



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Μελέτη των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του
ραδονίου μέσω της φασματοσκοπίας ακτινών-γ
κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Κατερίνας Λιβανού

Ερευνητικός Επιβλέπων:	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων:
Διονύσης Πατήρης	Μιχάλης Κόκκορης
Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών	Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος, 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΘΥΓΑΤΡΙΚΩΝ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΩΝ
ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ
ΑΚΤΙΝΩΝ- γ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της
ΛΙΒΑΝΟΥ ΚΑΤΕΡΙΝΑ

Ερευνητικός Επιβλέπων: Πατήρης Διονύσης
Ακαδημαϊκός Επιβλέπων: Κόκκορης Μιχάλης

Αθήνα, 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ και ερευνητικό επιβλέπων Δρ. Πατήρη Διονύση, τον καθηγητή του Ε.Μ.Π και επιβλέπων τη διπλωματικής εργασίας τον Καθ. Κόκκορη Μιχάλη καθώς και τον ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ Δρ Τσαμπάρη Χρήστο για την ανάθεση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω μία μεγάλη ομάδα ανθρώπων, ακαδημαϊκών και φοιτητών για τις συμβουλές που μου παρείχαν αλλά και τους δικούς μου ανθρώπους για την συνεχή ενθάρρυνση τους για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα. Κάλφα Κώστα για την χορήγηση του προγράμματος ανάλυσης μετρήσεων SPECTRW.

Abstract

Sources of natural radioactivity are the natural radioactive isotopes present on Earth as well as the cosmic radiation coming from space. The radioactive radioisotopes are produced from the radioactive decay chains of ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th as well as from the isotope of ^{40}K . The important elements responsible for the radiation to humans and the environment is the radon gas Rn and its progenies. Therefore they have an interest in scientific studies. Researches have shown that natural radioactivity presents significant fluctuations during the day. It has also been observed that radon progenies ^{214}Pb και ^{214}Bi are responsible for the increment of natural radioactivity during rainfalls, compared to the days with no rain. The phenomenon contributes to further increase of radioactivity in the atmospheric air. Therefore it becomes dangerous for human health in areas with high concentrations of natural radionuclides, such as mines, oil or gas extraction areas, thermal springs, lignite-producing areas for electricity and so on.

Radioisotopes have been a major research subject for many years, and due to their ability to attach to atmospheric aerosols, they are used as tracers to study and understand various atmospheric processes such as rainfalls. The present study aims at monitoring radon progenies in the atmospheric air, before, during, and after rainfall events for a period of five months using gamma-spectroscopy. More specific, an experiment was conducted using the detection system GeOMAREA for in-situ measurements, a scintillator consisting from a 2"x2" CeBr₃ crystal at the HCMR building (Hellenic Centre for Marine Research) in the region of Anavyssos in South Attica. Hourly data for the counting gamma ray rate of the isotopes ^{214}Pb και ^{214}Bi were obtained for five months. At the same time, the radioactivity from thorium daughter (^{220}Rn), ^{208}Tl , and from the isotope ^{40}K , were also studied. Meteorological data were also obtained from a weather station placed on the courtyard of the HCMR building which may be likely to be related to the above phenomenon.

From the data analysis an increase of the counting gamma ray intensity of ^{214}Pb and ^{214}Bi was observed for each rainfall event. On the contrary, thoron and ^{40}K did not show any significant change. Thus the radionuclides responsible for the change of the atmospheric radioactivity during rainfall are radon (^{222}Rn) progenies. Consequently a methodology has been developed where the atmospheric background gamma ray counting rate can be measured directly when it is not raining aiming at facilitating data analysis. Through statistical analysis, efforts were made to correlate the increase of radioactivity during rains with atmospheric factors indicating no direct correlation. On the other hand, there was a direct correlation between the gamma ray counting rate per rain height and rain intensity. Finally, a correlation of the phenomenon with the wind direction was observed indicating that the phenomenon depends on the geophysical and geomorphological conditions of the environment in which the experiment is conducted.

Περίληψη

Πηγές φυσικής ραδιενέργειας αποτελούν τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν στη Γη καθώς και από την κοσμική ακτινοβολία που έρχεται από το διάστημα. Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα προέρχονται από τις ραδιενεργές σειρές του ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th καθώς και από το φυσικό ισότοπο του ^{40}K . Σημαντικότερο στοιχείο που είναι υπεύθυνο για την συνολική ακτινοβολία που δέχεται ο άνθρωπος και το περιβάλλον είναι το αδρανές αέριο ραδόνιο Rn και τα θυγατρικά του. Από έρευνες έχει παρατηρηθεί ότι η φυσική ραδιενέργεια παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας (Dueñas, Pérez, Fernández, & Carretero, 1996; Florea & Dului, 2012; Gaso, Cervantes, Segovia, & Espindola, 1994; Porstendörfer, 1994). Παρατηρήθηκε επίσης να γίνεται σημαντική η αύξηση της ραδιενέργειας κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων λόγω των ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου (^{214}Pb και ^{214}Bi) (Elperin, Fominykh, & Krasoviton, 2015; Fujinami, 1997; Greenfield, Domondon, Tsuchiya, & Tomiyama, 2003; Hornig & Jiang, 2004; Livesay, Blessinger, Guzzardo, & Hausladen, 2014; Mercier et al., 2009; Takeyasu, Iida, Tsujimoto, Yamasaki, & Ogawa, 2006). Η αύξηση της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να γίνει επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία.

Τα ραδιοϊσότοπα αποτελούν βασικό αντικείμενο ερευνητικής μελέτης πολλά χρόνια και λόγω της ικανότητας τους να προσκολλώνται στα αεροζόλ που κινούνται ελεύθερα στον ατμοσφαιρικό αέρα, χρησιμοποιούνται ως ιχνηθέτες για την μελέτη και την κατανόηση ατμοσφαιρικών διεργασιών όπως είναι η βροχές (Porstendörfer, 1994; Papastefanou, 2008). Επομένως, η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη και την παρακολούθηση των ραδιενεργών προϊόντων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από τις βροχοπτώσεις για διάστημα πέντε μηνών μέσω της φασματοσκοπίας-γ. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε πείραμα στο κτίριο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών), στην περιοχή της Αναβύσσου στην Ανατολική Αττική. Χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτή σπινθηρισμού για in-situ μετρήσεις GeoMAREA (που αποτελείται από έναν κρύσταλλο Βρωμιούχου Δημητρίου CeBr_3 , διαστάσεων 2"x2"), λαμβάνοντας καθημερινά ωριαία δεδομένα του ρυθμού ακτινοβολίας- γ των ισοτόπων ^{214}Pb και ^{214}Bi . Παράλληλα μελετήθηκε και η ραδιενέργεια προερχόμενη από το θυγατρικό του θορονίου (^{220}Rn), το ^{208}Tl , καθώς και τη ραδιενέργεια που προέρχεται από το φυσικό ισότοπο ^{40}K . Επιπροσθέτως συλλέχθηκαν ατμοσφαιρικοί παράγοντες από τον μετεωρολογικό σταθμό τοποθετημένο στον προαύλιο χώρο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε και ερευνήθηκε πιθανή σχέση με το παραπάνω φαινόμενο.

Από την ανάλυση δεδομένων παρατηρήθηκε αύξηση των θυγατρικών ^{214}Pb και ^{214}Bi για κάθε γεγονός βροχής ενώ το ^{40}K δεν παρουσιάζει σημαντική αλλαγή. Το ραδιοϊσότοπο που είναι υπεύθυνο για την αύξηση της ραδιενέργειας στις βροχές είναι το ραδόνιο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του ρυθμού ακτινοβολίας- γ ανά ύψος βροχής με την ένταση της βροχής. Επίσης η κατεύθυνση του ανέμου είχε καθοριστικό ρόλο στην ενεργότητα των θυγατρικών πυρήνων του ραδονίου υποδεικνύοντας ότι το φαινόμενο εξαρτάται από το αν ο άνεμος έρχεται από το θαλάσσιο ή το χερσαίο περιβάλλον.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές πυρηνικής φυσικής και της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ με την ύλη. Παράλληλα γίνεται μία σύντομη αναφορά στην φυσική ραδιενέργεια που βρίσκεται στην Γη δίνοντας έμφαση στις ιδιότητες του ραδονίου και των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων. Επιπρόσθετα, αναφέρονται σύντομα οι διαδικασίες δημιουργίας του βρόχινου νερού και ορίζονται οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για ανάλυση στην παρούσα εργασία.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Γίνεται μια αναφορά των χαρακτηριστικών και της λειτουργίας του ανιχνευτικού συστήματος GeoMAREA για την τεχνική in-situ φασματοσκοπία- γ των μετρήσεων των επιπέδων ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία βαθμονόμησης του συστήματος, και οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για την λήψη, ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που κατέγραψε ο ανιχνευτής. Παράλληλα αναλύονται οι διαδικασίες επεξεργασίας των ατμοσφαιρικών δεδομένων που ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Αναβύσσου.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται σε χρονοσειρές τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων ραδιενέργειας. Επιπροσθέτως, αναλύεται εκτενώς η στατιστική ανάλυση σε σχέση με τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες με τα δεδομένα ραδιενέργειας, καταλήγοντας σε μη εμφανή συσχέτιση μεταξύ τους. Τέλος παρουσιάζεται η συσχέτιση της ποσότητας του ρυθμού ακτινοβολίας- γ ανά ύψος βροχής με τη ένταση της βροχής.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Abstract	3
Περίληψη.....	4
Λίστα σχημάτων	8
Λίστα πινάκων	15
1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	18
1.1 Στοιχεία θεωρίας	18
1.1.1 Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης.....	19
1.1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-γ με την ύλη	22
1.1.3 Ανίχνευση ακτινοβολίας – γ.....	25
1.1.4 Ραδιενεργές σειρές- Ραδιενέργεια περιβάλλοντος	30
1.1.5 Ραδόνιο και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα	32
1.2 Στοιχεία ατμοσφαιρικής φυσικής	33
1.2.1 Αλληλεπίδραση των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα	33
1.2.2 Ερευνητικό υπόβαθρο και συμμετοχή των ραδιενεργών αερολυμάτων στο σχηματισμό νεφών και σταγόνων βροχής.....	34
1.2.3 Χρήσιμα μεγέθη της ατμοσφαιρικής φυσικής.....	37
2. Υλικά και Μεθοδολογία.....	38
2.1 Μετρητικά συστήματα και πειραματική διάταξη.....	38
2.1.1 Ανιχνευτές σπινθηρισμού.....	38
2.1.2 Υποθαλάσσιο ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA	41
2.1.3 Μετεωρολογικός σταθμός Αναβύσσου	42
2.1.4 Πειραματική διάταξη.....	43
2.1.5 Λήψη δεδομένων.....	43
2.2 Γεωμετρία των in-situ μετρήσεων	44
2.3 Επεξεργασία και έλεγχος δεδομένων	47

2.3.1 Προσδιορισμός και παρακολούθηση περιοχών ενδιαφέροντας (ROIs) των φασμάτων.	47
2.3.2 Ανάλυση φασμάτων.....	55
2.3.3 Μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού καθαρών γεγονότων φωτοκορυφών των θυγατρικών του ραδονίου.....	56
2.3.4 Ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων	63
2.3.5 Δημιουργία βάσης δεδομένων	64
3. Αποτελέσματα και ερμηνεία αποτελεσμάτων	65
3.1 Χρονοσειρές δεδομένων ραδιενέργειας και μετεωρολογικών παραμέτρων	65
3.1.1 Νοέμβριος 2017	65
3.1.2 Δεκέμβριος 2017	72
3.1.3 Ιανουάριος 2018	77
3.1.4 Φεβρουάριος 2018	82
3.1.5 Μάρτιος 2018	86
3.2 Μελέτη της επίδρασης της διεύθυνσης του ανέμου	90
3.3 Συσχέτιση με ατμοσφαιρικές παραμέτρους	99
3.3.1 Συσχέτιση ρυθμών ακτινοβολία-γ με θερμοκρασία (T), υγρασία (H), πίεση (P).....	99
3.3.2 Συσχέτιση με ατμοσφαιρικές παραμέτρους	102
3.3 Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	108
Παράρτημα.....	111

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1: Η μεταβολή της ενεργότητας του θυγατρικού και του μητρικού πυρήνα κατά τη μεταβατική ισορροπία ($\lambda_2 > \lambda_1$), τη διαρκή ισορροπία ($\lambda_2 \gg \lambda_1$) και την έλλειψη ισορροπίας ($\lambda_2 < \lambda_1$).

Σχήμα 1.2: Γραφική απεικόνιση της διαρκούς ισορροπίας η οποία επιτυγχάνεται ύστερα από 25 ημέρες μεταξύ του μητρικού πυρήνα ^{226}Ra και των επόμενων κατά σειρά 4 θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων.

Σχήμα 1.3: Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας- γ μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Σχήμα 1.4: Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας $-\gamma$ μέσω της σκέδασης Compton.

Σχήμα 1.5: Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ μέσω της δίδυμης γένεσης.

Σχήμα 1.6: Γραφική παράσταση, όπου απεικονίζεται η πιθανότητα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ ενέργειας E_γ με τους τρεις κυρίαρχους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης, στο μέσο με ατομικό αριθμό Z .

Σχήμα 1.7: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ με ανιχνευτή πολύ μικρού μεγέθους όπου οι δευτερογενείς ακτίνες- γ διαφεύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδράσουν.

Σχήμα 1.8: Ενεργειακά φάσματα του πολύ μικρού ανιχνευτή. Στα αριστερά απεικονίζεται το αναμενόμενο φάσμα για ενέργειες ακτινών- γ μικρότερες από 1.022MeV που κυριαρχούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και σκεδάσεις Compton και στα δεξιά το φάσμα για ενέργειες μεγαλύτερες από 1.022MeV, όπου συμβαίνει και δίδυμη γέννηση.

Σχήμα 1.9: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ με ανιχνευτή πολύ μεγάλου μεγέθους όπου οι δευτερογενείς ακτίνες- γ απορροφούνται πλήρως από τον ανιχνευτή.

Σχήμα 1.10: Ενεργειακά φάσματα πολύ μεγάλου ανιχνευτή.

Σχήμα 1.11: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ σε έναν πραγματικό ανιχνευτή.

Σχήμα 1.12: Τυπικό φάσμα με τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις ακτινοβολίας- γ , που καταγράφονται από έναν ανιχνευτή.

Σχήμα 1.13: Υπολογισμός της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας.

Σχήμα 1.14: Οι ραδιενεργές σειρές του ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U .

Σχήμα 1.15: Αλληλεπίδραση των θυγατρικών του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα ύστερα από την μεταστοιχείωση τους από τον μητρικό πυρήνα του Rn.

Σχήμα 2.1α: Γεωμετρία και εξαρτήματα ενός τυπικού φωτοπολλαπλασιαστή.

Σχήμα 2.1β: Γεωμετρία και εξαρτήματα ενός τυπικού ανιχνευτή σπινθηρισμού.

Σχήμα 2.2: α) Αριστερά καθαρός κρύσταλλος, β) Δεξιά: κρύσταλλος με προσμίξεις.

Σχήμα 2.3: Περιοχή πειραματικών μετρήσεων στην Ανάβυσσο, Νότια Αττική.

Σχήμα 2.4: Το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA τοποθετημένο στην οροφή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Σχήμα 2.5: Ολικός συντελεστής εξασθένησης μ της ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων E_γ .

Σχήμα 2.6: Ενεργές αποστάσεις r_{eff} ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων E_γ .

Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίς γεγονός βροχής.

Σχήμα 2.8: Συμπεριφορά του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολίας- γ $\text{cps}_{\text{ROI}s}$ για τις ενεργειακές περιοχές του $^{214}\text{Pb}(351.9\text{keV})$, $^{214}\text{Bi}(609.3\text{keV})$, $^{208}\text{Tl}(2614.5\text{keV})$, και του συνολικού ρυθμού γεγονότων cps με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Σχήμα 2.9: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV (^{40}K).

Σχήμα 2.10: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 00:00π.μ. έως 12:00μ.μ.

Σχήμα 2.11: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 12:00μ.μ. έως τις 15:00 μ.μ.

Σχήμα 2.12: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 15:00μ.μ. έως τις 18:00 μ.μ.

Σχήμα 2.13: Συμπεριφορά του ρυθμού γεγονότων $\text{cps}_{\text{ROI}s}$ για τις ενεργειακές περιοχές του $^{214}\text{Pb}(351.9\text{keV})$, $^{214}\text{Bi}(609.3\text{keV})$, $^{208}\text{Tl}(2614.5\text{keV})$, και του ρυθμού γεγονότων cps με τη μεταβολή της θερμοκρασίας

Σχήμα 2.14: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα. Με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύεται φάσμα χωρίς γεγονός βροχής, με το μπλε χρώμα υποδεικνύεται φάσμα βροχόπτωσης.

Σχήμα 2.15: Ενεργειακό φάσμα μίας ώρας χωρίς βροχή.

Σχήμα 2.16: : Αθροισμένο ενεργειακό φάσμα τριών ωρών χωρίς βροχή.

Σχήμα 2.17: Ενεργειακό φάσμα μίας ώρας με βροχή.

Σχήμα 2.18: Η φωτοκορυφή ενέργειας 583.2keV του ^{208}Tl στο εμβαδόν της φωτοκορυφή ενέργειας 609.3keV του ^{214}Bi .

Σχήμα 2.19:Κανονική κατανομή για το σύνολο των δεδομένων χωρίς βροχή του λόγου $\frac{\text{cps}_{\text{net}_{583.2\text{keV}}}}{\text{cps}_{\text{net}_{614.5\text{eV}}}}$ των καθαρών ρυθμών γεγονότων του ^{208}Tl .

Σχήμα 2.20: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 351.9keV του ^{214}Pb για τα δεδομένα με γεγονότα βροχής.

Σχήμα 2.21: : Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της φωτοκορυφής ενέργειας 609.3keV του ^{214}B για τα δεδομένα με γεγονότα βροχής.

Σχήμα 2.22: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 351.9keV του ^{214}Pb για όλα δεδομένα.

Σχήμα 2.23: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 609.3keV του ^{214}Bi για όλα δεδομένα.

Σχήμα 2.24:Αντιστοίχιση των κατευθύνσεων του ανέμου σε μοίρες $^{\circ}$.

Σχήμα 2.25:Δείγμα της βάσης δεδομένων για την καταχώρηση, την επεξεργασία, την ανάλυση και τον έλεγχο των δεδομένων.

Σχήμα 3.1:Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Νοέμβριο 2017.

Σχήμα 3.2: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα με βροχοπτώσεις για τον Νοέμβριο 2017.

Σχήμα 3.3: 18-20 Νοεμβρίου 2017, όπου παρατηρούνται αυξημένοι οι καθαροί ρυθμοί cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) και για χρονική διάρκεια έως και 2 ώρες που

χρειάζονται τα ^{214}Pb και ^{214}Bi προερχόμενα από την βροχή να αποδιεγερθούν και να επανέλθουν σε τιμές χωρίς βροχή.

Σχήμα 3.4: Απεικόνιση του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) ^{214}Bi (609.3keV) και στην ενεργειακή περιοχή των 1460.8keV του ^{40}K , για το χρονικό διάστημα από 16 Νοεμβρίου 2017 έως 20 Νοεμβρίου 2017.

Σχήμα 3.5: Ενεργειακό φάσμα για την 17^η Νοεμβρίου 2017 στην περιοχή ενέργειας 1460.8keV και απεικονίζονται οι 8 φωτοκορυφές του ^{214}Bi . Με το κόκκινο χρώμα απεικονίζεται φάσμα χωρίς γεγονός βροχής και με το μπλε χρώμα απεικονίζεται φάσμα με βροχή.

Σχήμα 3.6: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV), του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 16 Νοεμβρίου 2017 έως 20 Νοεμβρίου 2017.

Σχήμα 3.7: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Νοέμβριο 2017.

Σχήμα 3.8: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχή για τον Νοέμβριο 2017.

Σχήμα 3.9: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Δεκέμβριο 2017.

Σχήμα 3.10: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Δεκέμβριο 2017.

Σχήμα 3.11: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ^{208}Tl (2614.5keV), του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Δεκέμβριο 2017.

Σχήμα 3.12: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Δεκέμβριο 2017.

Σχήμα 3.13: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Δεκέμβριο 2017.

Σχήμα 3.14: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 28/01/2018 έως 03/02/2018, όπου παρουσιάζονται αυξημένοι.

Σχήμα 3.15: Κατανομή του ολικού ρυθμού γεγονότων cps για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Ιανουάριο 2018 έως 27/01/2018.

Σχήμα 3.16: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (351.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για τον Ιανουάριο 2018.

Σχήμα 3.17: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) συναρτήσει του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (352.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 10 Ιανουαρίου 2018 έως 14 Ιανουαρίου 2018.

Σχήμα 3.18: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Ιανουάριο 2018.

Σχήμα 3.19: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Ιανουάριο 2018.

Σχήμα 3.20: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (351.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για δεδομένα με και χωρίς βροχοπτώσεις για τον Φεβρουάριο 2018.

Σχήμα 3.21: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (352.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για τον Φεβρουάριο 2018.

Σχήμα 3.22: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) συναρτήσει του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (352.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 13 Φεβρουαρίου 2018 έως 17 Φεβρουαρίου 2018.

Σχήμα 3.23: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Φεβρουάριο 2018.

Σχήμα 3.24: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Φεβρουάριο 2018.

Σχήμα 3.25: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (351.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Μάρτιο 2018.

Σχήμα 3.26: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ²¹⁴Pb (351.9keV) και ²¹⁴Bi (609.3keV) για τον Μάρτιο 2018.

Σχήμα 3.27: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) , του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (352.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 17 Μαρτίου 2018 έως 21 Μαρτίου 2018.

Σχήμα 3.28: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Μάρτιο 2018.

Σχήμα 3.29: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Φεβρουάριο 2018.

Σχήμα 3.30: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Σχήμα 3.31: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή για το ^{214}Pb για ενέργεια 351.9keV.

Σχήμα 3.32: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή για το ^{214}Bi για ενέργεια 609.3keV.

Σχήμα 3.33: Διάγραμμα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}}$ συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.

Σχήμα 3.34: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}_{\text{net}}(351.9\text{keV})}$ για το ^{214}Pb , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.

Σχήμα 3.35: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}_{\text{net}}(609.3\text{keV})}$ για το ^{214}Bi , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.

Σχήμα 3.36: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για όλα τα δεδομένα με βροχή.

Σχήμα 3.37: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα με βροχή για το ^{214}Pb για ενέργεια 351.9keV.

Σχήμα 3.38: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα με βροχή για το ^{214}Bi για ενέργεια 609.3keV.

Σχήμα 3.39: Διάγραμμα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}}$ - cps_{rain,max}, συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.

Σχήμα 3.40: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}_{\text{net}}(351.9\text{keV})}$ - cps_{rain,max} για το ^{214}Pb , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.

Σχήμα 3.41: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ $\overline{\text{cps}}_{\text{net}(609.3\text{keV})} - \text{cps}_{\text{rain,max}}$ για το ^{214}Bi , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.

Σχήμα 3.42: Απεικόνιση των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών του ρυθμού ακτινοβολίας- γ . Τα μπλε βέλη αναπαριστούν τις διευθύνσεις με τις μέγιστες τιμές και με πορτοκαλί βέλη τις διευθύνσεις με τις ελάχιστες τιμές.

Σχήμα 3.43: Η ποσότητα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινών- γ ανά χιλιοστό βροχής $\frac{\text{cps}}{\text{mm}}$ συναρτήσει της ραγδιότητας της βροχής.

Λίστα πινάκων

Πίνακας 2.1: Ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος ROIs για τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα.

Πίνακας 2.2: Ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος ROIs για τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα.

Πίνακας 2.3: Αντιστοίχιση των διευθύνσεων του ανέμου σε μοίρες °.

Πίνακας 3.1: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Νοέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 40 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.2: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Νοέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 40 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.3: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Δεκέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 38 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.4: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Δεκέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 38 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Ιανουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 45 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.6: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Ιανουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 45 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.7: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Φεβρουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 47 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.8: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Φεβρουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 47 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.9: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Μάρτιο 2018, με συνολική καταγραφή 10 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.10: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Μάρτιο 2018, με συνολική καταγραφή 10 γεγονότων βροχής.

Πίνακας 3.11: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις μέσες τιμές $\overline{cps}, \overline{cps_{net}}$, για τα δεδομένα χωρίς βροχές και $cps_{max}, cps_{net_{max}}$ του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτίνων-γ, του ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα για τα δεδομένα με βροχές.

Πίνακας 3.12: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τα δεδομένα με βροχές.

Πίνακας 3.13: Μέσες τιμές $\overline{cps}, \overline{cps_{net (351.9keV)}}$ και $\overline{cps_{net (609.3keV)}}$ για τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Πίνακας 3.14: Μέσες τιμές \overline{cps} , μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ολικό ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ.

Πίνακας 3.15: Μέσες τιμές $\overline{cps_{net (351.9keV)}}$, μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ για το ^{214}Pb (351.9keV).

Πίνακας 3.16: Μέσες τιμές $\overline{cps_{net (609.3keV)}}$, μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ για το ^{214}Bi (609.3keV).

Πίνακας 3.17: Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς cps & cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV), ^{214}Bi (609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ^{40}K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Πίνακας 3.18: Υπολογισμός του συντελεστή μονότονης συσχέτισης Spearman rho για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς cps & cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV), ^{214}Bi (609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ^{40}K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Πίνακας 3.19: Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς cps & cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV), ^{214}Bi (609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ^{40}K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα με βροχή.

Πίνακας 3.20: Υπολογισμός του συντελεστή μονότονης συσχέτισης Spearman rho για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς cps & cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV), ^{214}Bi (609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ^{40}K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα με βροχή.

Πίνακας συντομογραφιών

<i>cps</i>	ολικός ρυθμός γεγονότων ακτινοβολία-γ
<i>cps_{ROI}</i>	ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας-γ σε ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος της φωτοκορυφής
<i>cps_{net.}</i>	ρυθμός καθαρών γεγονότων ακτινοβολίας-γ της φωτοκορυφής
ROI	Ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος (Range of interest)
T	Θερμοκρασία °C
H	Υγρασία (%)
P	Πίεση (mbar)

1

1. Εισαγωγικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται η μελέτη των μεταβολών της συγκέντρωσης των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων, μέσω *in situ* φασματοσκοπίας- γ . Για τον σκοπό αυτό, στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται θεωρητικά στοιχεία σε σχέση με: τις φυσικές ραδιενεργές σειρές, την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας γάμμα με την ύλη και την ανίχνευσή της, τη συμπεριφορά του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, τα απαραίτητα μεγέθη για τη συνεχή παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων και των βροχοπτώσεων.

1.1 Στοιχεία θεωρίας

Η ραδιενεργός αποδιέγερση ενός ασταθούς πυρήνα είναι η αυθόρμητη μεταστοιχείωσή του και η έκλυση ενέργειας με την εκπομπή ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Ο αρχικός πυρήνας (μητρικός πυρήνας) μεταστοιχείωνεται σε νέο πυρήνα (θυγατρικός πυρήνας) με την εκπομπή ενός πυρήνα ${}^4\text{He}$ (ακτινοβολία- α) από τον πυρήνα του ατόμου, ή με την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου (ακτινοβολία- β^-/β^+), και συνήθως ακολουθείται με την ταυτόχρονη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή την ακτινοβολία- γ . Οι ασταθείς μητρικοί πυρήνες αποδιεγείρονται, με μία από τις παραπάνω διαδικασίες, σε θυγατρικούς πυρήνες που μπορεί να είναι επίσης ασταθείς και να μεταστοιχειώνονται με τη σειρά τους σε έναν τρίτο πυρήνα κλπ. Η διαδικασία αποδιέγερσης ακολουθείται με την εκπομπή ακτινοβολίας και συνεχίζεται μέχρι τη δημιουργία ενός σταθερού πυρήνα. Με αυτόν τον μηχανισμό δημιουργούνται αλυσίδες διάσπασης ασταθών πυρήνων ή αλλιώς ραδιενεργές σειρές. Στη Γη βρίσκονται τέσσερις φυσικές ραδιενεργές σειρές με κυριότερες αυτές του ${}^{238}\text{U}$ (ουράνιου), του ${}^{232}\text{Th}$ (θορίου) και του ${}^{235}\text{U}$ (ακτινίου) που θα συζητηθούν στην ενότητα 1.1.4.

1.1.1 Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης

Ο αριθμός των πυρήνων ενός ασταθούς ραδιονουκλιδίου ύστερα από χρόνο t δίνεται από τον νόμο της ραδιενέργειας σύμφωνα με τη σχέση:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Εξ.: 1.1}$$

όπου N ο αριθμός των πυρήνων ύστερα από χρόνο t και N_0 ο αριθμός των πυρήνων τη χρονική στιγμή $t=0$. Η σταθερά διάσπασης λ δηλώνει την πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου και υπολογίζεται από τον χρόνο ημιζωής $T_{1/2}$, δηλαδή τον χρόνο που χρειάζεται ώστε να αποδιεγερθούν οι μισοί πυρήνες. Υπολογίζεται από την σχέση

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad \text{Εξ.: 1.2}$$

Η ραδιενεργός διάσπαση αποτελεί μία τυχαία διαδικασία και έτσι δεν μπορεί να προβλεφθεί πότε ένας συγκεκριμένος ασταθής πυρήνας θα αποδιεγερθεί, όμως μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός αποδιέγερσης ενός αριθμού ραδιονουκλιδίου (ενεργότητα A) από τη σχέση:

$$A \equiv \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \quad \text{Εξ.: 1.3}$$

Για ένα σύστημα όπου δεν παρατηρούνται προσθήκες και απώλειες ραδιονουκλιδίων, ο πληθυσμός κάθε θυγατρικού πυρήνα της σειράς συνεχώς αυξάνει με την τροφοδοσία από τον αμέσως προηγούμενο μητρικό πυρήνα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται με κάθε αποδιέγερση προς το αμέσως επόμενο θυγατρικό πυρήνα. Ο ρυθμός μείωσης και αύξησης του μητρικού και θυγατρικού πυρήνα αντίστοιχα, εξαρτάται από τις τιμές των σταθερών διάσπασης λ του κάθε πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, σε μια ραδιενεργό σειρά για τον μητρικό πυρήνα με πλήθος πυρήνων N_1 και σταθερά αποδιέγερσης λ_1 , και για το αμέσως επόμενο θυγατρικό ραδιονουκλίδιο της σειράς ισχύει ότι ο αριθμός των πυρήνων ισούται με τον αριθμό των μητρικών πυρήνων που μεταστοιχειώνονται σε ίσο αριθμό θυγατρικών μείον τον αριθμό των πυρήνων του θυγατρικού που με τη σειρά του αποδιεγείρονται με σταθερά αποδιέγερσης λ_2 , σε επόμενο κατά σειρά θυγατρικό, διαδικασία που περιγράφεται με την σχέση:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \text{Εξ.: 1.4}$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση έχει λύση της μορφής:

$$N_2 = \alpha e^{-\lambda_1 t} + \beta e^{-\lambda_2 t} \quad \text{Εξ.: 1.5}$$

Την χρονική στιγμή $t=0$ υπήρχαν μόνο οι μητρικοί πυρήνες, επομένως $N_{20} = 0$ και οι συντελεστές α και β υπολογίζονται να είναι:

$$\alpha = -\beta = N_{10} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad \text{Εξ.: 1.6}$$

Όπου N_{10} δηλώνει τους αρχικούς πυρήνες του μητρικού ραδιονουκλιδίου, και τελικά το πλήθος των πυρήνων του πρώτου θυγατρικού σε σχέση με τον χρόνο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$N_2 = N_{10} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad \text{Εξ.: 1.7}$$

Ο υπολογισμός για τους υπόλοιπους θυγατρικούς πυρήνες της σειράς προέρχεται από την εφαρμογή των γενικευμένων εξισώσεων του Bateman (Lilley, 2001) και δίνονται από την σχέση:

$$N_n(t) = N_{10} \left[\sum_{k=1}^{n-1} \frac{P_{k \rightarrow k+1} (e^{-\lambda_k t} - e^{-\lambda_n t})}{\lambda_n - \lambda_k} * \prod_{l=1, l \neq k}^{n-1} \frac{P_{l \rightarrow l+1}}{\lambda_l - \lambda_k} \right] \quad \text{Εξ.: 1.8,}$$

Όπου N_{10} δηλώνει του αρχικούς πυρήνες του μητρικού ραδιονουκλιδίου, $P_{i \rightarrow j}$ δηλώνει τον ρυθμό παραγωγής του ραδιονουκλιδίου j από το ραδιονουκλίδιο i και λ η σταθερά διάσπασης του κάθε ραδιονουκλιδίου.

Ανάλογα με την σταθερά αποδιέγερσης των ραδιενεργών πυρήνων, οι διαδοχικές αποδιεγέρσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στην περίπτωση που ο μητρικός πυρήνας έχει χρόνο ημιζωής μεγαλύτερο από τον θυγατρικό του τότε η πιθανότητα αποδιέγερσης του μητρικού πυρήνα είναι μικρότερη, δηλαδή $\lambda_1 < \lambda_2$. Σύμφωνα με την εξίσωση 1.7 και ύστερα από αρκετό χρόνο για δύο διαδοχικά ραδιονουκλίδια ισχύει:

$$N_2 = N_{10} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{-\lambda_1 t} \quad \text{Εξ.: 1.9}$$

Από την παραπάνω εξίσωση και συνδυάζοντας τις εξισώσεις 1.1 και 1.3 καταλήγουν στην εξίσωση:

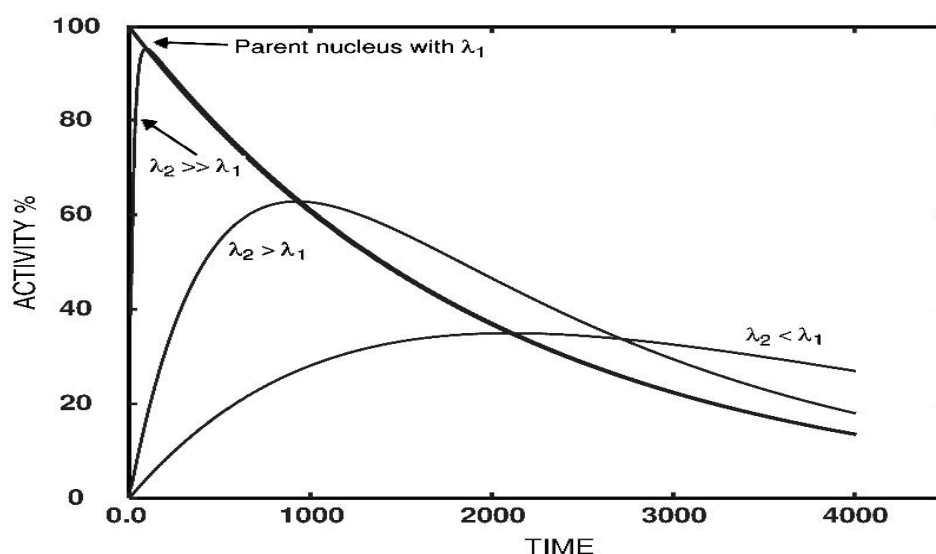
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad \text{Εξ.: 1.10}$$

Η κατάσταση αυτή ονομάζεται μεταβατική ισορροπία (transient equilibrium) όπου ο λόγος της ενεργότητας των δύο πυρήνων τείνει να παραμείνει σταθερός και ανεξάρτητος του χρόνου. Από τη στιγμή που επιτυγχάνεται η μεταβατική ισορροπία η ενεργότητα του θυγατρικού παραμένει μεγαλύτερη από εκείνη του μητρικού. Στην περίπτωση κατά την οποία ο μητρικός πυρήνας έχει πολύ μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής από το θυγατρικό του, δηλαδή $\lambda_1 \ll \lambda_2$, τότε $(\lambda_2 - \lambda_1) \approx \lambda_2$ και από την εξίσωση 1.9 καταλήγει:

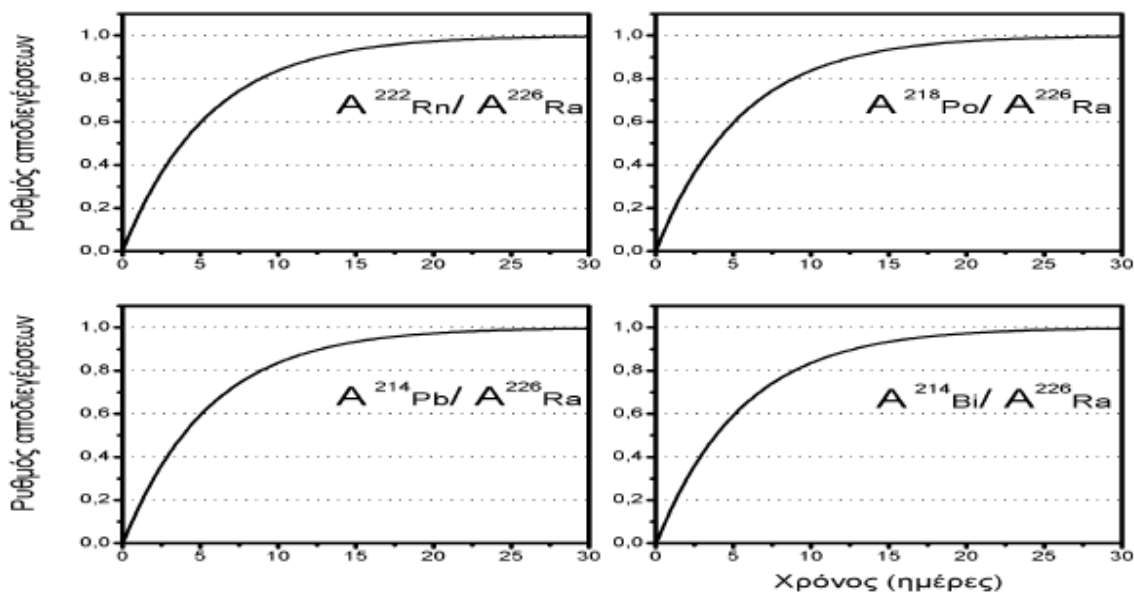
$$N_2 \lambda_2 = N_1 \lambda_1 \quad \text{Εξ.: 1.11}$$

Δηλαδή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ο μητρικός και ο θυγατρικός πυρήνας έχουν την ίδια ενεργότητα. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται διαρκής ραδιενεργός ισορροπία (secular equilibrium) ή κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας. Τέλος στην περίπτωση όπου ο μητρικός πυρήνας έχει μικρότερο χρόνο ημιζωής από τον θυγατρικό, τότε δεν επιτυγχάνεται ποτέ ραδιενεργός ισορροπία στην ραδιενεργό σειρά. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται γραφικά η μεταβολή της ενεργότητας του θυγατρικού πυρήνα για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται η κατάσταση

διαρκούς ισορροπίας μεταξύ του μητρικού ισότοπου του ραδίου ^{226}Ra και των θυγατρικών του έως και το ^{214}Bi , όπως ακολουθείται η αποδιέγερση του από την ραδιενεργό σειρά του ^{238}U . Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι λόγοι των ενεργοτήτων A του θυγατρικού πυρήνα προς τον μητρικό, όπως υπολογίστηκαν από τη χρήση των εξισώσεων Bateman (Εξ.:1.8). Όπως φαίνεται η ραδιενεργός ισορροπία επιτυγχάνεται σε περίπου 25 μέρες μεταξύ των θυγατρικών πυρήνων και του μητρικού πυρήνα, και ο λόγος των ενεργοτήτων είναι ίσος με την μονάδα. Δηλαδή ο μητρικός και ο θυγατρικός πυρήνας έχουν την ίδια ενεργότητα και αποδιηγούνται με τον ίδιο τρόπο. Η μεταστοιχείωση του ^{226}Ra στα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα απεικονίζεται στο σχήμα 1.13 της ενότητας 1.1.4 όπου παρουσιάζονται οι φυσικές ραδιενεργές σειρές πιο αναλυτικά.



Σχήμα 1.1: Η μεταβολή της ενεργότητας του θυγατρικού και του μητρικού πυρήνα κατά τη μεταβατική ισορροπία ($\lambda_2 > \lambda_1$), τη διαρκή ισορροπία ($\lambda_2 \gg \lambda_1$) και την έλλειψη ισορροπίας ($\lambda_2 < \lambda_1$).



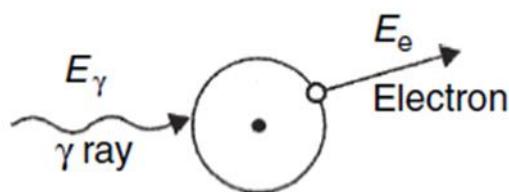
Σχήμα 1.2: Γραφική απεικόνιση της διαρκούς ισορροπίας η οποία επιτυγχάνεται ύστερα από 25 ημέρες μεταξύ του μητρικού πυρήνα ^{226}Ra και των επόμενων κατά σειρά 4 θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων.

