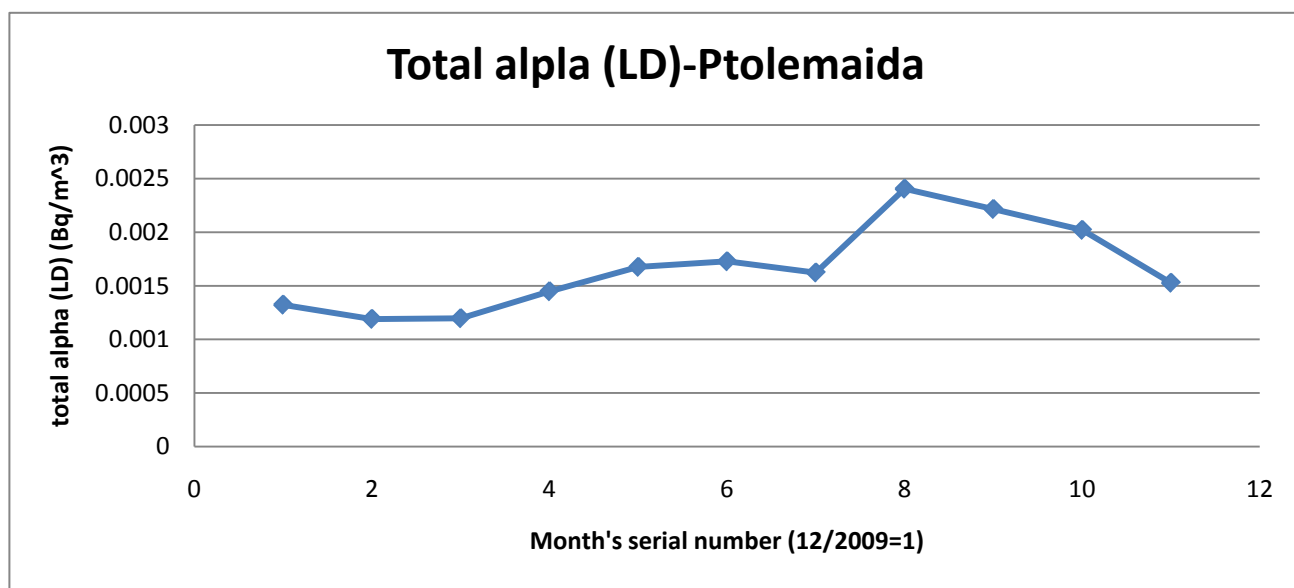
Date	AVG(total_aerosol_alpha_LD) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.001437826	11
1/9/2010 00:00	0.002672014	10
1/8/2010 00:00	0.002575714	9
1/7/2010 00:00	0.003186906	8
1/6/2010 00:00	0.002288686	7
1/5/2010 00:00	0.002433087	6
1/4/2010 00:00	0.002162846	5
1/3/2010 00:00	0.002077693	4
1/2/2010 00:00	0.002042025	3
1/1/2010 00:00	0.002008874	2
1/12/2009 00:00	0.00160036	1



Date	AVG(total_aerosol_alpha_LD) (Bq/m³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.0018353	11
1/9/2010 00:00	0.002999192	10
1/8/2010 00:00	0.003131709	9
1/7/2010 00:00	0.001935082	8
1/6/2010 00:00	0.001354979	7
1/5/2010 00:00	0.001768183	6
1/4/2010 00:00	0.002736719	5
1/3/2010 00:00	0.001367856	4
1/2/2010 00:00	0.001398071	3
1/1/2010 00:00	0.001363063	2
1/12/2009 00:00	0.001192461	1



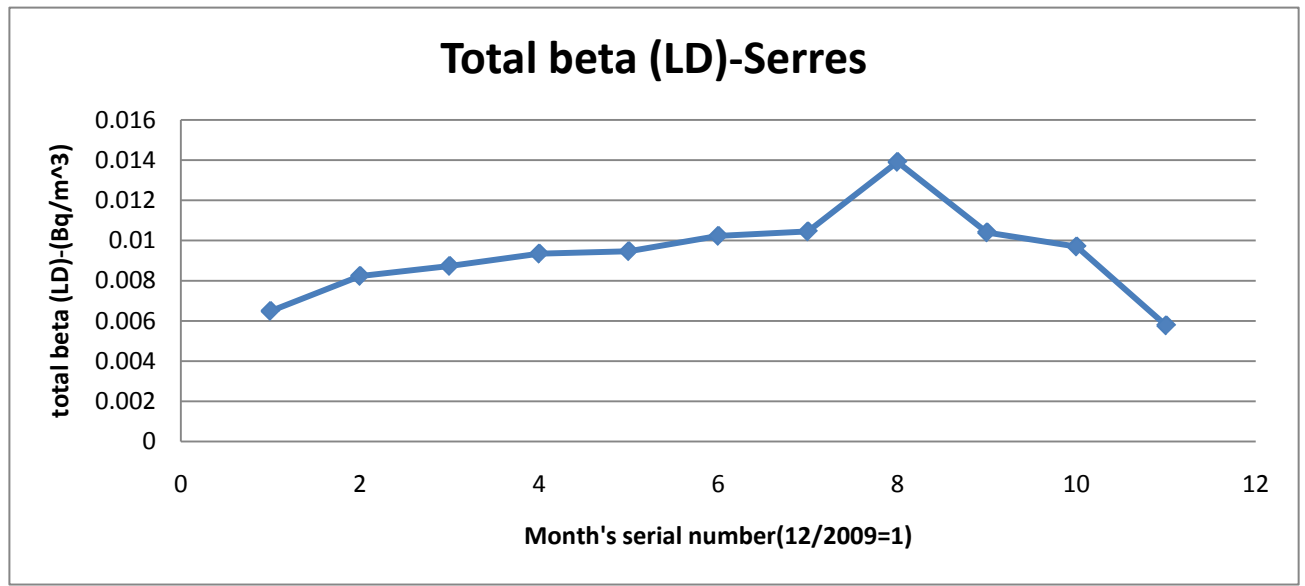
Date	AVG(total_aerosol_alpha_LD) (Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.00152747	11
1/9/2010 00:00	0.002021013	10
1/8/2010 00:00	0.002216072	9
1/7/2010 00:00	0.002405302	8
1/6/2010 00:00	0.001623061	7
1/5/2010 00:00	0.001727863	6
1/4/2010 00:00	0.001675696	5
1/3/2010 00:00	0.001448194	4
1/2/2010 00:00	0.001196419	3
1/1/2010 00:00	0.001190041	2
1/12/2009 00:00	0.001322918	1



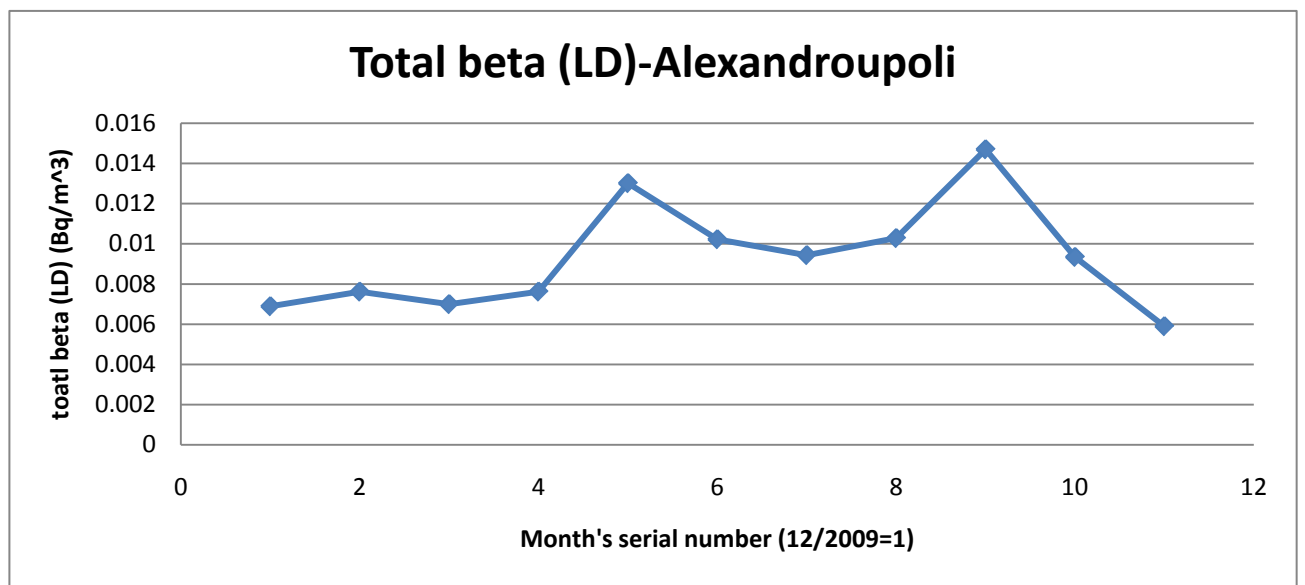
A.2) Συνολική βήτα ακτινοβολία (LD)

Η δεύτερη παράμετρος ελέγχου από το φίλτρο αεροζόλ είναι η συνολική βήτα ακτινοβολία, η οποία μετράται από τον ανιχνευτή PIPS. Το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας των μετρήσεων είναι όμοιο με πριν. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

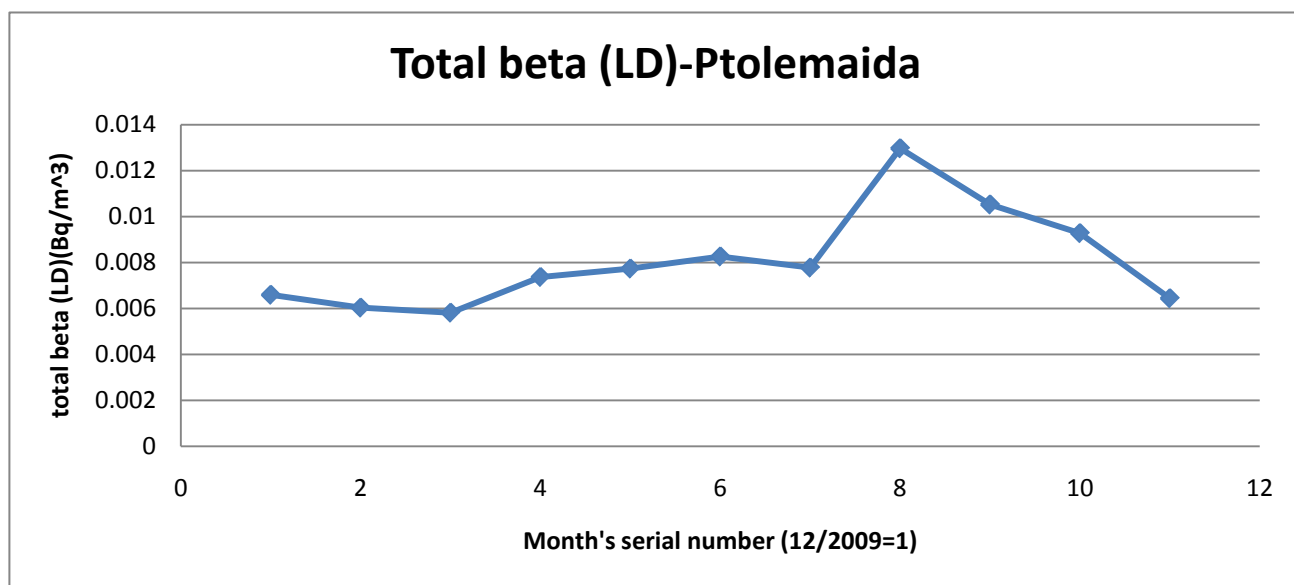
Date	AVG(total_aerosol_beta_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.00577221	11
1/9/2010 00:00	0.009698085	10
1/8/2010 00:00	0.010401231	9
1/7/2010 00:00	0.013910881	8
1/6/2010 00:00	0.010450252	7
1/5/2010 00:00	0.010227125	6
1/4/2010 00:00	0.009466098	5
1/3/2010 00:00	0.009344431	4
1/2/2010 00:00	0.008730776	3
1/1/2010 00:00	0.008232643	2
1/12/2009 00:00	0.006489212	1



Date	AVG(total_aerosol_beta_LD)(Bq/m³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.005895003	11
1/9/2010 00:00	0.009342798	10
1/8/2010 00:00	0.014701932	9
1/7/2010 00:00	0.010282691	8
1/6/2010 00:00	0.009433486	7
1/5/2010 00:00	0.010225199	6
1/4/2010 00:00	0.013017431	5
1/3/2010 00:00	0.0076181	4
1/2/2010 00:00	0.006994834	3
1/1/2010 00:00	0.007617106	2
1/12/2009 00:00	0.006890331	1



Date	AVG(total_aerosol_beta_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.006445037	11
1/9/2010 00:00	0.00927928	10
1/8/2010 00:00	0.01052644	9
1/7/2010 00:00	0.012973187	8
1/6/2010 00:00	0.007779549	7
1/5/2010 00:00	0.008263203	6
1/4/2010 00:00	0.007736448	5
1/3/2010 00:00	0.007369398	4
1/2/2010 00:00	0.0058169	3
1/1/2010 00:00	0.006036235	2
1/12/2009 00:00	0.006595224	1

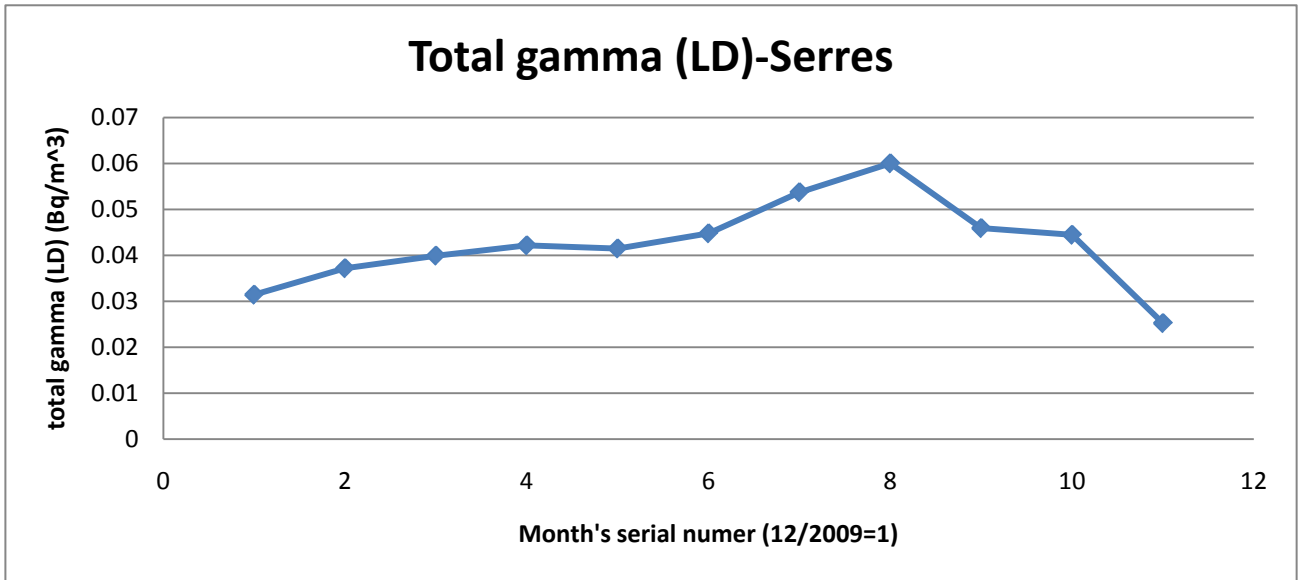


A.3) Συνολική ακτινοβολία γάμμα (LD)

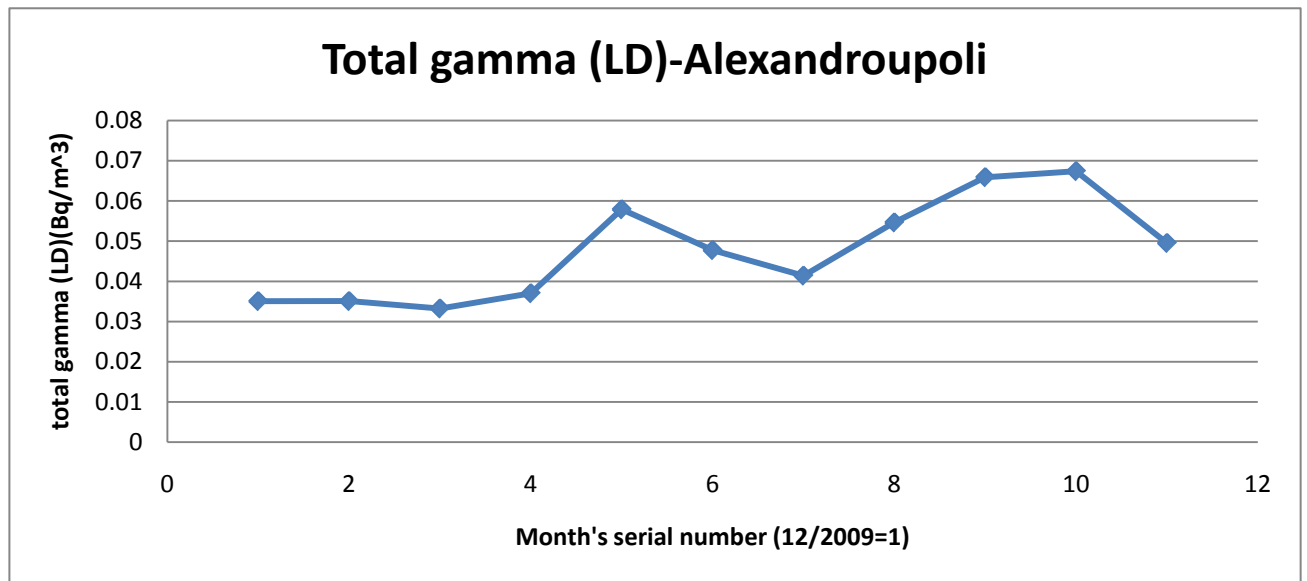
Η τελευταία παράμετρος του φίλτρου αεροζόλ που εξετάστηκε, είναι η συνολική ακτινοβολία γάμμα, που προκύπτει από τον ανιχνευτή NaI(Tl), ο οποίος βρίσκεται κατά μέτωπο του φίλτρου. Το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας και για αυτή την παράμετρο είναι το ίδιο, για όλους τους υποσταθμούς.

Παραθέτουμε τα αποτελέσματα της επεξεργασίας:

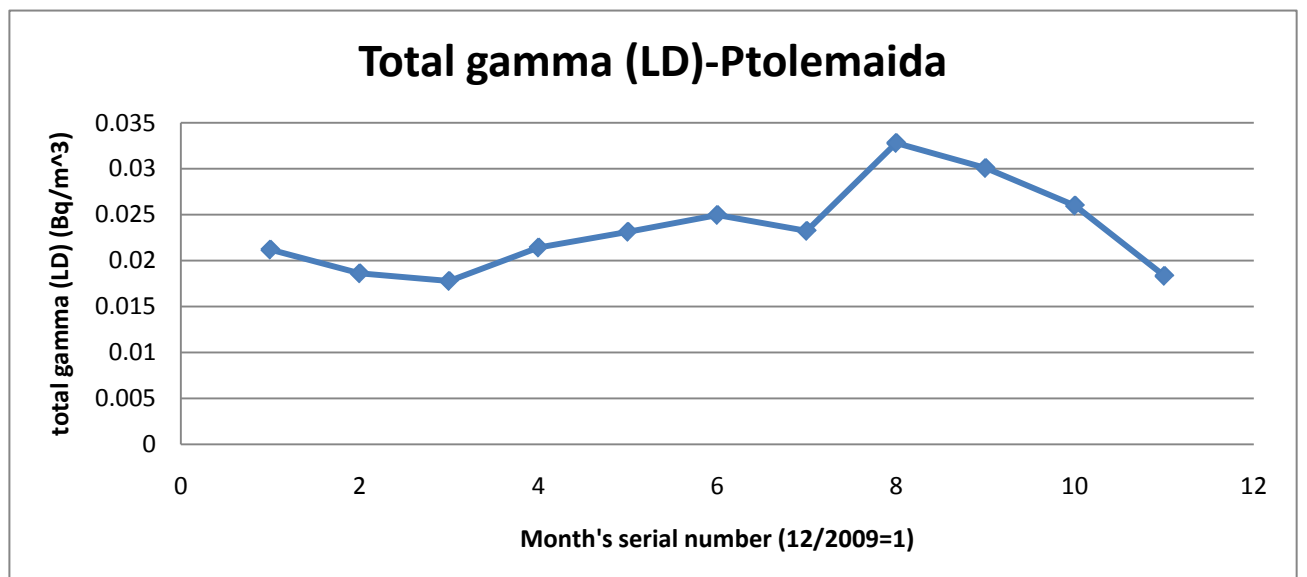
Date	AVG(total_aerosol_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.025248961	11
1/9/2010 00:00	0.044465637	10
1/8/2010 00:00	0.045927185	9
1/7/2010 00:00	0.060021773	8
1/6/2010 00:00	0.053732035	7
1/5/2010 00:00	0.044785514	6
1/4/2010 00:00	0.041492653	5
1/3/2010 00:00	0.042168042	4
1/2/2010 00:00	0.039930883	3
1/1/2010 00:00	0.037195163	2
1/12/2009 00:00	0.031432506	1