1.1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-γ με την ύλη

Οι τρεις κυρίαρχοι μηχανισμοί που αλληλεπιδρά η ακτινοβολία- γ με την ύλη είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (photoelectric effect), η σκέδαση Compton (Compton scattering) και η δίδυμη γένεση (pair production). Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η ακτινοβολία- γ που εκπέμπεται, απορροφάται πλήρως από ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο του μέσου, και το φωτοηλεκτρόνιο διαφεύγει από το άτομο με ενέργεια ίση με:

$$E_{e^-} = E_{\gamma} - E_b \quad \text{Εξ.: 1.12}$$

όπου E_{γ} η αρχική ενέργεια της ακτίνας-γ πριν την αλληλεπίδραση και E_b η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου.



Σχήμα 1.3: Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-γ μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο αλληλεπίδρασης για ακτίνες-γ χαμηλών ενεργειών έως 200keV. Επίσης το φαινόμενο ενισχύεται για υλικά απορροφητών μεγάλου ατομικού αριθμού (Z). Η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό Z του μέσου και δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση (Knoll, 2010):

$$\tau \propto \frac{Z^n}{E_{\gamma}^{3.5}} \quad \text{Εξ.:1.13}$$

όπου ο εκθέτης n κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ 4 και 5 ανάλογα με το ενεργειακό εύρος των ακτινών-γ.

Στην σκέδαση Compton μέρος της αρχικής ενέργειας E_{γ} της ακτίνας-γ μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρόνιο του μέσου και το φωτόνιο σκεδάζεται κατά γωνία θ (Σχήμα 1.3). Η ενέργεια της σκεδαζόμενης ακτίνας-γ (E'_{γ}) σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ενέργειας και ορμής, δίνεται από τη σχέση [(Knoll, 1989); (Gilmore, 2008)]:

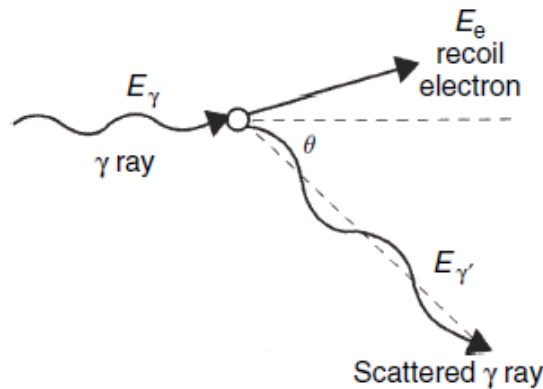
$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{mc^2}\right) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad \text{Εξ.:1.14}$$

Το ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια στο συνεχές φάσμα ενεργειών Compton (Compton continuum) που ορίζεται από την διαφορά της αρχικής ενέργειας από την τελική ενέργεια των ακτινών-γ, δηλαδή $E_{\gamma} - E'_{\gamma}$. Η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να αποκτήσει το ηλεκτρόνιο είναι για γωνία $\theta = \pi$ (180°) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{max} = \frac{2E_{\gamma}^2}{2E_{\gamma} + mc^2}$$

Εξ.: 1.15

Η πιθανότητα να συμβεί σκέδαση Compton εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμα ως στόχοι της σκέδασης, επομένως αυξάνεται γραμμικά με το Z και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της ενέργειας της ακτίνας- γ (Knoll, 2010).



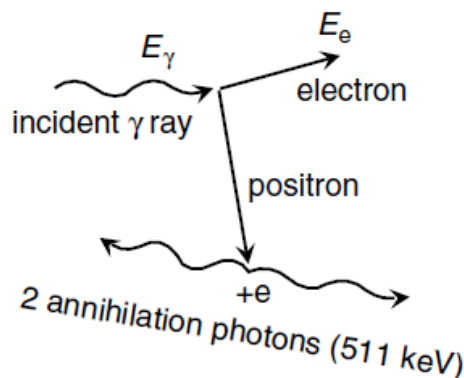
Σχήμα 1.4. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας γ μέσω της σκέδασης Compton.

Η δίδυμη γένεση είναι ενεργειακά δυνατή μόνο όταν η ακτίνα- γ έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το διπλάσιο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου, δηλαδή $E_{\gamma} > 1.022 \text{ MeV}$. Στο μέσο αλληλεπίδρασης, κατά τη δίδυμη γένεση η ακτίνα- γ μετατρέπεται σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Η περίσσεια ενέργειας από τη δημιουργία του ζεύγους είναι :

$$T_{e^{-}e^{+}} = E_{\gamma} - 2m_0c^2$$

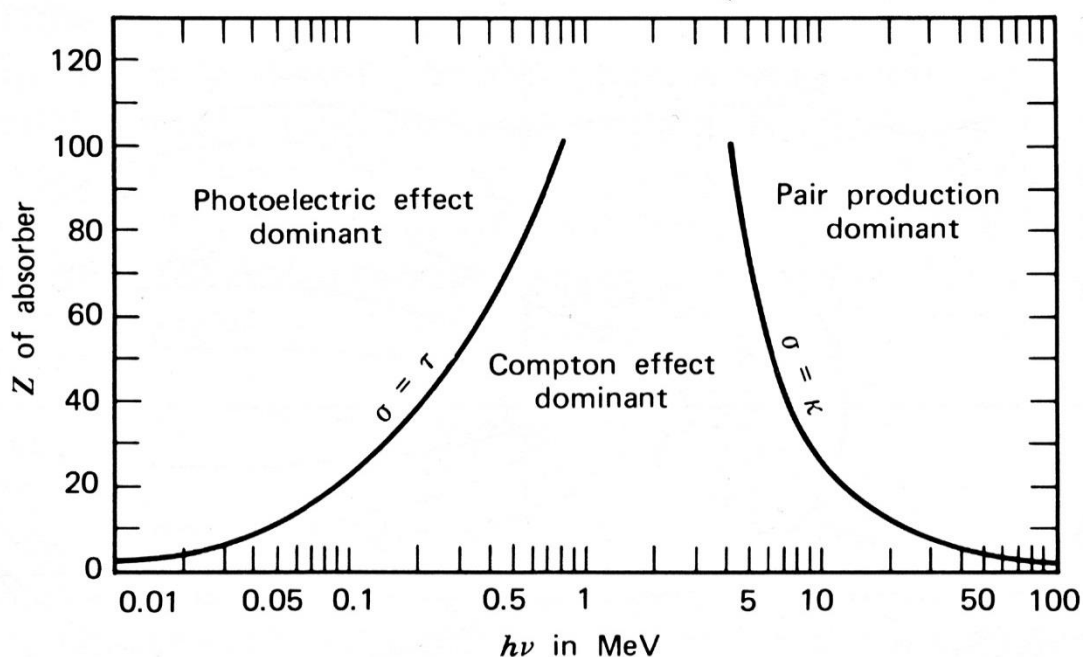
Εξ.: 1.16

και μοιράζεται σε κινητική ενέργεια μεταξύ του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου. Το ποζιτρόνιο, επιβραδύνεται στο μέσο, εξαυλώνεται παράγοντας δύο φωτόνια ενέργειας 0.511 MeV το καθένα ως δευτερεύοντα προϊόντα της αλληλεπίδρασης (Σχήμα 1.4). Η πιθανότητα να συμβεί δίδυμη γένεση εξαρτάται από την ενέργεια της ακτίνας- γ και από το Z^2 του μέσου.



Σχήμα 1.5: Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ μέσω της δίδυμης γένεσης.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ με τους τρεις μηχανισμούς αλληλεπίδρασης στο μέσο απεικονίζεται στο σχήμα 1.6. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται γραφικά η πιθανότητα μία ακτίνα- γ ενέργειας E_γ να αλληλεπιδράσει με τα υλικά του μέσου με ατομικό αριθμό Z . Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κυριαρχεί για χαμηλές ενέργειες ακτινών- γ έως περίπου 200 keV. Παράλληλα η δίδυμη γέννηση κυριαρχεί για πολύ μεγάλες ενέργειες ακτινών, δηλαδή για περίπου 5-10 MeV. Για το ενδιάμεσο εύρος ενεργειών μεταξύ των δύο άκρων, η σκέδαση Compton είναι πιο πιθανή να συμβεί. Επιπροσθέτως ο ατομικός αριθμός του μέσου αλληλεπίδρασης επηρεάζει σημαντικά την πιθανότητα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ . Όσο πιο χαμηλός είναι ο ατομικός αριθμός των υλικών του μέσου και η ενέργεια, κυριαρχεί η αλληλεπίδραση μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, ενώ όσο αυξάνονται ο αριθμός Z και η ενέργεια της ακτινοβολίας- γ εμπλέκονται και σκεδάσεις Compton μέσα στο μέσο. Τέλος για ενέργειες μεγαλύτερες από 1.022 MeV είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί δίδυμη γέννηση. Η γραμμή στα αριστερά αντιπροσωπεύει την ενέργεια για την οποία υπάρχει ίση πιθανότητα για την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας- γ μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της σκέδασης Compton, συναρτήσεως του Z . Αντίστοιχα, η γραμμή στα δεξιά αντιπροσωπεύει την ενέργεια για την οποία η πιθανότητα είναι ίση για την αλληλεπίδραση μέσω σκέδασης Compton και δίδυμης γένεσης, συνάρτησης του Z αντίστοιχα. Για την φασματοσκοπία- γ , δηλαδή την τεχνική ανίχνευσης των ακτινών- γ , λαμβάνονται υπόψη και οι τρεις μηχανισμοί που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και επιλέγονται ανιχνευτές με κατάλληλο ατομικό αριθμό και διαστάσεις.

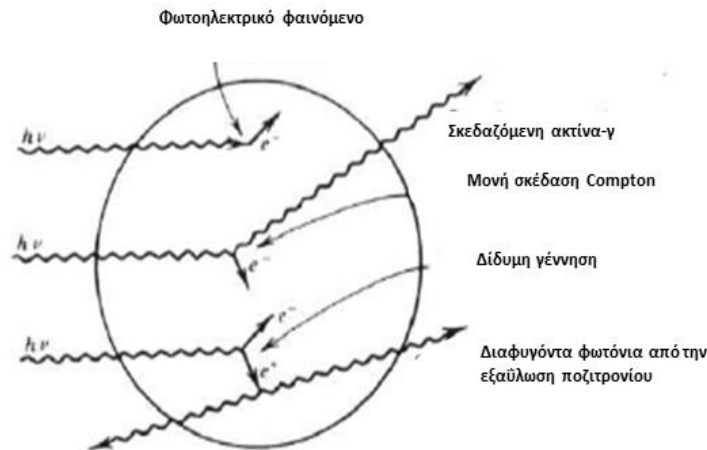


Σχήμα 1.6: Γραφική παράσταση, όπου απεικονίζεται η πιθανότητα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας- γ ενέργειας E_γ με τους τρεις κυρίαρχους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης, στο μέσο με ατομικό αριθμό Z .

1.1.3 Ανίχνευση ακτινοβολίας – γ

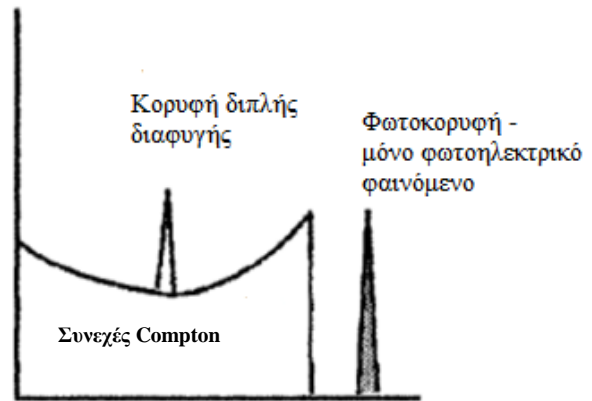
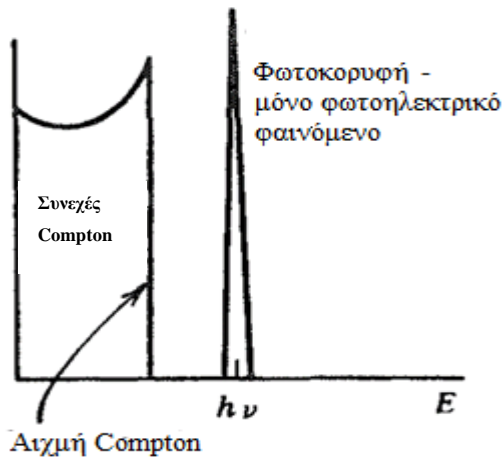
Η ακτινοβολία- γ αλληλεπιδρά με τα υλικά του ανιχνευτή σύμφωνα με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο τρόπος αλληλεπίδρασης των ακτινών- γ με τον ανιχνευτή εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου που εκπέμπεται, τον ατομικό αριθμό του κρυστάλλου του ανιχνευτή και τις διαστάσεις του ανιχνευτή. Οι αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν μέσα στον ανιχνευτή δημιουργούν διεγέρσεις/ιονισμούς των υλικών του και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα. Ανάλογα με τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών διαφορετικών ηλεκτρικών σημάτων, τα οποία καταγράφονται μέσω μιας αλληλουχίας ηλεκτρικών μονάδων, σε ένα ιστόγραμμα γεγονότων συναρτήσει της ενέργειας (ενεργειακό φάσμα). Η τεχνική ανίχνευσης της ακτινοβολίας- γ ονομάζεται φασματοσκοπία- γ . Για την καλύτερη κατανόηση της ανάλυσης του ενεργειακού φάσματος παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις ανιχνευτών και το ενεργειακό φάσμα που αναμένεται από τον καθένα όταν αλληλεπιδράσει με την ακτινοβολία- γ . Περιγράφονται δύο ακραίες περιπτώσεις ανιχνευτών, ο πολύ μικρός ανιχνευτής και ο πολύ μεγάλος ανιχνευτής. Ο πραγματικός ανιχνευτής, που παρουσιάζεται τελευταίος, βρίσκεται κάπου ανάμεσα στις δύο ακραίες περιπτώσεις.

Ο μικρός ανιχνευτής, έχει μέγεθος που είναι πολύ μικρό συγκριτικά με την μέση ελεύθερη διαδρομή της ακτινοβολίας- γ που παράγεται ύστερα από την αλληλεπίδραση μιας αρχικής δέσμης ακτινών- γ με τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.1.2. και οι διαστάσεις του δεν ξεπερνούν τα 1-2cm (Knoll, 2010). Ως μέση ελεύθερη διαδρομή αναφέρεται η μέση απόσταση που μπορεί να διανύσει μία ακτίνα- γ μέσα στο μέσο μεταξύ δύο διαδοχικών αλληλεπιδράσεων. Η δευτερογενής ακτινοβολία μπορεί να είναι οι σκεδαζόμενες ακτίνες- γ λόγω του φαινομένου Compton, ή ακτίνες- γ που παράγονται από την εξαΰλωση του ποζιτρονίου εάν η ενέργεια E_γ είναι μεγαλύτερη των 1.022MeV. Η αρχική ακτινοβολία μπορεί να αλληλεπιδράσει μόνο μία φορά μέσα στον ανιχνευτή και η δευτερογενής ακτινοβολία που παράγεται διαφεύγει από τον ανιχνευτή (Σχήμα 1.7).



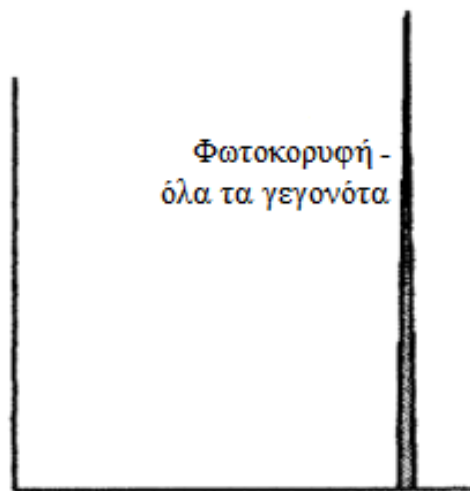
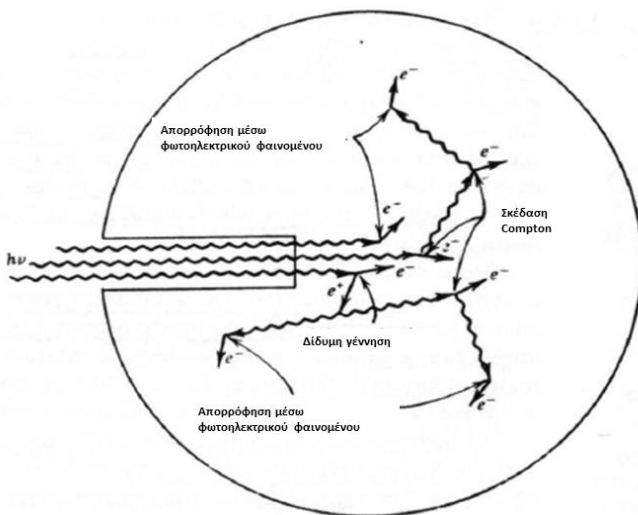
Σχήμα 1.7: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ με ανιχνευτή πολύ μικρού μεγέθους όπου οι δευτερογενείς ακτίνες- γ διαφεύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδράσουν. (Knoll, 2010)

Παράλληλα τα φωτοηλεκτρόνια, τα σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, και τα ηλεκτρόνια/ποζιτρόνια που παράγονται από την αλληλεπίδραση της αρχικής ακτίνας- γ , απορροφούνται πλήρως από τα υλικά του ανιχνευτή. Το ενεργειακό φάσμα που θα καταγράψει ο ανιχνευτής φαίνεται στο σχήμα 1.8. Εάν οι ακτίνες- γ αλληλεπιδράσουν με τα υλικά του ανιχνευτή και αφήσουν όλη τους την ενέργεια, δηλαδή απορροφηθούν πλήρως μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, τότε δημιουργούνται κορυφές, οι λεγόμενες φωτοκορυφές, που αντιστοιχούν στην ενέργεια των ακτινών- γ . Εάν η ακτίνα- γ αλληλεπιδράσει με σκέδαση Compton τότε μόνο μία σκέδαση θα συμβεί και η σκεδαζόμενη ακτίνα- γ θα διαφύγει με ενέργεια που δίνεται από την εξ.:1.14, δεν θα δημιουργηθεί φωτοκορυφή και στο φάσμα θα παρατηρηθεί ένα συνεχές υπόβαθρο από σκεδάσεις Compton όπου ονομάζεται συνεχές Compton και εκτείνεται έως την αιχμή Compton. Η αιχμή Compton αντιστοιχεί στην μέγιστη κινητική ενέργεια που θα αποκτήσει το ηλεκτρόνιο ύστερα από την σκέδαση και αντιστοιχεί σε γωνία $\theta=180^\circ$. Τέλος για ενέργεια E_γ μεγαλύτερη των 1.022MeV είναι δυνατό στο φάσμα να καταγραφούν γεγονότα που οφείλονται στη δίδυμη γέννηση. Τα δύο φωτόνια που παράγονται από την εξαΰλωση του ποζιτρονίου θα διαφύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς περαιτέρω αλληλεπίδραση και στο φάσμα θα καταγραφεί η κορυφή διπλής διαφυγής μικρότερης κατά 1.022MeV (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Ενεργειακά φάσματα του πολύ μικρού ανιχνευτή. Στα αριστερά απεικονίζεται το αναμενόμενο φάσμα για ενέργειες ακτίνων-γ μικρότερες από 1.022MeV που κυριαρχούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και σκεδάσεις Compton και στα δεξιά το φάσμα για ενέργειες μεγαλύτερες από 1.022MeV, όπου συμβαίνει και δίδυμη γέννηση.

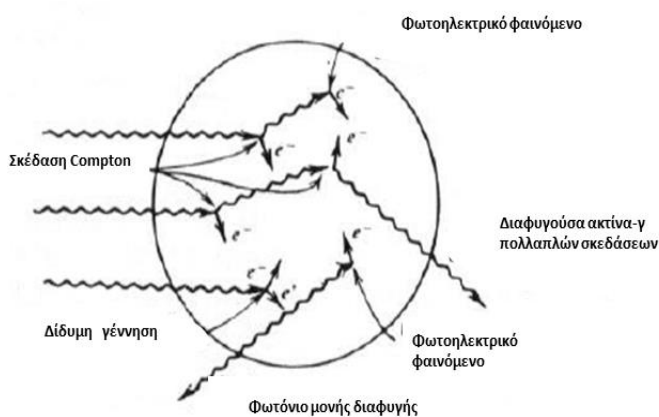
Στην περίπτωση που οι διαστάσεις του ανιχνευτικού συστήματος είναι μεγάλες όλες οι δευτερογενείς ακτινοβολίες-γ που παράγονται είτε από σκεδάσεις Compton, είτε από την εξαύλωση ποζιτρονίου ύστερα από δίδυμη γέννηση, θα αλληλεπιδράσουν μέσα στον ανιχνευτή χωρίς να διαφύγουν. Στην ουσία η αρχική δέσμη ακτίνων-γ, ύστερα από ένα σύμπλεγμα αλληλεπιδράσεων μέσα στον ανιχνευτή (Σχήμα 1.9), θα απορροφηθεί πλήρως μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και το τελικό ενεργειακό φάσμα που θα καταγραφεί θα αποτελείται από πολλές μεμονωμένες φωτοκορυφές με την κάθε μία να αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια της ακτίνας-γ (Σχήμα 1.10).



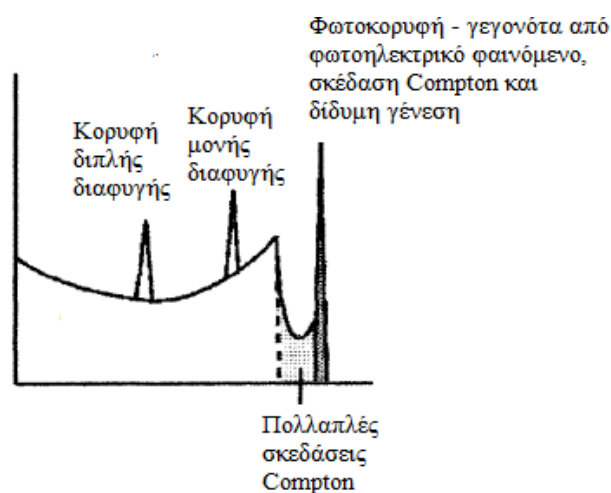
Σχήμα 1.9: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ με ανιχνευτή πολύ μεγάλου μεγέθους όπου οι δευτερογενείς ακτίνες-γ απορροφούνται πλήρως από τον ανιχνευτή. (Knoll, 2010)

Σχήμα 1.10: Ενεργειακά φάσματα πολύ μεγάλου ανιχνευτή.

Ένας πραγματικός ανιχνευτής συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και των δύο ακραίων ανιχνευτών που συζητήθηκαν. Η ακτινοβολία- γ μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα υλικά του ανιχνευτή και με τους τρεις μηχανισμούς (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton, δίδυμη γέννηση) και η δευτερογενής ακτινοβολία που θα παραχθεί μπορεί με τη σειρά της να απορροφηθεί πλήρως, είτε να αλληλεπιδράσει εκ νέου είτε να διαφύγει χωρίς αλληλεπίδραση (Σχήμα 1.11). Ως αποτέλεσμα το ενεργειακό φάσμα αποτελείται από το συνεχές Compton και τις φωτοκορυφές. Το συνεχές Compton εκτείνεται και ύστερα από την αιχμή Compton. Πιο συγκεκριμένα, από μία σκέδαση Compton μπορεί να συμβούν μία ή και παραπάνω σκεδάσεις με την καθεμία να απορροφά ένα ποσό από την ενέργεια της αρχικής ακτινοβολίας- γ , η οποία με τη σειρά της μπορεί να απορροφηθεί ή να διαφύγει από τον ανιχνευτή. Ως αποτέλεσμα εμφανίζονται γεγονότα ανάμεσα στην αιχμή Compton και την φωτοκορυφή. Για ακτινοβολία ενέργειας μεγαλύτερης από 1.022 MeV στο φάσμα θα καταγραφούν γεγονότα που οφείλονται στην δίδυμη γένεση, που αντιστοιχούν στη διαφυγή μίας ή και δύο ακτινών- γ που δημιουργούνται κατά την εξαύλωση του ποζιτρονίου που παράγεται. Εάν μετά την εξαύλωση του ποζιτρονίου διαφεύγει από τον ανιχνευτή μόνο ένα από τα δύο φωτόνια, χωρίς να αλληλεπιδράσει και το δεύτερο θα απορροφηθεί, (κι έτσι θα χαθούν 0.511 MeV) και δημιουργείται η φωτοκορυφή μονής διαφυγής (ενεργειακά μικρότερης κατά 0.511 MeV). Από την αντίθετη πλευρά, εάν και τα δύο φωτόνια διαφύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς αλληλεπίδραση τότε θα δημιουργηθεί η φωτοκορυφή διπλής διαφυγής (Σχήμα 1.12) με ενέργεια λιγότερη κατά 1.022 MeV.

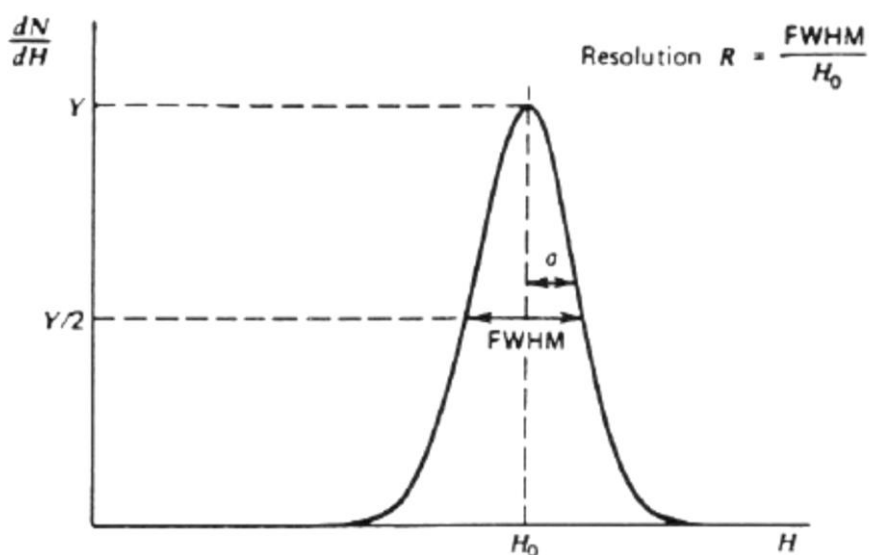


Σχήμα 1.11: Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας γ σε έναν πραγματικό ανιχνευτή. (Knoll, 2010)



Σχήμα 1.12: Τυπικό φάσμα με τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις ακτινοβολίας- γ , που καταγράφονται από έναν ανιχνευτή.

Τέλος, σε κάθε ενεργειακό φάσμα, όλες οι κορυφές είναι διευρυμένες και παρουσιάζουν μια διακύμανση γύρω από μία κεντρική τιμή (Gaussian) και οι μορφές των κορυφών εξαρτώνται από στατιστικές διακυμάνσεις που μπορεί να οφείλονται στα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή αλλά κυρίως εξαρτώνται από τον ίδιο τον ανιχνευτή που χρησιμοποιείται. Επομένως η ποσότητα που ορίζεται στους ανιχνευτές είναι η επί τοις εκατό (%) διακριτική ενεργειακή ικανότητα R (energy resolution) και ορίζει την ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει μεταξύ δύο κοντινών φωτοκορυφών. Ορίζεται ως το ενεργειακό εύρος στο μισό του μέγιστου ύψους της κορυφής (Full Width Half Maximum, FWHM) διαιρεμένο με την ενέργεια της φωτοκορυφής H_0 (Σχήμα 1.13). Η χαμηλή διακριτική ικανότητα δηλαδή μεγάλο FWHM μπορεί να εισάγει αβεβαιότητες κατά τη φασματική ανάλυση.



Σχήμα 1.13: Υπολογισμός της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας.

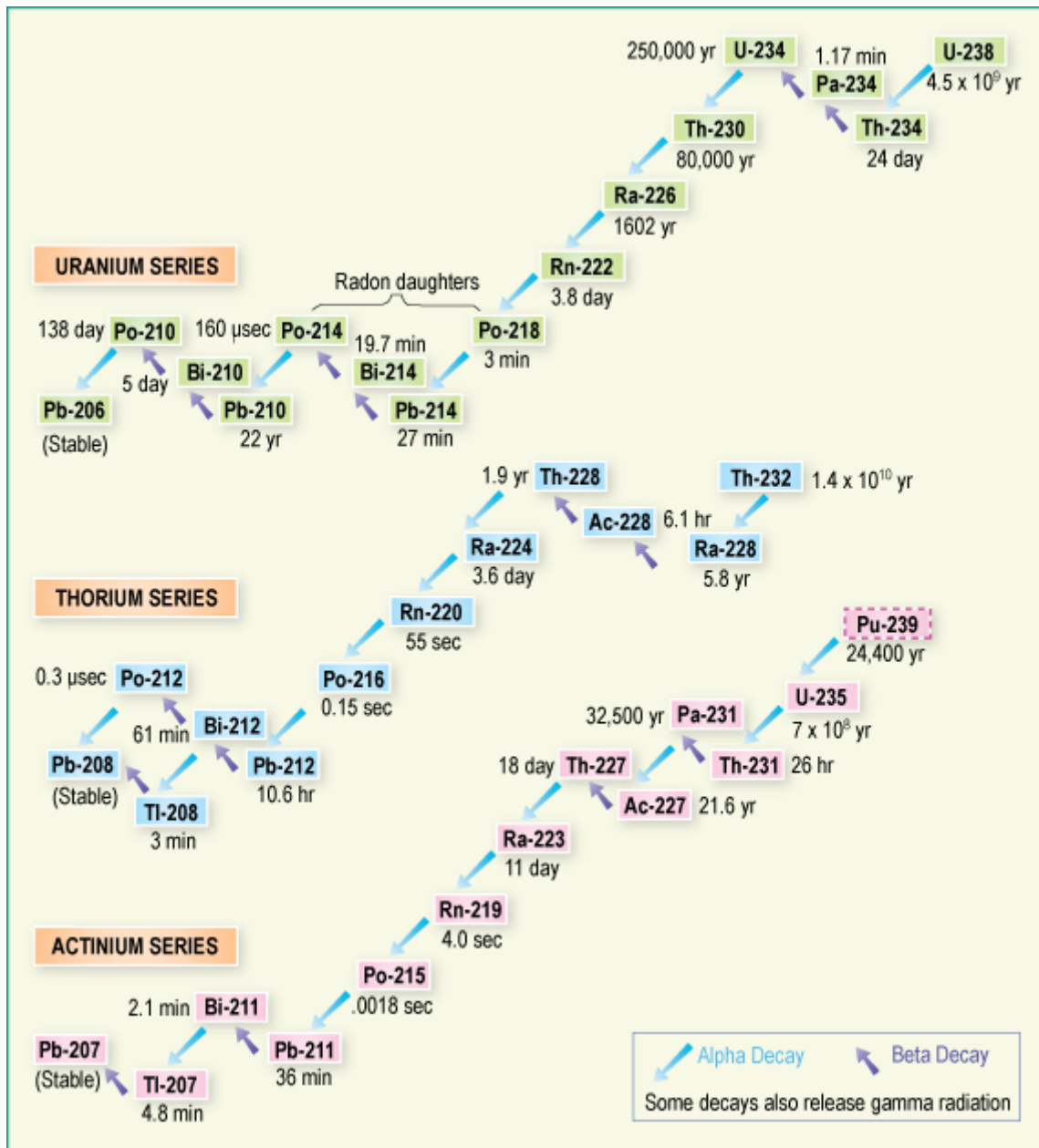
1.1.4 Ραδιενεργές σειρές- Ραδιενέργεια περιβάλλοντος

Την κύρια πηγή φυσικής ραδιενέργειας στο περιβάλλον αποτελούν τα φυσικά ραδιοϊσότοπα. Τα ραδιοϊσότοπα με $Z > 82$ αποτελούν ασταθείς πυρήνες και τείνουν να αποδιεγερθούν και να καταλήξουν σε σταθερούς πυρήνες με $Z \leq 82$, με την εκπομπή ακτινοβολίας α ή β . Τα φυσικά ισότοπα ταξινομούνται σε τέσσερις φυσικές ραδιενεργές σειρές με την καθεμία να ξεκινά από ένα μητρικό ραδιοϊσότοπο με μεγάλο χρόνο ημιζωής, συγκρίσιμο με την ηλικία του σύμπαντος ($\sim 13 \cdot 10^9$ y). Οι φυσικές ραδιενεργές σειρές είναι η σειρά του Ουρανίου ^{238}U ($T_{1/2} = 4.51 \cdot 10^9$ y), του Ακτινίου ^{235}U ($T_{1/2} = 7.07 \cdot 10^8$ y) και του Θορίου ^{232}Th ($T_{1/2} = 1.39 \cdot 10^{10}$ y). Οι ραδιενεργές σειρές που αναφέρθηκαν απεικονίζονται στο σχήμα 1.14.

Σημαντικό ρόλο στην φυσική ραδιενέργεια περιβάλλοντος αποτελεί το ραδόνιο Rn, ένα ευγενές αέριο που παράγεται στο έδαφος και εκλύεται στο περιβάλλον, το οποίο είναι επιβλαβές σε μεγάλες ποσότητες. Επίσης έχει και στις τρεις ραδιενεργές σειρές ισότοπα και είναι τα εξής, το ραδόνιο ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.82$ d), το θορόνιο ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55$ s) και το ^{219}Rn ($T_{1/2} = 4$ s).

Παράλληλα, εκτός των ραδιενεργών σειρών, σημαντικό φυσικό ραδιενεργό ισότοπο αποτελεί το κάλιο ^{40}K ($T_{1/2} = 1.277 \cdot 10^9$ y) του οποίου η αναλογία σε σχέση με τα σταθερά του ισότοπα είναι $\sim 0.012\%$, σε αντίθεση με το ^{39}K που είναι $\sim 93\%$ και του ^{41}K που είναι $\sim 6\%$. Όμως λόγω της αφθονίας του στα φυσικά πετρώματα αλλά και της διαλυτής μορφής του στο νερό αποτελεί την κύρια πηγή ραδιενέργειας στους ωκεανούς. Άλλη πηγή φυσικής ραδιενέργειας είναι η κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή σωματίδια υψηλής ενέργειας που προέρχονται από το διάστημα και προσκρούουν στην ατμόσφαιρα της Γης.

Τέλος, υπάρχουν πηγές ραδιενέργειας που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοιες πηγές τεχνητής ραδιενέργειας μπορεί να είναι οι πυρηνικές δοκιμές, τα πυρηνικά ατυχήματα (π.χ ^{137}Cs , Chernobyl 1986), κατάλοιπα ραδιοφαρμάκων (π.χ ^{131}I) κ.α.



Σχήμα 1.14: Οι ραδιενεργές σειρές του ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U .

1.1.5 Ραδόνιο και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα

Το ραδόνιο Rn δημιουργείται από την μεταστοιχείωση του ραδίου Ra το οποίο προέρχεται από τις ραδιενεργές σειρές του ουρανίου και του θορίου και τα ισότοπα του είναι τα εξής, το ραδόνιο ^{222}Rn ($T_{1/2}= 3.82\text{d}$), το θορόνιο ^{220}Rn ($T_{1/2}=55\text{s}$) και το ^{219}Rn ($T_{1/2}=4\text{s}$). Έχει ατομικό αριθμό 86, είναι ένα ευγενές αέριο, άχρωμο, άοσμο, άγευστο και χημικά αδρανές το οποίο δεν αλληλεπιδρά με άλλα μόρια του αέρα. Εκλύεται από τους πόρους του εδάφους προς την ατμόσφαιρα, διαλύεται εύκολα στο νερό και στον αέρα, επομένως μπορεί να κινηθεί ελεύθερο σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις στον αέρα πριν μεταστοιχειωθεί στα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα. Η αναλογία του φυσικού ουρανίου είναι για το ^{238}U ~99.7% και για το ^{235}U ~0.71%. Δηλαδή το ^{219}Rn (ακτίνιο) έχει πολύ μικρή συνεισφορά στην ραδιενέργεια της Γης. Αντιθέτως, το ^{232}Th βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες από το ^{238}U , έχει μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής και ο ρυθμός παραγωγής του ραδονίου και του θορονίου στο έδαφος είναι σχεδόν ίδιος. Όμως μεγαλύτερη συνεισφορά οφείλεται στο ραδόνιο ^{222}Rn με χρόνο ημιζωής 3.82 ημέρες και λιγότερη στο θορόνιο με χρόνο ημιζωής 55 δευτερόλεπτα, διότι το δεύτερο δεν προλαβαίνει να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα και μεταστοιχειώνεται πολύ γρήγορα. Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του, από ραδιολογική άποψη, αποτελούν την κύρια πηγή ραδιενέργειας που προσλαμβάνει ο άνθρωπος και τα επίπεδα της συγκέντρωσής του εξαρτώνται από τις γεωλογικές, γεωφυσικές συνθήκες και από μετεωρολογικούς και ατμοσφαιρικούς παράγοντες, όπως είναι η υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και οι βροχοπτώσεις

Το ραδόνιο και το θορόνιο μεταστοιχειώνονται μέσω της αλυσίδας διασπάσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως. Για το ^{222}Rn , τα κυριότερα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα που μελετηθήκαν στην παρούσα εργασία είναι τα ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi και για το ^{220}Rn είναι το ^{208}Tl (Σχήμα 1.13). Τα στοιχεία αυτά αποτελούν βαρύτερα στοιχεία, είναι χημικώς ενεργά και μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα μόρια του αέρα και να δημιουργήσουν συσσωματώματα ή σύμπλεγμα συσσωματωμάτων. Επίσης μπορούν να προσαρτηθούν στα αερολύματα της ατμόσφαιρας, δηλαδή σε υγρά ή στερεά σωματίδια του ατμοσφαιρικού αέρα (καπνός, ομίχλη, υδρατμοί, καυσαέριο κ.α.), δημιουργώντας τα ραδιενεργά αερολύματα. Τα ραδιενεργά αερολύματα αποτελούν κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου, διότι μπορούν να εισέλθουν στον οργανισμό μέσω της αναπνοής με συνέπεια την ακτινοβολία του οργανισμού και την αλληλεπίδραση με τα κύτταρα προκαλώντας σοβαρές νόσους όπως καρκίνο του πνεύμονα. Τα ραδιενεργά αερολύματα διαχέονται στον ατμοσφαιρικό αέρα και κινούνται ελεύθερα στον ατμοσφαιρικό αέρα, όπου μπορούν μέσω των αέριων μαζών να μεταφερθούν σε όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Τέλος μέσω του μηχανισμού της εναπόθεσης (deposition), τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα εναποτίθενται στις γύρω περιοχές του χώρου και στο έδαφος και είναι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης (έκπλυσης) τους από τον ατμοσφαιρικό αέρα και μετριάζεται έτσι ο κίνδυνός τους για την ανθρώπινη υγεία.

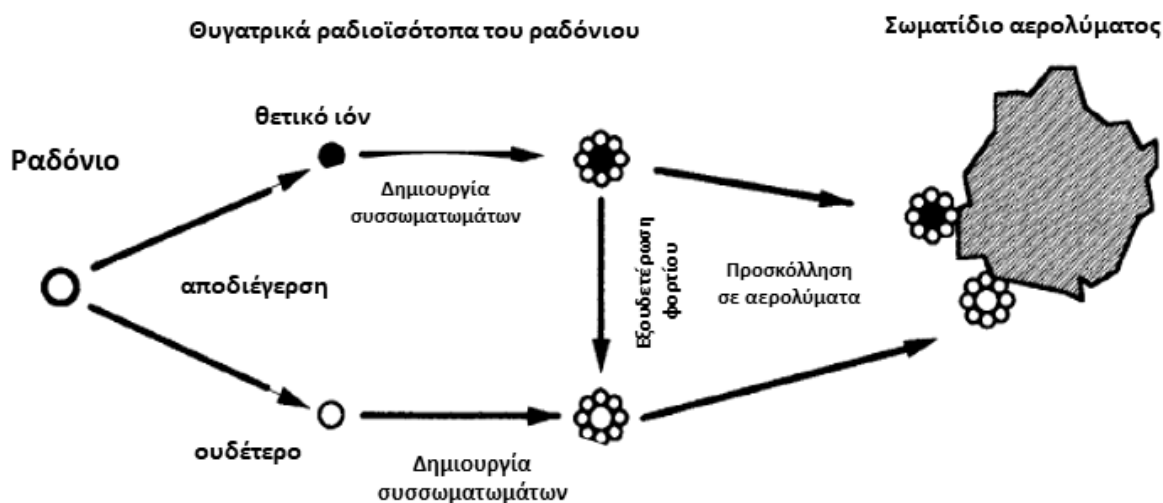
1.2 Στοιχεία ατμοσφαιρικής φυσικής

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται ο τρόπος που αλληλεπιδρούν τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αναλύονται ο μηχανισμός και οι προϋποθέσεις σχηματισμού του βρόχινου νερού και παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τους ερευνητικούς σκοπούς της παρούσας εργασίας.