Date	AVG(total_aerosol_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.049532744	11
1/9/2010 00:00	0.067409935	10
1/8/2010 00:00	0.065906004	9
1/7/2010 00:00	0.054650327	8
1/6/2010 00:00	0.041409978	7
1/5/2010 00:00	0.047761209	6
1/4/2010 00:00	0.057906944	5
1/3/2010 00:00	0.037032474	4
1/2/2010 00:00	0.033238736	3
1/1/2010 00:00	0.035082016	2
1/12/2009 00:00	0.035075277	1



Date	AVG(total_aerosol_gamma_LD)(Bq/m³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.018334935	11
1/9/2010 00:00	0.025987344	10
1/8/2010 00:00	0.030073845	9
1/7/2010 00:00	0.032802434	8
1/6/2010 00:00	0.02322875	7
1/5/2010 00:00	0.024965185	6
1/4/2010 00:00	0.023133479	5
1/3/2010 00:00	0.021420174	4
1/2/2010 00:00	0.017780963	3
1/1/2010 00:00	0.01861349	2
1/12/2009 00:00	0.021196468	1

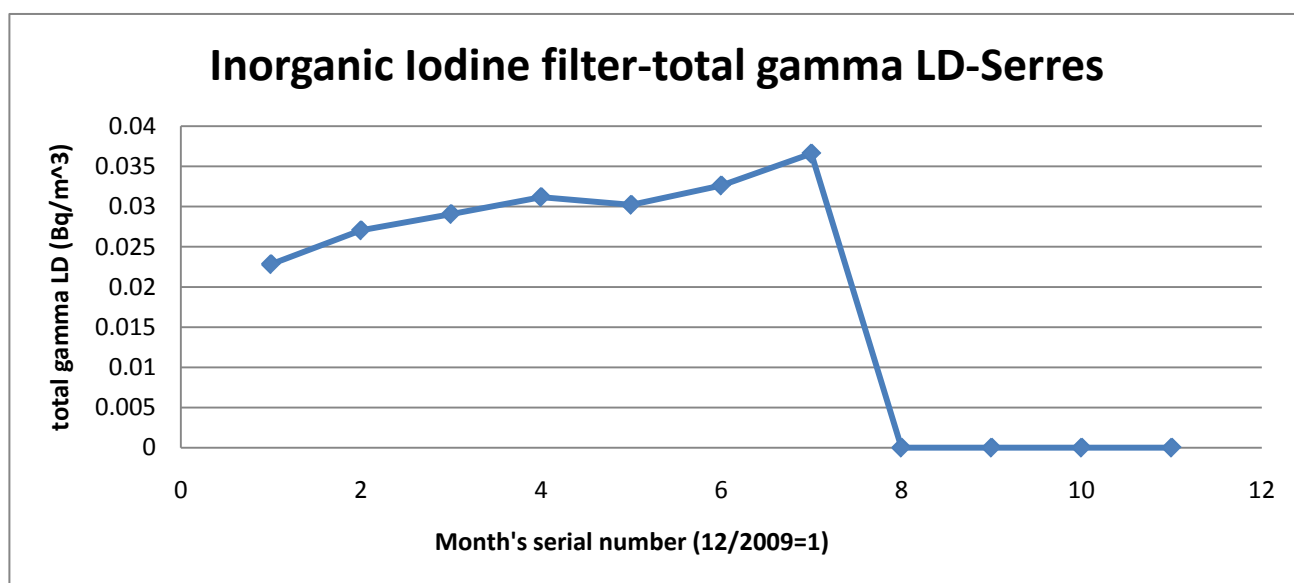


B) Φίλτρο ενεργού άνθρακα

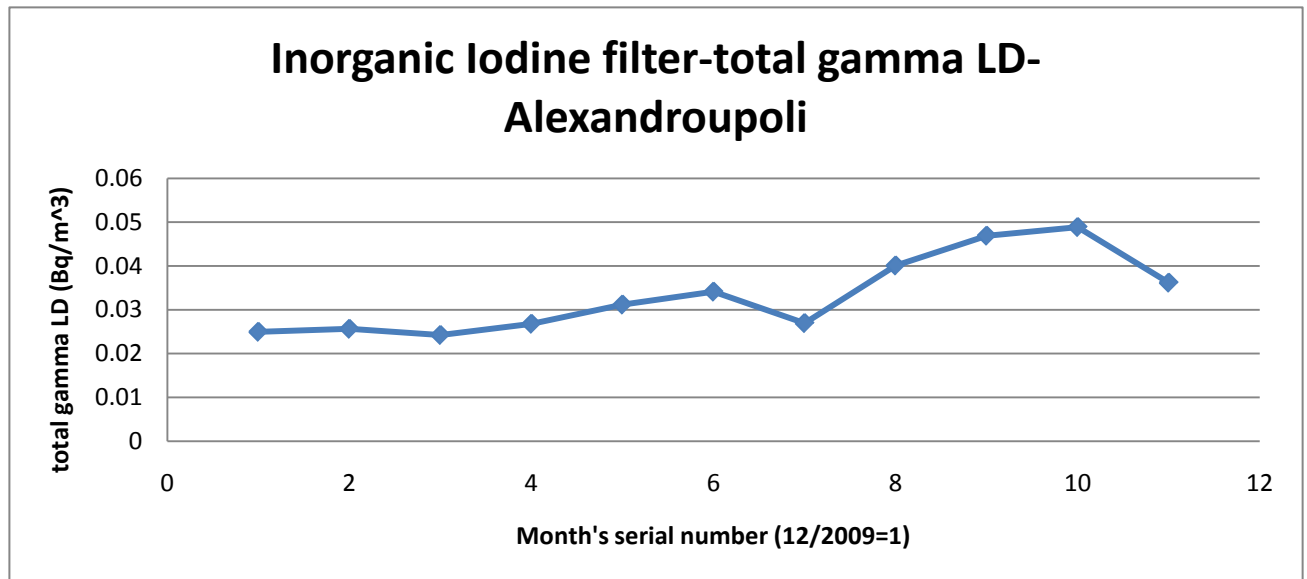
Το δεύτερο φίλτρο του συστήματος, αυτό του ενεργού άνθρακα, χρησιμοποιείται για την κατακράτηση μορίων Ιωδίου της ατμόσφαιρας και ο ανιχνευτής σπινθηρισμών που βρίσκεται απέναντί του, για τη μέτρηση της ραδιενέργειας που προέρχεται από την γάμμα κορυφή του ¹³¹I.

Και σε αυτή την περίπτωση, οι υποσταθμοί ξεκίνησαν να λαμβάνουν δεδομένα από τον Δεκέμβριο του 2009. Αξίζει να σημειώσουμε ότι όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, ο σταθμός των Σερρών δεν καταγράφει μετρήσεις του Ιωδίου-131 από τον Ιούλιο έως σήμερα, λόγω τεκμηριωμένα κακής λειτουργίας του. Στη συνέχεια παραθέτουμε τα δεδομένα των σταθμών:

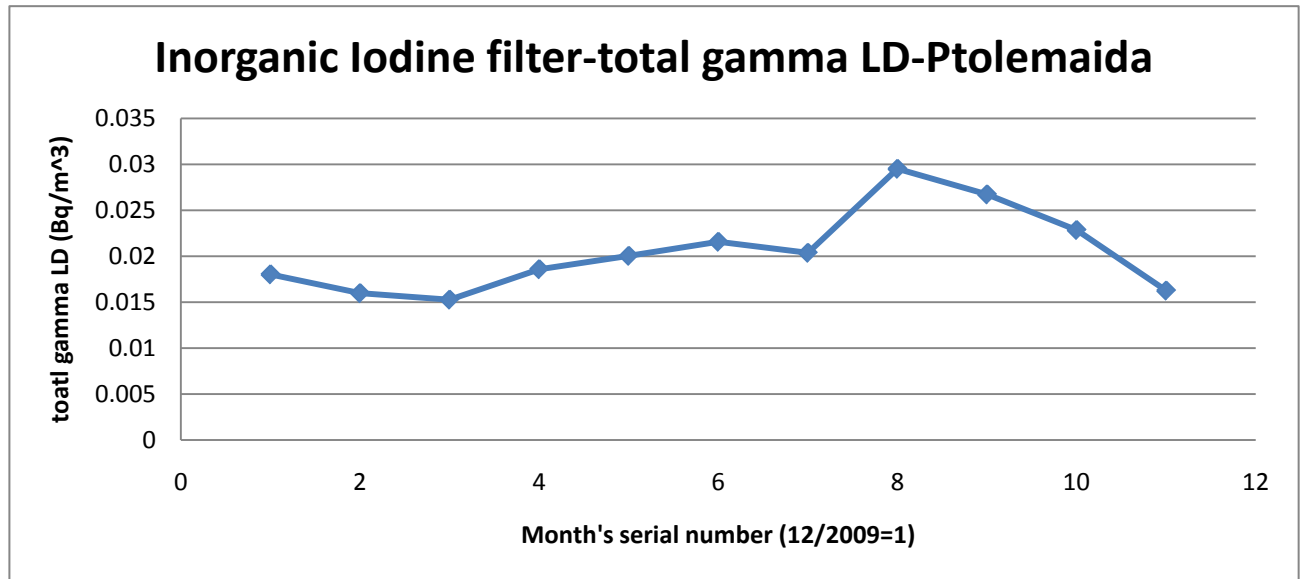
Date	AVG(total_iodine_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0	11
1/9/2010 00:00	0	10
1/8/2010 00:00	0	9
1/7/2010 00:00	0	8
1/6/2010 00:00	0.03659705	7
1/5/2010 00:00	0.032620392	6
1/4/2010 00:00	0.030218817	5
1/3/2010 00:00	0.031182756	4
1/2/2010 00:00	0.029069023	3
1/1/2010 00:00	0.027043464	2
1/12/2009 00:00	0.022831914	1



Date	AVG(total_iodine_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.036174522	11
1/9/2010 00:00	0.048866456	10
1/8/2010 00:00	0.046895645	9
1/7/2010 00:00	0.04009606	8
1/6/2010 00:00	0.026953193	7
1/5/2010 00:00	0.03412505	6
1/4/2010 00:00	0.031177177	5
1/3/2010 00:00	0.026792488	4
1/2/2010 00:00	0.024238495	3
1/1/2010 00:00	0.025648316	2
1/12/2009 00:00	0.024964968	1



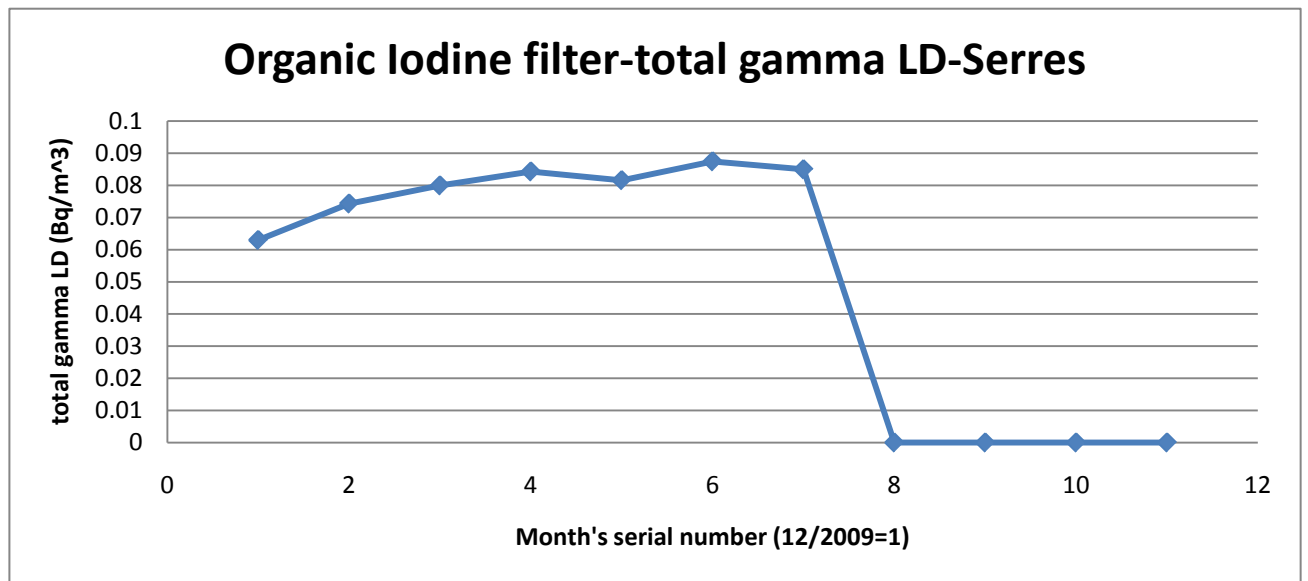
Date	AVG(total_iodine_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.016259243	11
1/9/2010 00:00	0.022854894	10
1/8/2010 00:00	0.026731245	9
1/7/2010 00:00	0.029517917	8
1/6/2010 00:00	0.020369476	7
1/5/2010 00:00	0.021571157	6
1/4/2010 00:00	0.020040416	5
1/3/2010 00:00	0.018588688	4
1/2/2010 00:00	0.015273385	3
1/1/2010 00:00	0.015981962	2
1/12/2009 00:00	0.018029393	1



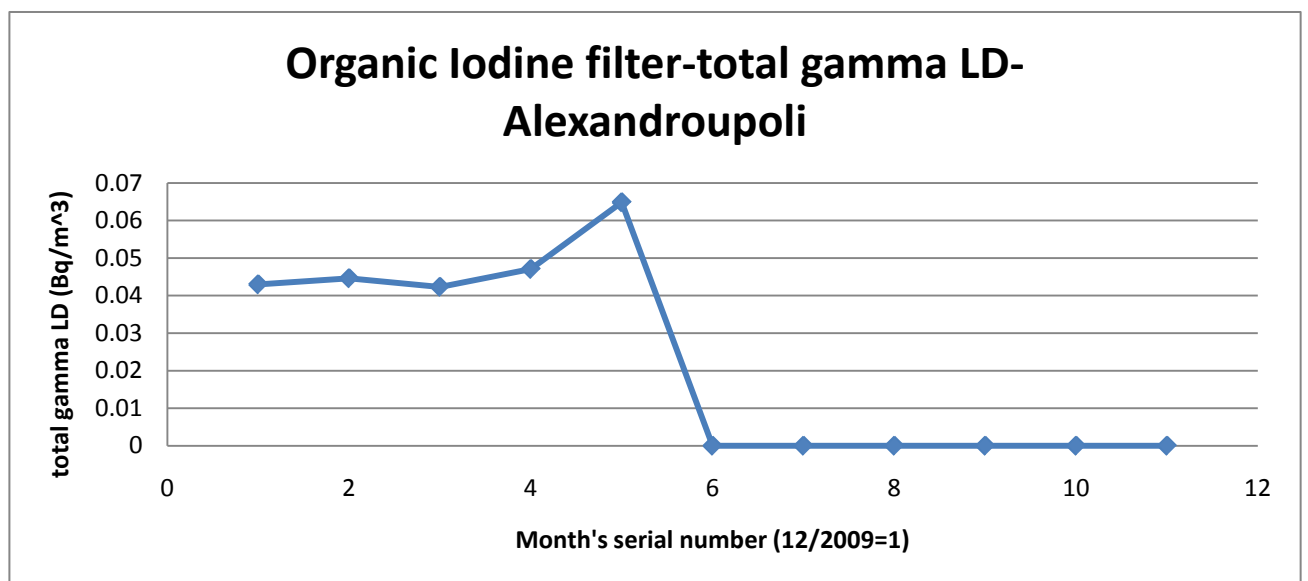
Γ) Φίλτρο οργανικών ενώσεων Ιωδίου

Το τρίτο κατά σειρά φίλτρο που συναντά στην πορεία του μέσα σε έναν υποσταθμό μέτρησης ο αντλούμενος αέρας, είναι το φίλτρο οργανικών Ιωδιούχων ενώσεων, που είναι εμποτισμένο με κόκκους αργύρου. Απέναντι από το φίλτρο αυτό, τοποθετείται όπως έχουμε πει ο τρίτος ανιχνευτής NaI(Tl), ο οποίος μετρά γεγονότα (αποδιεγέρσεις δηλαδή) γάμμα ακτινοβολίας από μόρια που ίσως να είχαν ξεφύγει από τα προηγούμενα φίλτρα. Οι υποσταθμοί των Σερρών και της Αλεξανδρούπολης, είχαν τους τελευταίους μήνες αποδεδειγμένα προβλήματα στη λήψη μετρήσεων της παραμέτρου αυτής, όπως φαίνεται και επόμενα: (Το δειγματοληπτικό διάστημα είναι Δεκέμβριος 2009 έως σήμερα, με τις όποιες ελλείψεις).

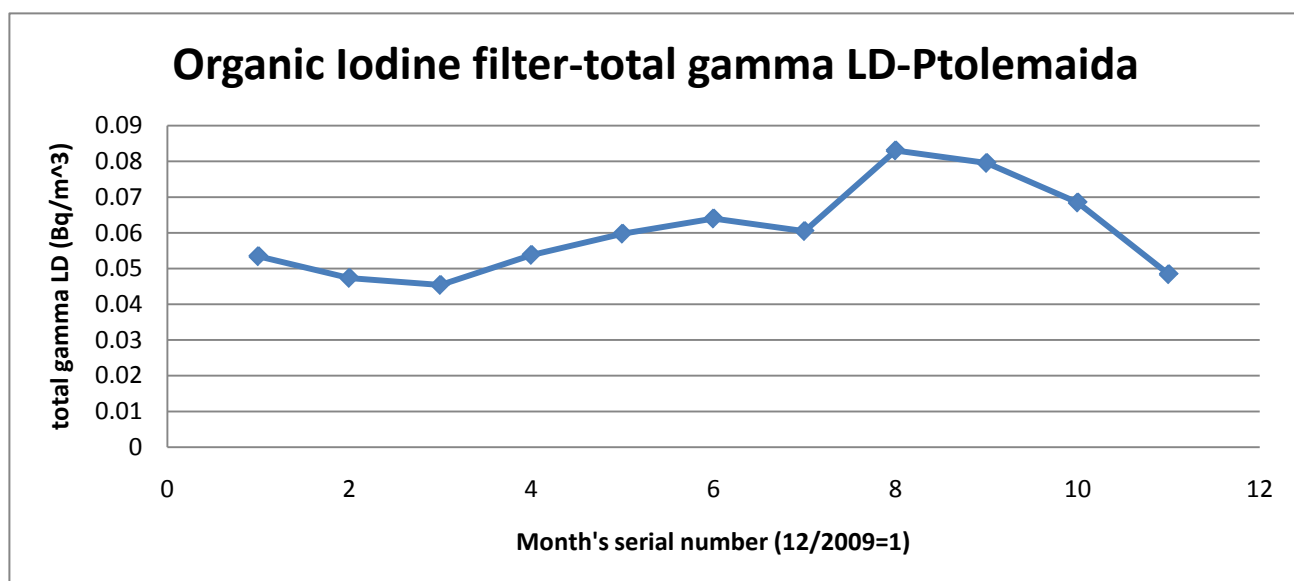
Date	AVG(total_organiodine_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0	11
1/9/2010 00:00	0	10
1/8/2010 00:00	0	9
1/7/2010 00:00	0	8
1/6/2010 00:00	0.084987697	7
1/5/2010 00:00	0.08743428	6
1/4/2010 00:00	0.081584989	5
1/3/2010 00:00	0.084293859	4
1/2/2010 00:00	0.079953398	3
1/1/2010 00:00	0.074320102	2
1/12/2009 00:00	0.062975638	1



Date	AVG(total_organiodine_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0	11
1/9/2010 00:00	0	10
1/8/2010 00:00	0	9
1/7/2010 00:00	0	8
1/6/2010 00:00	0	7
1/5/2010 00:00	0	6
1/4/2010 00:00	0.064834537	5
1/3/2010 00:00	0.047052031	4
1/2/2010 00:00	0.042310679	3
1/1/2010 00:00	0.044602699	2
1/12/2009 00:00	0.042972445	1



Date	AVG(total_organic_gamma_LD)(Bq/m ³)	Month's s.n.
1/10/2010 00:00	0.048388842	11
1/9/2010 00:00	0.068459751	10
1/8/2010 00:00	0.079529175	9
1/7/2010 00:00	0.083031531	8
1/6/2010 00:00	0.060467178	7
1/5/2010 00:00	0.063982544	6
1/4/2010 00:00	0.059736834	5
1/3/2010 00:00	0.05379432	4
1/2/2010 00:00	0.045384961	3
1/1/2010 00:00	0.047350098	2
1/12/2009 00:00	0.053433239	1



2. Συμπεράσματα

2.1 Γενικά συμπεράσματα

Βασικός σκοπός της παρούσης εργασίας, ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας του τηλεμετρικού δικτύου, μετά την αναβάθμιση που πραγματοποιήθηκε τον περασμένο Φεβρουάριο (2010). Για τη διεξαγωγή του ποιοτικού ελέγχου, προσπαθήσαμε να εξετάσουμε όλες τις παραμέτρους του συστήματος και να αποδείξουμε ότι το ανανεωμένο λογισμικό της BittScada για το AMS02, ανταποκρίνεται επιτυχώς στις απαιτήσεις της καταγραφής, αποθήκευσης και ανάκτησης των δεδομένων στη βάση τους (database). Από τη σκοπιά αυτή μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε τα εξής:

- Υπάρχει πλήρης ανάκτηση και δυνατότητα επεξεργασίας όλων των δεδομένων των παραμέτρων του συστήματος, τόσο αυτών που αποτελούν πλέον «ιστορικές» μετρήσεις (δηλαδή έχουν παρθεί πριν την αναβάθμιση), όσο και αυτών που λαμβάνονται από την αναβάθμιση του συστήματος μέχρι και σήμερα.
- Υπάρχει συνέπεια του συστήματος, ως προς την ομοιομορφία των μετρήσεων πριν και μετά την αναβάθμισή του.
- Οφείλουμε να τονίσουμε κατηγορηματικά ότι, ενώ υπάρχει πλήρης προσβασιμότητα στις καταγεγραμμένες μετρήσεις οποιουδήποτε είδους, εντούτοις υπάρχουν μεγάλες ελλείψεις μετρήσεων που οφείλονται σε τεκμηριωμένα κακή λειτουργία του ανιχνευτικού συστήματος (συνιστούν δηλαδή προβλήματα υλικού- hardware).
- Τέλος, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το προϊόν της BittScada, είναι εμφανώς αξιόπιστο, εκπληρώνει με επάρκεια την αποστολή για την οποία δημιουργήθηκε,

διευκολύνει στο έπακρο τη διαδικασία στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων και μας γεμίζει με προσδοκίες για τα αποτελέσματα της μελλοντικής χρήσης του.