1.2.1 Αλληλεπίδραση των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα

Κατά τη μεταστοιχείωση του ραδονίου ^{222}Rn στα θυγατρικά του, εκπέμπεται ένα σωματίδιο άλφα συγκεκριμένης ενέργειας η οποία είναι χαρακτηριστική του μητρικού πυρήνα. Μέρος της ενέργειας που εκλύεται μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια ανάκρουσης των θυγατρικών προϊόντων (recoil energy). Τα σωματίδια άλφα που εκπέμπονται είναι θετικά φορτισμένα σωματίδια τα οποία απογυμνώνονται από τον μητρικό πυρήνα κατά την ανάκρουσή τους και τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα που σχηματίζονται χάνουν ένα ή και περισσότερα από τα εξωτερικά τους ηλεκτρόνια. Επομένως τα ραδιοϊσότοπα αρχικά σχηματίζονται ως θετικά ιόντα στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν βαρύτερα στοιχεία, είναι χημικώς ενεργά και μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα μόρια του αέρα. Πιο συγκεκριμένα αρχικά στον ατμοσφαιρικό αέρα πραγματοποιείται η διαδικασία της εξουδετέρωσης των θετικών ιόντων των θυγατρικών του ραδονίου (Papastefanou, 2008). Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον συνδυασμό των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων με τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα ή τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα στον ατμοσφαιρικό αέρα λόγω των υδρατμών τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα αλληλεπιδρούν με τα μόρια νερού. Η εκπομπή ιοντίζουσας ακτινοβολίας μπορεί να οδηγήσει στην διαδικασία της ραδιόλυσης των μορίων νερού και σχηματίζονται ιόντα υδρογόνου H^+ και υδροξυλίου OH^- . Τα OH^- έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν τα ηλεκτρόνια των θετικών ιόντων των θυγατρικών και σαν αποτέλεσμα να εξουδετερώνεται το φορτίο. Στη συνέχεια τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα μόρια του αέρα και να δημιουργήσουν συσσωματώματα ή σύμπλεγμα συσσωματωμάτων. Γύρω από τα μόρια του αέρα προσκολλώνται τα θυγατρικά σχηματίζοντας συσσωματώματα (cluster formation). Κύριο ρόλο έχει το πολώνιο ^{218}Po που προσκολλάται στα μόρια του νερού πολύ γρήγορα ($< 1\text{sec.}$). Η διάμετρος του συσσωματώματος εξαρτάται από την υγρασία του περιβάλλοντος και κυμαίνεται από 0.5 nm έως 500 nm. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται παράλληλα με την εξουδετέρωση του φορτίου των θετικών ιόντων του ^{218}Po . Τα συσσωματώματα μεγαλώνουν σε μέγεθος και μετά την εξουδετέρωση τα μόρια του νερού εξατμίζονται όπου αποσυνδέονται από το συσσωμάτωμα και πλέον το σύμπλεγμα από ^{218}Po κινείται στον ατμοσφαιρικό αέρα πλέον ως συσσωμάτωμα.

Επιπροσθέτως τα συσσωματώματα που δημιουργήθηκαν συγκρούονται με τα αερολύματα της ατμόσφαιρας, δηλαδή με υγρά ή στερεά σωματίδια του ατμοσφαιρικού αέρα (καπνός, ομίχλη, υδρατμοί, καυσαέριο κ.α.), προσκολλώνται γρήγορα σε αυτά (1-100 s) και δημιουργούνται τα ραδιενεργά αερολύματα (attachment), τα οποία με την πάροδο του χρόνου μεγαλώνουν σε μέγεθος. Μετά την προσάρτησή τους, τα ραδιενεργά αερολύματα κινούνται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα και μπορούν να εισέλθουν μέσω της αναπνευστικής οδού στον ανθρώπινο οργανισμό όπου και τον ακτινοβολούν προκαλώντας σοβαρές νόσους όπως καρκίνο του πνεύμονα. Παράλληλα μέσω των αέριων μαζών του αέρα φτάνουν έως και τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας στο ύψος των νεφών, εισέρχονται στην ατμόσφαιρα των σύννεφων και στη συνέχεια μέσω του μηχανισμού της βροχόπτωσης εναποτίθενται στο έδαφος, απομακρύνοντας τα από τον ατμοσφαιρικό αέρα (Papastefanou, 2008). Οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα απεικονίζονται στο σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.15: Αλληλεπίδραση των θυγατρικών του ραδονίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα ύστερα από την μεταστοιχείωσή τους από τον μητρικό πυρήνα του Rn.

1.2.2 Ερευνητικό υπόβαθρο και συμμετοχή των ραδιενεργών αερολυμάτων στο σχηματισμό νεφών και σταγόνων βροχής

Η εναπόθεση των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος γίνεται μέσω της βροχής και αποτελεί μία πολύ σημαντική ατμοσφαιρική διεργασία καθώς μεταφέρει τα ραδιενεργά ισότοπα από την ατμόσφαιρα στο έδαφος (Papastefanou, 2008). Τα θυγατρικά ^{214}Pb και ^{214}Bi αποτελούν σημαντικούς ιχνηθέτες για την κατανόηση ατμοσφαιρικών διεργασιών λόγω της ανίχνευσή τους

μέσω φασματοσκοπίας-γ, χωρίς να υπόκεινται σε περεταίρω χημικές διεργασίες. Η συμπεριφορά των ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα αποτέλεσε κίνητρο μελέτης για πολλές έρευνες.

Λόγω της εναπόθεσης των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στο έδαφος μέσω της βροχής παρατηρήθηκε να είναι σημαντική η αύξηση της ενεργότητας της ακτινοβολίας-γ λόγω των θυγατρικών του ραδονίου και συγκεκριμένα των ραδιενεργών ισοτόπων του ^{214}Pb και ^{214}Bi συγκριτικά με τα επίπεδα ραδιενέργειας χωρίς βροχές (Elperin et al., 2015; Fujinami, 1997; Greenfield et al., 2003; Horn & Jiang, 2004; Livesay et al., 2014; Mercier et al., 2009; Takeyasu et al., 2006). Κίνητρο μελέτης ήταν η διερεύνηση αυτών των μεταβολών της ακτινοβολίας-γ διότι μπορούσαν να παρεμποδίσουν σημαντικά την παρακολούθηση απροσδόκητων διαρροών ραδιενέργειας στα πυρηνικά εργοστάσια. Επομένως αναγκαία ήταν η παρακολούθηση των διακυμάνσεων της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του για τις ημέρες χωρίς βροχής αλλά και με βροχές. Ο (Nishikawa, 1995) μελέτησε τις μεταβολές των συγκεντρώσεων των θυγατρικών ισοτόπων του ^{222}Rn στο έδαφος στη διάρκεια χωρίς βροχές και με βροχές, χρησιμοποιώντας ανιχνευτή σπινθηρισμού NaI. Συμπέρανε ότι οι συγκεντρώσεις μεταβάλλονται σημαντικά εκτός των ορίων των επιπέδων ραδιενέργειας για τις ημέρες με βροχές. Παράλληλα ο (Horn & Jiang, 2004) με την χρήση in-situ φασματοσκοπίας-γ χρησιμοποιώντας ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου HPGe υπολόγισε την ενεργότητα των ^{214}Pb και ^{214}Bi στο έδαφος και ο λόγος τους βρέθηκε να είναι αντίστροφος ανάλογος της έντασης της βροχής το οποίο έχει αποδειχθεί και σε επόμενες έρευνες (Fujinami, 1996; Hayakawa, 1985; Minato, 2007). Επιπροσθέτως ο (Takeyasu et al., 2006) χρησιμοποιώντας στο εργαστήριο ανιχνευτή γερμανίου Ge μελέτησε τόσο τη συγκέντρωση του ραδονίου όσο και τον λόγο των συγκεντρώσεων $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ και βρέθηκε να μην εμφανίζουν άμεση συσχέτιση με την ένταση της βροχής για ορισμένα γεγονότα βροχής. Η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου είναι ανεξάρτητη από την διάρκεια της βροχής και άλλων ατμοσφαιρικών παραμέτρων (Cortès, Sempau, & Ortega, 2001; Fujinami, 1996; Greenfield, Domondon, Okamoto, & Watanabe, 2002). Όμως για τα περισσότερα γεγονότα βροχής μία σχέση αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού ακτινοβολίας-γ με την ένταση της βροχής υπολογίστηκε μέσω μιας δυναμικής εξίσωσης της μορφής $y=x^a$ (y δηλώνει το ρυθμό ακτινοβολία-γ και x την ένταση της βροχής) με τον εκθέτη να είναι 0.45 ± 0.05 (Greenfield et al., 2003). Παράλληλα η κατεύθυνση του ανέμου συνεισφέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου όταν βρέχει (Cortès et al., 2001; Greenfield et al., 2003; Mercier et al., 2009). Από τον υπολογισμό του λόγου $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ από το βρόχινο νερό που φτάνει στο έδαφος, έγινε μία εκτίμηση της ηλικίας της σταγόνας βροχής, τον χρόνο δηλαδή που χρειάζονται τα σταγονίδια βροχής να πέσουν από τα σύννεφα στο έδαφος (Greenfield et al., 2008; Moriizumi et al., 2015). Τέλος οι (Greenfield et al.,

2003; Minato, 2007) πρότειναν ένα μοντέλο του μηχανισμού προσκόλλησης του ^{218}Po στα σταγονίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα του σύννεφου και στη συνέχεια στην διαδικασία δημιουργίας του βρόχινου νερού όπου ανιχνεύονται τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb και ^{214}Bi .

Συγκεκριμένα ο σχηματισμός του βρόχινου νερού ξεκινά από την συμπύκνωση των κορεσμένων υδρατμών στα αερολύματα της ατμόσφαιρας. Μέσω της διαδικασίας που αναφέρθηκε προηγουμένως το πολώνιο ^{218}Po που είναι προσκολλημένο στα ραδιενεργά αερολύματα της ατμόσφαιρας, συλλαμβάνεται από τα σταγονίδια μέσα στην επιφάνεια των σύννεφων (cloud droplets) όπου ενσωματώνονται μεταξύ τους και μεγαλώνουν σε μέγεθος μέσω μιας διαδικασίας συσσωματώματος (coagulation process). Καθώς τα λεπτά σταγονίδια αιωρούνται μέσα στο σύννεφο δημιουργούν τεράστιες σχηματισμένες σταγόνες νερού (raindrops.) Το πολώνιο προσκολλάται στην επιφάνεια των λεπτών σταγονιδίων, τα οποία μεγαλώνουν σε μέγεθος, και διασπάται στα θυγατρικά ^{214}Pb και ^{214}Bi . Λόγω της βαρύτητας αρχίζουν να κατεβαίνουν προς την βάση του σύννεφου και τελικά πέφτουν στο έδαφος μέσω της βροχόπτωσης. Τα μεγαλύτερα σταγονίδια έχουν μικρότερη συγκέντρωση συγκριτικά με τα μικρότερα και λεπτότερα, και τείνουν να πέσουν από το σύννεφο (Moriizumi et al., 2015). Επομένως τα θυγατρικά ^{214}Pb και ^{214}Bi που πέφτουν στο έδαφος προέρχονται από τις σταγόνες που πέφτουν από την βάση του σύννεφου και κάτω και από εκείνα που σαρώνονται στον αέρα σε κάθε βροχόπτωση έως να φθάσουν στο έδαφος (Elperin et al., 2015; Fujinami, 1997; Hayakawa, 1985; Horng & Jiang, 2004; Moriizumi et al., 2015; Paatero & Hatakka, 1999).

1.2.3 Χρήσιμα μεγέθη της ατμοσφαιρικής φυσικής

Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στην ερευνητική ανάλυση των δεδομένων είναι η υγρασία η πίεση, η θερμοκρασία, η κατεύθυνση του ανέμου, το ύψος βροχής και η ένταση της βροχής. Παρακάτω παρατίθενται οι ορισμοί των μεγεθών για την κατανόηση τους στα επόμενα κεφάλαια.

Υγρασία: Με τον όρο υγρασία ή σχετική υγρασία ορίζεται το ποσό των υδρατμών στον αέρα προς την μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να διατηρήσει ο αέρας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και εκφράζεται σε ποσοστό %. Ουσιαστικά εκφράζει πόσο κοντά βρίσκεται ο αέρας σε κορεσμό από υδρατμούς. Στο 100% ο αέρας έχει φτάσει σε κορεσμό.

Πίεση: Ατμοσφαιρική ή βαρομετρική πίεση είναι η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα με το βάρος της στην επιφάνεια της Γης, όπως αυτό καθορίζεται και από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Παρουσιάζει μικρές αλλαγές στις οποίες οφείλονται πολλά από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως ο άνεμος.

Θερμοκρασία: Ο όρος θερμοκρασία αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των μορίων του αέρα και γίνεται αισθητή ανάλογα με το πόσο κρύα ή πόσο ζεστή είναι η ατμόσφαιρα του αέρα.

Άνεμος ή διεύθυνση ανέμου: Ορίζεται η κίνηση των μορίων του αέρα προς οποιαδήποτε διεύθυνση και δημιουργείται όταν τα μόρια αέρα μετακινούνται από περιοχές υψηλής βαρομετρικής πίεσης προς περιοχές χαμηλότερης.

Ύψος βροχής: Ως ύψος βροχής ορίζεται η ποσότητα του βρόχινου νερού που φθάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια αποκλείοντας παράγοντες διαρροής, απορρόφησης και εξάτμισης και μετράται σε mm βροχής. Πιο συγκεκριμένα η «οριζόντια επιφάνεια» αφορά 1cm^2 οπότε 1mm βροχής είναι 1lt (ή 1 kgr) ανά τετραγωνικό μέτρο.

Ένταση βροχής: Ορίζεται ως το ύψος βροχής που φθάνει σε μία οριζόντια επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου. Ανάλογα με την τιμή της μια βροχόπτωση χαρακτηρίζεται ως ασθενής, μέτρια

2

2. Υλικά και Μεθοδολογία

2.1 Μετρητικά συστήματα και πειραματική διάταξη

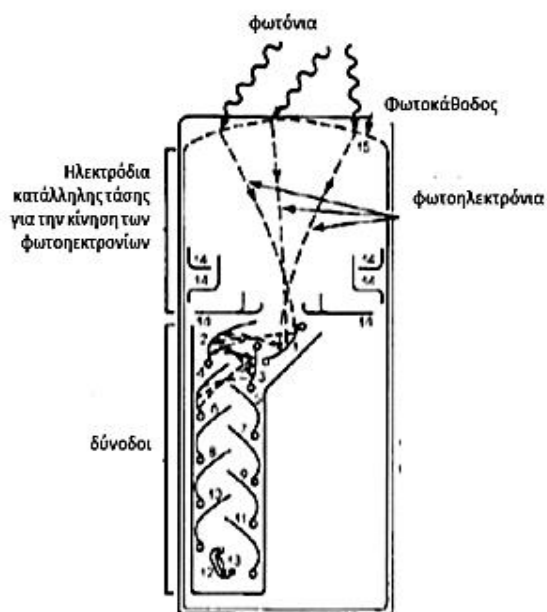
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA για την ανίχνευση της ακτινοβολίας- γ από την αποδιέγερση των ραδιενεργών ισοτόπων του ραδονίου. Αποτελεί έναν ανιχνευτή σπινθηρισμού, κρυστάλλου Βρωμιούχου Δημητρίου $CeBr_3$, μεσαίας διακριτικής ικανότητας, κατάλληλος για in-situ φασματοσκοπία ακτινών- γ . Στις επόμενες ενότητες θα συζητηθούν οι αρχές λειτουργίας των ανιχνευτών σπινθηρισμού ανόργανων κρυστάλλων και θα παρουσιαστεί το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA για την in-situ φασματοσκοπία ακτινών- γ . Επιπροσθέτως δεδομένα ατμοσφαιρικών παραμέτρων ανακτήθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Αναβύσσου.

2.1.1 Ανιχνευτές σπινθηρισμού

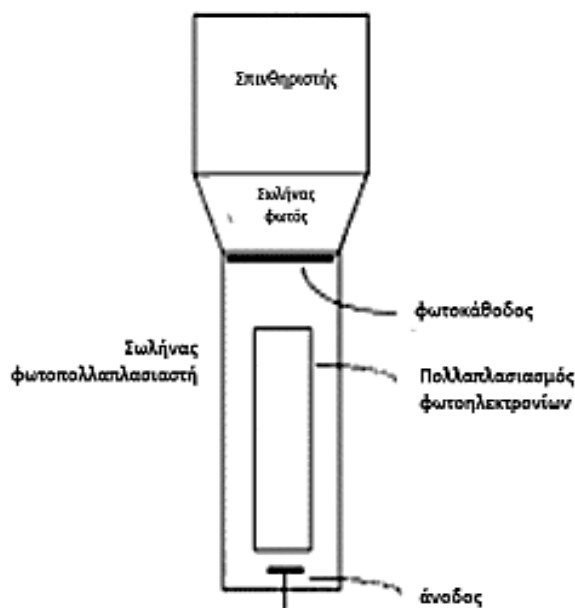
Ανιχνευτές σπινθηρισμού ονομάζονται τα ανιχνευτικά συστήματα που αποτελούνται από ένα υλικό σπινθηρισμού το οποίο έχει την ιδιότητα ότι όταν προσπίπτει ιοντίζουσα ακτινοβολία, απορροφούν μέρος ή όλη την ενέργειά της και την επανεκπέμπουν με τη μορφή φωτός (σπινθήρα). Η διάρκεια του σπινθηρισμού εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται και μπορεί να διαρκέσει από μερικά μs έως και μερικές ώρες. Ως υλικό σπινθηρισμού μπορεί να είναι ανόργανοι κρύσταλλοι, οργανικές ουσίες και πλαστικά υλικά. Ο μηχανισμός που ακολουθείται στους ανιχνευτές σπινθηρισμού είναι ο εξής.

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία διεγείρει τα ηλεκτρόνια του υλικού και φωτόνια παράγονται κατά την αποδιέγερση τους. Τα φωτόνια που παράγονται συλλέγονται από τον φωτοπολλαπλασιαστή (photomultiplier) (Σχήμα 2.1a), που έχει την ιδιότητα να ενισχύει την

παραγόμενη ακτινοβολία και να την μετατρέπει σε μετρήσιμο ηλεκτρικό παλμό. Στη συνέχεια λόγω της εκπομπής των φωτονίων σε τυχαίες κατευθύνσεις, κατάλληλος ανακλαστήρας οδηγεί μεγάλο αριθμό φωτονίων στην είσοδο του φωτοπολλαπλασιαστή, την φωτοκάθοδο. Η φωτοκάθοδος είναι μία φωτοευαίσθητη λεπτή επιφάνεια έως μερικά nm, όπου ποσοστό περίπου 10-20% των φωτονίων μετατρέπονται σε χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) στην επιφάνεια της μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης, τα φωτοηλεκτρόνια κινούνται στο εσωτερικό του φωτοπολλαπλασιαστή και ενισχύονται από ένα σύστημα διαδοχικών ηλεκτροδίων που ονομάζονται δύνοδοι. Σαν αποτέλεσμα τα φωτοηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται σε αριθμό εκθετικά έως και 10^7 - 10^{10} φορές και τελικά συλλέγονται στην άνοδο της εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή σχηματίζοντας ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα (Σχήμα 2.1β). Το σήμα έχει συγκεκριμένο ύψος και είναι ανάλογο με τον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων που συλλέχθηκαν από την άνοδο και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον σπινθηριστή.



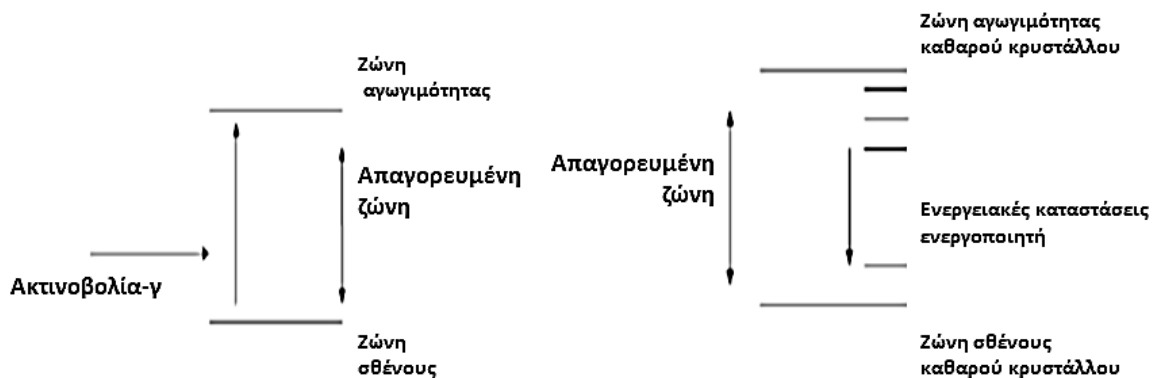
Σχήμα 2.1α: Γεωμετρία και εξαρτήματα ενός τυπικού φωτοπολλαπλασιαστή (Knoll, 2010).



Σχήμα 2.1β: Γεωμετρία και εξαρτήματα ενός τυπικού ανιχνευτή σπινθηρισμού (Price, 1964).

Σε ένα καθαρό (pure) ανόργανο κρυσταλλικό πλέγμα τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν επιλεγμένες ζώνες ενέργειας. Η χαμηλότερη ενεργειακά ζώνη ονομάζεται ζώνη σθένους όπου βρίσκονται τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια των ατόμων του κρυστάλλου. Παράλληλα στη ζώνη

αγωγιμότητας, που είναι η υψηλότερη ενεργειακά ζώνη, βρίσκονται τα ηλεκτρόνια που έχουν αποδεσμευτεί από τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος. Η ενδιάμεση ζώνη ονομάζεται απαγορευμένη περιοχή και δεν μπορεί να βρισκεται ποτέ ένα ηλεκτρόνιο. Όταν τα ηλεκτρόνια απορροφούν κατάλληλη ενέργεια έχει σαν αποτέλεσμα να μετατοπιστούν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργείται μία κενή θέση (οπή) στην ζώνη σθένους. Όταν το διεγερμένο πλέον ηλεκτρόνιο επιστρέψει στην αρχική του θέση εκπέμπει φωτόνια, όμως η πιθανότητα να συμβεί αυτό είναι μικρή στους καθαρούς κρυστάλλους λόγω του μεγάλου ενεργειακού εύρους μεταξύ των δύο ενεργειακών περιοχών. Επομένως για να αυξηθεί η πιθανότητα μετάπτωσης του ηλεκτρονίου και την εκπομπή φωτονίων, χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα προσμίξεων (impurities) στους κρυστάλλους που ονομάζονται ενεργοποιητές (activators). Η δομή του ενεργειακού εύρους στο κρυσταλλικό πλέγμα τροποποιείται χωρίς να αλλάζει συνολικά η ηλεκτρονική δομή του κρυστάλλου. Ουσιαστικά δημιουργούνται ενδιάμεσες ενεργειακές ζώνες στο εύρος της απαγορευμένης ζώνης και τα ηλεκτρόνια που αποδιεγείρονται, μεταβαίνουν στη ζώνη σθένους μέσω αυτών των ενδιάμεσων ζωνών εκπέμποντας φωτόνια (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: α) Αριστερά καθαρός κρύσταλλος, β) Δεξιά: κρύσταλλος με προσμίξεις.

Οι σπινθηριστές παρέχουν μεγάλη ανιχνευτική απόδοση και το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλό συγκριτικά με άλλα ανιχνευτικά συστήματα (Knoll, 2010). Οι πιο κοινοί ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ακτινοβολίας- γ στο περιβάλλον είναι οι ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου NaI(Tl) με μικρές προσμίξεις θαλίου Tl. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι LaBr₃:Ce (Βρωμιούχο λανθάνιο με προσμίξεις δημητρίου) που παρέχουν υψηλή διακριτική ενεργειακή ικανότητα και ανιχνευτική απόδοση σε σχέση με τους κρυστάλλους NaI(Tl), ίδιων διαστάσεων (Lutter et al., 2013). Λόγω της παρουσίας εγγενούς ραδιενέργειας του κρυστάλλου από το λανθάνιο ¹³⁸La (~0.1% του φυσικού λανθανίου) μπορεί να εμποδίσει την χρήση

τέτοιων συστημάτων για μετρήσεις χαμηλού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολίας-γ. Παράλληλα χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι Βρωμιούχου Δημητρίου CeBr_3 μεσαίας διακριτικής ικανότητας και υψηλής ανιχνευτικής απόδοσης. Δεδομένου ότι το δημήτριο Ce βρίσκεται δίπλα στο λανθάνιο La στον περιοδικό πίνακα, η χημεία των κρυστάλλων $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ και CeBr_3 είναι παρόμοια, όμως η συγκέντρωση του ^{138}La είναι 5 φορές μεγαλύτερη στον κρύσταλλο $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA όπου είναι κατάλληλο για in-situ φασματοσκοπία-γ στον ατμοσφαιρικό αέρα, αποτελείται από κρύσταλλο CeBr_3 και τα χαρακτηριστικά του θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα. Η in-situ φασματοσκοπία ακτινοβολίας-γ επιτρέπει τις μετρήσεις ακτινών-γ σε μια μεγάλη περιοχή, σε μικρό χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος συγκριτικά με τις εργαστηριακές μεθόδους που αποτελούν χρονοβόρα διαδικασία για την επεξεργασία και την ανάλυση μεγάλου όγκου δειγμάτων.

2.1.2 Υποθαλάσσιο ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA

Το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA, είναι ένας ανιχνευτής σπινθηρισμού μεσαίας διακριτικής ικανότητας, κατάλληλος για in-situ φασματοσκοπία ακτινών-γ για μετρήσεις ραδιονουκλιδίων φυσικής προέλευσης (λ.χ. τα θυγατρικά από τις ραδιενεργές σειρές των ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th καθώς και ^{40}K) καθώς και ανθρωπογενής προέλευσης (λ.χ ^{137}Cs , ^{60}Co) και για μεγάλο εύρος ενεργειών, από 150keV έως 3.000keV.

Αποτελείται από ένα κυλινδρικό ανόργανο κρύσταλλο 2'' x 2'' βρωμιούχου δημητρίου CeBr_3 και περιβάλλεται από έναν ανακλαστήρα (reflector) κατασκευασμένο από οξείδιο του αργιλίου Al_2O_3 πυκνότητας 0.55 g/cm^3 ακτίνας 2.665 cm, ύψους 4 cm και πάχους 0.125 cm. Ο κρύσταλλος μαζί με τον ανακλαστήρα είναι συνδεδεμένοι με έναν φωτοπολλαπλασιαστή ο οποίος λειτουργεί στα 670V. Στη συνέχεια συνδέεται με έναν προενισχυτή (Preamplifier) για την επεξεργασία και εξαγωγή του σήματος/παλμού του ανιχνευτή μαζί με μία μονάδα τροφοδοσίας ρεύματος. Βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρύσταλλο με τα κυκλώματα εισόδου να ταιριάζουν στα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή. Για την αξιόπιστη μέτρηση των παλμών που παράγονται, η έξοδος του προενισχυτή είναι συνδεδεμένη με ενισχυτή διαμόρφωσης (amplifier) για χαμηλούς ρυθμούς ακτινοβολίας-γ. Στη συνέχεια οι παλμοί μετατρέπονται σε ψηφιακό σήμα μέσω του ψηφιακού μετατροπέα (ADC) και η έξοδος του ενισχυτή εισάγεται σε έναν πολυδιαυλικό αναλυτή (multichannel analyzer ή MCA). Οι παλμοί κατανέμονται σε σχέση με το ύψος τους σε 1024 κανάλια (channels) με το κάθε κανάλι να αντιπροσωπεύει ένα μικρό εύρος ενέργειας ακτινοβολίας-γ (~3keV). Τέλος η παραπάνω διάταξη είναι συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή. Ο κρύσταλλος μαζί με τον ανακλαστήρα και τα ηλεκτρονικά

στοιχεία αποτελούν τη διάταξη του σπινθηριστή και είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό κοίλου κυλίνδρου από αλουμίνιο ακτίνας 2.715 cm, πάχους 0.05 cm και ύψους 18.65 cm. Οι ηλεκτρονικές μονάδες κατασκευάζονται ειδικά για να λειτουργούν σε χαμηλή κατανάλωση ρεύματος (~0,8-1,0W) και να ταιριάζουν στο εσωτερικό του περιβλήματος του ανιχνευτή. Ο σπινθηριστής είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό κυλίνδρου από εξωτερικό υδατοστεγές περίβλημα ακετάλης πυκνότητας 0.825 g/cm^3 , ακτίνας 5.295 cm, πάχους 0.78 cm και ύψους 49.54 cm και παρέχει στον ανιχνευτή ανθεκτικότητα και αντοχή στη φθορά στις διάφορες καιρικές συνθήκες. Επίσης το υλικό αυτό επιλέχθηκε έτσι ώστε να παρουσιάζει ελάχιστη απορρόφηση των ακτινών-γ για όσο το δυνατόν την υλοποίηση μετρήσεων με καλή στατιστική. Ο ανιχνευτής στηρίζεται κατακόρυφα στο εσωτερικό του περιβλήματος μέσω ειδικής υποστήριξης (έλκητρο).

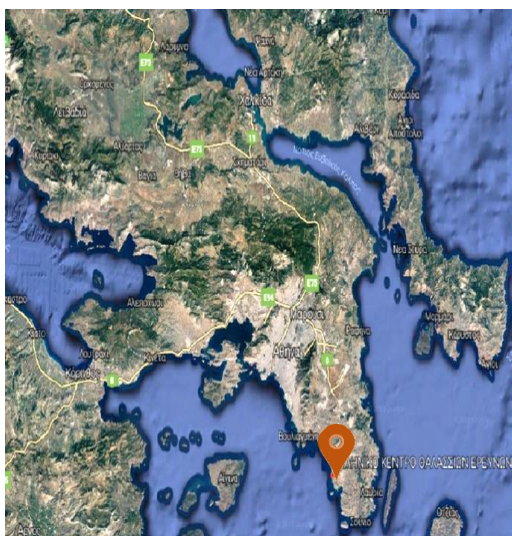
Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να είναι ενσωματωμένο σε οποιοδήποτε σταθερό ή πλωτό έδαφος ή κινητή πλατφόρμα επιτρέποντας τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο. Ο καταγραφέας δεδομένων του συστήματος σχεδιάστηκε αναλόγως για να επικοινωνεί με οποιοδήποτε τυπικό σύστημα υπολογιστή για λειτουργία με αυτόνομο τρόπο. Το σύστημα ανίχνευσης παρέχει χρονοσειρές δεδομένων χωρίς σύνδεση με τον υπολογιστή. Αυτή η λειτουργία εκτελείται με την ανάπτυξη ενός κώδικα λογισμικού όπου ο χρήστης δίνει ως είσοδο το επιθυμητό χρονικό διάστημα απόκτησης των χρονοσειρών των δεδομένων. Στη συνέχεια ξεκινά η προσωρινή αποθήκευση για την περίοδο της προκαθορισμένης χρονικής διάρκειας και το αρχείο φάσματος αποθηκεύεται σε μια ειδική μνήμη. Οι ψηφιακές τιμές αποθηκεύονται στον υπολογιστή και ταξινομούνται σε ιστόγραμμα που αντιπροσωπεύει το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας- γ που λαμβάνει ο ανιχνευτής.

2.1.3 Μετεωρολογικός σταθμός Αναβύσσου

Ο μετεωρολογικός σταθμός της Αναβύσσου, στη Νότια περιοχή της Αττικής, είναι τοποθετημένος σε υψόμετρο 10 μέτρα από το έδαφος, στον προαύλιο χώρο του κτηρίου του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.). Ο σταθμός είναι εξοπλισμένος με αισθητήρες που μετρούν ατμοσφαιρικές παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, το ύψος βροχόπτωσης, η ραγδαιότητα βροχής, η πυκνότητα του αέρα κ.α. Τα δεδομένα καιρού καταχωρούνται κάθε δέκα λεπτά και η ανάκτηση τους είναι δυνατή μέσω της ιστοσελίδας www.meteo.gr.

2.1.4 Πειραματική διάταξη

Το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA τοποθετήθηκε σε υψόμετρο περίπου 20m, στην οροφή του κτηρίου του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε (Σχήμα 2.3). Ο ανιχνευτής στηρίζεται κατακόρυφα από μεταλλική βάση στήριξης, με τον κρύσταλλο να είναι στραμμένος προς τα πάνω έτσι ώστε να ανιχνεύονται ακτίνες-γ προερχόμενες απευθείας από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ελαχιστοποιώντας εκείνες που προέρχονται από το έδαφος. Ο ανιχνευτής συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή ώστε τα δεδομένα των μετρήσεων να μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο και να αποθηκεύονται (Σχήμα 2.4) με τη μορφή ωριαίων φασμάτων με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού.



Σχήμα 2.3: Περιοχή πειραματικών μετρήσεων στην Ανάβυσσο, Νότια Αττική.



Σχήμα 2.4: Το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA τοποθετημένο στην οροφή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

2.1.5 Λήψη δεδομένων

Τα δεδομένα από την ανιχνευτική διάταξη καταγράφονταν καθημερινά ανά μία ώρα (3600s) για χρονική διάρκεια πέντε μηνών από τον Νοέμβριο 2017 έως τον Μάρτιο 2018. Τα γεγονότα ακτινοβολίας-γ συλλέγονταν πριν, κατά τη διάρκεια και ύστερα από κάθε γεγονός βροχόπτωσης και αποθηκεύονταν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επεξεργασία και την ανάλυσή τους. Συνολικά συλλέχθηκαν 3.415 ωριαία φάσματα εκ των οποίων τα 143 αντιπροσωπεύουν γεγονότα βροχόπτωσης. Παράλληλα τα μετεωρολογικά δεδομένα καταγράφονταν και συλλέγονταν καθημερινά στο παραπάνω χρονικό διάστημα κάθε δέκα λεπτά από τον μετεωρολογικό σταθμό της Αναβύσσου.

2.2 Γεωμετρία των in-situ μετρήσεων

Ως γεωμετρία των μετρήσεων θεωρήθηκε ένας σφαιρικός όγκος ατμοσφαιρικού αέρα το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από την ενέργεια των ακτινών-γ καθώς και από την ύπαρξη ή μη, σταγονιδίων βροχής γύρω από τον ανιχνευτή. Στον όγκο αυτό ανιχνεύονται οι ακτίνες γ που εκπέμπονται από τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου. Η εξασθένηση για συγκεκριμένη ενέργεια E_γ , ακολουθεί τον νόμο:

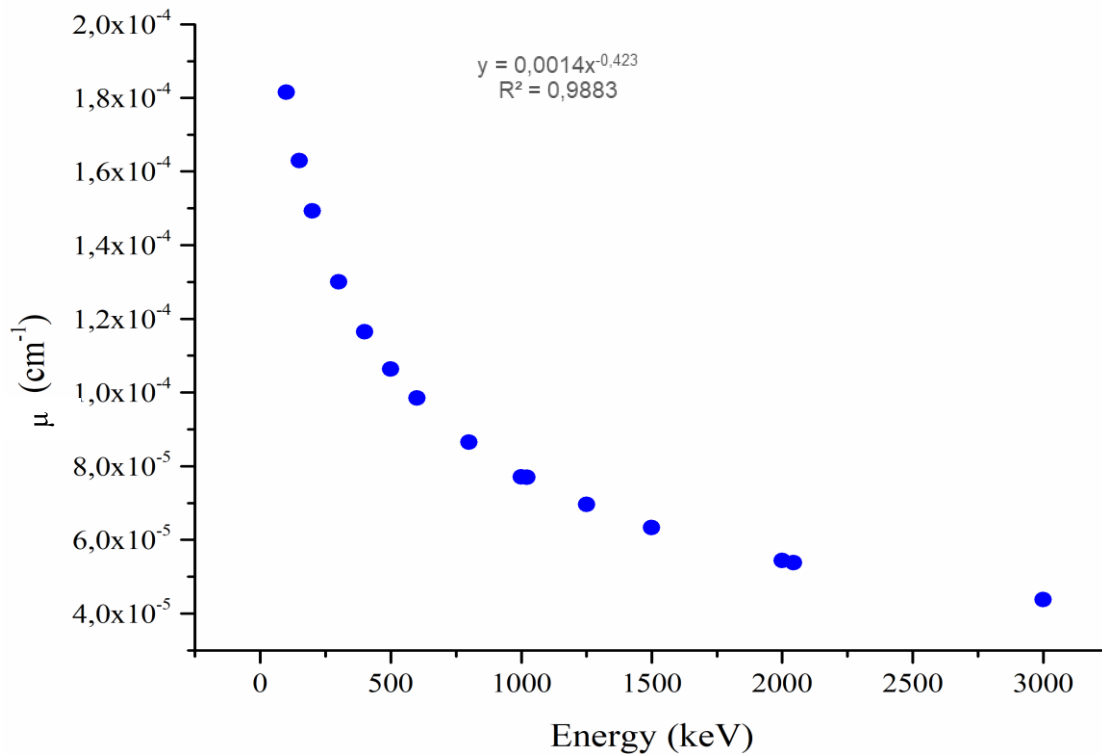
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot r} \quad \text{Εξ.:2.1}$$

Με I_0 συμβολίζεται η ένταση της αρχικής δέσμης των ακτινών-γ, με r η απόσταση/ακτίνα του όγκου αέρα την οποία διανύουν οι ακτίνες-γ στον ατμοσφαιρικό αέρα μετρημένη σε cm, και μ ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, που εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης των ακτινών-γ με τον αέρα ανά μονάδα μήκους, υπολογισμένη σε cm^{-1} . Ορίζεται ως το άθροισμα των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης για κάθε διαδικασία αλληλεπίδρασης των ακτινών-γ με το μέσο (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton, δίδυμη γέννηση). Ως ενεργό απόσταση ή ακτίνα του όγκου r_{eff} , ορίζεται η απόσταση όπου το 99,99% της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας-γ έχει απορροφηθεί πλήρως, (δηλαδή για $I=1$ και $I_0=10.000$), και ο αντίστοιχος όγκος σφαίρας με ακτίνα την ενεργό απόσταση ονομάζεται ενεργός όγκος V_{eff} . Ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται κυρίως από οξυγόνο (~21%), άζωτο (~78%), διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και άλλα μόρια (~1%) και έχει υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, πυκνότητα $\rho_{air} = 1.223 \cdot 10^{-3} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$. Στον όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα προστίθενται τα αερολύματα της ατμόσφαιρας που προέρχονται από ανθρωπογενείς ή φυσικούς μηχανισμούς. Μπορεί να είναι σε στερεή ή υγρή μορφή, με το μέγεθός τους να φτάνει έως μερικά μm (Papastefanou, 2008). Παράλληλα κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων στον όγκο γύρω από τον ανιχνευτή προστίθενται και σταγόνες νερού. Η αλλαγή στην περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε σταγονίδια βροχής κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ενεργού απόστασης και του αντίστοιχου όγκου λόγω της αλληλεπίδρασης (σκέδαση ή απορρόφηση) των ακτινών-γ με τα μόρια του νερού των σταγόνων. Η ελάττωση σχετίζεται με την ραγδιότητα της βροχής η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με τον συνολικό όγκο σταγονιδίων βροχής ανά μονάδα όγκου αέρα. Αν και ο θεωρητικός υπολογισμός της ελάττωσης του ενεργού όγκου ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας, η μέγιστη τιμή αφορά την περίπτωση έλλειψης βροχοπτώσεων και για τον θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης μ στον ελεύθερο, από σταγονίδια βροχής ατμοσφαιρικό αέρα, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο XCOM (Berger, 2010). Στη συνέχεια κατασκευάστηκε γραφική παράσταση

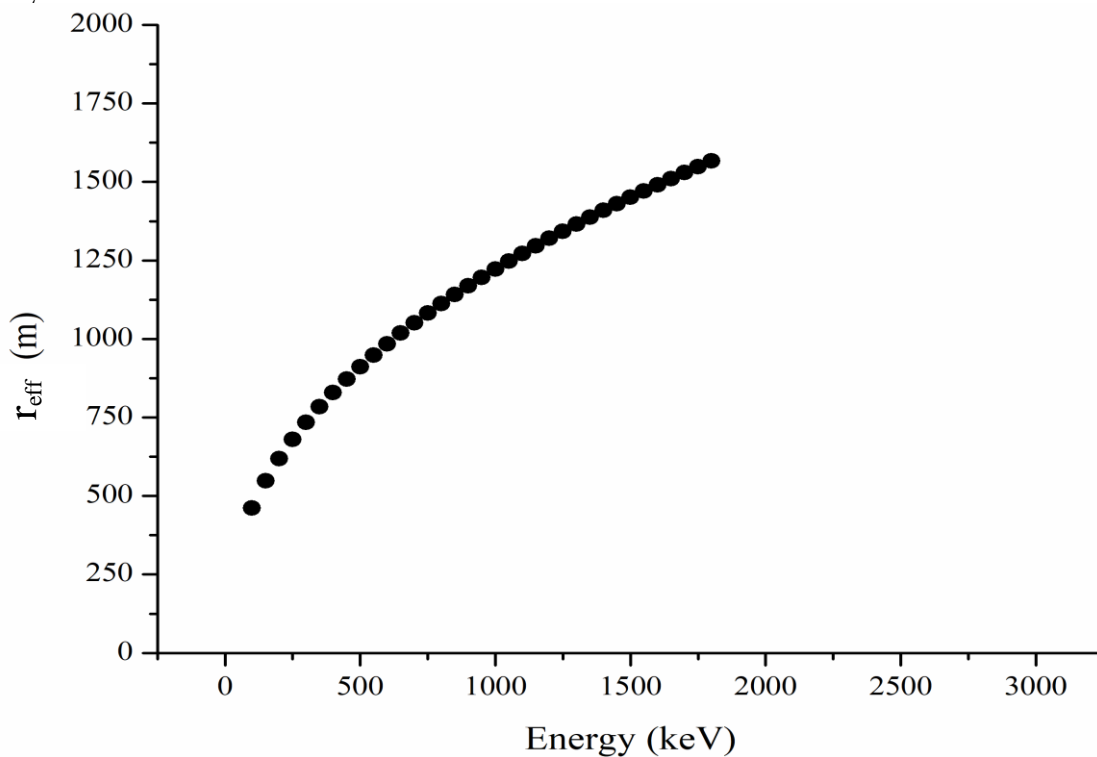
μέσω του προγράμματος OriginLab (Σχήμα 2.5), μεταξύ του συντελεστή εξασθένησης μ (άξονας y) και της ενέργειας των ακτινών- γ (άξονας x), και η εξίσωση που προκύπτει δίνεται από τη σχέση:

$$y = 0.0014 \cdot x^{-0.423}$$

Εξ.:2.2



Σχήμα 2.5: Ολικός συντελεστής εξασθένησης μ της ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων E_γ .