2.2 Συμπεράσματα για τις παραμέτρους χρήσης

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την στατιστική ανάλυση της κάθε παραμέτρου.

- Doserate: Το σύστημα έχει αξιοσημείωτη αξιοπιστία στη μέτρηση της παραμέτρου αυτής. Υπάρχουν πολύ λογικές αποκλίσεις στις μετρήσεις, της τάξης του 2-3%, πέρα από ελάχιστες περιπτώσεις (όπως του Ιουλίου του 2010 στην Πτολεμαΐδα). Όπως προαναφέραμε όμως, το λογισμικό δε φέρει ευθύνη για την υπολειτουργία ή την κατάρρευση του hardware, κατάσταση που μπορεί να οφείλεται στην επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών συνθηκών (εν προκειμένω στη θερμοκρασία). Άλλωστε αυτό που εξετάζουμε είναι η αξιοπιστία και η συνέπεια των μετρήσεων και όχι η ποιότητά τους (για αυτή είναι υπεύθυνο το hardware).
- Μετεωρολογικά δεδομένα: Εξετάσαμε τις παραμέτρους της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου και αξιολογήσαμε τις μετρήσεις ως έγκυρες. Μάλιστα, όπως θα περίμενε κανείς, στις μετρήσεις της θερμοκρασίας εμφανίζεται μία ταύτιση σε ίδιους μήνες συναπτών ετών, αφού κάναμε χρήση μηνιαίων μέσων τιμών.
- ^{220}Rn , ^{222}Rn , ^{137}Cs , ^{131}I : Μελετήσαμε τα ραδιοϊσότοπα αυτά (προφανώς τα όρια ανίχνευσής τους, **LD**, αφού ευτυχώς δεν υπήρχε τέτοιου είδους τεχνητή ακτινοβολία) και δεν ανακαλύψαμε σφάλματα στην καταγραφή των δεδομένων, ή οποιαδήποτε άλλη παρατυπία.

-
- Τεχνητή άλφα και βήτα ακτινοβολία: Δεν διαφάνηκε από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων των υποσταθμών οποιαδήποτε λάθος καταγραφή μέτρησης ή κάποιο άλλο ατόπημα. Οι μετρήσεις είναι έγκυρες και συνεπείς.
 - Totals per filter: Όπως και στην περίπτωση της τεχνητής άλφα και βήτα ακτινοβολίας, δεν παρατηρήθηκε κάποια ανησυχητική διαταραχή της συνέπειας του συστήματος ως προς την καταγραφή και την πλήρη ανάκτηση των δεδομένων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. Βασικές έννοιες της πυρηνικής φυσικής-ραδιενέργεια

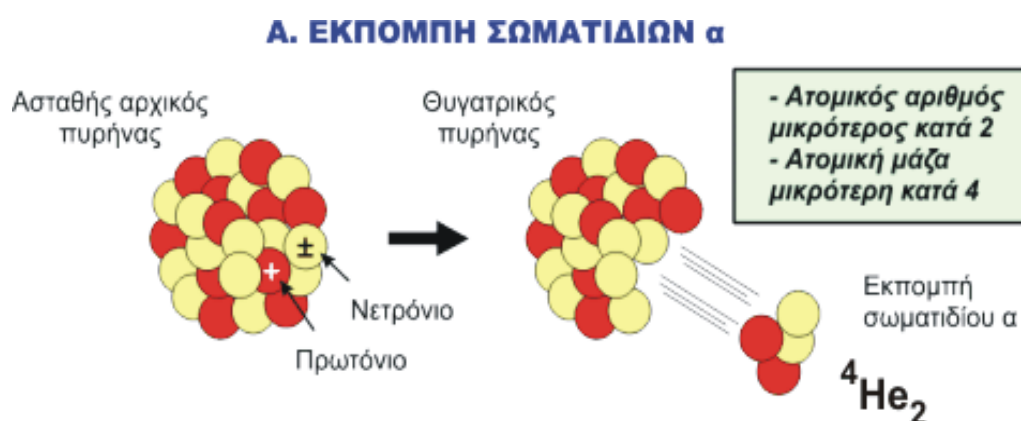
A.1 Η πυρηνική υπόθεση

Το 1911 ο Rutherford απέδειξε την ύπαρξη ενός πυρήνα μέσα στο άτομο από τα πειράματα στα οποία τα άλφα σωματίδια διασκορπίστηκαν από λεπτά φύλλα αλουμινίου. Η πυρηνική υπόθεση άρχισε από τότε να αναπτύσσεται με μια αναθεωρημένη θεωρία της ατομικής δομής, από την άποψη της οποίας ολόκληρο το φαινόμενο της ραδιενέργειας μπορούσε να εξηγηθεί.

Εν συντομία, το άτομο έχει βρεθεί να αποτελείται από έναν πυκνό κεντρικό πυρήνα που περιβάλλεται από ένα νέφος ηλεκτρονίων. Ο πυρήνας, στη συνέχεια, αποτελείται από τα πρωτόνια τα οποία είναι ίσα σε αριθμό με τα ηλεκτρόνια (σε ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο), και των νετρονίων. Τα νετρόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και περίπου της ίδιας μάζας με τα πρωτόνια. Ένα άλφα σωματίδιο, ή το διπλά φορτισμένο ιόν του ηλίου, αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια, και ως εκ τούτου μπορεί να εκπεμφθεί μόνο από τον πυρήνα ενός ατόμου.

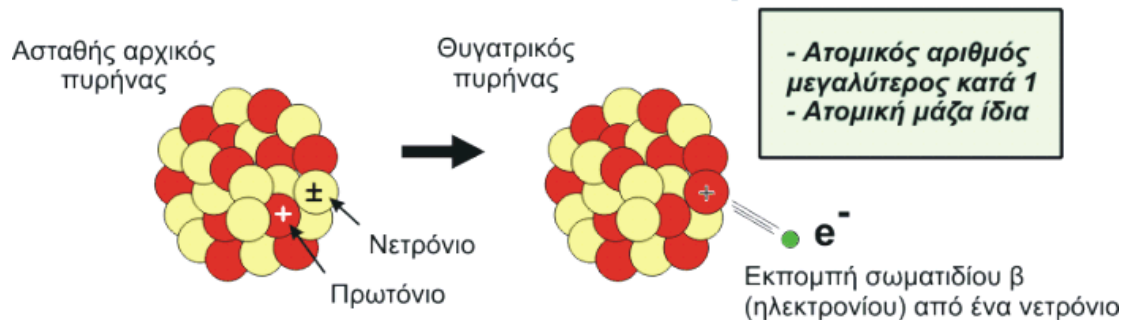
Η απώλεια ενός άλφα σωματιδίου από έναν πυρήνα οδηγεί στο σχηματισμό ενός νέου πυρήνα, ελαφρύτερου από τον αρχικό κατά τέσσερις μονάδες ατομικής μάζας u (οι μάζες του κάθε νετρονίου και πρωτονίου είναι περίπου μια ατομική μονάδα μάζας u). Ένα άτομο του ισότοπου ουράνιου με μαζικό αριθμό 238, μετά την εκπομπή ενός άλφα σωματιδίου, γίνεται ένα άτομο ενός άλλου στοιχείου με μαζικό αριθμό 234. (Ο μαζικός αριθμός ενός πυρήνα είναι ο συνολικός αριθμός νετρονίων και πρωτονίων και είναι σχεδόν, αλλά όχι ακριβώς, ίσος με τη πραγματική μάζα του που εκφράζεται με μονάδες ατομικής μάζας u .) Κάθε ένα από τα δύο πρωτόνια που αποτελούν μέρος του άλφα σωματιδίου κατέχει μια μονάδα θετικού ηλεκτρικού φορτίου. Ο αριθμός των θετικών

φορτίων στον πυρήνα, που ισορροπείται από τον ίδιο αριθμό αρνητικών ηλεκτρονίων στις στιβάδες έξω από τον πυρήνα, καθορίζει τη χημική φύση του ατόμου. Επειδή το φορτίο στον πυρήνα του Ουρανίου-238 μειώνεται κατά δύο μονάδες ως αποτέλεσμα της εκπομπής άλφα σωματιδίων, ο ατομικός αριθμός του νέου ατόμου που δημιουργείται είναι κατά 2 μικρότερος του αρχικού, ο οποίος ήταν 92. Το νέο άτομο λοιπόν έχει έναν ατομικό αριθμό 90 και ως εκ τούτου είναι ένα ισότοπο του στοιχείου θορίου.



Το Θόριο-234 εκπέμπει βήτα σωματίδια, τα οποία είναι ηλεκτρόνια. Η βήτα εκπομπή ολοκληρώνεται από το μετασχηματισμό ενός νετρονίου σε ένα πρωτόνιο, κατά συνέπεια με μια αύξηση στο πυρηνικό φορτίο (ή στον ατομικό αριθμό) κατά μια ατομική μονάδα u . Η μάζα του ηλεκτρονίου είναι αμελητέα, έτσι το ισότοπο που προκύπτει από την αποσύνθεση του θορίου-234 έχει μαζικό αριθμό 234 αλλά ατομικό αριθμό 91 και είναι, επομένως, ένα πρωτακτίνο.

Β. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ β



A.2 Ακτίνες γάμμα

Η εκπομπή γάμμα εμφανίζεται συνήθως σε συνδυασμό με την άλφα και την βήτα εκπομπή. Οι ακτίνες γάμμα δεν φέρουν κανένα φορτίο ή μάζα και κατά συνέπεια η εκπομπή των ακτινών γάμμα από έναν πυρήνα δεν οδηγεί σε καμιά αλλαγή στις χημικές ιδιότητες του πυρήνα αλλά μόνο στην απώλεια ενός ορισμένου ποσού ακτινοβόλου ενέργειας. Η εκπομπή των ακτινών γάμμα οφείλεται σε μια αποδιέγερση του πυρήνα που βρισκόταν σε μια ασταθή κατάσταση, λόγω των εκπομπών άλφα ή βήτα από τον πυρήνα. Το αρχικό άλφα ή βήτα σωματίδιο και η επακόλουθη εκπομπή ακτινών γάμμα εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα.



Μερικές μόνο περιπτώσεις είναι γνωστές για την εκπομπή άλφα και βήτα ακτινοβολίας χωρίς να συμμετέχει σε αυτές η εκπομπή

ακτινών γάμμα, επίσης είναι γνωστή εκπομπή αποκλειστικά γάμμα ακτινοβολίας από ορισμένα ισότοπα. Η καθαρή εκπομπή γάμμα εμφανίζεται όταν υπάρχει ένα ισότοπο με δύο διαφορετικές μορφές, που αποκαλούνται πυρηνικά ισομερή έχοντας τους ίδιους ατομικούς αριθμούς και τους μαζικούς αριθμούς αλλά διαφέρουν στην ενέργεια. Η εκπομπή των ακτινών γάμμα συνοδεύει τη μετάβαση του υψηλού-ενεργειακού ισομερούς στην χαμηλή-ενεργειακή μορφή. Ένα παράδειγμα του ισομερισμού είναι το ισότοπο πρωτακτίνιο-234, που υπάρχει σε δύο ευδιάκριτες ενεργειακές καταστάσεις, με την εκπομπή των ακτινών γάμμα που επισημαίνουν τη μετάβαση από την μια στην άλλη κατάσταση. Οι ακτίνες άλφα, βήτα, και οι ακτινοβολίες γάμμα εκπέμπονται από τους μητρικούς πυρήνες τους με τεράστιες

ταχύτητες. Τα άλφα σωματίδια επιβραδύνονται και σταματούν καθώς περνούν μέσω της ύλης, πρώτιστα μέσω της αλληλεπίδρασης τους με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε εκείνη την ύλη. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα άλφα σωματίδια εκπεμπόμενα από την ίδια ουσία εκτινάσσονται με σχεδόν ίδια ταχύτητα. Κατά συνέπεια σχεδόν όλα τα άλφα σωματίδια από το πολώνιο-210 ταξιδεύουν 3,8 cm μέσω του αέρα πριν να σταματήσουν εντελώς, και εκείνα από το πολώνιο-212 ταξιδεύουν 8,5 cm υπό τους ίδιους όρους. Η μέτρηση της απόστασης που διανύεται από τα άλφα σωματίδια χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα ισότοπα.

Τα βήτα σωματίδια εκτινάσσονται με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από τα άλφα σωματίδια, και έτσι θα διαπεράσουν αρκετή περισσότερη ύλη, αν και ο μηχανισμός με τον οποίο αυτά σταματούν είναι ουσιαστικά παρόμοιος. Αντίθετα από τα άλφα σωματίδια, όμως, τα βήτα σωματίδια εκπέμπονται με πολλές διαφορετικές ταχύτητες, και οι βήτα εκπομπές πρέπει να διακριθούν μεταξύ τους από τις χαρακτηριστικές μέγιστες και μέσες ταχύτητες των βήτα σωματιδίων τους. Η κατανομή στις ενέργειες βήτα-σωματιδίων (ταχυτήτων) απαιτήσε την υπόθεση της ύπαρξης, ενός σωματιδίου χωρίς μάζα αποκαλούμενο νετρίνο. Η εκπομπή νετρίνο συνοδεύει όλες τις διασπάσεις βήτα.

Οι ακτίνες γάμμα έχουν ακτίνα δράσης αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτήν των βήτα σωματιδίων και μπορούν σε μερικές περιπτώσεις να περάσουν μέσω αρκετών cm φύλλων μολύβδου. Τα άλφα και βήτα σωματίδια, κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη, προκαλούν τον σχηματισμό πολλών ιόντων. Αυτός ο ιονισμός είναι ιδιαίτερα εύκολο να παρατηρηθεί όταν η ύλη είναι αερίωδης. Οι ακτίνες γάμμα δεν έχουν φορτίο, και ως εκ τούτου δεν μπορούν να προκαλέσουν τέτοιο ιονισμό τόσο εύκολα. Οι βήτα ακτίνες παράγουν το 1/100 έως το 1/200 του ιονισμού που παράγεται από τις άλφα ακτίνες ανά εκατοστόμετρο της διαδρομής τους στον αέρα. Οι ακτίνες γάμμα παράγουν περίπου το 1/100 του ιονισμού των βήτα ακτινών.



Υπάρχουν και άλλοι τρόποι
ραδιενεργού αποσύνθεσης εκτός

από τις τρεις προαναφερθείσες. Μερικά ισότοπα είναι ικανά να εκπέμπουν ποζιτρόνια τα οποία είναι ίδια με τα ηλεκτρόνια αλλά με αντίθετο φορτίο. Η διαδικασία εκπομπής ποζιτρονίου είναι συνήθως ταξινομημένη ως βήτα-διάσπαση και καλείται βήτα-συν εκπομπή για να την διακρίνει κάποιος από την πιο κοινή εκπομπή των αρνητικών ηλεκτρονίων. Η εκπομπή ποζιτρονίων ολοκληρώνεται πιθανά μέσω της μετατροπής, στον πυρήνα, ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο, με συνέπεια μια μείωση του ατομικού αριθμού κατά μια μονάδα.

Ένας άλλος τρόπος αποσύνθεσης, γνωστός ως σύλληψη K-ηλεκτρονίου, αποτελείται από την σύλληψη ενός ηλεκτρονίου



από τον πυρήνα, ακολουθούμενη από το μετασχηματισμό ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι επίσης μια μείωση του ατομικού αριθμού

κατά μια μονάδα. Η διαδικασία είναι αισθητή μόνο επειδή η αφαίρεση του ηλεκτρονίου από την τροχιά του οδηγεί στην εκπομπή μιας ακτίνας-X.

Διάφορα ισότοπα, ειδικότερα το ουράνιο-235 και διάφορα ισότοπα των τεχνητών υπερουράνιων στοιχείων είναι σε θέση με μια διαδικασία αυθόρμητης διάσπασης, στην οποία ο πυρήνας διασπάται σε δύο τμήματα. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 ένας μοναδικός τρόπος διάσπασης παρατηρήθηκε, στον οποίο τα ισότοπα του ραδίου με μάζες 222, 223, και 224 εκπέμπουν πυρήνες άνθρακα-14 παρά να αποσυντεθούν όπως συνήθως γίνεται με την εκπομπή της άλφα ακτινοβολίας.

A.3 Ρυθμοί ραδιενεργών διασπάσεων

Ο βαθμός σταθερότητας ενός πυρηνικού συστήματος μπορεί να εκφραστεί από την πιθανότητα που έχει ώστε μέσα σε ένα χρονικό διάστημα Δt να μεταπέσει σε ένα σταθερότερο σύστημα. Εφόσον ο πυρήνας παραμένει αμετάβλητος μέχρι τη στιγμή που πραγματοποιείται η μετάπτωση, η πιθανότητα αυτή είναι μια χαρακτηριστική σταθερά του συστήματος, ανεξάρτητη από το χρόνο. Με άλλα λόγια, σε οποιαδήποτε

δεδομένη στιγμή, η πιθανότητα ώστε να αποδιεγερθεί ο πυρήνας μέσα στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα Δt είναι η ίδια. Έτσι για ένα συγκεκριμένο πυρήνα δεν είναι δυνατόν να προβλέψουμε την ακριβή στιγμή που θα μεταπέσει σε μία άλλη κατάσταση. Η περιγραφή της αποδιέγερσης μπορεί να γίνει μόνο για ένα στατιστικό σύνολο όμοιων ασταθών πυρήνων, από τους οποίους ο καθένας έχει την ίδια πιθανότητα λ να αποδιεγερθεί μέσα στην αμέσως επόμενη μονάδα του χρόνου. Τότε, αν N είναι ο ολικός αριθμός των πυρήνων στο στατιστικό σύνολο που θεωρούμε,

ο ρυθμός αποδιέγερσης $\frac{dN}{dt}$ (αποδιεγέρσεις ανά μονάδα χρόνου) θα είναι κατά μέσο όρο ίσος με λN , δηλαδή:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

όπου το αρνητικό πρόσημο εκφράζει τη μείωση του αριθμού N με την πάροδο του χρόνου t . Η σταθερά λ στην εξίσωση ονομάζεται σταθερά **αποδιέγερσης** ενώ η ποσότητα λN έχει καθιερωθεί στην ελληνική επιστημονική ορολογία με την ατυχή ονομασία **ραδιενέργεια**. Εξίσου ατυχείς είναι οι όροι **ραδιενεργός πυρήνας**, που αναφέρεται σε ένα γενικά ασταθή πυρήνα, ο οποίος αποδιεγείρεται με εκπομπή ακτινοβολίας α , β , ή γ και **ραδιενεργός πηγή**, που αναφέρεται σε ένα δείγμα, το υλικό του οποίου περιέχει ραδιενεργούς πυρήνες.

Ολοκλήρωση της εξίσωσης δίνει τη χρονική εξέλιξη ενός συνόλου ραδιενεργών πυρήνων. Αν σε χρόνο $t=0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες στο ραδιενεργό δείγμα, τότε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων που παραμένουν μετά από πάροδο χρόνου t είναι

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

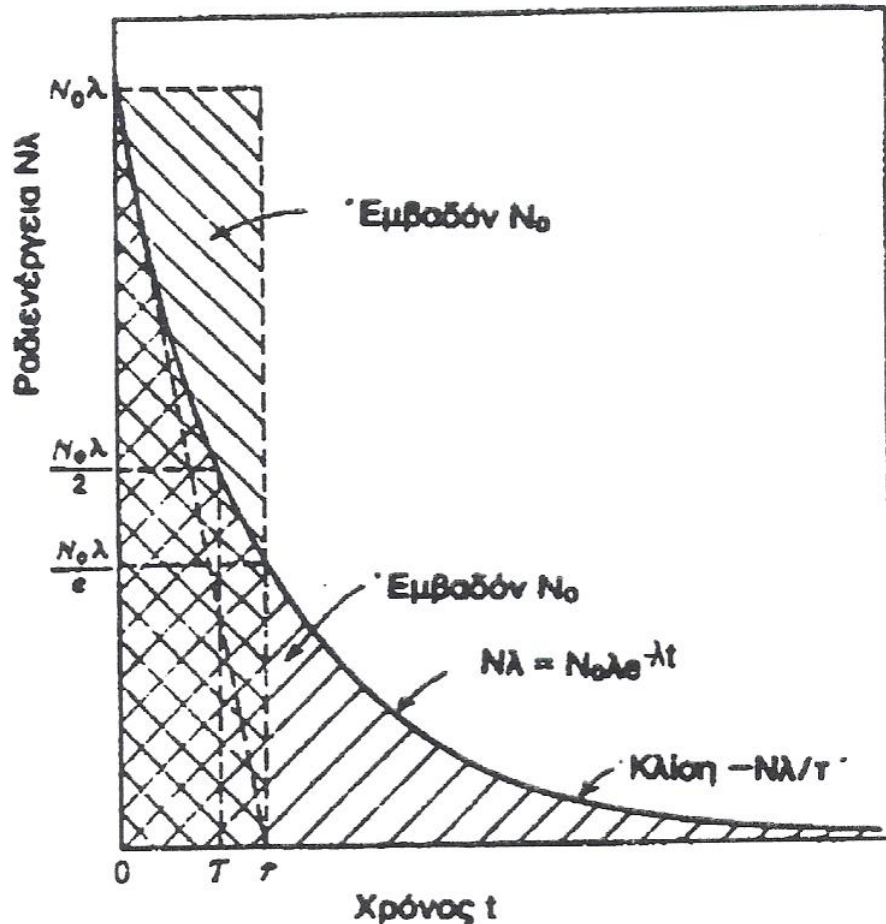
Αν και η σταθερά αποδιέγερσης λ έχει συγκεκριμένη φυσική σημασία είναι πιο εύκολο να παρακολουθήσουμε τη χρονική εξέλιξη ενός ραδιενεργού δείγματος μέσω μιας αντίστοιχης σταθεράς με διαστάσεις χρόνου. Ο **μέσος χρόνος ζωής** ενός ασταθούς ορίζεται ως

$$\tau \equiv \langle t \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t dN}{\int_0^{\infty} dN} = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN}{dt} dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Ενώ η εξίσωση (2) μπορεί να γραφεί στη μορφή

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

που αποδίδεται στη γραφική παράσταση στο σχήμα (1).