Σχήμα 2.6: Ενεργές αποστάσεις r_{eff} ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων E_γ .

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση και την εξίσωση 2.1 υπολογίστηκαν οι ενεργές αποστάσεις r_{eff} των ακτινών- γ για τα θυγατρικά του ραδονίου (^{214}Pb & ^{214}Bi) (Σχήμα 2.6). Στην περίπτωση όπου ακτίνες- γ εκπέμπονται από το ^{214}Pb με ενέργεια 351.9 keV, η ενεργός απόσταση υπολογίζεται ίση με ~ 783 m. Ομοίως για την περίπτωση της ακτινοβολίας - γ του ^{214}Bi με ενέργεια 609.3 keV η απόσταση υπολογίστηκε ίση με ~ 985 m. Και στις δύο περιπτώσεις ο όγκος V_{eff} είναι πολύ μεγάλος και γεγονότα που προέρχονται από την κτιριακή υποδομή και το έδαφος γύρω από τον ανιχνευτή δε μπορούν να αποκλειστούν.

Η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή εκφράζει την ικανότητα του να καταγράφει ακτίνες- γ συγκεκριμένης ενέργειας και μεταβάλλεται συναρτήσει της ενέργειας. Για την ποσοτικοποίηση $\left(\frac{Bq}{L}, \frac{Bq}{cm^3}, \text{κ. α.}\right)$ των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις φασματοσκοπίας- γ θα έπρεπε να υπολογιστεί θεωρητικά και πειραματικά η ανιχνευτική απόδοση ε του ανιχνευτή. Γενικά, η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή για ακτίνες- γ ενέργειας E_γ με πιθανότητα εκπομπής για την συγκεκριμένη ενέργεια I_γ υπό στερεά γωνία Ω γνωστής ενεργότητας A , υπολογίζεται πειραματικά από την σχέση:

$$\varepsilon = \frac{N}{I_\gamma \cdot A}, \quad \text{Εξ:2.3}$$

όπου N εκφράζει τα καταγεγραμμένα γεγονότα ανά μονάδα χρόνου στην εν λόγω φωτοκορυφή ενέργειας E_γ .

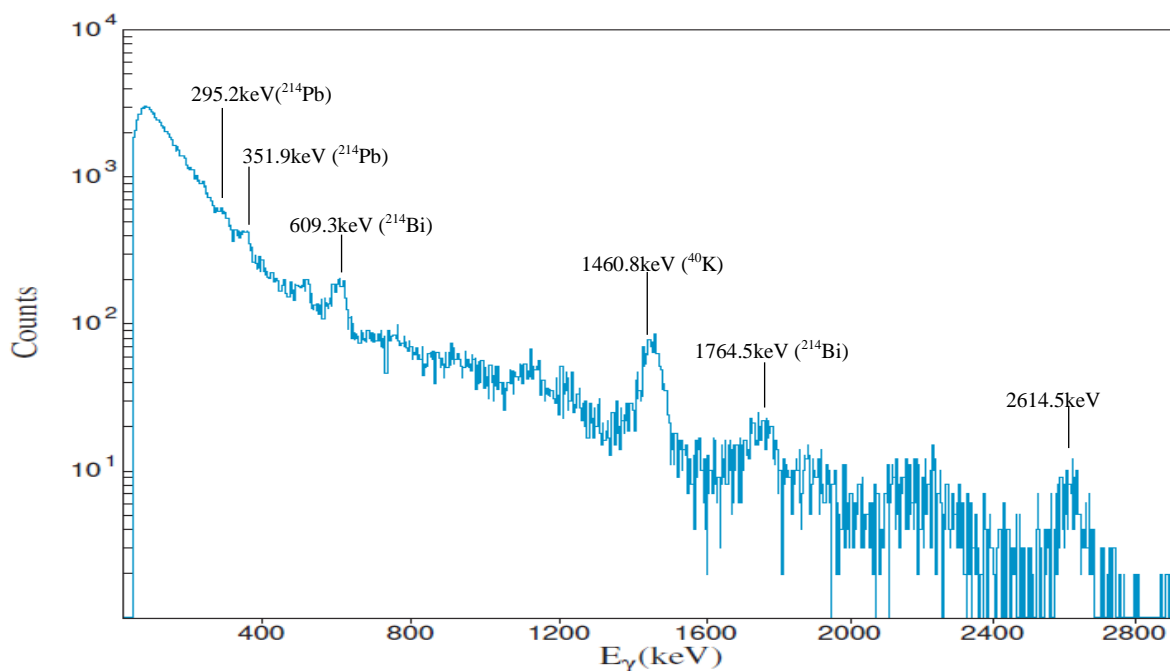
Ο πειραματικός προσδιορισμός της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος GeoMAREA στις πραγματικές συνθήκες μέτρησης στον ατμοσφαιρικό αέρα δεν είναι δυνατός καθώς στον όγκο V_{eff} δεν είναι γνωστή η ενεργότητα A των θυγατρικών του ραδονίου. Παράλληλα, ο πολύ μεγάλος όγκος και η πολύπλοκη γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου καθιστούν εξαιρετικά δύσκολο και χρονοβόρο τον θεωρητικό προσδιορισμό της μέσω χρήσης προγραμμάτων εξομοίωσης τύπου Monte-Carlo (πχ MCNP5, GEANT). Εξάλλου τα χαρακτηριστικά του αέρα, όπως η πυκνότητα, η σύσταση, η περιεκτικότητα σε υδρατμούς, αερολύματα και σταγονίδια βροχής μεταβάλλονται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες γεγονός που θα επέφερε περαιτέρω δυσκολία. Επομένως η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης και ο θεωρητικός υπολογισμός της απόδοσης ε δεν αποτέλεσε στόχο της παρούσας εργασίας. Έτσι, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή έχουν ποιοτικό και όχι αυστηρά ποσοτικό χαρακτήρα. Δόθηκε βαρύτητα σε σχετικές μεταβολές τους καθώς και σε μεγέθη όπου είναι δυνατό με αναλυτικό τρόπο να προσδιορισθεί έμμεσα ο λόγος των ενεργοτήτων των θυγατρικών του ραδονίου παρακάμπτοντας τον ακριβή προσδιορισμό της ανιχνευτικής απόδοσης.

2.3 Επεξεργασία και έλεγχος δεδομένων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι διαδικασίες και οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία, τον έλεγχο και την ανάλυση των δεδομένων που καταγράφονται από το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA και τον μετεωρολογικό σταθμό της Αναβύσσου. Για την ανάλυση των δεδομένων ακτινοβολίας γ επιλέχθηκαν ενεργειακές περιοχές με συγκεκριμένα ενεργειακά εύρη για τις υπό μελέτη φωτοκορυφές και δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος για την αυτόματη ενεργειακή βαθμονόμηση κάθε φάσματος που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή. Τέλος παρουσιάζεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων που ανακτώνται από τον μετεωρολογικό σταθμό, για τον συγχρονισμό των δύο συστημάτων και την συσχέτιση τους.

2.3.1 Προσδιορισμός και παρακολούθηση περιοχών ενδιαφέροντας (ROIs) των φασμάτων

Τα δεδομένα που καταγράφονταν για τις ημέρες χωρίς βροχή και για τις ημέρες με βροχόπτωση με σκοπό την παρακολούθηση μεταβολών των υπό μελέτη φυσικών παραμέτρων. Στη συνέχεια για την μετατροπή των καναλιών (channel ή ch) σε ενέργεια (E_γ), επιλέχθηκε ένα τυχαίο φάσμα.. Η σχέση της ενεργειακής βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε δίνεται από την εξίσωση $E_\gamma (keV) = a + b \cdot ch$ (Εξ.:2.4), όπου οι συντελεστές a και b υπολογίζονται μέσω του προγράμματος ανάλυσης φασμάτων SPECTR-W (Kalfas, Axiotis, & Tsabaris, 2016). Ένα χαρακτηριστικό φάσμα χωρίς βροχή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.7). Σε όλο το εύρος φαίνεται το υπόβαθρο λόγω του φαινομένου Compton όπου στις χαμηλότερες ενέργειες είναι πιο έντονο.



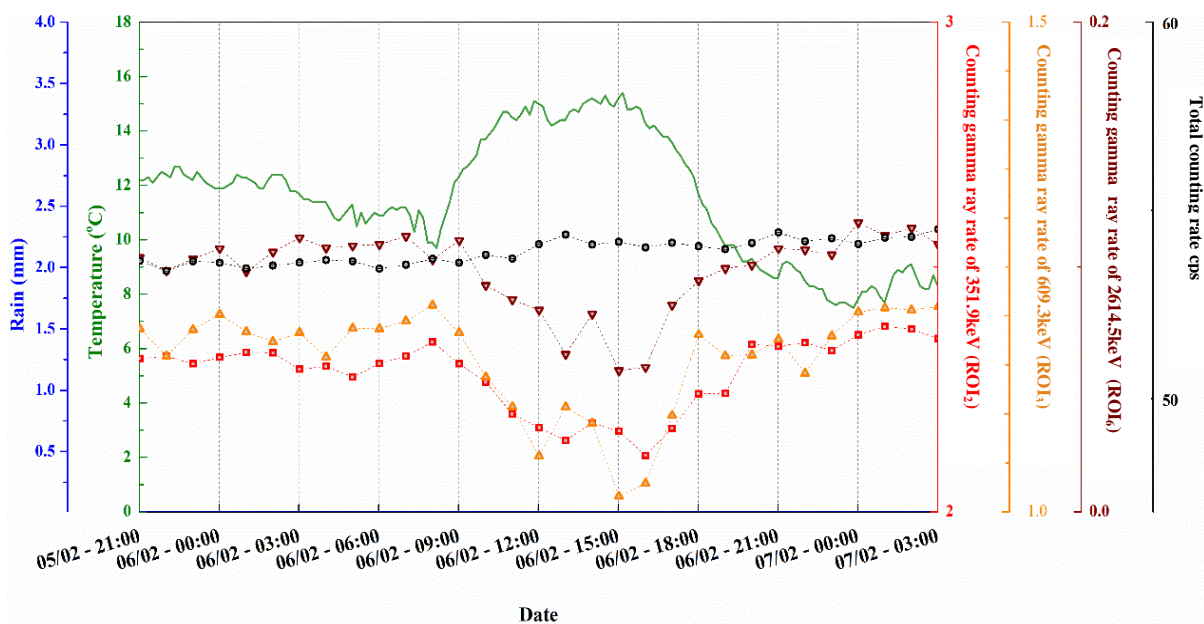
Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτινοβολίας- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίς γεγονός βροχής.

Στη συνέχεια για την παρακολούθηση των υπό μελέτη ραδιοϊσοτόπων και των μεταβολών των συγκεντρώσεων απομονώθηκαν έξι ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος (Range Of Interest ή ROIs), δηλαδή περιοχές γύρω από τις υπό μελέτη φωτοκορυφές ακτινοβολίας-γ. Για την κάθε ενέργεια επιλέχθηκε συγκεκριμένος αριθμός καναλιών, επομένως και ενέργειας, εκατέρωθεν της φωτοκορυφής έτσι ώστε να απομονώνεται όλο το εύρος της. Για κάθε φάσμα που συλλέχθηκε, οι συγκεκριμένες περιοχές μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι ενεργειακές περιοχές φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος	Ραδιοϊσότοπο
ROI₁	²¹⁴ Pb (295.2keV)
ROI₂	²¹⁴ Pb (351.9keV)
ROI₃	²¹⁴ Bi (609.3keV)
ROI₄	²¹⁴ Bi (1764.5keV)
ROI₅	⁴⁰ K (1460.8keV)
ROI₆	²⁰⁸ Tl (2614.5keV)

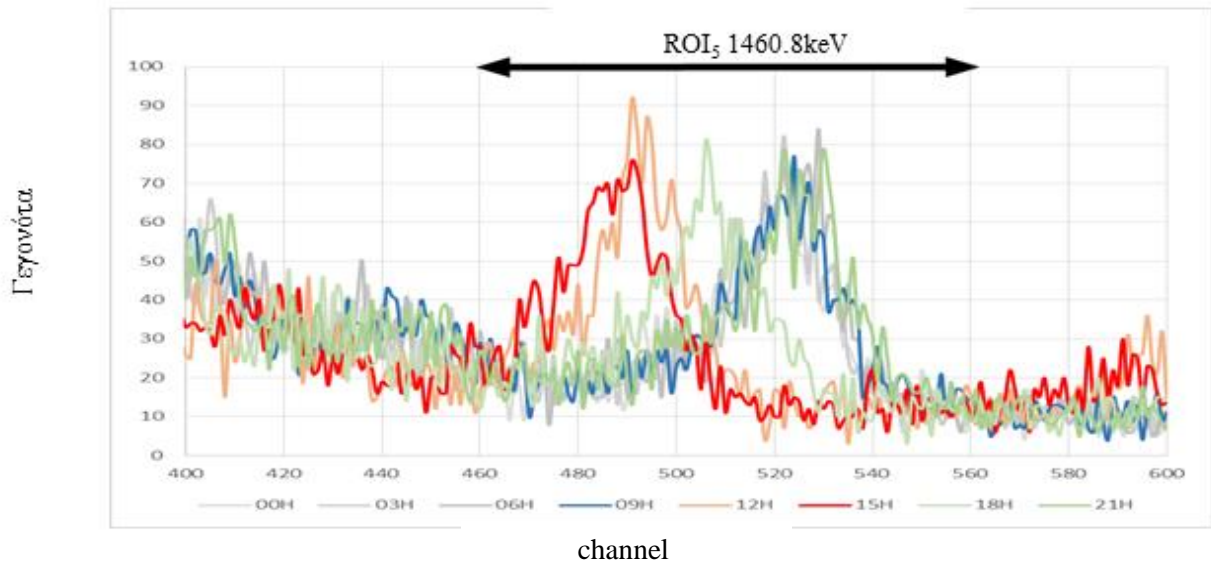
Πίνακας 2.1: ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος ROIs για τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα.

Όμως λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρήθηκε η ενεργειακή μετατόπιση (energy shift) των φωτοκορυφών στο φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία μεταβάλλεται συνεχώς, ακόμα και έως 10°C κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, με την χαμηλότερη τιμή της να καταγράφεται κυρίως τις βραδινές ώρες έως τις πρώτες πρωινές ώρες και την υψηλότερη τιμή της να αντιστοιχεί στις μεσημεριανές ώρες. Τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή επηρεάζονται κατά την εναλλαγή της θερμοκρασίας και έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση των φωτοκορυφών στα κανάλια. Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.8) παρατηρήθηκε η μεταβολή του ρυθμού γεγονότων ακτινών-γ cps_{ROIs} , για τις ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για τα φάσματα που κατέγραψε ο ανιχνευτής την 6^η Φεβρουαρίου 2018. Η θερμοκρασία έφτασε την μέγιστη τιμή της για $T_{max} = 15.4$ °C στις 15:10μ.μ. το μεσημέρι, ενώ η ελάχιστη τιμή της κατέγραψε $T_{min} = 7.5$ °C στις 23:50μ.μ το βράδυ. Εμφανής ήταν η μείωση του ρυθμού cps_{ROIs} με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ ο ρυθμός cps παραμένει σχεδόν σταθερός.

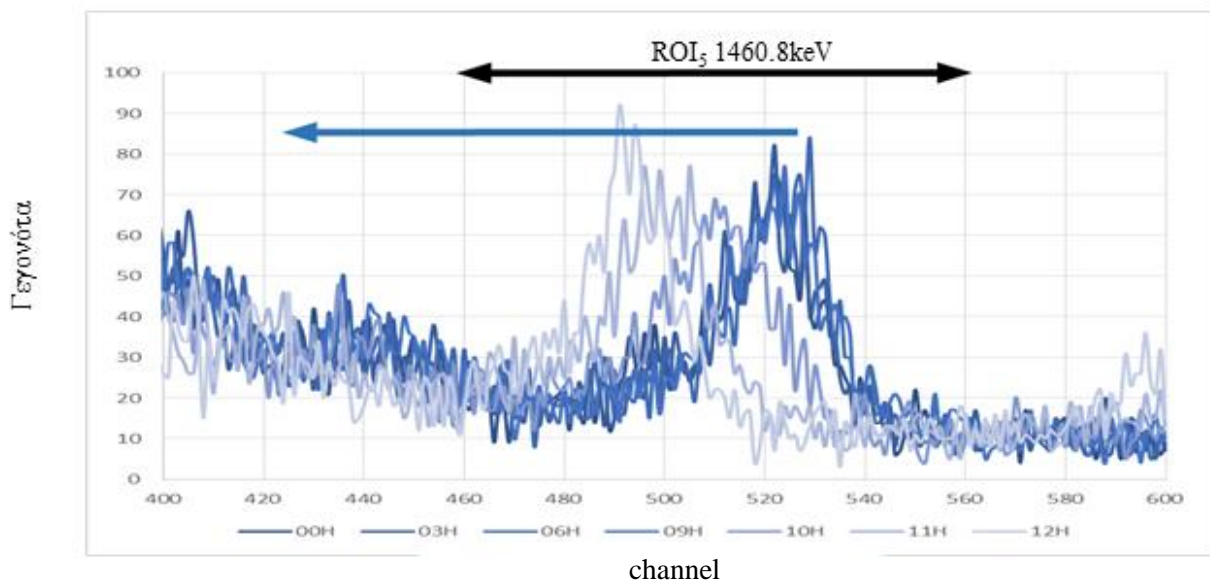


Σχήμα 2.8: Συμπεριφορά του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολίας-γ cps_{ROIs} για τις ενεργειακές περιοχές του $^{214}Pb(351.9keV)$, $^{214}Bi(609.3keV)$, $^{208}Tl(2614.5keV)$, και του συνολικού ρυθμού γεγονότων cps με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

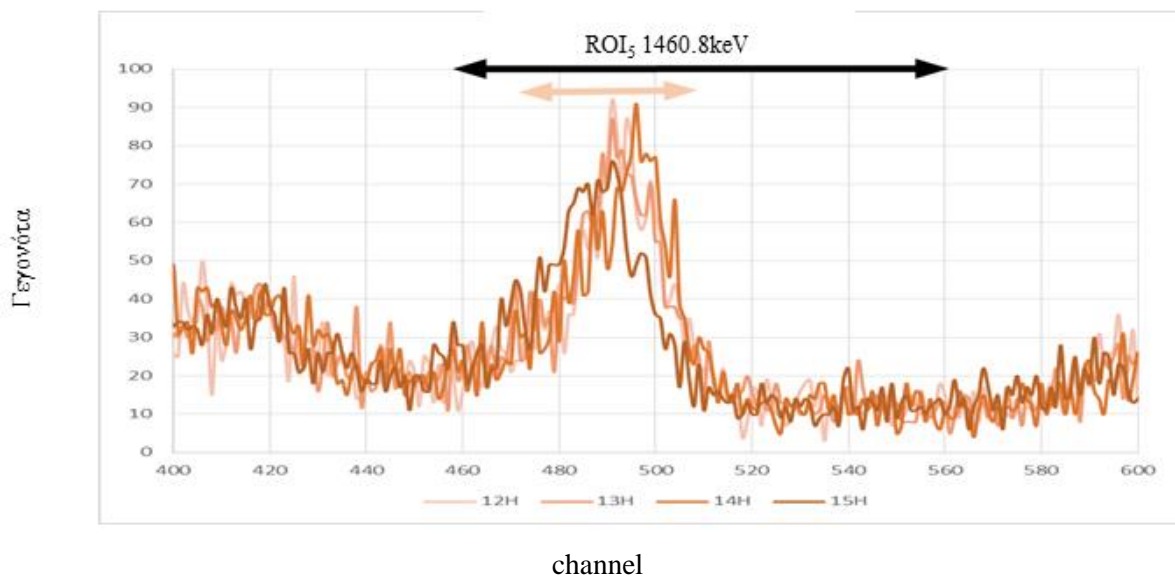
Για την διερεύνηση του συγκεκριμένου φαινομένου το φάσμα περιορίστηκε στη κορυφή των 1460.8keV (ROI₅), την πιο ευκρινή φωτοκορυφή. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.9) φαίνεται η μετακίνηση του φάσματος στο χρονικό διάστημα από τις 00:00π.μ έως τις 21:00μ.μ. Παράλληλα η ημέρα χωρίστηκε σε τρία διαστήματα. Το πρώτο είναι το διάστημα 00:00π.μ. έως 12:00μ.μ όπου η θερμοκρασία από τις χαμηλότερες τιμές αρχίζει να αυξάνει. Το δεύτερο διάστημα από τις 12:00μ.μ. έως τις 15:00 μ.μ. η θερμοκρασία εμφανίζει τις μέγιστες τιμές. Το τρίτο διάστημα από τις 15:00μ.μ. έως τις 18:00μ.μ. η θερμοκρασία από τις υψηλότερες τιμές αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 2.10 - 2.12).



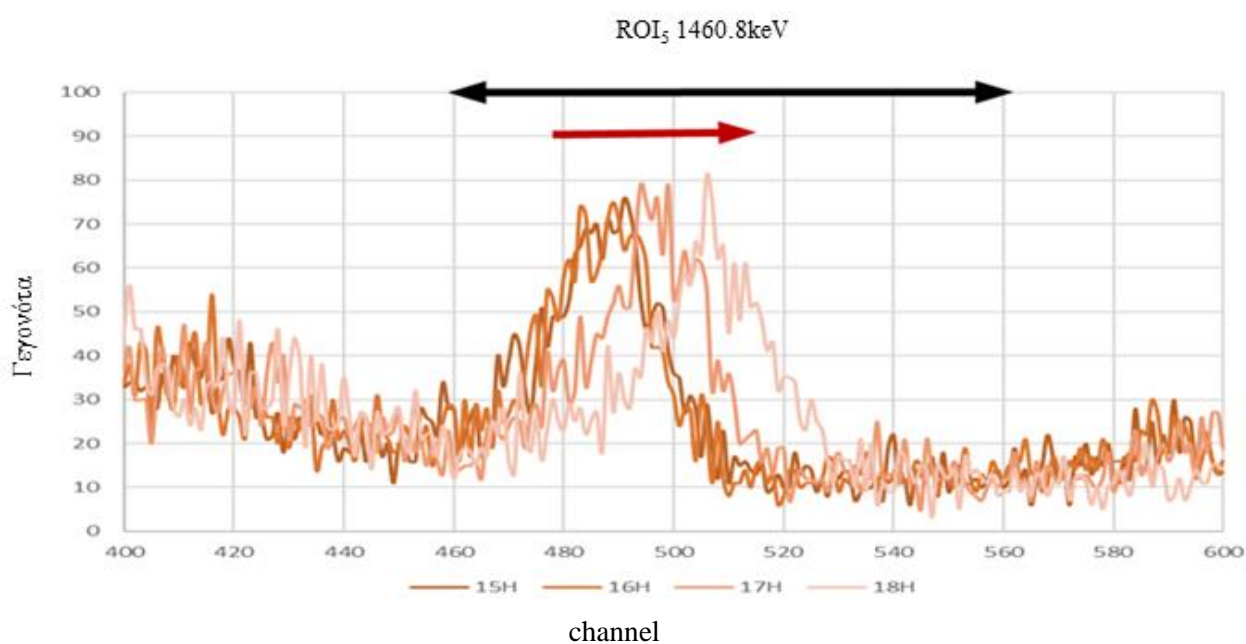
Σχήμα 2.9: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV (^{40}K).



Σχήμα 2.10: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 00:00π.μ. έως 12:00μ.μ



Σχήμα 2.11: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 12:00μ.μ. έως τις 15:00 μ.μ.



Σχήμα 2.12: Ενεργειακή μετατόπιση της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV το διάστημα 15:00μ.μ. έως τις 18:00 μ.μ.

Στο πρώτο διάστημα, με την αύξηση της θερμοκρασίας η φωτοκορυφή μετακινείται προς τα αριστερά στο ενεργειακό φάσμα. Στο δεύτερο διάστημα η θερμοκρασία δεν παρουσίασε σημαντική διαφορά, με την μετακίνηση της φωτοκορυφής να είναι μικρή, περίπου στα 10keV (~3 κανάλια). Στο τρίτο διάστημα, με την μείωση της θερμοκρασίας η φωτοκορυφή μετακινείται προς στα δεξιά

στο ενεργειακό φάσμα. Σε όλο το ενεργειακό φάσμα παρατηρείται το υπόβαθρο λόγω του φαινομένου Compton (Compton continuum). Στις χαμηλές ενέργειες, το συνεχές Compton καλύπτει περισσότερο εμβαδόν σε σχέση με μεγαλύτερες ενέργειες, επομένως περισσότερα γεγονότα ακτινών-γ καταγράφονται σε μικρότερες ενέργειες λόγω του παραπάνω φαινομένου. Παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασίας και της εν λόγω μετατόπισης των φωτοκορυφών προς αριστερά στο ενεργειακό φάσμα, και από την επιλογή συγκεκριμένου ενεργειακού εύρους για την παρακολούθηση των ROI, παρατηρείται μείωση των cps_{ROI} , διότι καταγράφηκαν γεγονότα ακτίνων-γ που δεν οφείλονται αποκλειστικά από το εύρος της φωτοκορυφής. Από την άλλη πλευρά με την μείωση της θερμοκρασίας, η φωτοκορυφή μετατοπίζεται προς τα δεξιά, επομένως καταγράφονται περισσότερα γεγονότα ακτινών-γ από το εύρος της κορυφής, και για αυτό παρατηρούνται σχετικά αυξημένες τιμές. Επομένως για την επίλυση του προβλήματος της ενεργειακής μετατόπισης (energy shift problem), για την κάθε φωτοκορυφή θα πρέπει το κάθε φάσμα που καταγράφει ο ανιχνευτής να βαθμονομηθεί και ύστερα να επιλεχτεί το εύρος καναλιών (channels) για τις περιοχές ενδιαφέροντος. Όμως λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων η βαθμονόμηση του κάθε φάσματος ξεχωριστά θα αποτελούσε μία χρονοβόρα διαδικασία, επομένως και δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος αυτόματης βαθμονόμησης και εύρεσης των ενεργειακών περιοχών ενδιαφέροντος. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται ως εξής:

Αρχικά επιλέχθηκαν τέσσερις φωτοκορυφές ενέργειας, για 0keV, 351.9keV, 609.3keV και 1460.8keV, και αντιστοιχήθηκε το κανάλι της κάθε φωτοκορυφής ως προς την ενέργεια. Στη συνέχεια ο κώδικας εντόπιζε το τοπικό μέγιστο των γεγονότων (counts) μιας προκαθορισμένης από τον χρήστη περιοχής καναλιών. Η περιοχή αυτή αφορούσε την περιοχή που αναμένεται η εκάστοτε φωτοκορυφή. Επομένως για το κάθε φάσμα που κατέγραψε ο ανιχνευτής προέκυψαν τέσσερα σημεία (E_1, ch_1) , (E_2, ch_2) , (E_3, ch_3) και (E_4, ch_4) , που αντιστοιχούν σε ενέργεια με κανάλι. Τα τέσσερα αυτά σημεία χρησιμοποιήθηκαν ώστε να βρεθεί η καλύτερη το δυνατό προσαρμογή (fitting) της εξίσωσης της ενεργειακής βαθμονόμησης που προκύπτει από την Εξ.: 2.5. Για κάθε διαφορετικό φάσμα ένα ζεύγος των παραμέτρων a και b προσδιορίζεται και μετατρέπεται ο αριθμός καναλιού σε ενέργεια. Τέλος από την εκάστοτε βαθμονόμησης του κάθε φάσματος μέσω του αλγόριθμου, ορίζονται οι περιοχές ενδιαφέροντος βάση του πίνακα 2.2. Βάση της εκάστοτε βαθμονόμησης τα γεγονότα εντός των περιοχών ενέργειας ROIs που αφορά το κάθε ραδιοϊσότοπο αθροίζονται και προκύπτει ο ρυθμός γεγονότων ανά ραδιοϊσότοπο. Τα γεγονότα που προέρχονται από τα ραδιονουκλίδια, ακολουθούν μια τυχαία διαδικασία που υπακούει στην στατιστική Poisson σύμφωνα με την οποία το σφάλμα δίνεται από την σχέση $\delta N = \sqrt{N}$ (Davidson, 1984). Επομένως το αποτέλεσμα ενός γεγονότος $N = count$ αναφέρεται ως $count \pm \delta count$. Για κάθε ωριαίο φάσμα

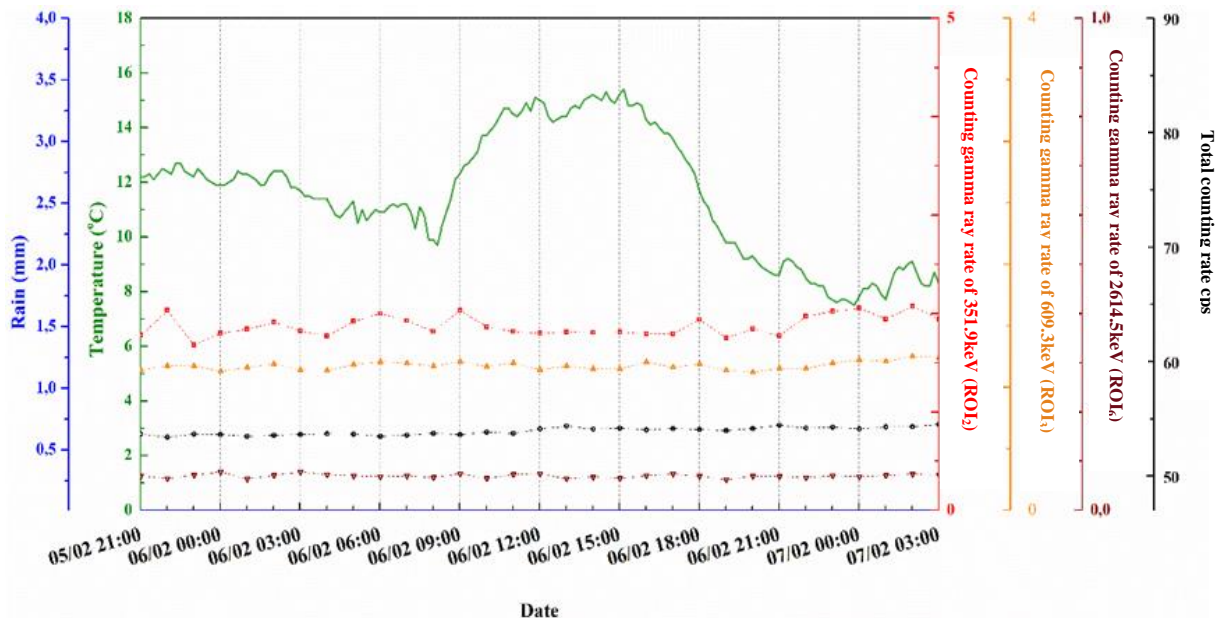
υπολογίστηκε ο ρυθμός ολικών γεγονότων ακτινοβολίας-γ $cps = \frac{counts}{seconds}$, με το σφάλμα να ακολουθεί την διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta cps = \sqrt{\left(\frac{\partial cps}{\partial counts} \cdot \delta counts\right)^2 + \left(\frac{\partial cps}{\partial t} \cdot t\right)^2} = \frac{\sqrt{counts}}{t} \quad \text{Εξ.:2.5}$$

Ραδιοϊσότοπο	Ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος	
^{214}Pb (295.2keV)	ROI₁	260.2keV→ 321.5keV
^{214}Pb (351.9keV)	ROI₂	310.3keV→ 388.3keV
^{214}Bi (609.3keV)	ROI₃	527.8keV→ 678.7keV
^{214}Bi (1764.5keV)	ROI₄	1707.9keV→ 1843.8keV
^{40}K (1460.8keV)	ROI₅	1253.8keV→ 1577.9keV
^{208}Tl (2614.5keV)	ROI₆	2360.6keV→2785.9keV

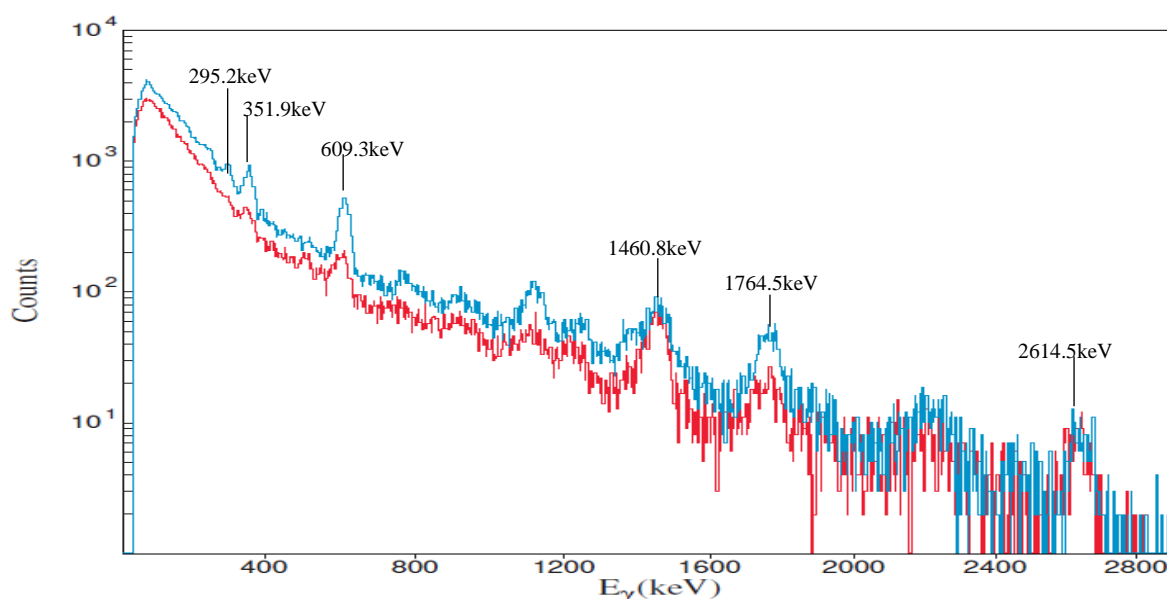
Πίνακας 2.2: Ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος ROIs για τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ρυθμοί cps_{ROI} και cps φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. (Σχήμα 2.13)



Σχήμα 2.13: Συμπεριφορά του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για τις ενεργειακές περιοχές του ^{214}Pb (351.9keV), ^{214}Bi (609.3keV), ^{208}Tl (2614.5keV), και του ρυθμού γεγονότων cps με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η ενεργειακή περιοχή που επιλέχθηκε για την 295.2keV είναι το εύρος ενεργειών από 260.2keV έως 321.5keV. Για την φωτοκορυφή ενέργειας 351.9keV το ενεργειακό εύρος είναι από 310.3keV έως 388.3keV (Πίνακας 2.2). Επομένως λόγω του γεγονότος ότι η κατάλληλη επιλογή των ROI στην περιοχή εκείνη ήταν περιορισμένη, αναπόφευκτα καταγράφονται δεδομένα ακτινοβολίας-γ που προέρχονται και από την φωτοκορυφή ενέργειας 295.2keV. Η παρακολούθηση των συνολικών καταγεγραμμένων γεγονότων ακτινοβολίας-γ για κάθε φάσμα ήταν δυνατή, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας (24 ώρες) με και χωρίς βροχόπτωση. Ένα χαρακτηριστικό ωριαίο φάσμα, με εμφανή τη μεταβολή των ραδιοϊσοτόπων του ^{214}Pb και του ^{214}Bi στις περιοχές ενδιαφέροντος φαίνεται στο Σχήμα 2.14.

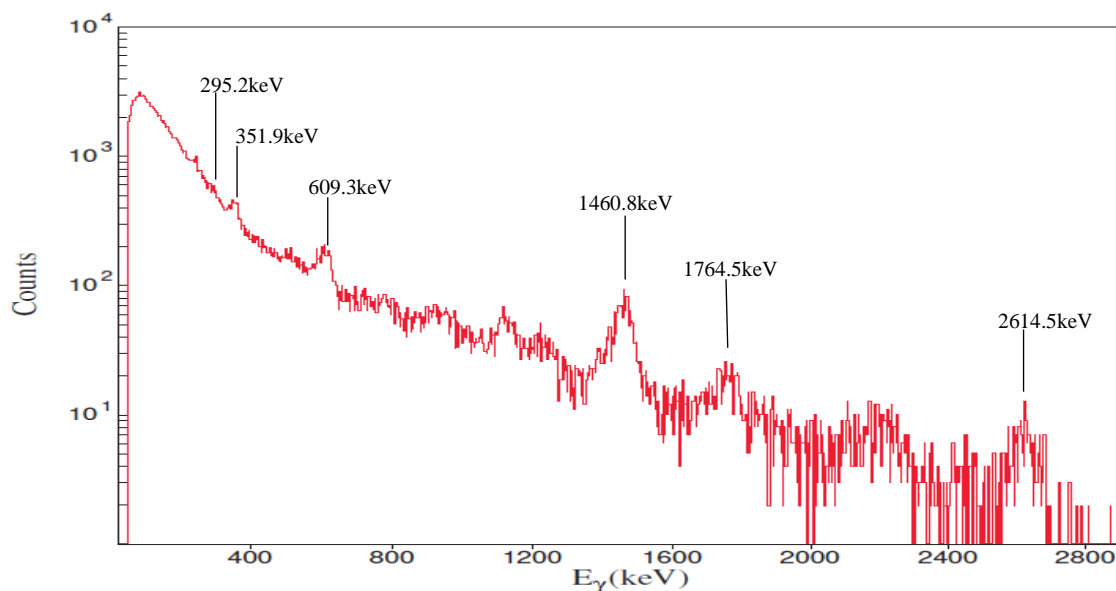


Σχήμα 2.14: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτινοβολίας-γ στον ατμοσφαιρικό αέρα. Με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύεται φάσμα χωρίς γεγονός βροχής, με το μπλε χρώμα υποδεικνύεται φάσμα βροχόπτωσης.

Συγκρίνοντας δύο ενδεικτικά φάσματα με και χωρίς βροχή γίνεται φανερό ότι τα γεγονότα των φωτοκορυφών για ενέργειες 295.2keV (^{214}Pb), 351.9keV (^{214}Pb), 609.3keV (^{214}Bi), και 1764.5keV (^{214}Bi) αυξάνονται σημαντικά. Το δεύτερο σημείο είναι ότι στην περιοχή που εκπέμπει ακτίνες-γ το ^{40}K , στην περιοχή δηλαδή για ενέργεια 1460.8keV (ROI₅) δεν παρατηρείται αύξηση αλλά διαπλάτυνση του εύρους της φωτοκορυφής. Αυτό οφείλεται στις φωτοκορυφές μικρής έντασης του ^{214}Bi . Σε ότι έχει σχέση με το ^{208}Tl , θυγατρικό του θορονίου (^{220}Rn), στην ενεργειακή περιοχή της φωτοκορυφής ενέργειας 2614.5keV (ROI₆) δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή κατά την εναλλαγή των καιρικών συνθηκών βροχής.

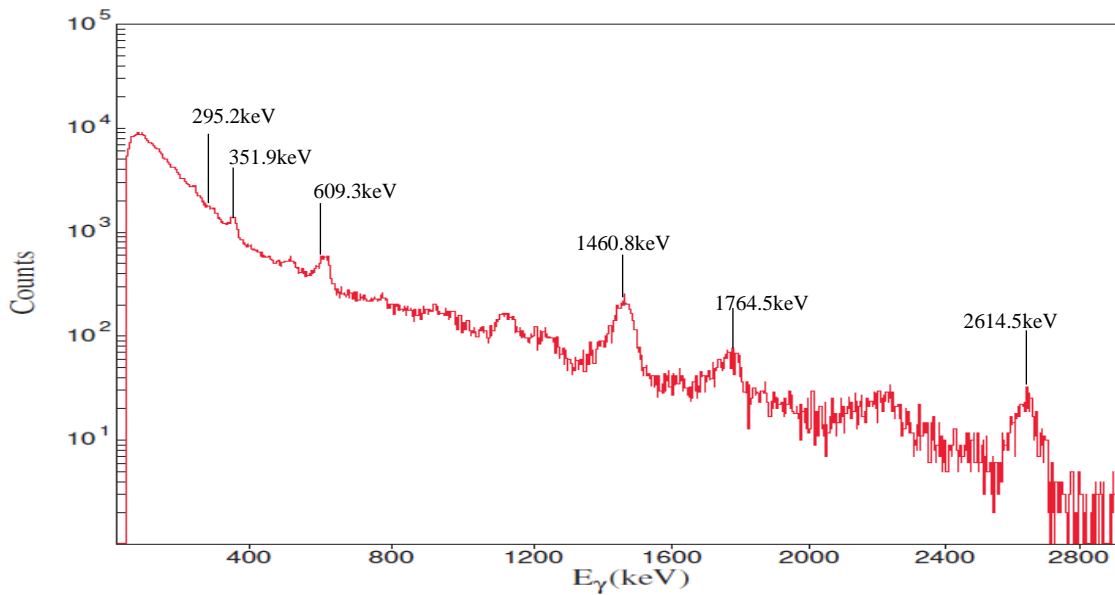
2.3.2 Ανάλυση φασμάτων

Η ανάλυση των φασμάτων έγινε με το πρόγραμμα ανάλυσης φασμάτων SPECTR-W. Ο ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας- γ για τα γεγονότα που συμβαίνουν στις φωτοκορυφές, θα συμβολίζεται ως cps_{net} , και θα ονομάζεται ρυθμός καθαρών γεγονότων ακτινοβολίας- γ . Καθώς την ημέρα καταγράφονταν 24 ωριαία φάσματα, κύριος στόχος ήταν η ανάλυση όλων των φασμάτων, στις φωτοκορυφές για ενέργειες 295.2keV (^{214}Pb), 351.9keV(^{214}Pb), 609.3keV(^{214}Bi), 1764.5keV (^{214}Bi), 1460.8keV(^{40}K), 2614.5keV (^{208}Tl) για τις ημέρες χωρίς και με βροχοπτώσεις. Στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών, για τις ημέρες χωρίς βροχοπτώσεις, οι φωτοκορυφές δεν ήταν ευκρινείς λόγω χαμηλής στατιστικής του ρυθμού cps_{net} που καταγράφονταν (Σχήμα 2.15).

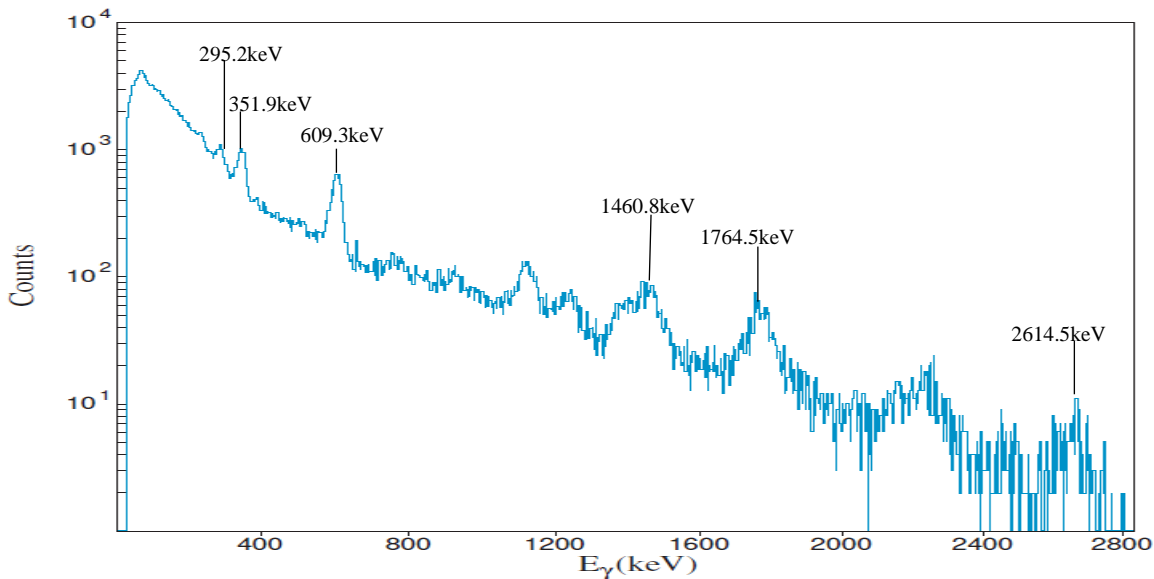


Σχήμα 2.15: Ενεργειακό φάσμα μίας ώρας χωρίς βροχή.

Για την καλύτερη ανάλυση των μετρήσεων, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η πρόσθεση (data summing), το λιγότερο τριών συνεχόμενων ωριαίων φασμάτων. Με αυτό τον τρόπο οι προαναφερθείσες φωτοκορυφές παρουσιάζονται με περισσότερη ευκρίνεια (Σχήμα 2.16). Το νέο φάσμα που δημιουργήθηκε κανονικοποιήθηκε (time normalization) μέσω του SPECTR-W στην διάρκεια μίας ώρας, και κάθε φωτοκορυφή αναλύθηκε και υπολογίστηκε ο ρυθμός cps_{net} . Τις ημέρες με βροχή οι φωτοκορυφές διακρίνονται σε όλο το εύρος ενεργειών (Σχήμα 2.17). Επομένως τα ωριαία φάσματα βροχοπτώσεων, αναλύθηκαν χωρίς να υποστούν την παραπάνω επεξεργασία. Συνολικά αναλύθηκαν 889 φάσματα, τα 683 αντιστοιχούν σε αθροισμένα φάσματα χωρίς γεγονός βροχής και τα 143 σε φάσματα με βροχή. Επίσης αναλύθηκαν 61 φάσματα τα οποία συλλέχθηκαν σε χρονικό διάστημα 1-3 ωρών μετά το πέρας βροχοπτώσεων καθώς εμφάνιζαν αυξημένες τιμές του ολικού αριθμού των ανιχνευόμενων ακτινών- γ .



Σχήμα 2.16: : Αθροισμένο ενεργειακό φάσμα τριών ωρών χωρίς βροχή.

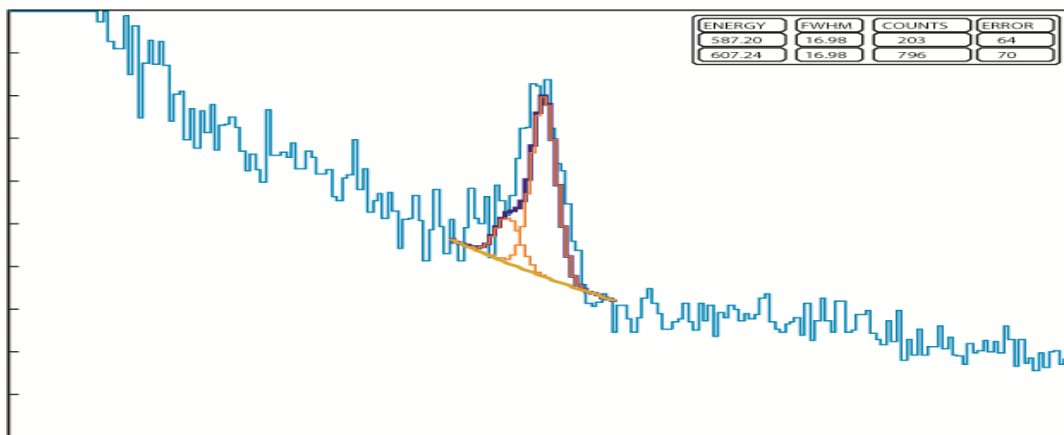


Σχήμα 2.17: Ενεργειακό φάσμα μίας ώρας με βροχή.

2.3.3 Μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού καθαρών γεγονότων φωτοκορυφών των θυγατρικών του ραδονίου

Από την ανάλυση των δεδομένων, σε όλο το ενεργειακό φάσμα, μεταβλήθηκαν τα θυγατρικά του ραδονίου κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων (Σχήμα 2.14). Δηλαδή ο ρυθμός cps_{net} στις φωτοκορυφές των ^{214}Pb και ^{214}Bi αυξήθηκε σε αντίθεση με του ^{208}Tl όπου δεν μεταβλήθηκε σημαντικά. Επίσης με την αύξηση των γεγονότων ακτινών- γ από τα θυγατρικά του ραδονίου, αυξήθηκε και το υπόβαθρο σε όλο το εύρος των φασμάτων, δηλαδή τα γεγονότα που οφείλονται από

το φαινόμενο Compton. Επομένως υπεύθυνο ραδιονουκλίδιο για την αύξηση της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα για κάθε γεγονός βροχής, είναι το ραδόνιο ^{222}Rn . Συνεπώς, για την διερεύνηση της μεταβολής της ακτινοβολίας- γ κατά την διάρκεια των βροχών, η μελέτη θα πρέπει να περιοριστεί στα θυγατρικά του ραδονίου, το ^{214}Pb και ^{214}Bi . Όμως λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, για την διευκόλυνση από την ανάλυση κάθε φάσματος ξεχωριστά, σκοπός είναι να προσδιοριστεί μια εξίσωση για την αυτόματη αφαίρεση του υπόβαθρου λόγω φαινομένου Compton από τις μετρήσεις, και τον προσδιορισμό των καταγεγραμμένων από τον ανιχνευτή καθαρών γεγονότων. Μια μεθοδολογία έμμεσου προσδιορισμού των ρυθμών cps_{net} για τα θυγατρικά του ραδονίου προτείνεται. Εξετάστηκε η συσχέτιση των ρυθμών cps_{ROI} των φωτοκορυφών 351.9 keV (^{214}Pb), και 609.3 keV (^{214}Bi), και των ρυθμών cps_{net} για τις ίδιες φωτοκορυφές, των δεδομένων με και χωρίς βροχές. Για να γίνει αυτό όμως θα έπρεπε αρχικά να εξετασθούν οι ρυθμοί cps_{net} που προέρχονται από το ραδόνιο. Πιο συγκεκριμένα στο εύρος της φωτοκορυφής ενέργειας 609.3 keV συμπεριλαμβάνεται η φωτοκορυφή που εκπέμπει το ^{208}Tl στην 583.2 keV. Κατά την ανάλυση των φασμάτων κατέστη δύσκολος ο διαχωρισμός των δύο φωτοκορυφών μέσω της αντίστοιχης μεθόδου που περιλαμβάνεται στο SPECTR-W (deconvolution) (Σχήμα 2.18). Τα βήματα για την αφαίρεση των ρυθμών cps_{net} της φωτοκορυφής 583.2keV περιγράφονται ακολούθως.



Σχήμα 2.18: Η φωτοκορυφή ενέργειας 583.2keV του ^{208}Tl στο εμβάδόν της φωτοκορυφή ενέργειας 609.3keV του ^{214}Bi .

Για τον ρυθμό καθαρών γεγονότων στην φωτοκορυφή 609.3keV του ^{214}Bi ισχύει:

$$cps_{net_{609.3keV}} = cps_{609.3keV(int)} - cps_{net_{583.2keV}} \quad \text{Εξ.:2.6}$$

Όπου $cps_{609.3keV(int)}$ αντιστοιχεί στον ρυθμό γεγονότων της φωτοκορυφής 609.3 keV όπου συμπεριλαμβάνονται και εκείνα από την φωτοκορυφή της 583.2 keV. Καθώς η ενεργότητα του ^{208}Tl παραμένει ίδια ανεξάρτητα από το ποια φωτοκορυφή θα αναλυθεί, δηλαδή $A_{583.2keV} = A_{2614.5keV}$, προσδιορίστηκε ο λόγος της απόλυτης απόδοσης στις φωτοκορυφές με ενέργειες 583.2 και 2614.5 keV αντίστοιχα.

$$\frac{\varepsilon_{583keV}}{\varepsilon_{2614.5eV}} = \frac{I_{\gamma_{2614.5keV}}}{I_{\gamma_{583.2keV}}} \cdot \frac{cps_{net_{583.2keV}}}{cps_{net_{2614.5eV}}} \quad E\acute{\xi}.:2.7$$

Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος των ρυθμών καθαρών γεγονότων των φωτοκορυφών για 583.2 keV και 2614.5 keV $\frac{cps_{net_{583.2keV}}}{cps_{net_{2614.5eV}}}$ για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή ακολουθεί κανονική κατανομή (Σχήμα 2.19) , και υπολογίστηκε ο μέσο όρος να είναι:

$$\frac{\overline{cps_{net_{583.2keV}}}}{cps_{net_{2614.5eV}}} = 1.81 \pm 0.47$$

Επομένως από την E\acute{\xi}.:2.7 προσδιορίστηκε ο λόγος της απόλυτης απόδοσης:

$$\frac{\varepsilon_{583.2keV}}{\varepsilon_{2614.5eV}} \approx 2.12 \pm 0.55$$

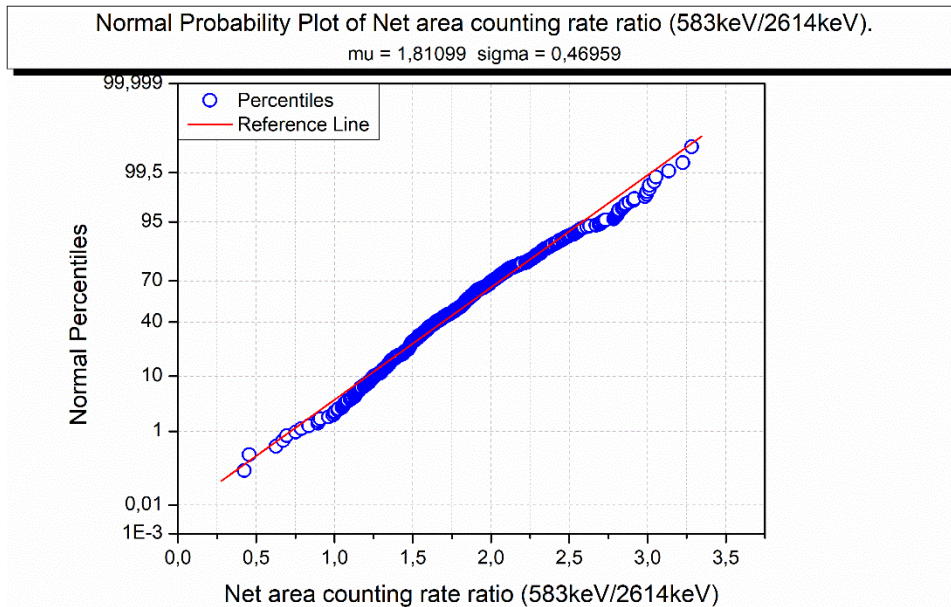
Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ρυθμός καθαρών γεγονότων της φωτοκορυφής ενέργειας 583.2 keV δίνεται από την σχέση:

$$cps_{net_{583keV}} = \frac{I_{\gamma_{583.2keV}}}{I_{\gamma_{2614.5keV}}} \frac{\varepsilon_{583keV}}{\varepsilon_{2614.5eV}} \cdot cps_{net_{2614.5eV}} \quad E\acute{\xi}.:2.8$$

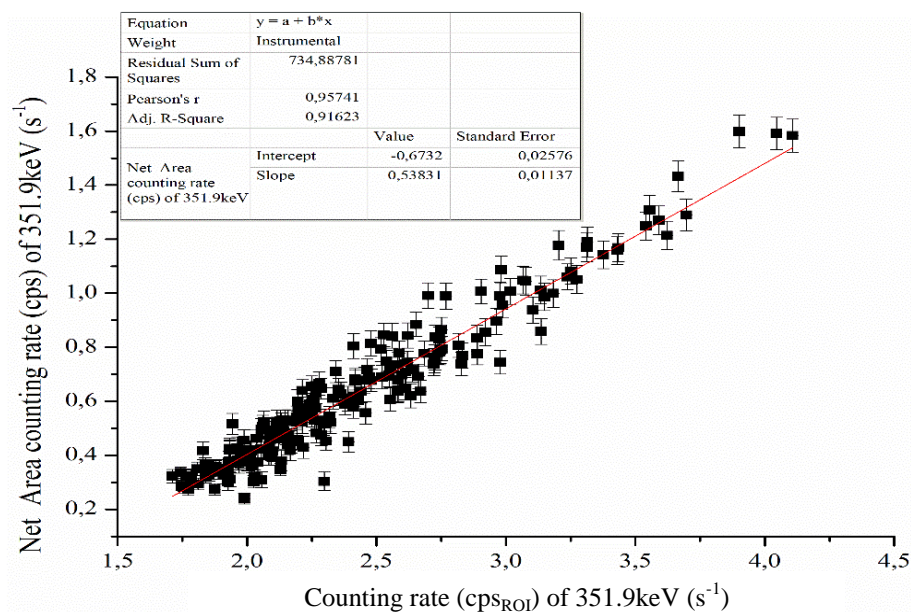
Και τελικά ο ρυθμός καθαρών γεγονότων της φωτοκορυφής ενέργειας 609.3 keV για το ^{214}Bi προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$cps_{net_{609.3keV}} = cps_{609.3keV(int)} - \frac{I_{\gamma_{583.2keV}}}{I_{\gamma_{2614.5keV}}} \frac{\varepsilon_{583.2keV}}{\varepsilon_{2614.5eV}} \cdot cps_{net_{2614.5eV}} \quad E\acute{\xi}.:2.9$$

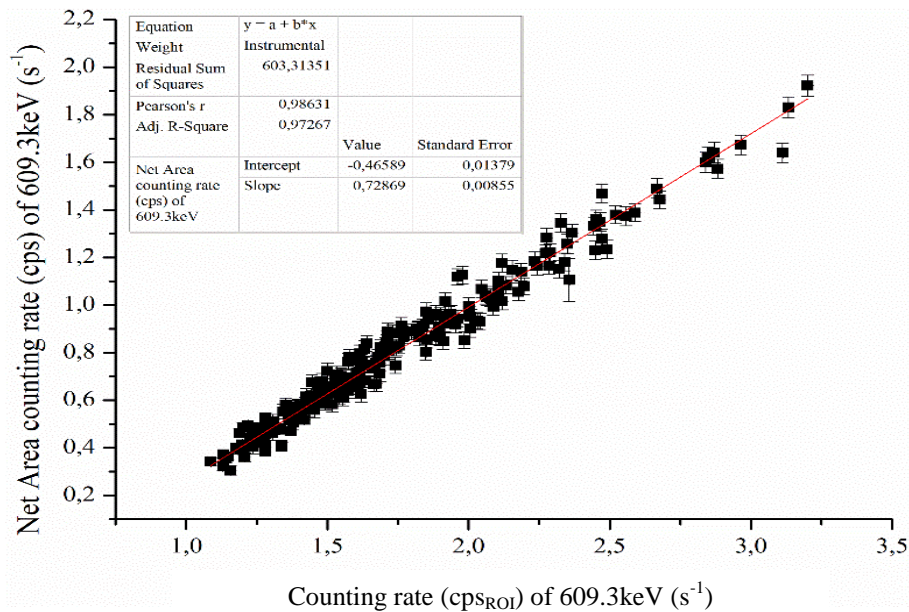
Όπου $I_{\gamma_{583.2keV}}$ η πιθανότητα (%) εκπομπής φωτονίων στην φωτοκορυφή των 583.2 keV με τιμή 30.36% και $I_{\gamma_{2614.5keV}}$ η πιθανότητα (%) εκπομπής φωτονίων στην φωτοκορυφή των 2614.5 keV με τιμή 35.64%.



Σχήμα 2.19: Κανονική κατανομή για το σύνολο των δεδομένων χωρίς βροχή του λόγου $\frac{cps_{net_{583.2keV}}}{cps_{net_{2614.5eV}}}$ των καθαρών ρυθμών γεγονότων του ^{208}Tl .



Σχήμα 2.20: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 351.9keV του ^{214}Pb για τα δεδομένα με γεγονότα βροχής.



Σχήμα 2.21: : Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της φωτοκορυφής ενέργειας 609.3keV του ^{214}Bi για τα δεδομένα με γεγονότα βροχής.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε γραμμική παράσταση μεταξύ των δύο μεταβλητών (cps_{ROI} & cps_{net}), των φωτοκορυφών 351.9 keV για το ^{214}Pb και 609.3 keV για το ^{214}Bi αντίστοιχα, για τα δεδομένα με βροχοπτώσεις, με σκοπό την αφαίρεση του υπόβαθρου λόγω φαινομένου Compton . Από τα σχήματα 2.20 και 2.21 για τις δύο φωτοκορυφές, οι ρυθμοί cps_{net} εμφανίζουν μία γραμμική εξάρτηση (linear fit) με τον ρυθμό cps_{ROI} στις ενεργειακές περιοχές ενδιαφέροντος ROI_2 (351.9 keV), και ROI_3 . (609.3 keV). Δηλαδή κατά την διάρκεια βροχών οι ρυθμοί cps_{net} αυξάνονται γραμμικά με τους ρυθμούς cps_{ROI} από την εξίσωση της μορφής $cps_{net} = b \cdot cps_{ROI} + a$. Ο παράγοντας b υποδεικνύει το ποσοστό των γεγονότων ακτινοβολίας-γ που οφείλονται στο φαινόμενο Compton.

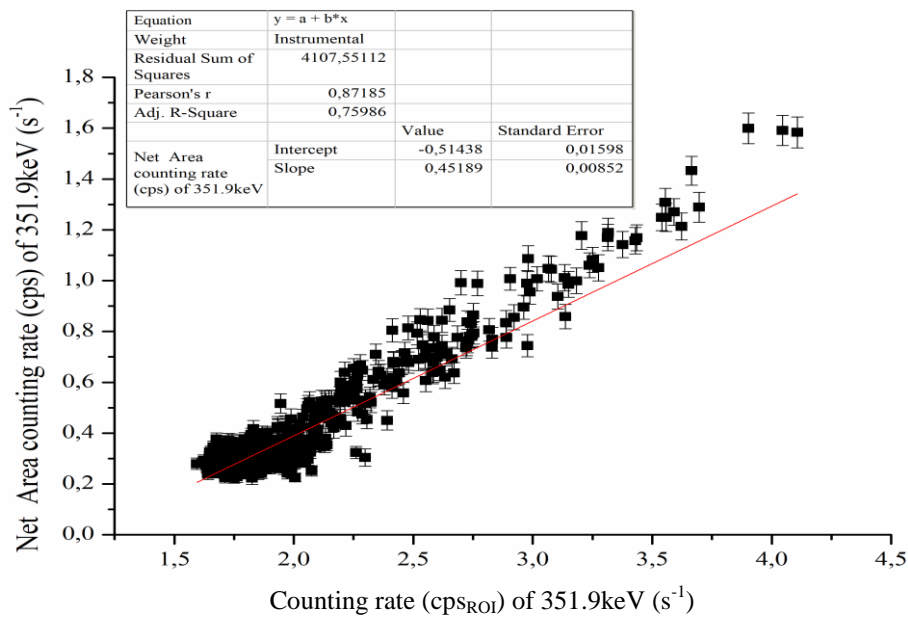
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δεδομένα για την φωτοκορυφή 351.9 keV, με και χωρίς βροχοπτώσεις, όπου μελετήθηκε η γραμμική εξάρτηση των ρυθμών cps_{net} συναρτήσει των ρυθμών cps_{ROI} . Στο σχήμα 2.22 φαίνεται όπως και προηγουμένως η γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} . Ο ρυθμός $cps_{net_{351.9keV}}$ συναρτήσει του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI_2} για όλα δεδομένα (με και χωρίς βροχές) δίνεται από τη σχέση :

$$cps_{net_{351.9keV}} = a \cdot cps_{ROI_2} + b \quad \text{Εξ.:2.10}$$

με τιμές $a = 0.452 \pm 0.008$, $b = -0.514 \pm 0.016$ και σφάλμα που δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta cps_{net_{351.9keV}} = \sqrt{(cps_{ROI_2} \cdot \delta a)^2 + (a \cdot \delta cps_{ROI_2})^2 + \delta b^2} \quad \text{Εξ.:2.11}$$

Ο παράγοντας b υποδεικνύει το ποσοστό των γεγονότων ακτινοβολίας-γ που οφείλονται στο φαινόμενο Compton. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ενεργειακής βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως και της περιορισμένης επιλογής κατάλληλου ενεργειακού εύρους για την παρακολούθηση των ρυθμών γεγονότων cps_{ROI} , στις τιμές του άξονα x (cps_{ROI}) περιλαμβάνονται και γεγονότα της φωτοκορυφής 295.2keV. Επομένως οι συγκεκριμένες τιμές επηρεάζουν την γραμμικότητα των μεταβλητών για τιμές με $cps_{ROI} \geq 3.0 \text{ s}^{-1}$ και $cps_{net} \geq 0.8 \text{ s}^{-1}$.



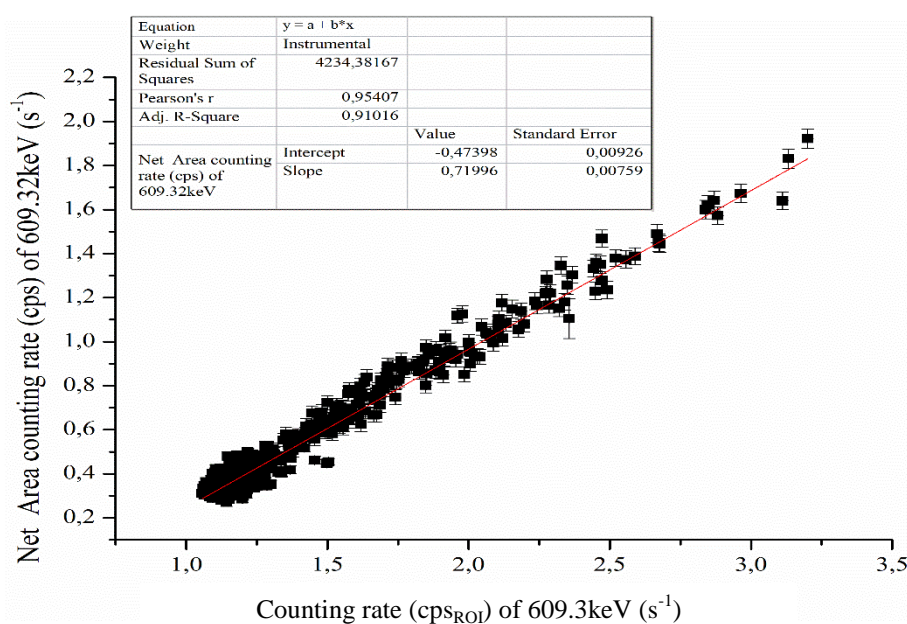
Σχήμα 2.22: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσει του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 351.9keV του ^{214}Pb για όλα δεδομένα.

Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται η γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσεως του ρυθμού cps_{ROI} της φωτοκορυφής 609.3keV του ^{214}Bi , για όλα τα δεδομένα. Ο ρυθμός $cps_{net_{609.3keV}}$ συναρτήσεως του ρυθμού cps_{ROI_3} δίνεται από τη σχέση:

$$cps_{net_{609.3keV}} = a \cdot cps_{ROI_3} + b \quad \text{Εξ.:.2.12}$$

με τιμές $a=0.720 \pm 0.007$, $b=-0.474 \pm 0.009$ και σφάλμα:

$$\delta cps_{net_{609.3keV}} = \sqrt{(cps_{ROI_3} \cdot \delta a)^2 + (a \cdot \delta cps_{ROI_3})^2 + \delta b^2} \quad \text{Εξ.:.2.13}$$



Σχήμα 2.23: Γραμμική εξάρτηση του ρυθμού cps_{net} συναρτήσεως του ρυθμού cps_{ROI} της ενέργειας 609.3keV του ^{214}Bi για όλα τα δεδομένα.

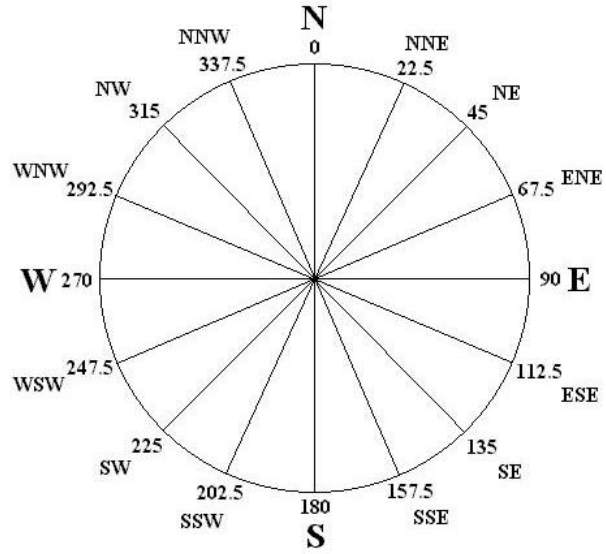
Σύμφωνα με τα παραπάνω και όπως προαναφέρθηκε, στο ραδόνιο οφείλεται η αύξηση της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε επόμενα πειράματα in-situ φασματοσκοπίας-γ με το ανιχνευτικό σύστημα GeoMAREA στον ατμοσφαιρικό αέρα.

2.3.4 Ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων

Οι μετεωρολογικές παράμετροι που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι: θερμοκρασία (Temperature), υγρασία (Humidity), ατμοσφαιρική πίεση (Barometer), ύψος βροχής (Rain [mm]), ραγδιότητα βροχής (Rain rate $\left[\frac{mm}{hr}\right]$), και διεύθυνση ανέμου (Wind direction). Τα δεδομένα αυτά συλλέγονταν ανά δέκα λεπτά και για τον συγχρονισμό τους σε χρονικό διάστημα μίας ώρας με τα δεδομένα ραδιενέργειας, υπολογίστηκε ο αριθμητικός μέσος όρος (mean value) των 6 τιμών που καταγράφηκαν στα αντίστοιχα 6 δεκάλεπτα της ώρας. Στην περίπτωση προσδιορισμού του μέσου όρου για το ύψος και την ένταση της βροχής εξαιρούνται τιμές από δεκάλεπτα κατά τα οποία δεν καταγράφηκε γεγονός βροχής. Για παράδειγμα εάν σε διάστημα μίας ώρας καταγράφηκαν 4 δεκάλεπτα με βροχή και 2 δεκάλεπτα χωρίς βροχή, ο αριθμητικός μέσος όρος υπολογίστηκε βάσει των 4 τιμών με βροχή χωρίς να ληφθούν υπόψη τα 2 δεκάλεπτα χωρίς γεγονός βροχής.

Η αντιστοίχιση μίας μέσης τιμής για την διεύθυνση του ανέμου σε διάστημα μίας ώρας ήταν περισσότερο πολύπλοκη λόγω του γεγονότος ότι έπρεπε να μετατραπούν οι κατευθύνσεις σε μία αριθμητική τιμή. Η διαδικασία περιγράφεται ως εξής. Οι δεκαέξι κατευθύνσεις του ανέμου τοποθετούνται σε κύκλο 360° χωρισμένο σε 16 κυκλικούς τομείς 22,25° ο καθένας (Σχήμα 2.24). Κάθε διεύθυνση αντιστοιχεί σε μοίρες (° degrees) με τον Βορρά να αντιστοιχεί σε 0° και στις 360°. Παράλληλα υπήρχαν ώρες χωρίς καταγραφή διεύθυνσης ανέμου, όπου θεωρήθηκαν ώρες άπνοιας και εξαιρέθηκαν από τον υπολογισμό του μέσου όρου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που αντιστοιχούν οι διευθύνσεις του ανέμου ύστερα από την μετατροπή σε μοίρες (Πίνακας 2.3).

Διεύθυνση ανέμου	° degrees
N	0→22.25
NNE	22.25→45
NE	45→67.5
ENE	67.5→ 90
E	90→112.5
ESE	112.5→135
SE	135→157.5
SSE	157.5→180
S	180→202.5
SSW	202.5→225
SW	225→247.5
WSW	247.5→270
W	270→292.5
WNW	292.5→ 315
NW	315→337.5
NNW	337.5→360



Πίνακας 2.3:Αντιστοίχιση των διευθύνσεων του ανέμου σε μοίρες °.

Σχήμα 2.24:Αντιστοίχιση των κατευθύνσεων του ανέμου σε μοίρες °.

Από την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκε αριθμητικά ο μέσος όρος της διεύθυνσεως του ανέμου, παράμετρος που αντιπροσωπεύει την πιο συχνή διεύθυνση του ανέμου στο διάστημα της μίας ώρας.

2.3.5 Δημιουργία βάσης δεδομένων

Από τον συγχρονισμό των δεδομένων ανά ώρα κατασκευάστηκε μία πρώτη βάση δεδομένων η οποία καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος εμπλουτίζονταν. Με το πέρας του πειράματος, υπέστη συστηματικό έλεγχο και με τις απαραίτητες διορθώσεις μετατράπηκε στην τελική βάση δεδομένων. Αυτή αποτέλεσε την βάση όπου αντλήθηκαν δεδομένα και καταχωρήθηκαν τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις με την εκάστοτε μεθοδολογία που παρουσιάζονται στις ενότητες των κεφαλαίων 2 και 3.

DATE	Tper hr	Hmu per hr	Dew per hr	wind dir per hr	P per hr	cps	cps err	ROI1 (295keV)	ROI1 err	ROI2 (352keV)	ROI2 err	ROI3 (609keV)	ROI3 err	ROI4 (1764keV)	ROI4err	ROI5 (1460keV)
1/11/2017 0:30	15.0	56	6.233333333	NE	1020.8	52.772	0.002	2.044	0.000	1.7672	0.0004	1.1311	0.0003	0.1903	0.0001	0.5519
1/11/2017 1:30	15.1	57	6.6	NE	1020.6	52.956	0.002	2.168	0.000	1.7228	0.0004	1.1775	0.0003	0.1803	0.0001	0.5575
1/11/2017 2:30	15.0	58	6.8	NNE	1020.6	53.362	0.002	2.089	0.000	1.7283	0.0004	1.1181	0.0003	0.1889	0.0001	0.5778
1/11/2017 3:40	14.7	60	6.9	NNE	1020.4	53.605	0.002	2.168	0.000	1.7061	0.0004	1.1311	0.0003	0.1850	0.0001	0.5806
1/11/2017 4:40	14.7	58	6.5	NNE	1020.3	54.063	0.002	2.114	0.000	1.8217	0.0004	1.1750	0.0003	0.2139	0.0001	0.5792
1/11/2017 5:40	14.6	55	5.6	NNE	1020.4	54.130	0.002	2.045	0.000	1.7742	0.0004	1.1492	0.0003	0.1881	0.0001	0.5642
1/11/2017 6:40	14.6	51	4.6	N	1020.7	54.440	0.002	2.057	0.000	1.8147	0.0004	1.1981	0.0003	0.2056	0.0001	0.5811
1/11/2017 7:40	14.6	47	3.4	N	1021.2	54.190	0.002	2.061	0.000	1.8067	0.0004	1.1878	0.0003	0.1969	0.0001	0.5433
1/11/2017 8:40	15.0	47	3.7	N	1021.7	54.014	0.002	2.209	0.000	1.7289	0.0004	1.1586	0.0003	0.1839	0.0001	0.5706
1/11/2017 9:40	15.5	45	3.7	N	1022.1	54.202	0.002	2.061	0.000	1.7894	0.0004	1.1439	0.0003	0.1900	0.0001	0.5942
1/11/2017 10:40	16.3	45	4.3	N	1022.4	54.372	0.002	2.229	0.000	1.7986	0.0004	1.2119	0.0003	0.1947	0.0001	0.5842
1/11/2017 11:40	17.2	44	4.9	NNE	1022.5	54.476	0.002	2.026	0.000	1.9039	0.0004	1.1672	0.0003	0.1922	0.0001	0.5681
1/11/2017 12:40	17.2	44	4.9	NNE	1022.2	54.176	0.002	2.194	0.000	1.7269	0.0004	1.1819	0.0003	0.1881	0.0001	0.5736
1/11/2017 13:40	17.4	48	6.4	NE	1021.7	54.413	0.002	2.235	0.000	1.8358	0.0004	1.1956	0.0003	0.2011	0.0001	0.5681
1/11/2017 14:40	16.8	50	6.3	NNE	1021.5	54.306	0.002	2.028	0.000	1.8681	0.0004	1.2261	0.0003	0.1842	0.0001	0.5589
1/11/2017 15:40	16.2	51	6.1	NE	1021.4	54.021	0.002	2.143	0.000	1.7067	0.0004	1.1769	0.0003	0.1875	0.0001	0.5997
1/11/2017 16:40	15.2	57	6.9	NE	1021.2	53.809	0.002	2.068	0.000	1.8147	0.0004	1.1383	0.0003	0.1944	0.0001	0.5753
1/11/2017 17:40	14.3	60	6.6	NE	1021.4	53.674	0.002	2.123	0.000	1.7814	0.0004	1.1442	0.0003	0.2019	0.0001	0.5628
1/11/2017 18:40	13.7	61	6.4	NNE	1021.7	53.407	0.002	2.186	0.000	1.7783	0.0004	1.1456	0.0003	0.1864	0.0001	0.5558
1/11/2017 19:40	13.7	62	6.5	NNE	1022.0	53.623	0.002	2.017	0.000	1.7294	0.0004	1.1233	0.0003	0.1844	0.0001	0.5622
1/11/2017 20:40	13.6	62	6.5	NNE	1022.1	53.291	0.002	2.065	0.000	1.7906	0.0004	1.1694	0.0003	0.1928	0.0001	0.5611
1/11/2017 21:40	13.4	64	6.7	NNE	1022.2	53.349	0.002	2.083	0.000	1.6769	0.0004	1.1308	0.0003	0.1792	0.0001	0.5619
1/11/2017 22:40	13.5	64	6.8	NNE	1022.4	53.723	0.002	2.026	0.000	1.7842	0.0004	1.1025	0.0003	0.1886	0.0001	0.5683

Σχήμα 2.25:Δείγμα της βάσης δεδομένων για την καταχώρηση, την επεξεργασία, την ανάλυση και τον έλεγχο των δεδομένων.

3

3. Αποτελέσματα και ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρακολούθηση των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ^{222}Rn (^{214}Pb & ^{214}Bi), του ^{220}Rn (^{208}Tl) και του φυσικού ^{40}K μέσω της φασματοσκοπίας- γ πριν κατά τη διάρκεια και μετά από βροχόπτωση, για το χρονικό διάστημα από το Νοέμβριο 2017 έως τον Μάρτιο 2018. Παράλληλα μελετήθηκε η μεταβολή της ακτινοβολίας- γ για κάθε γεγονός βροχής και η πιθανή εξάρτηση των υπό μελέτη στοιχείων ανάλογα με την κατεύθυνση του αέρα. Επίσης ερευνήθηκε πιθανή σχέση με υπόλοιπες ατμοσφαιρικές παραμέτρους της θερμοκρασίας (T), υγρασίας (H) και της πίεσης (P) και μελετήθηκε η συσχέτιση της ποσότητας του ολικού ρυθμού ακτινοβολίας- γ ανά χιλιοστό βροχής με την ένταση της βροχής.