Σχήμα 3-1 Χρονική εξέλιξη ενός ραδιενεργού δείγματος με μέσο χρόνο ζωής τ . Η αρχική κλίση της καμπύλης (διακεκομμένη γραμμή) τέμνει τον άξονα του χρόνου στην τιμή τ . Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη αποδιέγερσης είναι ίσο με το πλήθος των ασταθών πυρήνων

Παρατηρείται ότι σε χρόνο $t=\tau$ οι διεγερμένοι πυρήνες που έχουν απομείνει στο δείγμα είναι

$$N(\tau)=N_0/e=0,368N_0 \quad (5)$$

δηλαδή μέσα στο πρώτο χρονικό διάστημα, ίσο προς ένα μέσο χρόνο ζωής, τα 63,2% των πυρήνων του αρχικού δείγματος έχουν αποδιεγερθεί.

Εναλλακτικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε για την περιγραφή της χρονικής εξέλιξης ενός συνόλου ασταθών πυρήνων το **χρόνο ημιζωής** ή **χρόνο υποδιπλασιασμού**, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται ώστε να αποδιεγερθούν οι μισοί από τους πυρήνες στο αρχικό δείγμα. Από την εξίσωση (4) ο χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$ δίνεται από τη σχέση:

ή

$$T_{1/2}=(\ln 2)\tau=0,693\tau \quad (6).$$

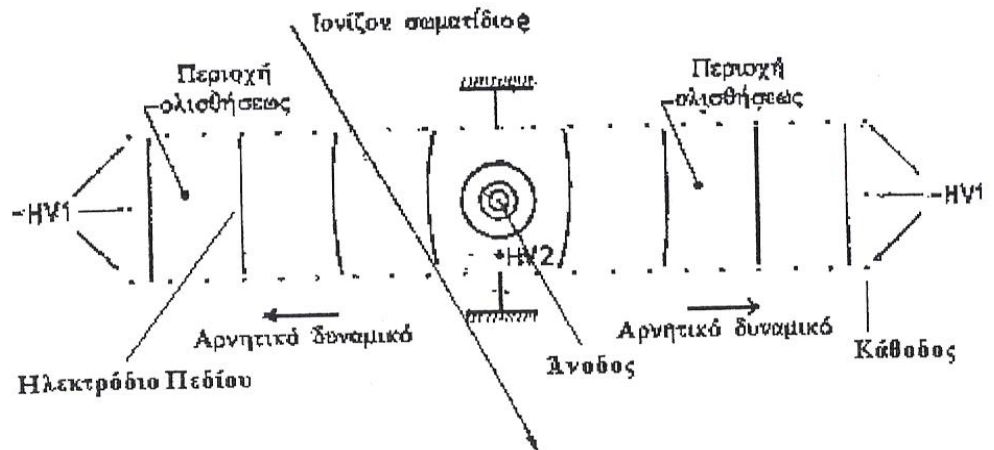
Οι μέσοι χρόνοι ζωής που χαρακτηρίζουν ασταθή πυρηνικά συστήματα καλύπτουν πολλές τάξεις μεγέθους. Χαρακτηριστικοί χρόνοι για αποδιέγερση μέσω εκπομπής σωματίου α εκτείνονται από 10^{-6} s έως 10^{10} γ ενώ η σχετικά βραδύτερη αποδιέγερση β πραγματοποιείται με χρόνους ημιζωής που κυμαίνονται μεταξύ 10^{-2} s έως 10^{14} γ. Η αποδιέγερση γ είναι συνήθως ταχύτερη με χαρακτηριστικούς χρόνους ημιζωής μεταξύ 10^{-17} s έως 10^{-10} s.

B. Ανιχνευτικά συστήματα

B.1 Ανιχνευτές μέτρησης χρόνου ολίσθησης

Οι ανιχνευτές (θάλαμοι) ολίσθησης (drift chambers) είναι συσκευές ανίχνευσης τροχιών που χρησιμοποιούν τον χρόνο ολίσθησης των ηλεκτρονίων που παράγονται στο αέριο του θαλάμου λόγω ιοντισμού, από το σημείο διέλευσης του σωματιδίου μέχρι την άνοδο που συγκεντρώνονται τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μετρηθεί η θέση του διερχόμενου σωματιδίου.

Οι ανιχνευτές αυτού του τύπου αποτελούνται από ένα θάλαμο στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν τα ηλεκτρόδια συλλογής των ιόντων και σύρματα τα οποία ονομάζονται **σύρματα πεδίου**. Τα ηλεκτρόδια (η άνοδος και η κάθοδος) είναι ειδικά διαμορφωμένα σε στρώματα. Οι κάθοδοι είναι σε μορφή ταινιών και οι άνοδοι είναι διαμορφωμένες σε σύρματα τα οποία είναι τοποθετημένα στο επίπεδο ανάμεσα στο χώρο των ανόδων σε γωνία 90° , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 5.6 : Αρχή θαλάμου ολίσθησης

Οι θάλαμοι ολίσθησης επιτυγχάνουν μία τάξη μεγέθους καλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα από τους αναλογικούς θαλάμους. Τυπική μέτρηση χρόνου ολίσθησης, με ακρίβεια 2ns και ταχύτητα 4cm/μs αντιστοιχεί σε χωρική ακρίβεια των 80μm. Η μέτρηση του χρόνου Δt αντιστοιχεί στη μέτρηση από την είσοδο του σωματιδίου στο θάλαμο και έναρξη του πρωτογενούς ιοντισμού μέχρι τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην άνοδο.

Το μήκος διαδρομής των ηλεκτρονίων είναι:

$$\Delta x = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_D(t) dt \quad (11)$$

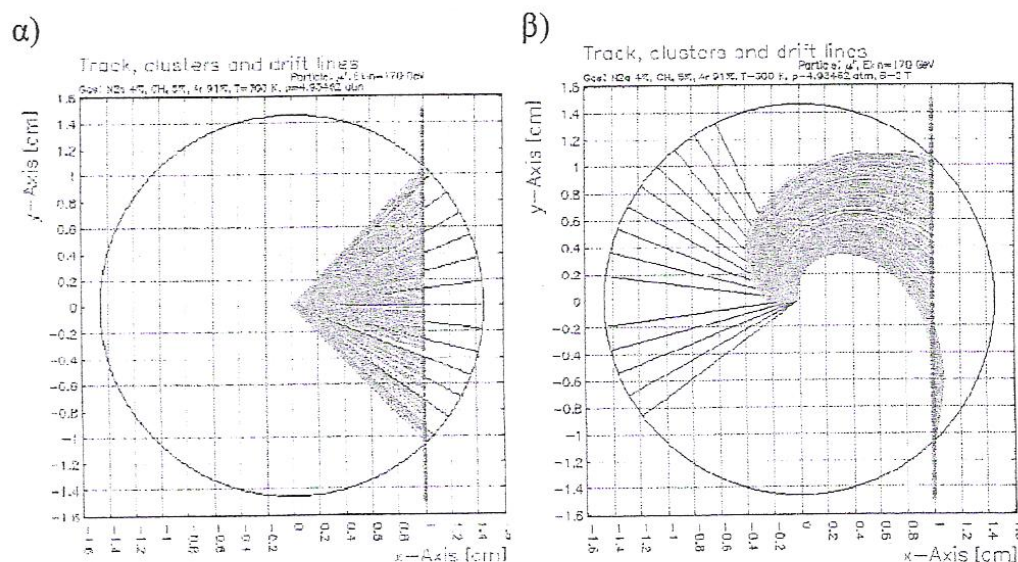
Ο ανιχνευτής απαιτείται να έχει σταθερή ταχύτητα ολίσθησης. Για να επιτευχθεί αυτό ο αρχικός πολυσυρματικός αναλογικός θάλαμος έχει βελτιωθεί με την εισαγωγή και άλλων συρμάτων με αυξανόμενο δυναμικό 0-V₁ μεταξύ δύο ανόδων, ενώ η άνοδος έχει δυναμικό +V₂ και οι κάθοδοι -V₁.

Με ειδικά αέρια μείγματα (π.χ. Αργό 80%-Ισοβουτάνιο 20%), έχει επιτευχθεί μία σχεδόν ανεξαρτησία της τιμής της ταχύτητας ολίσθησης από το ηλεκτρικό πεδίο.

Χρησιμοποιούνται σε πειράματα που απαιτείται ακριβής εντοπισμός της τροχιάς των ιονισμένων σωματιδίων και για χαμηλής ενέργειας ακτίνες-Χ. Έχουμε διαφόρων ειδών θαλάμους ολίσθησης ανάλογα με τη γεωμετρία θαλάμου:

Επίπεδοι θάλαμοι μεγάλου μεγέθους αποτελούνται από περίπου 10 ανεξάρτητους όγκους ολίσθησης με διακριτική ικανότητα 100-300 μm .

Κυλινδρικοί θάλαμοι για πειράματα τεμνόμενων δεσμών όπου το μαγνητικό πεδίο έχει τιμή μόνο στον άξονα z σε κυλινδρικές συντεταγμένες, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο έχει ακτινική διεύθυνση. Η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τα στοιχεία κατασκευής και το είδος χρησιμοποιούμενου αερίου του ανιχνευτή.