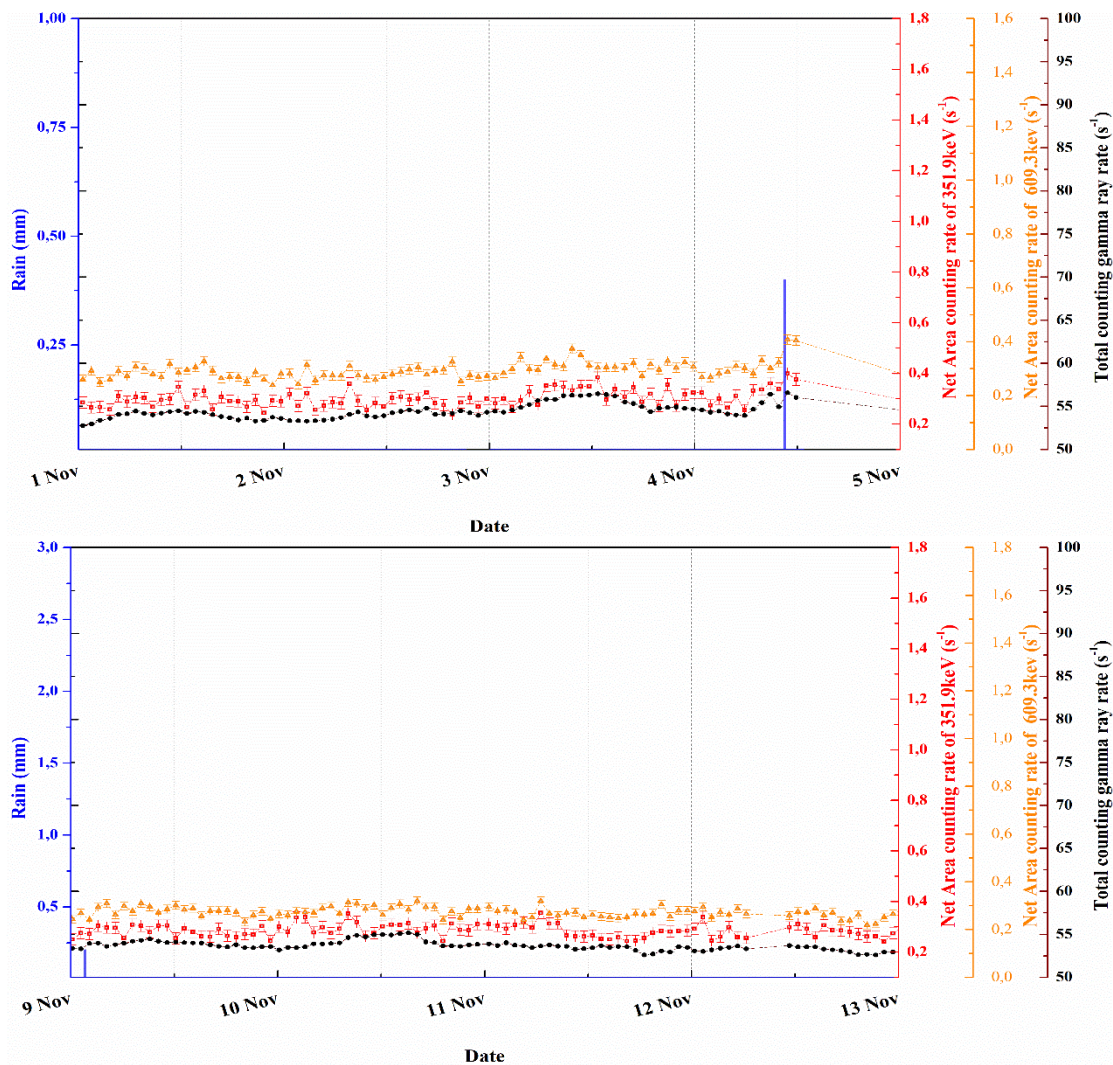
3.1 Χρονοσειρές δεδομένων ραδιενέργειας και μετεωρολογικών παραμέτρων

Για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των υπό μελέτη ραδιοϊσοτόπων, ήταν απαραίτητη η απεικόνιση των δεδομένων σε χρονοσειρές για τον κάθε μήνα ξεχωριστά. Μελετήθηκε ο ολικός ρυθμός γεγονότων cps ακτινοβολίας- γ που κατέγραψε ο ανιχνευτής στον ατμοσφαιρικό αέρα, και ο καθαρός ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας- γ cps_{net} , των ραδιοϊσοτόπων, για όλο το χρονικό διάστημα του πειράματος, πριν κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας όλων των γεγονότων βροχής. Στις ενότητες 3.1.1 έως 3.1.6 παρουσιάζονται η συμπεριφορές των cps και cps_{net} για τον κάθε μήνα διεξαγωγής του πειράματος ξεχωριστά.

3.1.1 Νοέμβριος 2017

Αρχικά μελετήθηκαν τα δεδομένα χωρίς καταγραφή βροχών. Στο σχήμα 3.1 απεικονίζονται ενδεικτικά σε χρονοσειρές ο ρυθμός cps και οι ρυθμοί cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) και το ^{214}Bi (609.3keV. Παρατηρήθηκε ότι οι ρυθμοί cps και cps_{net} ακτινοβολίας- γ δεν παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι κατανομές για το σύνολο των δεδομένων χωρίς βροχή, για τους ρυθμούς cps και cps_{net} (^{214}Pb & ^{214}Bi) δεν αποκλίνουν από μια κανονική κατανομή (Gaussian) επομένως οι τιμές τους συγκεντρώνονται γύρω από μία μέση τιμή. Υπολογίστηκαν να είναι για το ^{214}Pb (351.9keV) $\overline{cps_{net}(351.9keV)} = 0.29 \pm 0.03s^{-1}$, και για το ^{214}Bi (609.3keV)

$\overline{cps_{net(609.3keV)}} = 0.28 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$. Ως εκ τούτου οι μέσες τιμές των \overline{cps} και $\overline{cps_{net}}$ θα μπορούσαν να θεωρηθούν τιμές υποβάθρου για τον ατμοσφαιρικό αέρα για τα θυγατρικά του ραδονίου στην περιοχή που διεξάχθηκε το πείραμα.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Νοέμβριο 2017.

Στην συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά των υπό μελέτη ραδιοϊσοτόπων για τα δεδομένα με καταγραφή βροχής όπου για τον Νοέμβριο συνολικά καταγράφηκαν 40 ωριαία δεδομένα βροχής. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται σε χρονοσειρές οι ρυθμοί cps και cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα του ^{214}Pb για ενέργεια 351.9keV και του ^{214}Bi για ενέργεια 609.3keV για δεδομένα με βροχές. Παρατηρήθηκε ότι για κάθε γεγονός βροχής, ο ολικός ρυθμός cps και ο ρυθμός γεγονότων cps_{net} αυξήθηκε. Σε αντίθεση με τις συνθήκες χωρίς βροχής (υποβάθρου), τα δεδομένα βροχοπτώσεων παρουσίασαν απόκλιση από μια κανονική κατανομή και ο υπολογισμός μιας μέσης

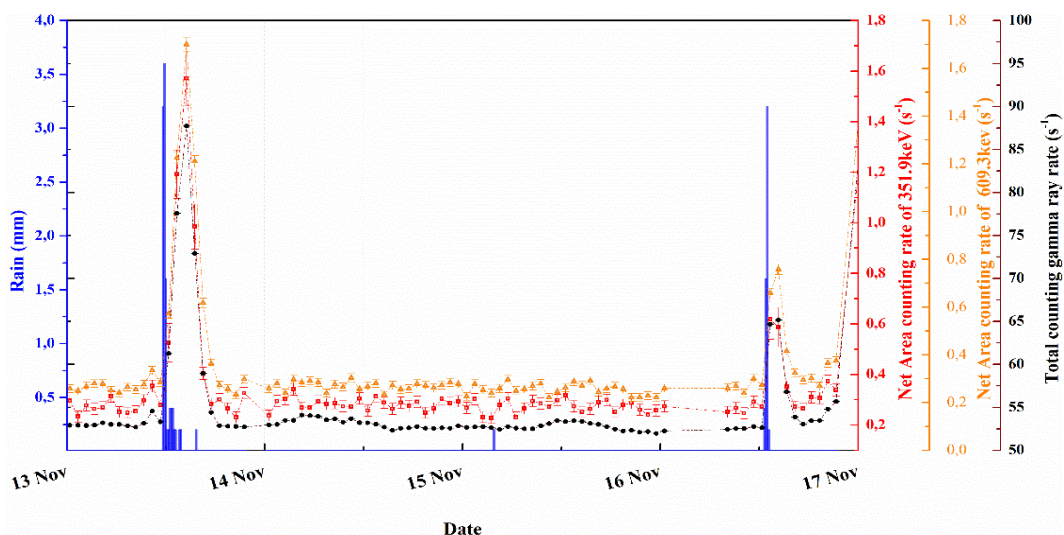
τιμής δεν ήταν αποδεκτός. Επομένως χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ρυθμών ακτινοβολίας-γ cps και cps_{net} για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι τιμές $cps_{min,max}$, $cps_{net,min,max}({}^{214}\text{Pb})$, $cps_{net,min,max}({}^{214}\text{Bi})$ παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

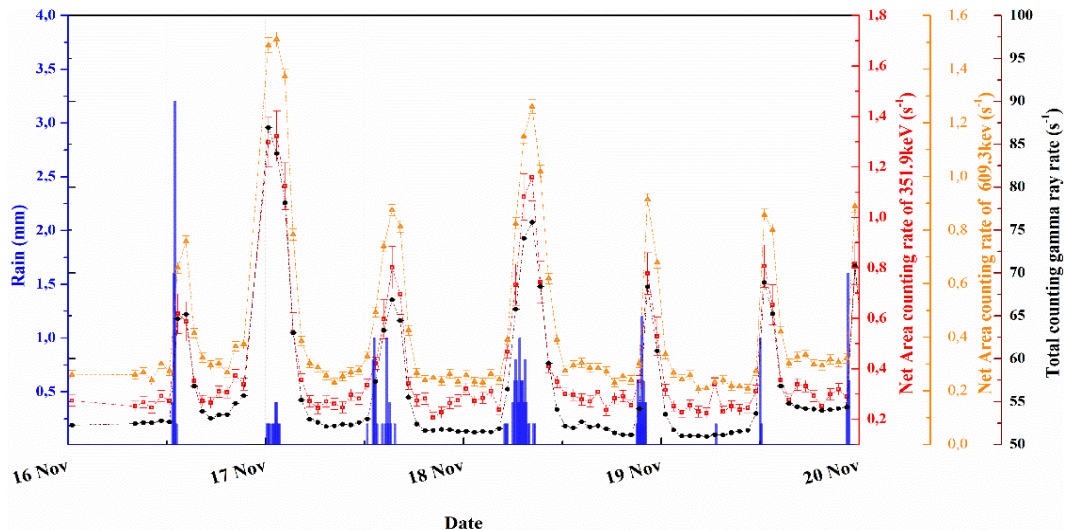
Νοέμβριος 2017										
Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
40	0.2	3.6	0.8	129.4	10.2°	17.4	74	97	1002.6	1018.7

Πίνακας 3.1: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Νοέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 40 γεγονότων βροχής.

Νοέμβριος 2017						
Γεγονότα βροχής	cps_{min} (s ⁻¹)	cps_{max} (s ⁻¹)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)
40	51.103±0.002	87.819±0.003	0.21 ±0.02	1.6 ±0.1	0.21±0.02	1.70±0.03

Πίνακας 3.2: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ²¹⁴Pb (351.9keV) και το ²¹⁴Bi (609.3)keV για τον Νοέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 40 γεγονότων βροχής.

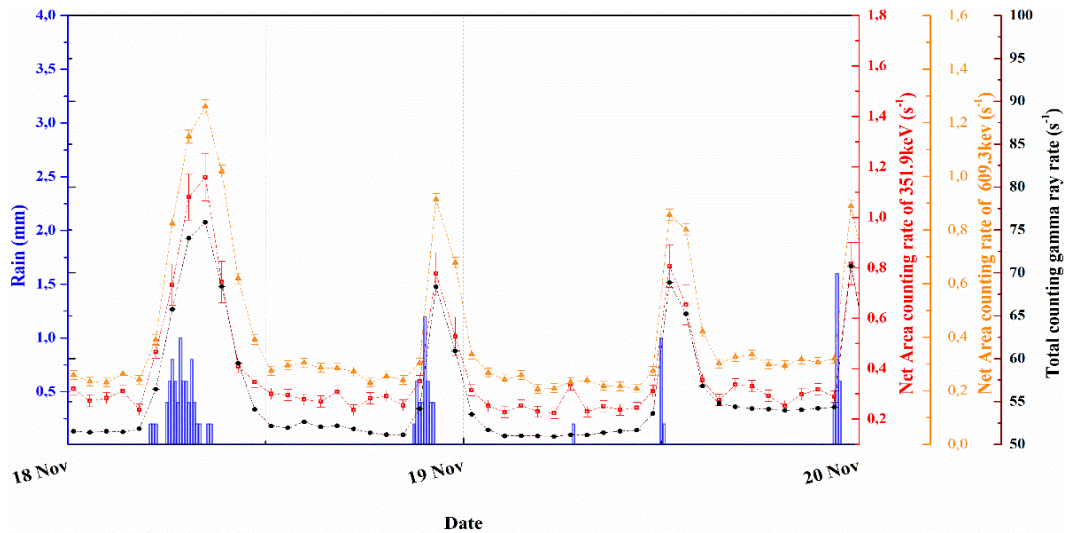




Σχήμα 3.2: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα με βροχοπτώσεις για τον Νοέμβριο 2017.

Σύμφωνα με τις μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για τα γεγονότα χωρίς βροχή και τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές για τα δεδομένα με βροχή, συνολικά για το ^{214}Pb ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε έως και 441% ($\pm 67\%$) σε σχέση με τις τιμές υποβάθρου και το ^{214}Bi αυξήθηκε έως και 508% ($\pm 61\%$) αντίστοιχα. Τέλος ο ρυθμός cps μεταβλήθηκε σύμφωνα με την αύξηση των ^{214}Pb και ^{214}Bi , όπου αυξήθηκε έως και 64% ($\pm 3\%$). Συμπεραίνεται ότι η αύξηση των ρυθμού cps οφείλεται στην αύξηση των γεγονότων ακτινών- γ από τα θυγατρικά του ^{222}Rn που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε συνθήκες βροχής.

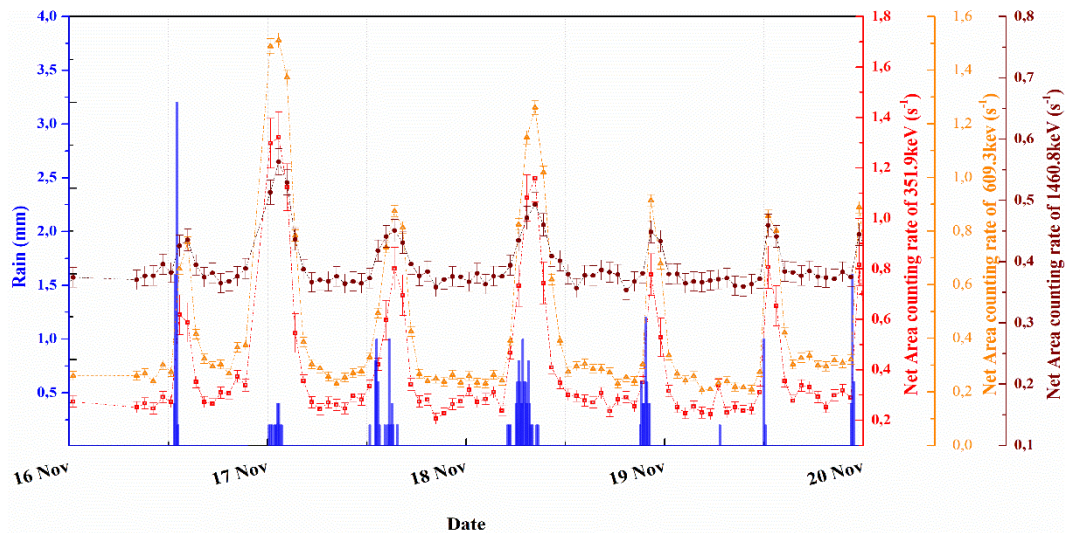
Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι ρυθμοί μέτρησης γεγονότων cps_{net} των ^{214}Pb και ^{214}Bi παρέμειναν αυξημένοι για περίπου 2 ώρες μετά το πέρας βροχοπτώσεων έως να φτάσουν στα επίπεδα των τιμών του υποβάθρου. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ενδεικτικά σε μεγέθυνση η χρονική περίοδος από 18 έως 20 Νοεμβρίου 2017 όπου φαίνονται με ευκρίνεια οι αυξημένες τιμές των cps_{net} για τα προαναφερόμενα ραδιοϊσότοπα.



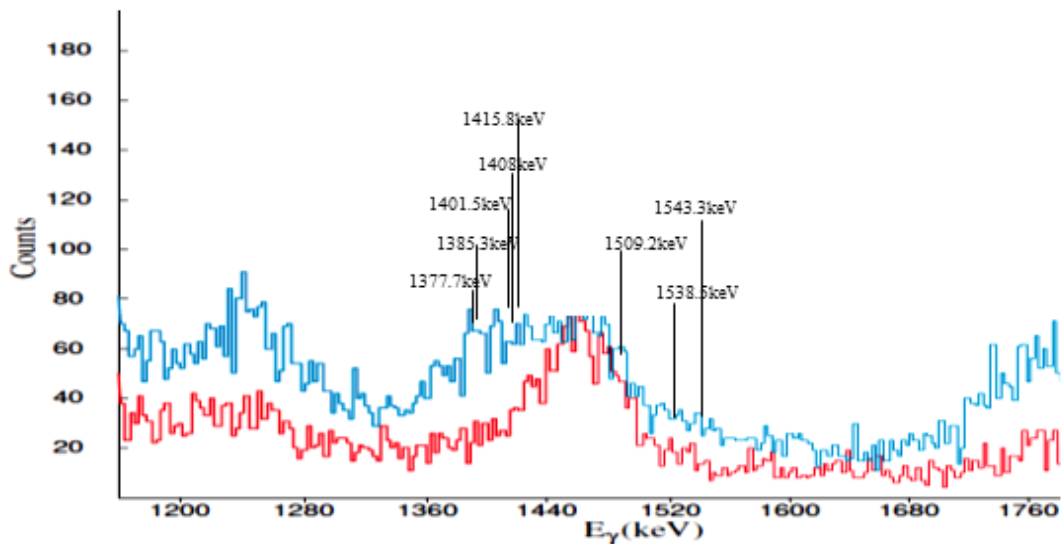
Σχήμα 3.3: 18-20 Νοεμβρίου 2017, όπου παρατηρούνται αυξημένοι οι καθαροί ρυθμοί cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) και για χρονική διάρκεια έως και 2 ώρες που χρειάζονται τα ^{214}Pb και ^{214}Bi προερχόμενα από την βροχή να αποδιεγερθούν και να επανέλθουν σε τιμές χωρίς βροχή.

Όταν η σταγόνα φτάσει στην επιφάνεια του κρυστάλλου CeBr3 του ανιχνευτή, το ^{218}Po έχει αποδιεγερθεί σε ^{214}Pb και ^{214}Bi (Moriizumi et al., 2015). Ο χρόνος ημιζωής για το ^{214}Pb είναι 26.8 λεπτά και για το ^{214}Bi είναι 19.7 λεπτά. Λόγω συνεχόμενων βροχοπτώσεων, ο κρύσταλλος δέχεται συνεχώς βρόχινο νερό όπου εναποτίθενται συνεχώς θυγατρικά του ραδονίου τα οποία αποδιεγείρονται έως οι τιμές των ρυθμών cps_{net} , για το ^{214}Pb και ^{214}Bi , που προστίθενται στην ατμόσφαιρα γύρω από τον ανιχνευτή, να φτάσουν τα επίπεδα των τιμών υποβάθρου. Το χρονικό διάστημα για την αποδιέγερση των ^{214}Pb και ^{214}Bi είναι 3 χρόνοι ημιζωής, δηλαδή περίπου 2 ώρες. Επομένως λόγω της συνεχόμενης εναπόθεσης βρόχινου νερού και επομένως και ραδιενέργειας, ο ανιχνευτής λαμβάνει γεγονότα από τα θυγατρικά του ραδονίου και συνεπώς, οι τιμές των ρυθμών cps_{net} εμφανίζονται αυξημένες για χρονική διάρκεια έως και 2 ώρες μετά την λήξη της βροχής.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά του ^{40}K στην περιοχή της φωτοκορυφής ενέργειας 1460.8keV. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται ο ρυθμός cps_{net} να συμπεριφέρεται παρόμοια με το ^{214}Pb και το ^{214}Bi , δηλαδή να αυξάνεται σε κάθε γεγονός βροχής. Όμως η φωτοκορυφή ενέργειας 1460.8 keV, διευρύνεται στο ενεργειακό φάσμα κατά τη διάρκεια των βροχών, λόγω της αύξησης των γεγονότων ακτινών γ από τις οχτώ (8) μικρής έντασης φωτοκορυφές του ^{214}Bi στην συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή.



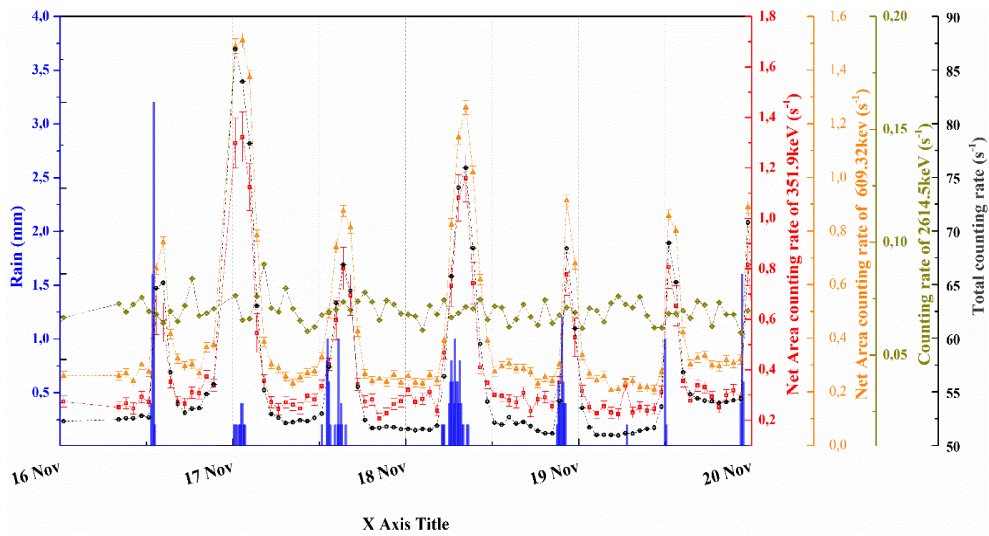
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) ^{214}Bi (609.3keV) και στην ενεργειακή περιοχή των 1460.8keV του ^{40}K , για το χρονικό διάστημα από 16 Νοεμβρίου 2017 έως 20 Νοεμβρίου 2017.



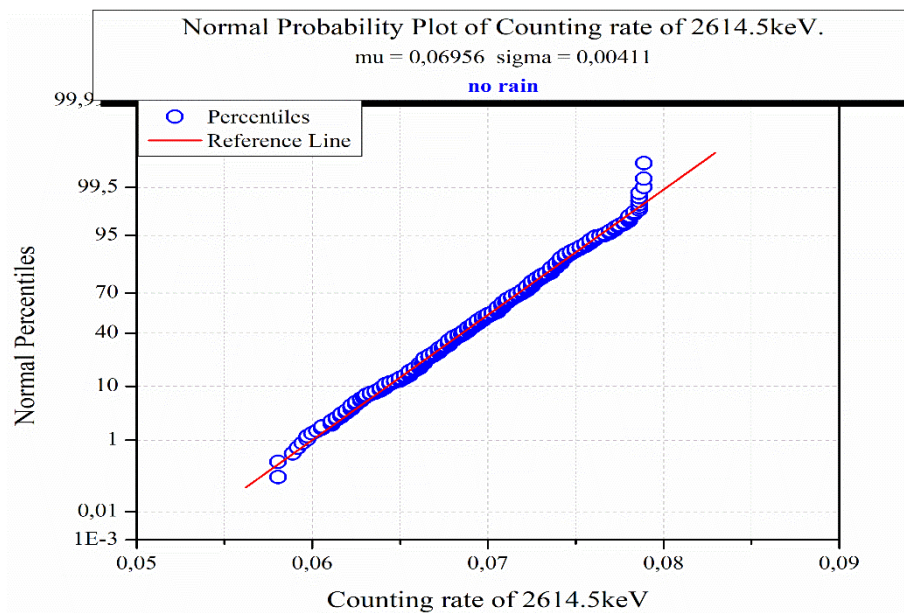
Σχήμα 3.5: Ενεργειακό φάσμα για την 17^η Νοεμβρίου 2017 στην περιοχή ενέργειας 1460.8keV και απεικονίζονται οι 8 φωτοκορυφές του ^{214}Bi . Με το κόκκινο χρώμα απεικονίζεται φάσμα χωρίς γεγονός βροχής και με το μπλε χρώμα απεικονίζεται φάσμα με βροχή.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, το ^{208}Tl (^{220}Rn) δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή σε σχέση με τον ολικό γεγονότων cps κατά τη διάρκεια των βροχών (Σχήμα 3.6). Από τα σχήματα 3.7 και 3.8 οι κατανομές των ρυθμών cps , τόσο για δεδομένα χωρίς βροχή, αλλά και για εκείνα με καταγεγραμμένες βροχοπτώσεις, δεν αποκλίνουν από κανονική κατανομή. Επομένως οι μέσες τιμές για δεδομένα χωρίς βροχή υπολογίστηκαν να είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.069 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ και για τα δεδομένα βροχής να είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.069 \pm 0.002 \text{ s}^{-1}$. Συνεπώς η μεταβολή του θορονίου

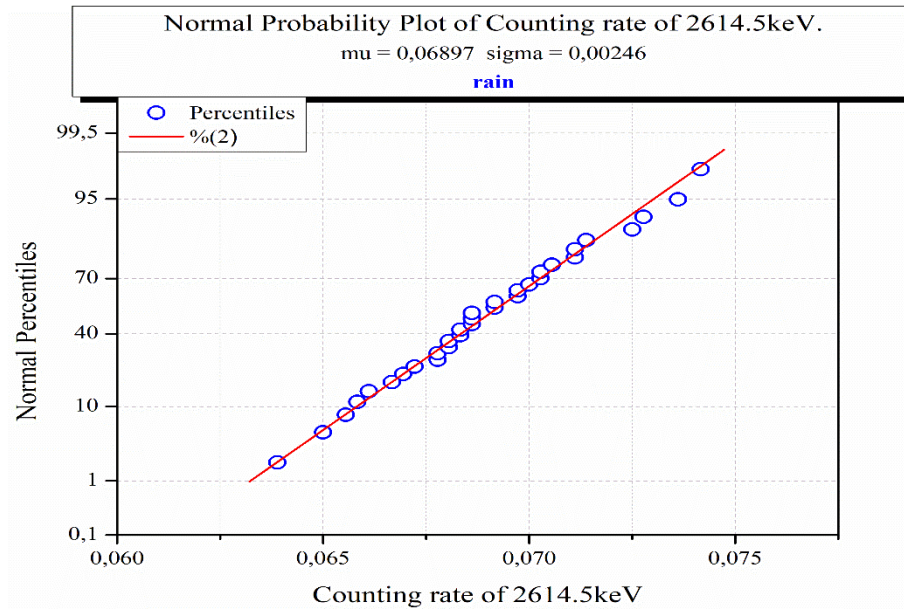
(^{220}Rn) παραμένει σταθερή και το ραδόνιο (^{222}Rn) ευθύνεται για την αύξηση της ακτινοβολίας- γ κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων, για τον Νοέμβριο.



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV), του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 16 Νοεμβρίου 2017 έως 20 Νοεμβρίου 2017.



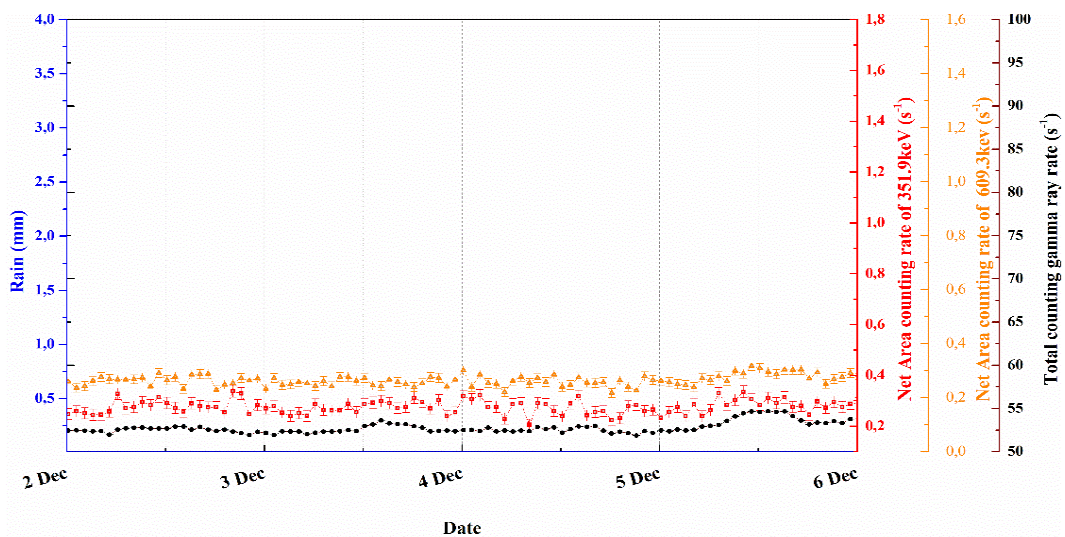
Σχήμα 3.7: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Νοέμβριο 2017.

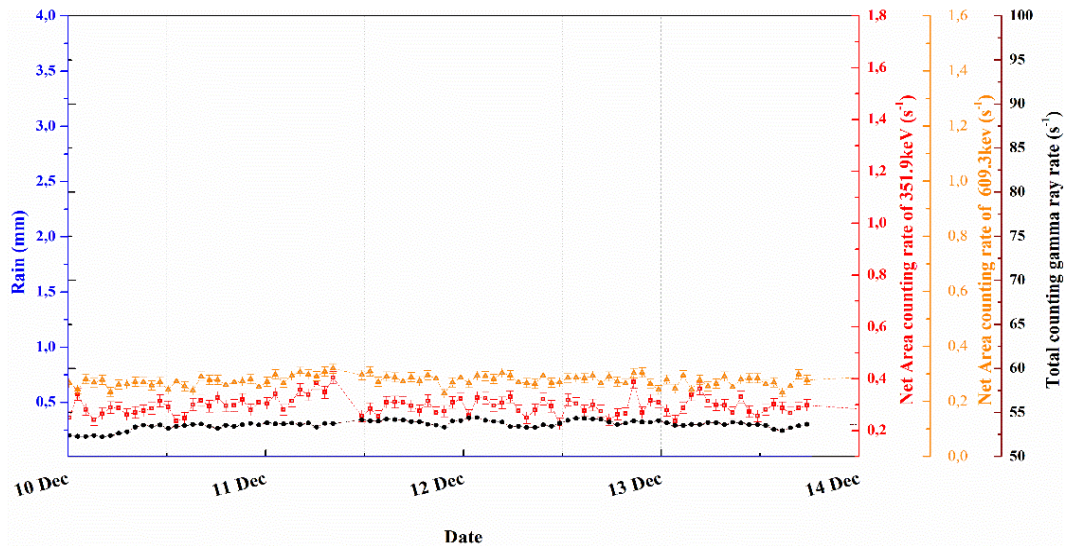


Σχήμα 3.8: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχή για τον Νοέμβριο 2017.

3.1.2 Δεκέμβριος 2017

Τα δεδομένα για τον Δεκέμβριο απεικονίζονται στο σχήμα 3.9 όπου απεικονίζονται οι χρονοσειρές για τον ολικό ρυθμό cps και cps_{net} του ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV). Παρατηρήθηκε, ότι δεν παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, και οι μέσες τιμές υπολογίστηκαν να είναι $\overline{cps} = 53.71 \pm 0.94 \text{ s}^{-1}$, για το ^{214}Pb (351.9keV) $\overline{cps_{net(351.2keV)}} = 0.29 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$ και για το ^{214}Bi (609.3keV) $\overline{cps_{net(351.2keV)}} = 0.28 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$ των δεδομένων χωρίς βροχή.





Σχήμα 3.9: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Δεκέμβριο 2017.

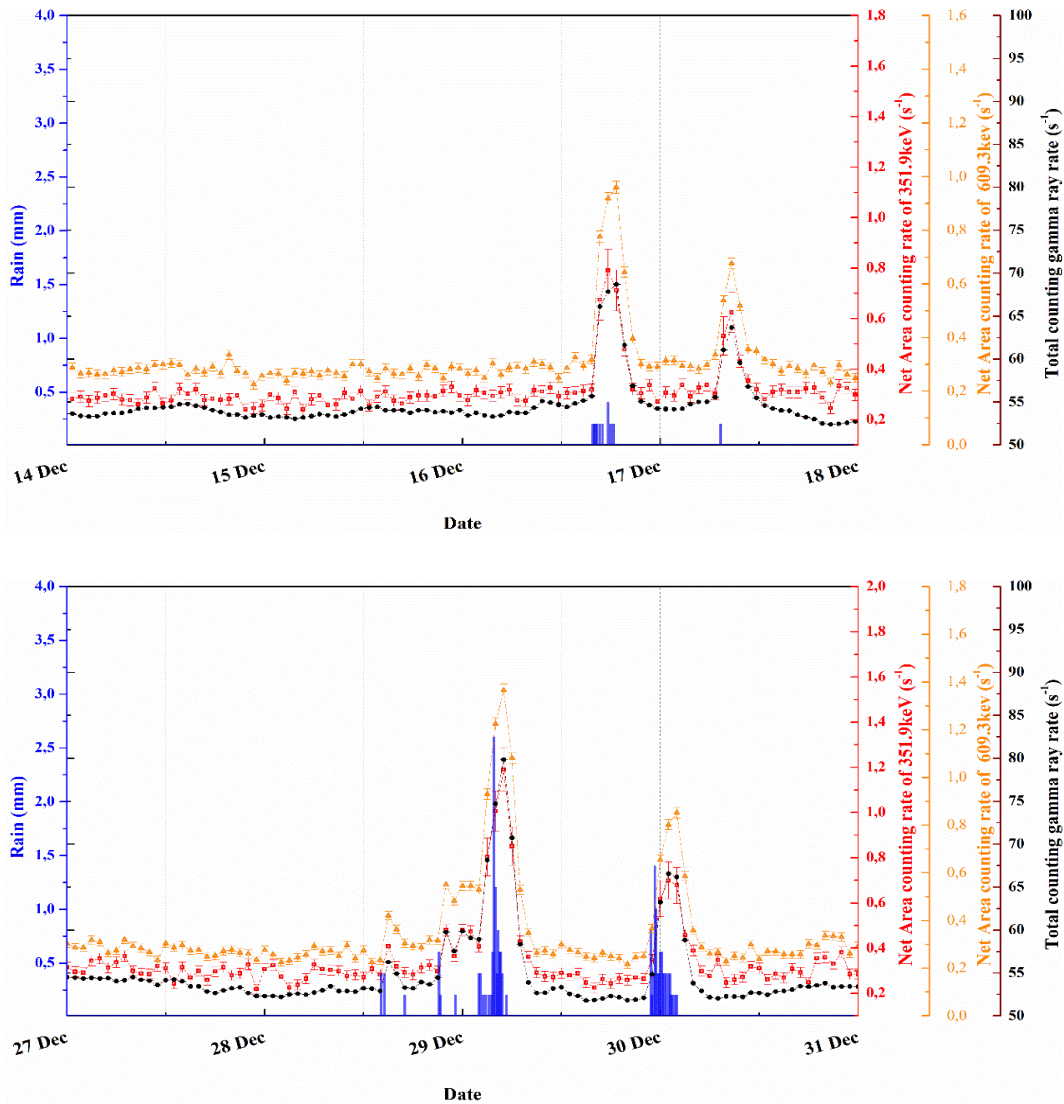
Στην συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά των υπό μελέτη στοιχείων για δεδομένα βροχών, όπου για τον Δεκέμβριο συνολικά καταγράφηκαν 38 ωριαία δεδομένα βροχής. Στο σχήμα 3.10 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικές χρονοσειρές βροχών του ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για τα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV). Όπως και στον προηγούμενο μήνα, για κάθε γεγονός βροχής, τόσο ο ρυθμός cps αλλά και ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε σημαντικά. Τα δεδομένα των ρυθμών $cps_{min,max}$, $cps_{net,min,max}$ (^{214}Pb), $cps_{net,min,max}$ (^{214}Bi), οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων δίνονται, στους Πίνακες 3.3 και 3.4.

Δεκέμβριος 2017						
Γεγονότα βροχής	cps_{min} (s ⁻¹)	cps_{max} (s ⁻¹)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)
38	53.286±0.002	87.572±0.003	0.20 ±0.02	1.5 ±0.1	1.75±0.03	0.22±0.02

Πίνακας 3.3: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) και το ^{214}Bi (609.3keV) για τον Δεκέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 38 γεγονότων βροχής.

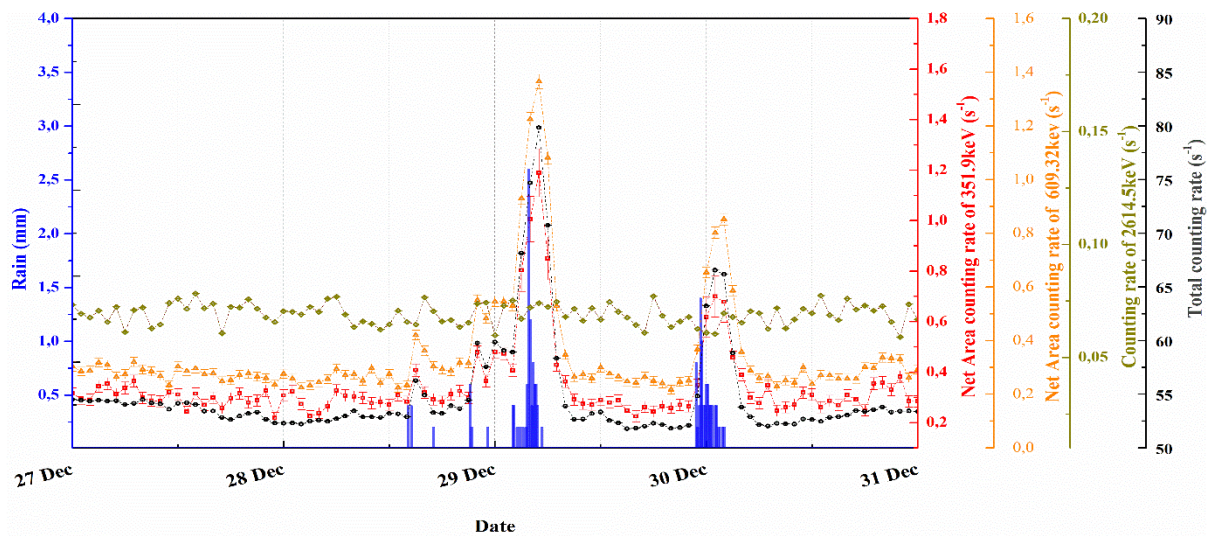
Δεκέμβριος 2017										
Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
38	0.2	2.6	0.8	33.2	4.9°	17.6°	70	93	1004.6	1023.8

Πίνακας 3.4: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Δεκέμβριο 2017, με συνολική καταγραφή 38 γεγονότων βροχής.

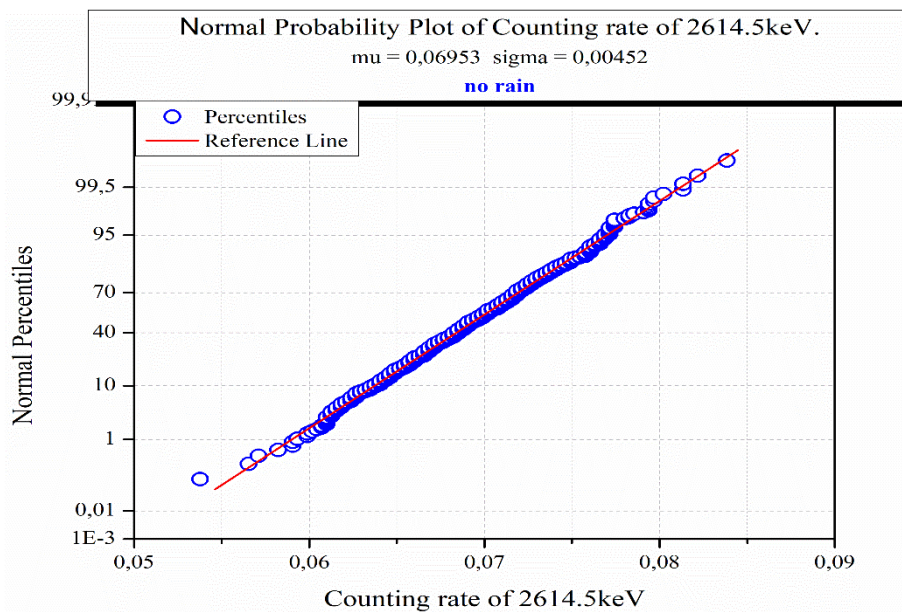


Σχήμα 3.10: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Δεκέμβριο 2017.