Σχήμα 5.7 : α) Προσομοίωση ανίχνευσης τροχιάς (κατακόρυφη ευθεία) φορτισμένου σωματιδίου από κυλινδρικό ανιχνευτή ολίσθησης. Είναι χαρακτηριστικές οι τροχιές των παραγομένων ηλεκτρονίων που ολισθαίνουν προς την άνοδο (κέντρο) ενώ οι αραιές γραμμές είναι των θετικών ιόντων που κατευθύνονται προς την κάθοδο (κυλινδρική επιφάνεια), β) η ίδια προσομοίωση του σχήματος α) με τον ανιχνευτή να βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο 2Tesla.

B.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμών οργανικών υλικών

Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι αρωματικές ενώσεις υδρογονανθράκων που περιέχουν γραμμικές ή συμπυκνωμένες δομές βενζολικών δακτυλίων.

Σε αντιδιαστολή με τους ανόργανους κρυστάλλους οι οργανικοί χρησιμοποιούνται σε μεγάλους θαλάμους, όπως οι ιατρικοί ολόσωμοι ανιχνευτές και οι ανιχνευτές νετρίνων. Οι κρύσταλλοι αυτοί δεν καταστρέφονται από θερμική ή μηχανική καταπόνηση. Επίσης βρίσκονται σε πλαστική, στερεή ή υγρή μορφή.

Οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να φθορίζουν όταν εκτεθούν σε φως ημέρας ή σε ακτίνες-Χ. Η ανθρακίνη και η ναφθαλίνη, για παράδειγμα, εκπέμπουν όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία βήτα ή σε χαμηλής ενέργειας ακτίνες-Χ. Επίσης χρησιμοποιούνται κυκλικές αρωματικές ενώσεις με φαινόλη, που φθορίζουν κοντά στο υπεριώδες και στη μπλε περιοχή. Με κατάλληλες προσμίξεις μπορούμε να μεταφέρουμε την περιοχή εκπομπή τους σε κάποια άλλη.

Το πλεονέκτημά τους είναι ότι έχουν πολύ μικρούς χρόνους διέγερσης και αποδιέγερσης, περίπου στα 3-10μsec. Βέβαια είναι δύσκολο να βρεθούν καθαροί κρύσταλλοι στο μέγεθος που τους θέλουμε. Οι περισσότεροι παράγονται σε μεγέθη μερικών εκατοστών. Τα υγρά υλικά όπως το ξυλένιο, η τολουένη και το χλωροεξανικόφαινίλιο έχουν τις απαραίτητες ιδιότητες για χρήση στους ανιχνευτές. Όλα αυτά τα υλικά εκπέμπουν στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος και πρέπει να προστεθεί μία ουσία η παρατερφαινίλη για να εκπέμπουν στο ορατό. Η μάζα του δείγματος που μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο είναι περιορισμένη γιατί δρα ως πρόσμιξη εισάγοντας τα δικά της ενεργειακά επίπεδα που επηρεάζουν το φθορισμό και μπορεί να προκαλέσουν αποχρωματισμό ή διάθλαση, πρέπει λοιπόν να προσδιοριστεί η ακριβής ελάχιστη μάζα έτσι ώστε να μην υπάρχει πολύ μεγάλη μείωση στην αποδοτικότητα του ανιχνευτή. Υπάρχουν οι εξής μηχανισμοί μείωσης του φθορισμού:

Χημικός τρόπος: Προκαλείται από τα υλικά που δεν φθορίζουν και απορροφούν την ενέργεια του φθορισμού αποδίδοντάς την πάλι αλλά με φθορίζουσα μορφή

Χρωματική μείωση: Τα δείγματα, χημικές ή φωτοχημικές αντιδράσεις που προκαλούν αλλαγή των ιδιοτήτων του φθορίζοντος υλικού του θαλάμου.

Φωτονική μείωση: Η συσσωμάτωση με ασυμβίβαστα υλικά μπορεί να προκαλέσει ετερογενή μίξη της ακτινοβολίας.

B.3 Ανιχνευτές ημιαγωγών-επιφανειακών φραγμάτων

Μακράν οι πιο διαδεδομένες ανιχνευτικές συσκευές ημιαγωγών είναι αυτές των επιφανειακών φραγμάτων (surface barrier detectors). Οι ανιχνευτές αυτοί βασίζονται στην επαφή που σχηματίζεται μεταξύ ενός ημιαγωγού και συγκεκριμένων μετάλλων, συνήθως n-τύπου πυρίτιο με χρυσό ή p-τύπου πυρίτιο με αλουμίνιο. Λόγω των διαφορετικών επιπέδων Fermi αυτών των υλικών, όταν συνενωθούν, προκαλείται μείωση των επιπέδων των ζωνών του ημιαγωγού, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.

Fig. 10.11. Formation of a Schottky barrier junction

Fig. 10.12. Schematic diagram of a surface barrier detector (from Ortec [10.28])

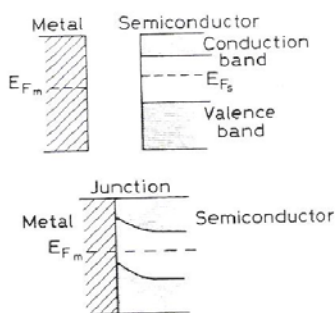


Fig. 10.11

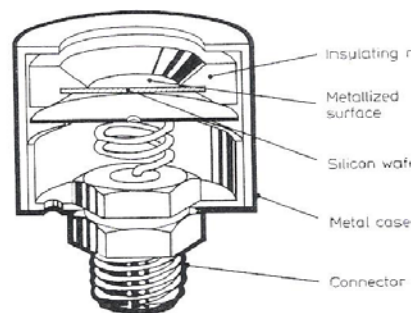


Fig. 10.12

Η κατάσταση αυτή είναι παρόμοια με τη δημιουργία μίας ηρεπαφής και έτσι εμφανίζεται μία κενή ζώνη που εκτείνεται εξ' ολοκλήρου εντός του ημιαγωγού. Οι συνδέσεις αυτές είναι επίσης γνωστές με τον όρο Schottky barriers. Για πυρίτιο υψηλής αντίστασης, αναμένεται πάχος της νεκρής ζώνης περί τα 5mm.

Η παραγωγή αυτών των συσκευών είναι πιο απλή από των διόδων διαχυμένης επαφής και με πολλά πλεονεκτήματα. Κατασκευάζονται σε θερμοκρασία δωματίου, όπου αρχικά η επιφάνεια του πυριτίου

χαρακώνεται, αφήνεται να οξειδωθεί και έπειτα αποτίθεται ένα λεπτό στρώμα ($\sim 40\mu\text{g}/\text{cm}^2$) χρυσού μέσω εξάτμισης.

Οι ανιχνευτές επιφανειακών φραγμάτων μπορούν να κατασκευαστούν με ποικιλία παχών και νεκρών ζωνών. Εάν ο ανιχνευτής δεν είναι πολύ λεπτός, είναι πιθανό η κενή περιοχή να εκτείνεται σε όλο του το μήκος. Επιπλέον, αυξάνοντας την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού σε τέτοιου είδους ανιχνευτές, υπάρχει ενίσχυση στο χρόνο συλλογής φορτίου, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τον ταχύτερο χρόνο ανόδου του σήματος. Ένα μειονέκτημα των επιφανειακών φραγμάτων είναι η ευαισθησία τους στο φως. Το λεπτό στρώμα χρυσού που καλύπτει τον ημιαγωγό, είναι ανίκανο να σταματήσει το περιβάλλον φως και εφόσον η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος στο ορατό έχει ενέργεια από 2 έως 4 eV, (ενώ το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου είναι μόλις 1.1 eV) θα ληφθεί σήμα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να παρέχεται στον ανιχνευτή μία περίφραξη φωτός. Οι συσκευές αυτές είναι επίσης ευαίσθητες στην επιφανειακή ρύπανση και πρέπει να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα ούτως ώστε η επιφάνεια του ανιχνευτή να παραμένει καθαρή.

ΕΝΤΥΠΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Glenn F.Knoll (1989) **“Radiation detection and measurement”**
2. William R.Leo (1994) **“Techniques for nuclear and particle physics experiments”**
3. Michael F. L’Annunziata (2003) **“Handbook of radioactivity analysis”**
4. James Edward Turner (2007) **“Atoms, radiation and radiation protection”**
5. Paul W. Nicholson (1974) **“Nuclear electronics”**
6. S.S. Kapoor, V. Ramamurthy (1993) **“Nuclear radiation detectors”**
7. Frank H. Attix (1986) **“Introduction to radiological physics and radiation dosimetry”**
8. Syed Naeem Ahmed (2007) **“Physics and engineering of radiation detection”**
9. Ευάγγελος Ν. Γαζής (1999) **«Ιοντίζουσες ακτινοβολίες»**
10. W. N. Gottingham, D.A. Greenwood (1986) **“An introduction to nuclear Physics”**
11. Π. Α. Ασημακόπουλου (2005) **«Εισαγωγή στην πυρηνική Φυσική»**

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

12. [http://en.wikipedia.org/wiki/European Atomic Energy Community](http://en.wikipedia.org/wiki/European_Atomic_Energy_Community)
13. [http://europa.eu/legislation_summaries/institutional affairs/treaties/treaties_euratom_el.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/institutional_affairs/treaties/treaties_euratom_el.htm)
14. [http://esarda2.jrc.it/references/Technical sheets/ts-Euratom-040304.pdf](http://esarda2.jrc.it/references/Technical_sheets/ts-Euratom-040304.pdf)
15. <http://eur-lex.europa.eu/en/treaties/dat/12006A/12006A.htm>
16. http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/radiation_protection_en.htm
17. http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/article_35_en.htm
18. http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/art35/main_findings_greece_en.pdf
19. http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/art35/tech_report_greece_en.pdf
20. http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_271_en.pdf
21. http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/law_radprotection1
22. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P088_scr.pdf
23. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1216_web.pdf
24. <http://www.eeae.gr/gr/docs/president/RADIENERGIA%20final.pdf>
25. http://ipta.demokritos.gr/Documents/ERL-1-erp032009_takis.pdf
26. http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/rife14_final.pdf
27. http://www.euphix.org/object_class/euph_airborne_particulate_matter.html
28. <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/sdfp/2008/KatsanikakiAmanta/attached-document/2008katsanikaki.pdf>

-
29. http://web.princeton.edu/sites/ehs/osradtraining/ext_int_doselimits/doselimits2.htm#Limits
 30. http://www.infim.ro/rrp/2009_61_4/art23Stochioiu.pdf
 31. <http://www.bitt.at/pdfs/AMS02Ver22.pdf>

**ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΑ ΦΥΛΛΑΔΙΑ-
ΟΠΤΙΚΟΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ**

32. Joint Research Center European Commission, Nuclear Science and Technology (1993) **“Environmental radioactivity in the European Community”**
33. <http://www.physics.ntua.gr/~yorgos/med/>
34. <http://nuclear.ntua.gr/arcas/education/courses/mat-pt-semfe.el.html>
35. Bitt Scada (2006) **“Manual of AMS02”**