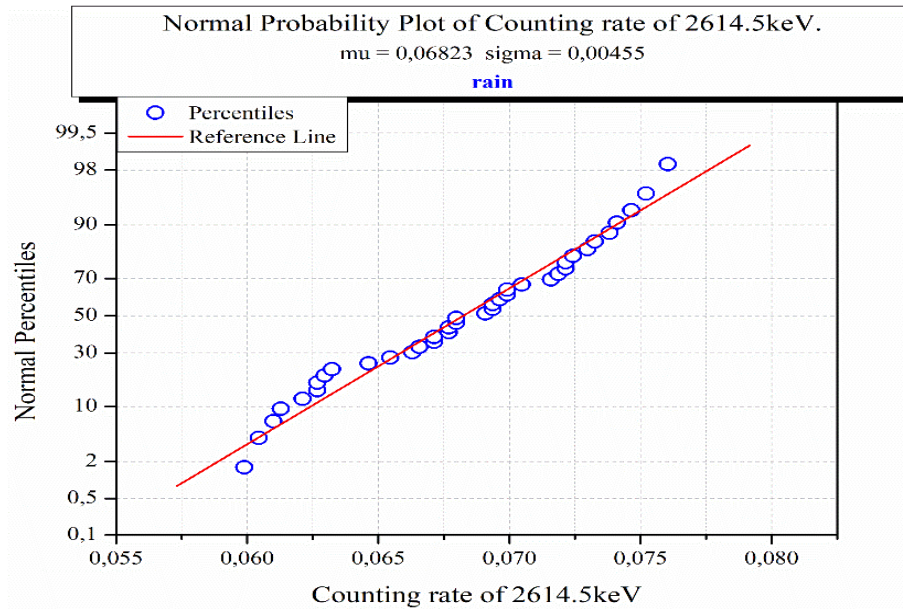
Συνολικά για το ^{214}Pb ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε έως και 407% ($\pm 76\%$) σε σχέση με τις ημέρες χωρίς βροχή ενώ για το ^{214}Bi η αυξήθηκε έως και 519% ($\pm 63\%$), αντίστοιχα. Παρομοίως και τον Δεκέμβριο, το ^{208}Tl δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή σε σχέση με τον ρυθμό cps κατά τη διάρκεια των βροχών (Σχήμα 3.11). Οι κατανομές του ρυθμού γεγονότων για το ^{208}Tl για δεδομένα χωρίς βροχή και με βροχή δεν αποκλίνουν από μία κανονική κατανομή (Σχήματα 3.12 και 3.13). Η μέση τιμή για δεδομένα χωρίς βροχή υπολογίστηκε να είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.069 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ και για τα δεδομένα βροχής τιμή $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.068 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$. Συνεπώς η μεταβολή του θορονίου (^{220}Rn) παραμένει σταθερή και το ραδόνιο (^{222}Rn) ευθύνεται για την αύξηση της ακτινοβολίας- γ κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων για τον Δεκέμβριο.



Σχήμα 3.11: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ^{208}Tl (2614.5keV), του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Δεκέμβριο 2017.



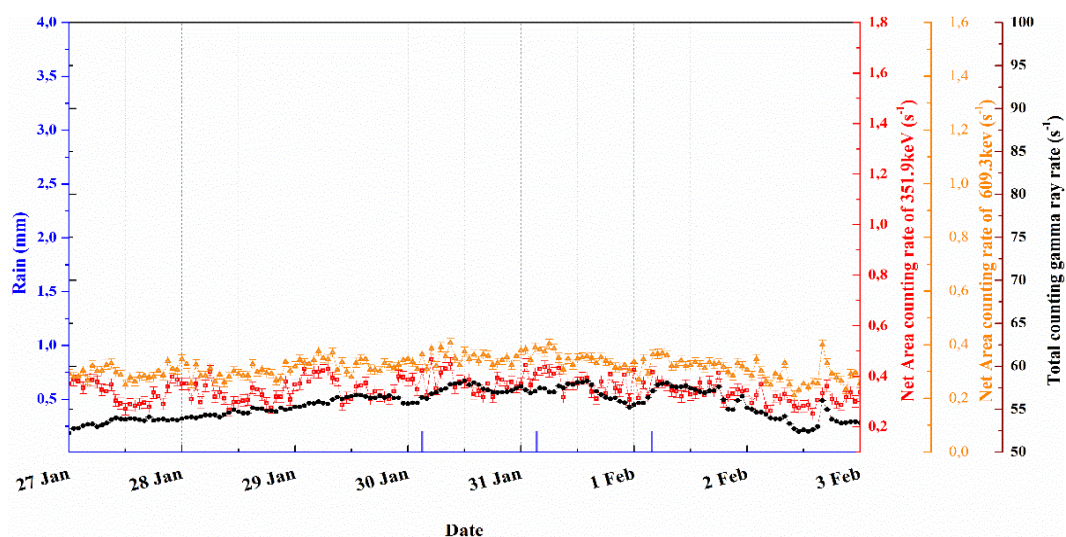
Σχήμα 3.12: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Δεκέμβριο 2017.



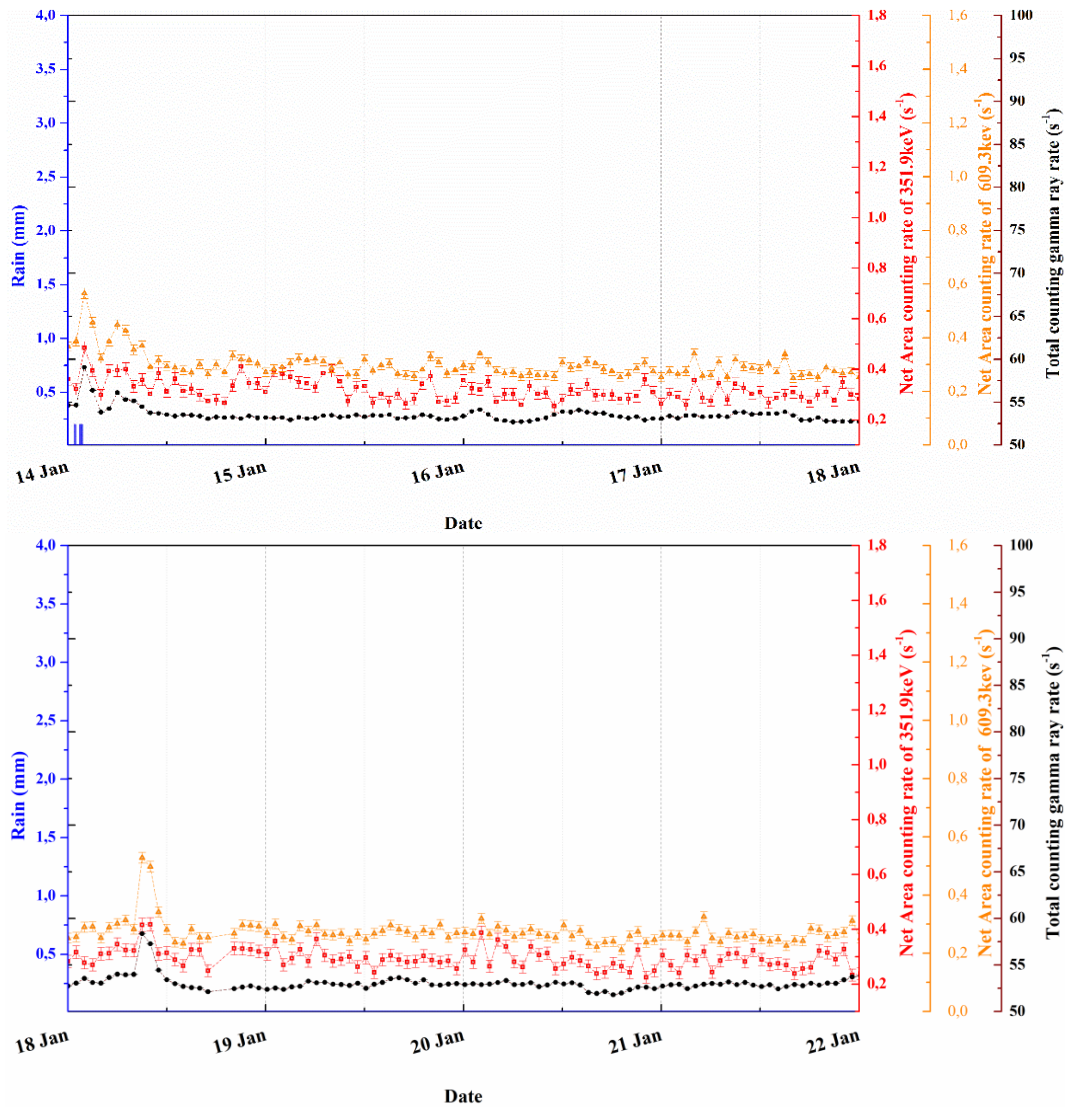
Σχήμα 3.13: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Δεκέμβριο 2017.

3.1.3 Ιανουάριος 2018

Για τον Ιανουάριο μελετήθηκε η συμπεριφορά του ^{214}Pb και ^{214}Bi καθώς και του ολικού ρυθμού ακτίνων-γ για τα δεδομένα χωρίς καταγεγραμμένη βροχή. Από το σχήμα 3.14, οι ρυθμοί cps και cps_{net} για το ^{214}Bi , παρουσίασαν αυξημένες τιμές για το χρονικό διάστημα 28/01/2018 έως 03/02/2018 συγκριτικά με τους προηγούμενους μήνες. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τρία (3) γεγονότα βροχής στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όμως οι ρυθμοί cps και cps_{net} παρέμειναν αυξημένοι και για δεδομένα χωρίς καταγραφή βροχής. Το παραπάνω φαινόμενο ίσως οφείλεται στην κατακρήμνιση από μικρής έντασης βροχές και στην αδυναμία του μετρητικού σταθμού μετεωρολογικών δεδομένων να καταγράψει βροχές με ύψος βροχής μικρότερο από 0.2 mm. Επομένως οι τιμές αυτές εξαιρέθηκαν για την μελέτη των κατανομών των δεδομένων. Από το σχήμα 3.15 για το χρονικό διάστημα έως 27/01/2018, η κατανομή των δεδομένων του ρυθμού ακτινοβολίας-γ, δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή και η μέση τιμή υπολογίστηκε να είναι $\overline{cps} = 53.21 \pm 0.88 \text{ s}^{-1}$. Ομοίως για τις κατανομές των ρυθμων cps_{net} , οι μέσες τιμές τους υπολογίστηκαν να είναι για το ^{214}Pb (351.9keV) $\overline{cps_{net}(351.2keV)} = 0.31 \pm 0.04 \text{ s}^{-1}$, και για το ^{214}Bi (609.3keV) $\overline{cps_{net}(351.2keV)} = 0.28 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$.



Σχήμα 3.14: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 28/01/2018 έως 03/02/2018, όπου παρουσιάζονται αυξημένοι.



Σχήμα 3.15: Κατανομή του ολικού ρυθμού γεγονότων cps για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Ιανουάριο 2018 έως 27/01/2018.

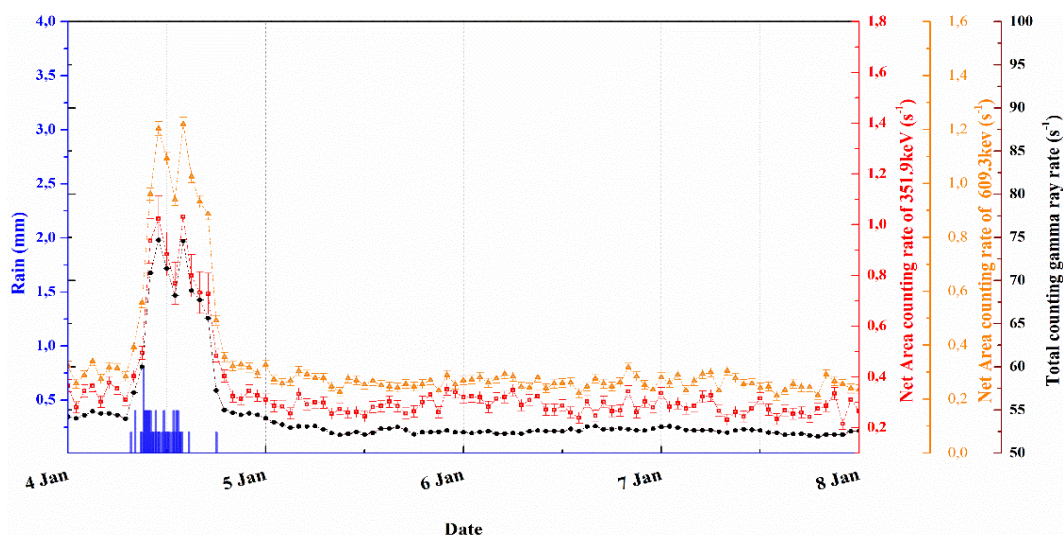
Στην συνέχεια μελετήθηκαν τα δεδομένα με βροχές, όπου για τον Ιανουάριο συνολικά καταγράφηκαν 45 ωριαία δεδομένα. Στο σχήμα 3.16 απεικονίζονται χρονοσειρές βροχών του ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για τα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV). Παρατηρήθηκε, όπως και στον προηγούμενο μήνα, ότι για κάθε γεγονός βροχής, τόσο ο ρυθμός cps αλλά και ο ρυθμός γεγονότων cps_{net} αυξήθηκε. Στους πίνακες 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων και οι τιμές των ρυθμών $cps_{min,max}$, $cps_{net,min,max}$ (^{214}Pb), $cps_{net,min,max}$ (^{214}Bi).

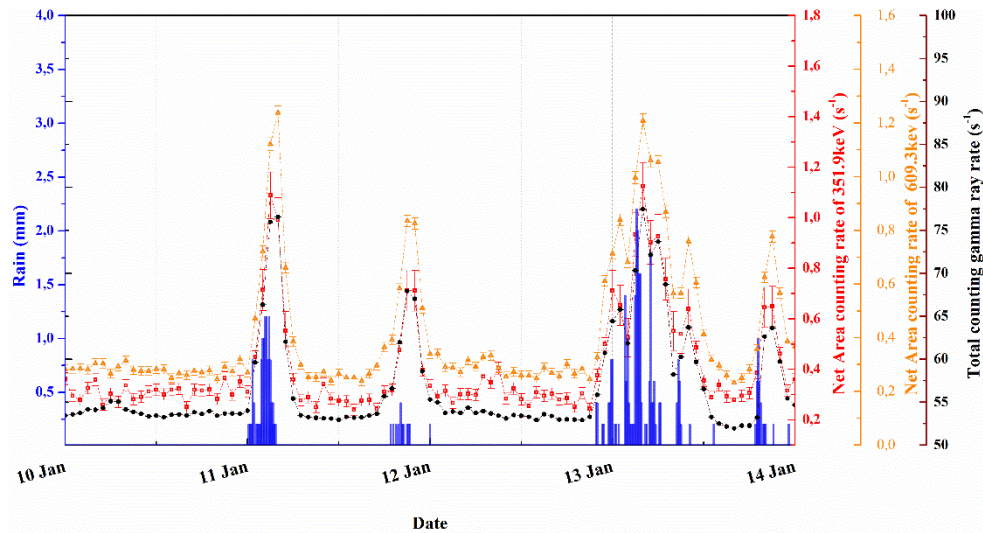
Ιανουάριος 2018										
Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
45	0.2	2.4	0.8	67.8	7.6	13.4	69	96	995.8	1028.1

Πίνακας 3.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Ιανουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 45 γεγονότων βροχής.

Ιανουάριος 2018						
Γεγονότα βροχής	cps_{min} (s ⁻¹)	cps_{max} (s ⁻¹)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,min}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)
45	52.491±0.002	77.458±0.002	0.21 ±0.02	1.1 ±0.1	0.21±0.02	1.24±0.02

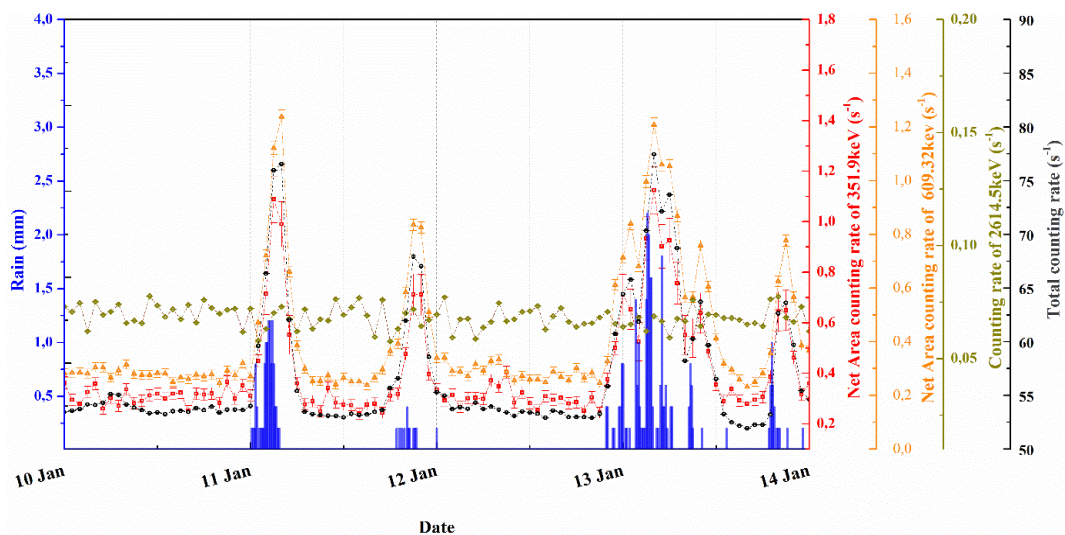
Πίνακας 3.6: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) και το ^{214}Bi (609.3)keV για τον Ιανουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 45 γεγονότων βροχής.



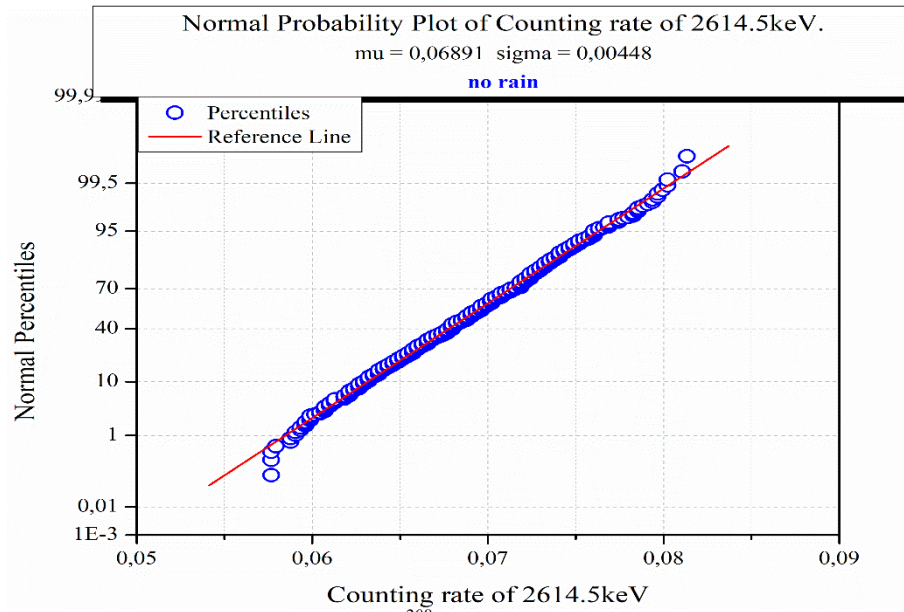


Σχήμα 3.16: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Ιανουάριο 2018.

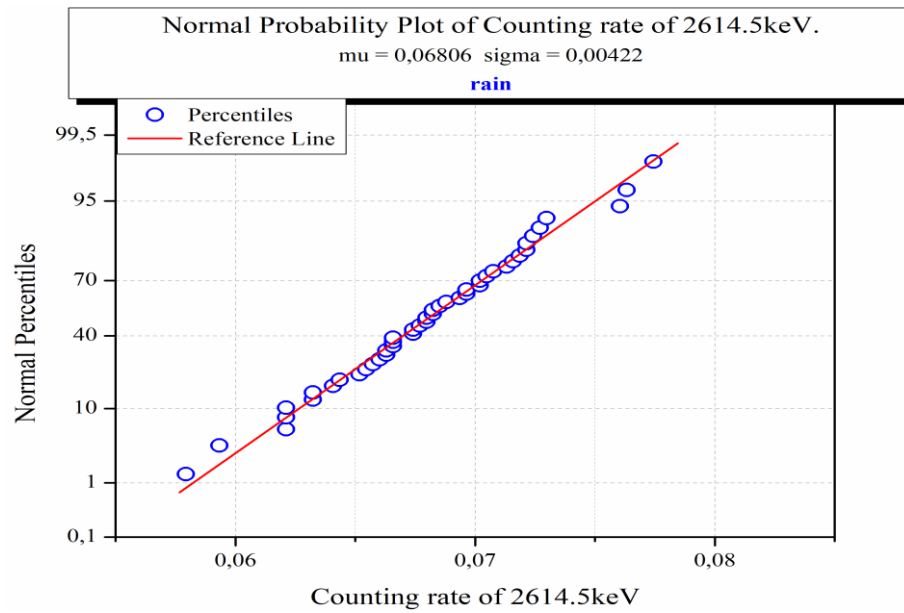
Συνολικά για το ^{214}Pb ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε έως και 264% ($\pm 59\%$) σε σχέση με τις ημέρες χωρίς βροχή και για το ^{214}Bi η αυξήθηκε έως και 339% ($\pm 54\%$) φορές αντίστοιχα. Παράλληλα, το ^{208}Tl , όπως και στους προηγούμενους μήνες δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή σε σχέση με τον ολικό ρυθμό γεγονότων cps κατά τη διάρκεια των βροχών (Σχήμα 3.17). Από στα σχήματα 3.18 και 3.19, οι κατανομές του ρυθμού γεγονότων για το ^{208}Tl για δεδομένα χωρίς βροχή και με βροχή δεν αποκλίνουν από μία κανονική κατανομή με τις μέσες τιμές να υπολογίζονται να είναι για δεδομένα χωρίς βροχή $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0,069 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ και για τα δεδομένα βροχής $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.068 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 3.17: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) συναρτήσει του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (352.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV για το χρονικό διάστημα από 10 Ιανουαρίου 2018 έως 14 Ιανουαρίου 2018.



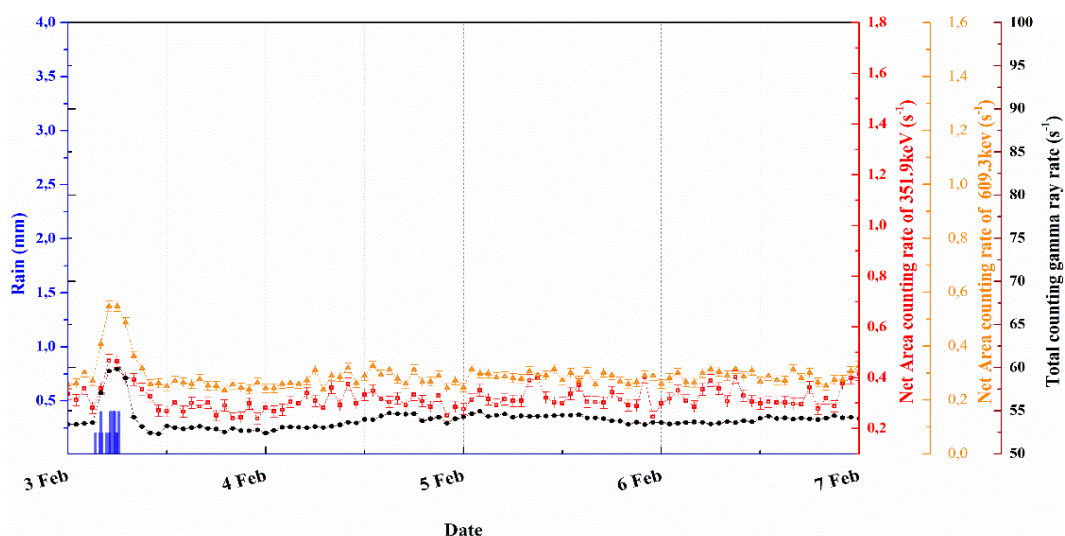
Σχήμα 3.18: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Ιανουάριο 2018.



Σχήμα 3.19: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ²⁰⁸Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Ιανουάριο 2018.

3.1.4 Φεβρουάριος 2018

Για τον Φεβρουάριο 2018 για την μελέτη των δεδομένων χωρίς καταγραφή βροχής εξαιρέθηκαν τα δεδομένα έως την 03/02/2018. Οι συμπεριφορές των ρυθμών του ^{214}Pb και του ^{214}Bi καθώς και του ολικού ρυθμού ακτινών- γ για τα δεδομένα χωρίς καταγεγραμμένη βροχή απεικονίζονται στο σχήμα 3.20. Όπως και στα προηγούμενα, ο ρυθμός cps ακτινοβολίας- γ και οι ρυθμοί cps_{net} δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά και οι μέσες τιμές υπολογίστηκαν να είναι για τον ολικό ρυθμό $\overline{cps} = 54.10 \pm 0.87 \text{ s}^{-1}$, για το ^{214}Pb (351.9keV) $\overline{cps_{net}(351.2keV)} = 0.32 \pm 0.04 \text{ s}^{-1}$, και για το ^{214}Bi (609.3keV) $\overline{cps_{net}(609.3keV)} = 0.29 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$.



Σχήμα 3.20: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα με και χωρίς βροχοπτώσεις για τον Φεβρουάριο 2018.

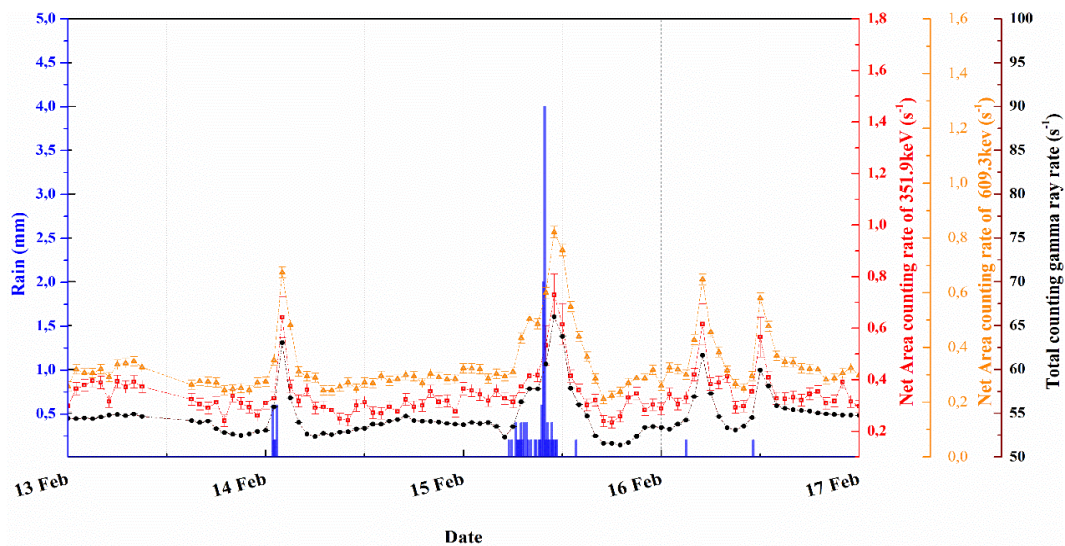
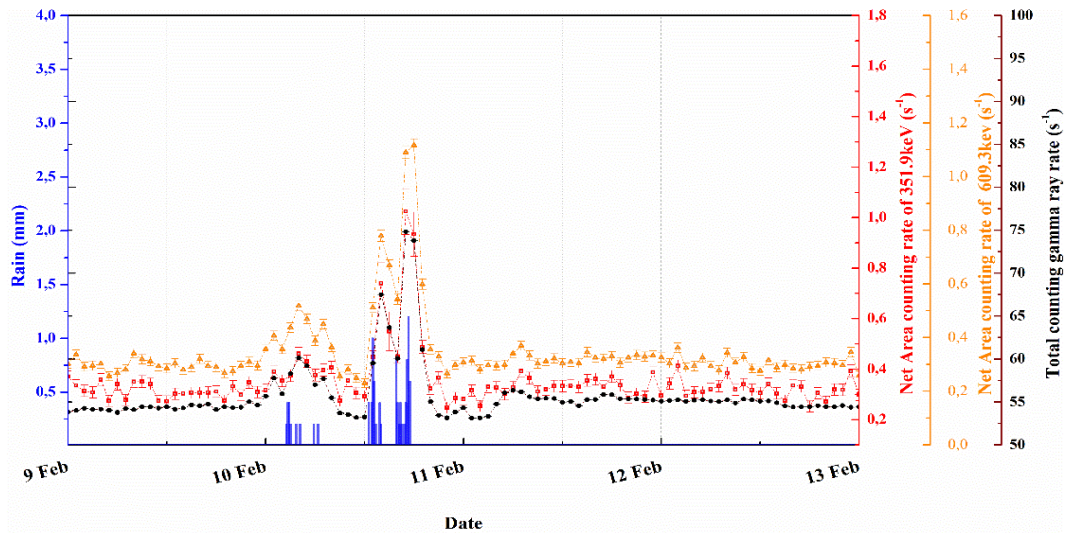
Για τον Φεβρουάριο συνολικά καταγράφηκαν 47 ωριαία δεδομένα βροχής. Στο σχήμα 3.21 απεικονίζονται χρονοσειρές βροχών του ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για τα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV), όπου για κάθε γεγονός βροχής οι ρυθμοί (cps και cps_{net}) αυξήθηκαν. Στους πίνακες 3.7 και 3.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων και οι τιμές των ρυθμών $cps_{min,max}$, $cps_{net,min,max}$ (^{214}Pb), $cps_{net,min,max}$ (^{214}Bi).

Φεβρουάριος 2018										
Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
47	0.2	4.0	0.8	111.8	9.4	15.1	67	93	995.2	1019.6

Πίνακας 3.7: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Φεβρουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 47 γεγονότων βροχής.

Φεβρουάριος 2018						
Γεγονότα βροχής	cps_{min} (s^{-1})	cps_{max} (s^{-1})	$cps_{net_{min}}$ (s^{-1}) ^{214}Pb (351.9keV)	$cps_{net_{max}}$ (s^{-1}) ^{214}Pb (351.9keV)	$cps_{net_{min}}$ (s^{-1}) ^{214}Bi (609.3keV)	$cps_{net_{max}}$ (s^{-1}) ^{214}Bi (609.3keV)
47	52.514±0.002	83.041±0.003	0.22 ±0.02	1.3 ±0.1	1.52±0.03	0.21±0.02

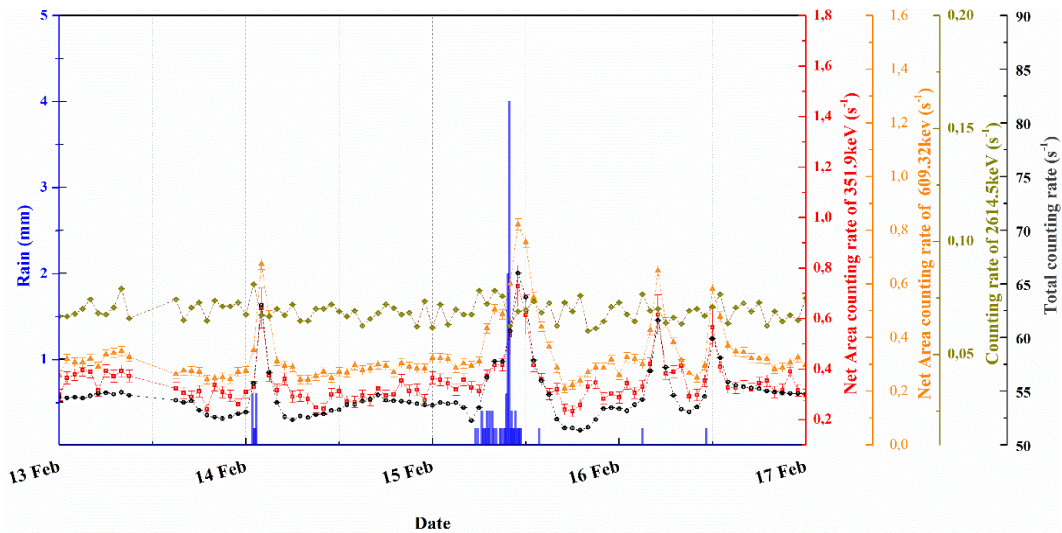
Πίνακας 3.8: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) και το ^{214}Bi (609.3)keV για τον Φεβρουάριο 2018, με συνολική καταγραφή 47 γεγονότων βροχής.



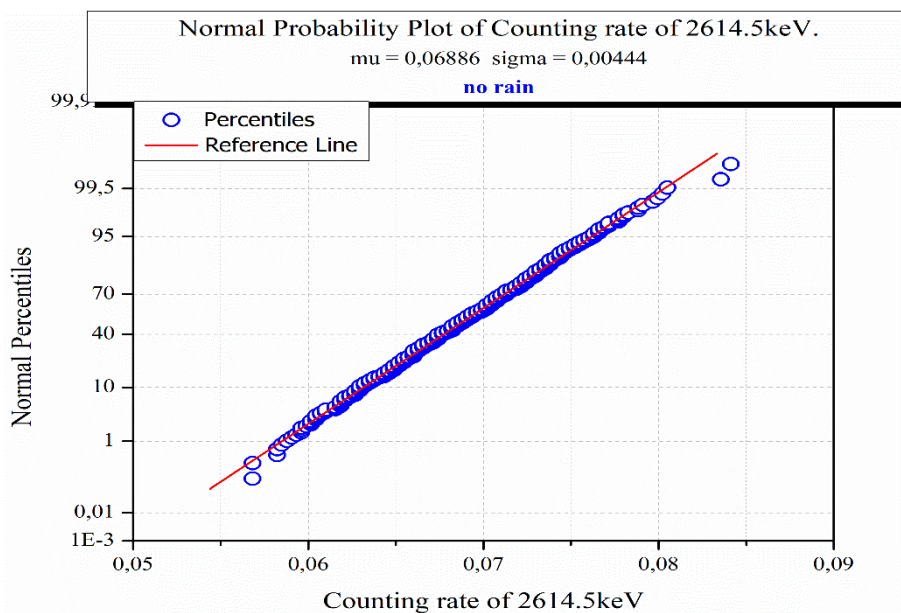
Σχήμα 3.21: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (352.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Φεβρουάριο 2018

Συνολικά ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε έως και 318% ($\pm 61\%$), για το ^{214}Pb σε σχέση με δεδομένα χωρίς βροχή και για το ^{214}Bi αυξήθηκε έως και 417% ($\pm 57\%$) αντίστοιχα.

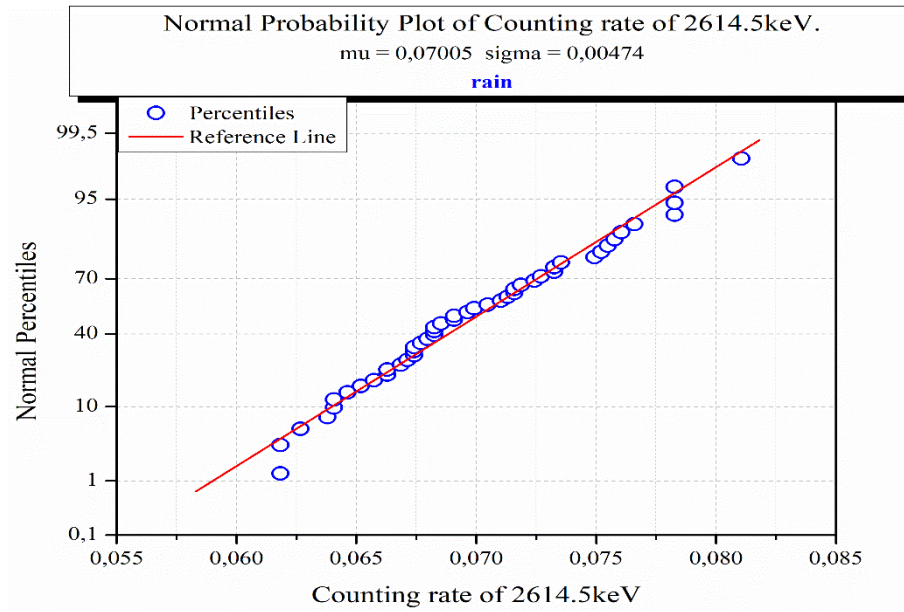
Το ^{208}Tl ομοίως με τους προηγούμενους μήνες δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή για δεδομένα χωρίς βροχή και κατά τη διάρκεια βροχής (Σχήμα 3.22). Οι μέσες τιμές υπολογίστηκαν να είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0,069 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ για δεδομένα χωρίς βροχή και σε $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.070 \pm 0.004 \text{ s}^{-1}$ για δεδομένα με βροχή (Σχήματα 3.23 και 3.24).



Σχήμα 3.22: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) συναρτήσει του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (352.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 13 Φεβρουαρίου 2018 έως 17 Φεβρουαρίου 2018.



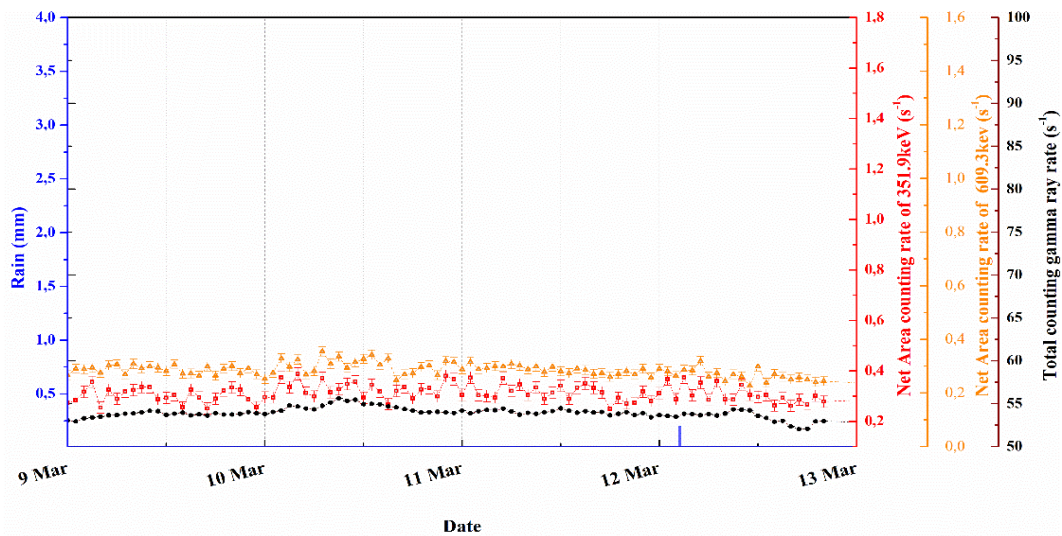
Σχήμα 3.23: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Φεβρουάριο 2018.



Σχήμα 3.24 Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{ROI} για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Φεβρουάριο 2018.

3.1.5 Μάρτιος 2018

Στο σχήμα 3.25, απεικονίζονται οι ρυθμοί cps και cps_{net} των ^{214}Pb και ^{214}Bi για τον Μάρτιο 2018, για δεδομένα χωρίς βροχή. Όπως με τους προηγούμενους μήνες ο ρυθμός cps ακτινοβολίας- γ δεν παρουσίασε σημαντικές μεταβολές, ομοίως για τους ρυθμούς cps_{net} των θυγατρικών του ραδονίου (^{214}Pb & ^{214}Bi). Οι μέσες τιμές υπολογίστηκαν να είναι για τον ολικό ρυθμό $\overline{cps} = 53.50 \pm 0.78 \text{ s}^{-1}$, για το ^{214}Pb (351.9 keV) $\overline{cps_{net}(351.2keV)} = 0.30 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$, και για το ^{214}Bi (609.3 keV) $\overline{cps_{net}(609.3keV)} = 0.27 \pm 0.03 \text{ s}^{-1}$.



Σχήμα 3.25: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για δεδομένα χωρίς βροχοπτώσεις για τον Μάρτιο 2018.

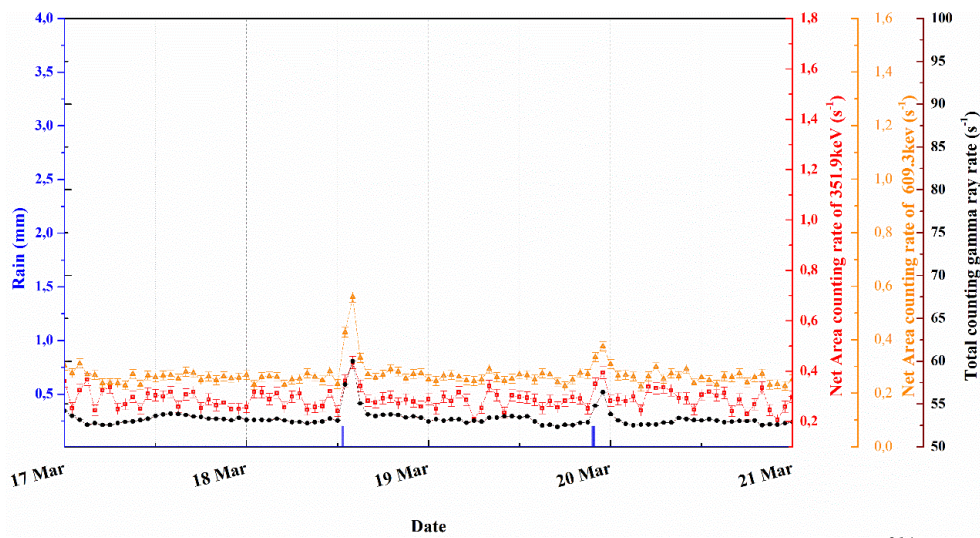
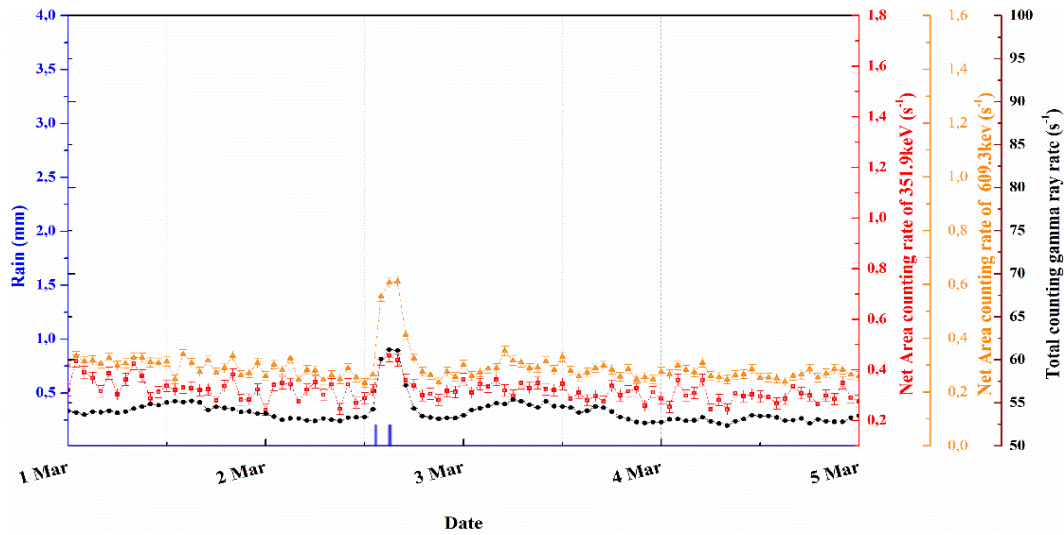
Τον Μάρτιο καταγράφηκαν μόνο 10 ωριαία δεδομένα βροχής. Στο σχήμα 3.26 απεικονίζονται χρονοσειρές βροχών του ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για τα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV). Παρατηρήθηκε, όπως και στα προηγούμενα, ότι για κάθε γεγονός βροχής, ο ρυθμός cps και ο ρυθμός γεγονότων cps_{net} αυξήθηκε. Στους πίνακες 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων και οι τιμές των ρυθμών $cps_{min,max}$, $cps_{net,min,max}$ (^{214}Pb), $cps_{net,min,max}$ (^{214}Bi).

Μάρτιος 2018										
Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
10	0.2	0.8	1.8	6.4	10.2	17.3	77	92	1000.9	1018

Πίνακας 3.9: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τον Μάρτιο 2018, με συνολική καταγραφή 10 γεγονότων βροχής.

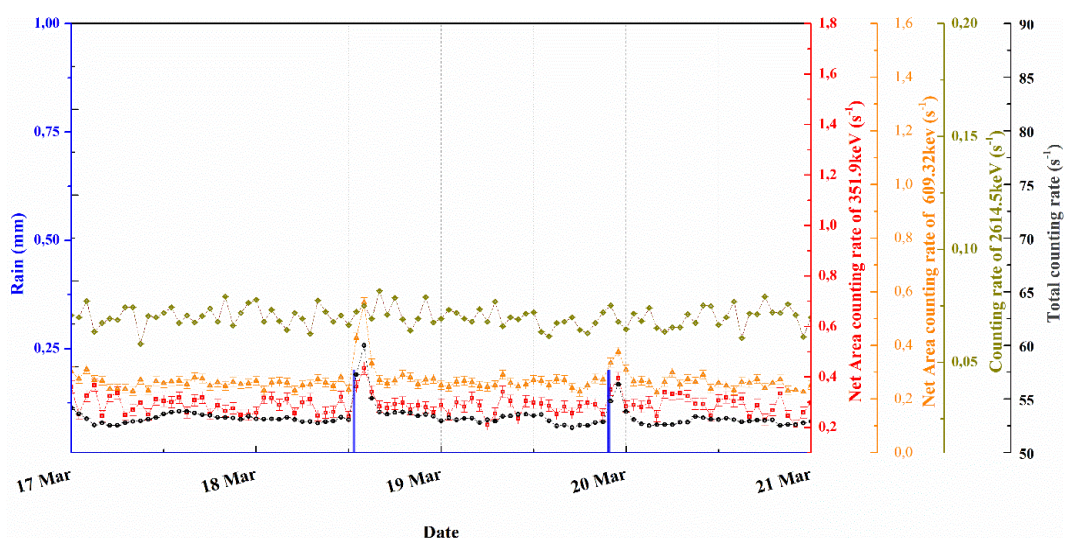
Μάρτιος 2018						
Γεγονότα βροχής	cps_{min} (s^{-1})	cps_{max} (s^{-1})	$cps_{net,min}$ (s^{-1}) ^{214}Pb (351.9keV)	$cps_{net,max}$ (s^{-1}) ^{214}Pb (351.9keV)	$cps_{net,min}$ (s^{-1}) ^{214}Bi (609.3keV)	$cps_{net,max}$ (s^{-1}) ^{214}Bi (609.3keV)
10	53.774±0.002	81.186±0.003	0.20 ±0.02	1.3 ±0.1	1.49±0.03	0.21±0.02

Πίνακας 3.10: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ολικού ρυθμού cps και των ρυθμών cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) και το ^{214}Bi (609.3)keV για τον Μάρτιο 2018, με συνολική καταγραφή 10 γεγονότων βροχής.

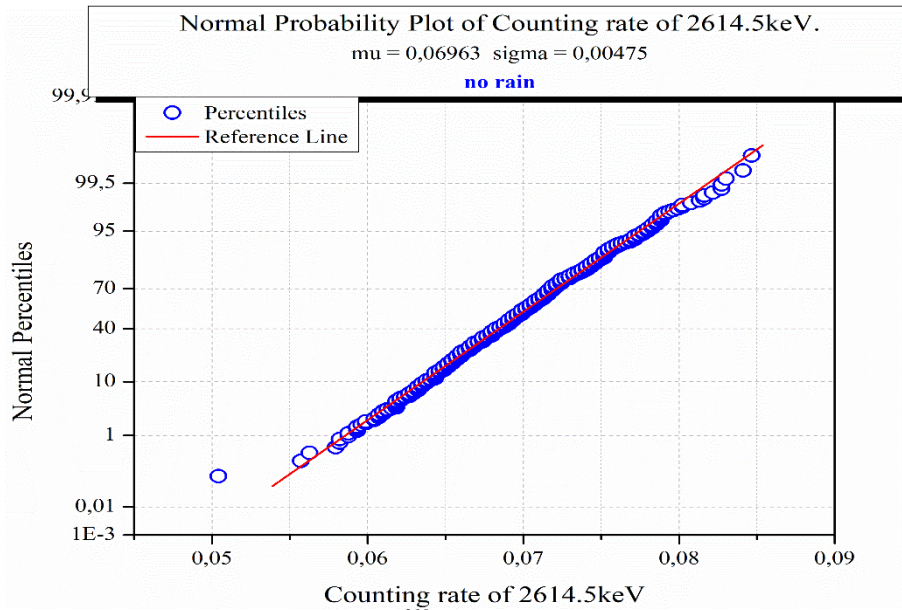


Σχήμα 3.26: Απεικόνιση του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (351.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για τον Μάρτιο 2018.

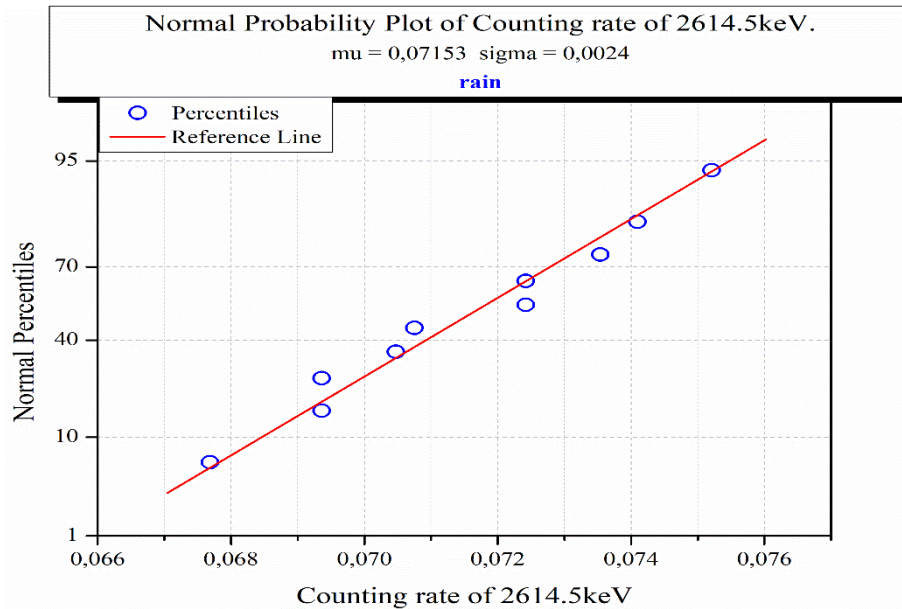
Συνολικά για το ^{214}Pb ο ρυθμός cps_{net} αυξήθηκε έως και 322% ($\pm 0.58\%$) σε σχέση με τα δεδομένα χωρίς βροχή και για το ^{214}Bi η αυξήθηκε έως και 450% ($\pm 52\%$) αντίστοιχα. Το ^{208}Tl επίσης δεν παρουσίασε σημαντική μεταβολή σε σχέση με τον ολικό ρυθμό γεγονότων cps κατά τη διάρκεια των βροχών (Σχήμα 3.27). Στα σχήματα 3.28 και 3.29 φαίνονται οι κατανομές του ρυθμού γεγονότων για το ^{208}Tl για δεδομένα χωρίς βροχή και με βροχή όπου οι μέσες τιμές για δεδομένα χωρίς βροχή είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0,069 \pm 0.005 \text{ s}^{-1}$ και για τα δεδομένα βροχής η μέση τιμή είναι $\overline{cps}_{(2614.5keV)} \approx 0.071 \pm 0.002 \text{ s}^{-1}$.



Σχήμα 3.27: Απεικόνιση του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV), του ολικού ρυθμού cps και του καθαρού ρυθμού cps_{net} για τα ραδιοϊσότοπα ^{214}Pb (352.9keV) και ^{214}Bi (609.3keV) για το χρονικό διάστημα από 17 Μαρτίου 2018 έως 21 Μαρτίου 2018.



Σχήμα 3.28: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα χωρίς βροχή για τον Μάρτιο 2018.



Σχήμα 3.29: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για το ^{208}Tl (2614.5keV) για δεδομένα με βροχές για τον Φεβρουάριο 2018.

Στον πίνακα 3.11 συνοψίζονται οι μέσες τιμές \overline{cps} , $\overline{cps_{net(351.2keV)}}$, $\overline{cps_{net(609.3eV)}}$, για τα δεδομένα χωρίς βροχές και cps_{max} , $cps_{net_{max}}(^{214}\text{Pb})$, $cps_{net_{max}}(^{214}\text{Bi})$ για τα δεδομένα βροχών για τον ολικό ρυθμό γεγονότων ακτινών-γ, του ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα. Επίσης στον Πίνακα 3.12 συνοψίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τα δεδομένα βροχής.

Μήνας	Χωρίς βροχή			Με βροχή			μεταβολή		
	\overline{cps} (s ⁻¹)	$\overline{cps_{net}}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$\overline{cps_{net}}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)	cps_{max} (s ⁻¹)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Pb (351.9keV)	$cps_{net,max}$ (s ⁻¹) ²¹⁴ Bi (609.3keV)	Ολικού ρυθμού cps	Ρυθμού cps_{net} ²¹⁴ Pb (351.9keV)	Ρυθμού cps_{net} ²¹⁴ Bi (609.3keV)
Νοέμβριος 2017	53.61±0.98	0.29±0.03	0.28±0.03	87.819±0.003	1.6±0.1	1.70±0.03	0.64±0.03	4.41±0.67	5.08±0.61
Δεκέμβριος 2017	53.71±0.94	0.30±0.04	0.28±0.03	87.572±0.003	1.5±0.1	1.75±0.03	0.63±0.03	4.07±0.76	5.19±0.63
Ιανουάριος 2018	53.29±0.88	0.31±0.04	0.28±0.03	77.458±0.002	1.1±0.1	1.24±0.03	0.45±0.02	2.64±0.59	3.39±0.54
Φεβρουάριος 2018	54.10±0.87	0.32±0.04	0.29±0.03	83.041±0.003	1.3±0.1	1.52±0.03	0.53±0.02	3.18±0.61	4.17±0.57
Μάρτιος 2018	53.50±0.78	0.30±0.03	0.27±0.03	81.186±0.003	1.3±0.1	1.49±0.03	0.52±0.02	3.22±0.58	4.50±0.52

Πίνακας 3.11: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις μέσες τιμές \overline{cps} , $\overline{cps_{net}}$, για τα δεδομένα χωρίς βροχές και cps_{max} , $cps_{net,max}$ του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινών-γ, του ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi αντίστοιχα για τα δεδομένα με βροχές.

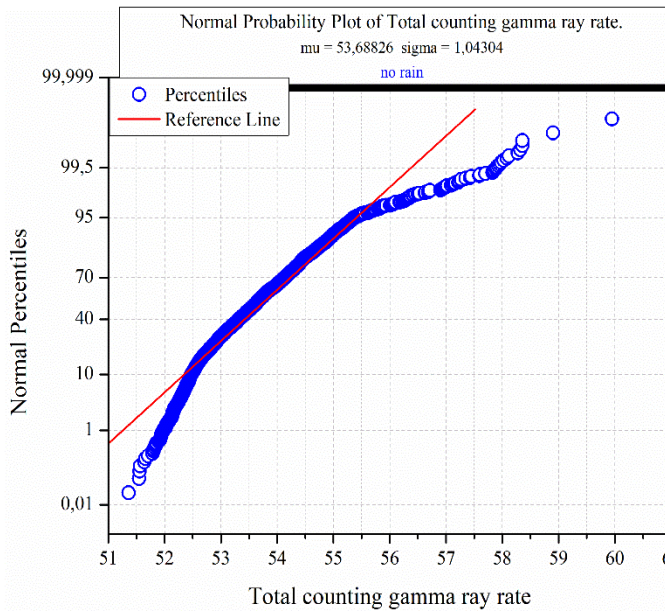
Μήνας	Γεγονότα βροχής	Rain _{min} (mm)	Rain _{max} (mm)	Rain rate _{min} (mm/hr)	Rain rate _{max} (mm/hr)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hum _{min} (%)	Hum _{max} (%)	P _{min} (mbar)	P _{max} (mbar)
Νοέμβριος 2017	40	0.2	3.6	0.8	129.4	10.2°	17.4	74	97	1002.6	1018.7
Δεκέμβριος 2017	38	0.2	2.6	0.8	33.2	4.9°	17.6°	70	93	1004.6	1023.8
Ιανουάριος 2018	45	0.2	2.4	0.8	67.8	7.6	13.4	69	96	995.8	1028.1
Φεβρουάριος 2018	47	0.2	4.0	0.8	111.8	9.4	15.1	67	93	995.2	1019.6
Μάρτιος 2018	10	0.2	0.8	1.8	6.4	10.2	17.3	77	92	1000.9	1018

Πίνακας 3.12: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων για τα δεδομένα με βροχές.

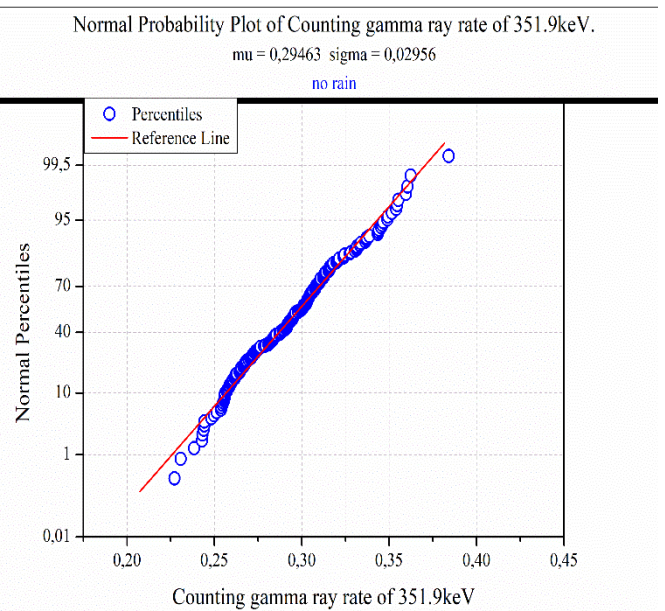
3.2 Μελέτη της επίδρασης της διεύθυνσης του ανέμου

Μελετήθηκε πιθανή συσχέτιση της αύξησης του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολίας- γ cps και των ρυθμών cps_{net} των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου με τις δεκαέξι (16) διευθύνσεις του ανέμου. Αρχικά από τον συγχρονισμό των δεδομένων των δύο συστημάτων (GeoMAREA & μετεωρολογικός σταθμός meteo), αντιστοιχήθηκε κάθε ωριαίο φάσμα με μία διεύθυνση αέρα (Κεφ.2). Στη συνέχεια μελετήθηκε η κατανομή των ρυθμών cps και cps_{net} για τα θυγατρικά του ραδονίου, για την κάθε κατεύθυνση του αέρα ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε κατά πόσο τα δεδομένα με βροχή και χωρίς βροχή αποκλίνουν από μία κανονική κατανομή. Βρέθηκε ότι για το σύνολο των δεδομένων χωρίς καταγραφή γεγονότος βροχής, οι ρυθμοί cps , και cps_{net} των ²¹⁴Pb(351.9keV) και ²¹⁴Bi(609.38keV), για όλες τις διευθύνσεις του αέρα, δεν αποκλίνουν

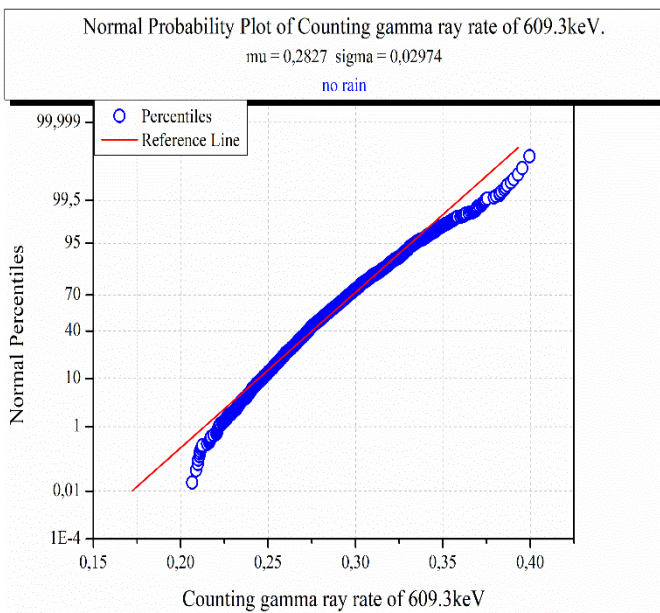
από μία κανονική κατανομή. (Σχήματα 3.30- 3.32). Επομένως για την κάθε διεύθυνση υπολογίστηκε μία μέση τιμή \overline{cps} και $\overline{cps_{net}}$ (πίνακας 3.13). Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν γραφικές παραστάσεις των ρυθμών \overline{cps} , $\overline{cps_{net}(351.9keV)}$, $\overline{cps_{net}(609.3keV)}$ συναρτήσει και των διευθύνσεων του αέρα και απεικονίζονται στα σχήματα 3.33- 3.35.



Σχήμα 3.30: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή.



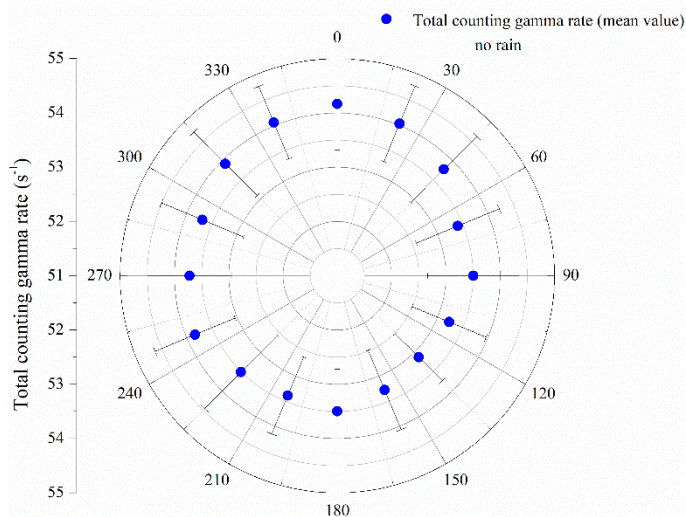
Σχήμα 3.31: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή για το ^{214}Pb για ενέργεια 351.9keV.



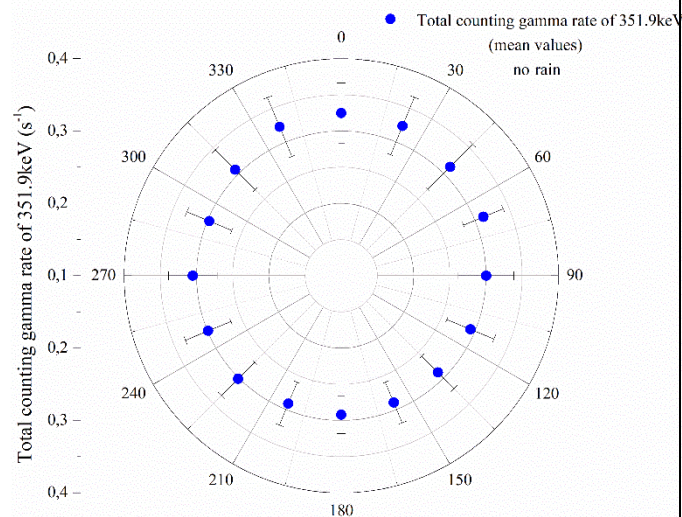
Σχήμα 3.32: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα χωρίς βροχή για το ^{214}Bi για ενέργεια 609.3keV.

Αέρας		Δεδομένα χωρίς βροχή		
Μοίρες ϕ	Διεύθυνση αέρα	Μέση τιμή (mean value) $s^{-1} \overline{cps}$	Μέση τιμή (mean value) $\overline{cps}_{net} (351.9keV) s^{-1}$	Μέση τιμή (mean value) $\overline{cps}_{net} (609.3keV) s^{-1}$
0	N	54,2 ± 0,9	0,32 ± 0,04	0,30 ± 0,03
22,5	NNE	54,0 ± 0,8	0,32 ± 0,04	0,29 ± 0,02
45	NE	53,8 ± 0,9	0,31 ± 0,04	0,29 ± 0,02
67,5	ENE	53,4 ± 0,8	0,31 ± 0,03	0,28 ± 0,03
90	E	53,5 ± 0,8	0,30 ± 0,04	0,28 ± 0,03
112,5	ESE	53,2 ± 0,7	0,29 ± 0,04	0,27 ± 0,03
135	SE	53,1 ± 0,6	0,29 ± 0,03	0,26 ± 0,02
157,5	SSE	53,3 ± 0,8	0,29 ± 0,03	0,27 ± 0,02
180	S	53,5 ± 0,8	0,29 ± 0,03	0,27 ± 0,03
202,5	SSW	53,4 ± 0,8	0,29 ± 0,03	0,27 ± 0,02
225	SW	53,5 ± 0,9	0,30 ± 0,03	0,28 ± 0,03
247,5	WSW	53,8 ± 0,8	0,30 ± 0,03	0,28 ± 0,02
270	W	53,7 ± 0,8	0,31 ± 0,03	0,28 ± 0,03
292,5	WNW	53,7 ± 0,8	0,30 ± 0,03	0,28 ± 0,03
315	NW	53,9 ± 0,8	0,31 ± 0,04	0,28 ± 0,03
337,5	NNW	54,1 ± 0,7	0,32 ± 0,04	0,29 ± 0,03

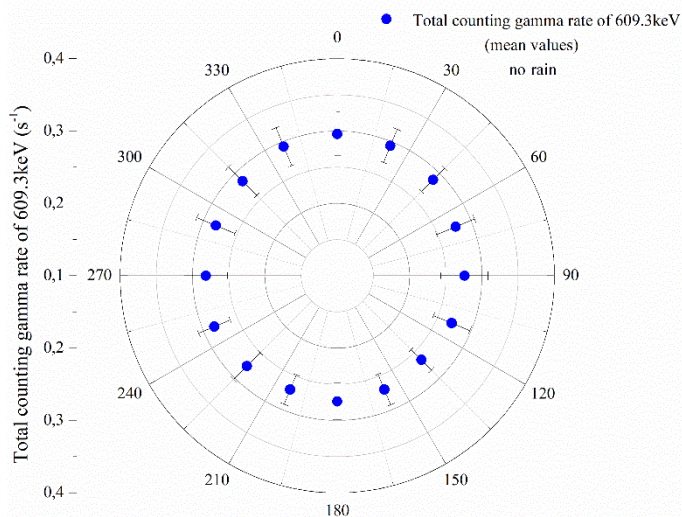
Πίνακας 3.13: Μέσες τιμές \overline{cps} , $\overline{cps}_{net} (351.9keV)$ και $\overline{cps}_{net} (609.3keV)$ για τα δεδομένα χωρίς βροχή



Σχήμα 3.33: Διάγραμμα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ \overline{cps} συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.



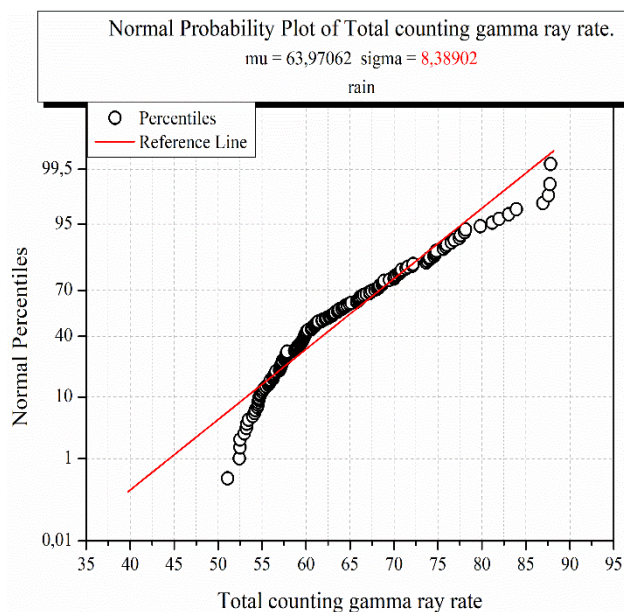
Σχήμα 3.34: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ \overline{cps}_{net} (351.9keV) για το ^{214}Pb , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.



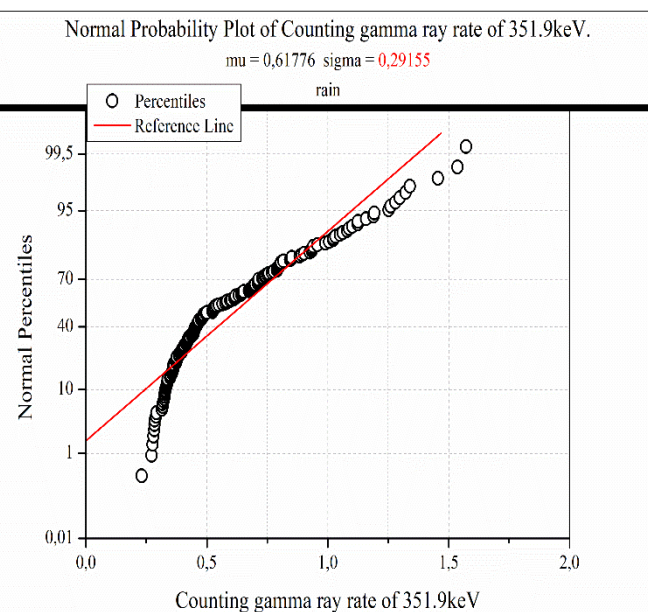
Σχήμα 3.35: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία- γ \overline{cps}_{net} (609.3keV) για το ^{214}Bi , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα χωρίς βροχές.

Για την κάθε διεύθυνση φάνηκαν οι τιμές των ρυθμών \overline{cps} , $\overline{cps_{net(351.9keV)}}$ και $cps_{net(609.3keV)}$ της ακτινοβολίας-γ να παραμένουν σταθερές χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική μεταβολή. Επομένως οι επιμέρους μέσες τιμές για την κάθε διεύθυνση μπορούν να θεωρηθούν μέσες τιμές για το υπόβαθρο σε ατμοσφαιρικό αέρα σε συνθήκες χωρίς βροχή, για την περιοχή διεξαγωγής του πειράματος.

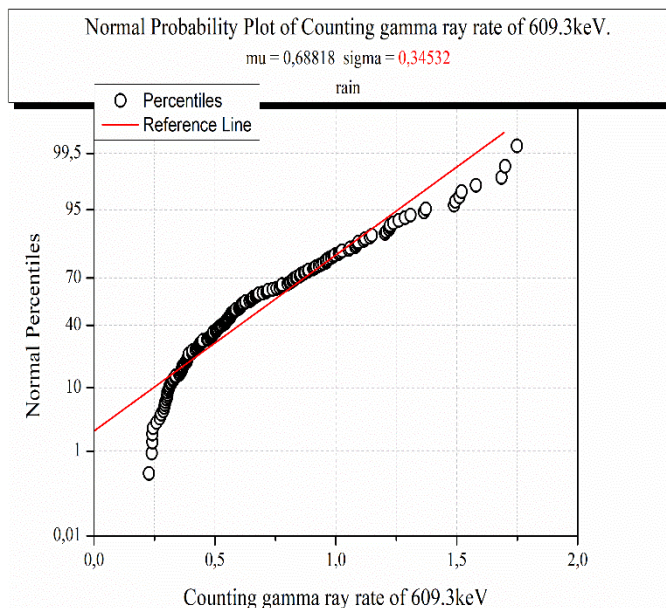
Παράλληλα οι κατανομές των ρυθμών cps και cps_{net} , για τα δεδομένα με βροχές αποκλίνουν από την κανονική κατανομή (Σχήματα 3.36- 3.38), επομένως χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και $cps_{net,rain,max}$, δηλαδή οι πιο ακραίες τιμές που καταγράφηκαν για την κάθε διεύθυνση. Σημειώνεται ότι οι ρυθμοί $cps_{rain,max}$ και $cps_{net,rain,max}$ χαρακτηρίζονται από τα καταγεγραμμένα γεγονότα από τον ανιχνευτή, σε διάστημα μιας ώρας, όπου προέρχονται και από βρόχινο νερό, αλλά και από γεγονότα του υποβάθρου γύρω από την περιοχή ανίχνευσης. Για την μελέτη της μεταβολής των γεγονότων που προέρχονται μόνο από το βρόχινο νερό που εναποτίθεται στον κρύσταλλο, αφαιρέθηκαν οι μέσες τιμές \overline{cps} και $\overline{cps_{net}}$ των δεδομένων χωρίς βροχή, από τις μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ των δεδομένων βροχής (Πίνακες 3.14-3.16)



Σχήμα 3.36: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps για όλα τα δεδομένα με βροχή.



Σχήμα 3.37: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα με βροχή για το ^{214}Pb για ενέργεια 351.9keV.



Σχήμα 3.38: Κατανομή του ρυθμού γεγονότων cps_{net} για όλα τα δεδομένα με βροχή για το ^{214}Bi για ενέργεια 609.3keV.

Αέρας		Δεδομένα χωρίς βροχή	Δεδομένα με βροχή	
Μοίρες ϕ	Διεύθυνση αέρα	Μέση τιμή (mean value) $s^{-1} \overline{cps}$	Μέγιστη τιμή (max value) $cps_{rain,max}$ s^{-1}	$Cps_{net\ rain}$ s^{-1}
0	N	$54,2 \pm 0,9$	$87,572 \pm 0,003$	$33,4 \pm 0,9$
22,25	NNE	$54,0 \pm 0,8$	$81,186 \pm 0,003$	$27,2 \pm 0,8$
45	NE	$53,8 \pm 0,9$	$64,662 \pm 0,002$	$10,9 \pm 0,9$
67,5	ENE	$53,4 \pm 0,8$	$68,366 \pm 0,002$	$15,0 \pm 0,8$
90	E	$53,5 \pm 0,8$	$87,728 \pm 0,003$	$34,2 \pm 0,8$
112,5	ESE	$53,2 \pm 0,7$	$87,819 \pm 0,003$	$34,6 \pm 0,7$
135	SE	$53,1 \pm 0,6$	$74,815 \pm 0,002$	$21,7 \pm 0,6$
157,5	SSE	$53,3 \pm 0,8$	$83,041 \pm 0,003$	$29,8 \pm 0,8$
180	S	$53,5 \pm 0,8$	$68,678 \pm 0,002$	$15,2 \pm 0,8$
202,5	SSW	$53,4 \pm 0,8$	$67,835 \pm 0,002$	$14,4 \pm 0,8$
225	SW	$53,5 \pm 0,9$	$74,698 \pm 0,002$	$21,2 \pm 0,9$
247,5	WSW	$53,8 \pm 0,8$	$57,014 \pm 0,002$	$3,2 \pm 0,8$
270	W	$53,7 \pm 0,8$	$68,879 \pm 0,002$	$15,2 \pm 0,8$
292,5	WNW	$53,7 \pm 0,8$	$79,840 \pm 0,002$	$26,2 \pm 0,8$
315	NW	$53,9 \pm 0,8$	$77,566 \pm 0,002$	$23,6 \pm 0,8$
337,5	NNW	$54,1 \pm 0,7$	$64,301 \pm 0,002$	$10,2 \pm 0,7$

Πίνακας 3.14: Μέσες τιμές \overline{cps} , μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ολικό ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ

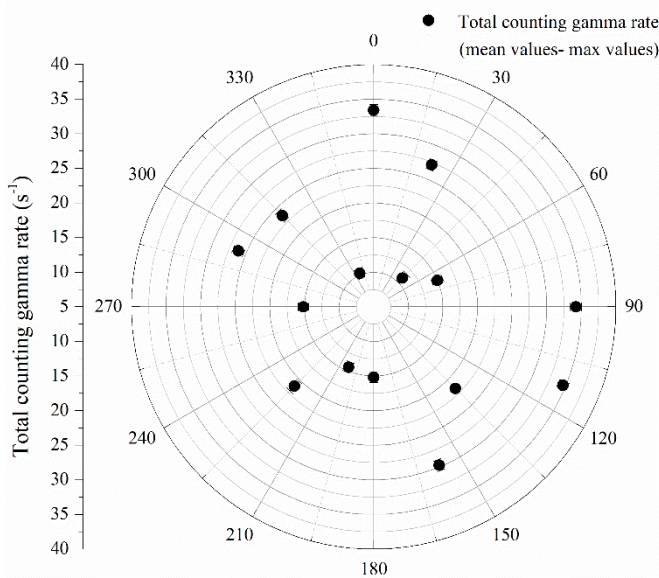
Αέρας		Δεδομένα χωρίς βροχή	Δεδομένα με βροχή	
Μοίρες ϕ	Διεύθυνση αέρα	Μέση τιμή (mean value) $\overline{cps}_{net} (351.9keV) s^{-1}$	Μέγιστη τιμή (max value) $cps_{rain,max}$ s^{-1}	cps_{rain} s^{-1}
0	N	0,32 ± 0,04	1,5 ± 0,1	1,2 ± 0,1
22,25	NNE	0,32 ± 0,04	1,3 ± 0,1	0,9 ± 0,1
45	NE	0,31 ± 0,04	0,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1
67,5	ENE	0,31 ± 0,03	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
90	E	0,30 ± 0,04	1,6 ± 0,1	1,3 ± 0,1
112,5	ESE	0,29 ± 0,04	1,5 ± 0,1	1,2 ± 0,1
135	SE	0,29 ± 0,03	1,0 ± 0,1	0,7 ± 0,1
157,5	SSE	0,29 ± 0,03	1,3 ± 0,1	1,0 ± 0,1
180	S	0,29 ± 0,03	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
202,5	SSW	0,29 ± 0,03	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
225	SW	0,30 ± 0,03	1,1 ± 0,1	0,8 ± 0,1
247,5	WSW	0,30 ± 0,03	0,4 ± 0,1	0,1 ± 0,1
270	W	0,31 ± 0,03	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
292,5	WNW	0,30 ± 0,03	1,2 ± 0,1	0,9 ± 0,1
315	NW	0,31 ± 0,04	1,2 ± 0,1	0,9 ± 0,1
337,5	NNW	0,32 ± 0,04	0,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1

Πίνακας 3.15: Μέσες τιμές $\overline{cps}_{net} (351.9keV)$, μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ για το ^{214}Pb (351.9keV).

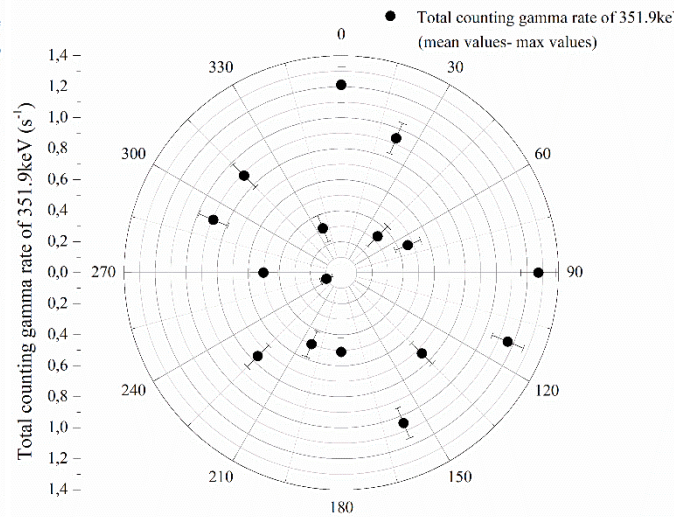
Αέρας		Δεδομένα χωρίς βροχή	Δεδομένα με βροχή	
Μοίρες ϕ	Διεύθυνση αέρα	Μέση τιμή (mean value) $\overline{cps}_{net} (609.3keV) s^{-1}$	Μέγιστη τιμή (max value) $cps_{rain,max}$ s^{-1}	cps_{rain} s^{-1}
0	N	0,30 ± 0,03	1,75 ± 0,03	1,45 ± 0,04
22,25	NNE	0,29 ± 0,02	1,49 ± 0,03	1,20 ± 0,04
45	NE	0,29 ± 0,02	0,66 ± 0,02	0,37 ± 0,03
67,5	ENE	0,28 ± 0,03	0,91 ± 0,02	0,64 ± 0,04
90	E	0,28 ± 0,03	1,70 ± 0,03	1,42 ± 0,04
112,5	ESE	0,27 ± 0,03	1,69 ± 0,03	1,41 ± 0,04
135	SE	0,26 ± 0,02	1,12 ± 0,02	0,85 ± 0,03
157,5	SSE	0,27 ± 0,02	1,52 ± 0,03	1,25 ± 0,04
180	S	0,27 ± 0,03	0,96 ± 0,02	0,69 ± 0,03
202,5	SSW	0,27 ± 0,02	0,92 ± 0,02	0,65 ± 0,03
225	SW	0,28 ± 0,03	1,22 ± 0,03	0,95 ± 0,04
247,5	WSW	0,28 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,11 ± 0,03
270	W	0,28 ± 0,03	0,86 ± 0,02	0,58 ± 0,04
292,5	WNW	0,28 ± 0,03	1,37 ± 0,03	1,08 ± 0,04
315	NW	0,28 ± 0,03	1,23 ± 0,03	0,94 ± 0,04
337,5	NNW	0,29 ± 0,03	0,66 ± 0,02	0,37 ± 0,03

Πίνακας 3.16: Μέσες τιμές $\overline{cps}_{net} (609.3keV)$, μέγιστες τιμές $cps_{rain,max}$ και τιμές cps_{rain} , για τον ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας-γ για το ^{214}Bi (609.3keV).

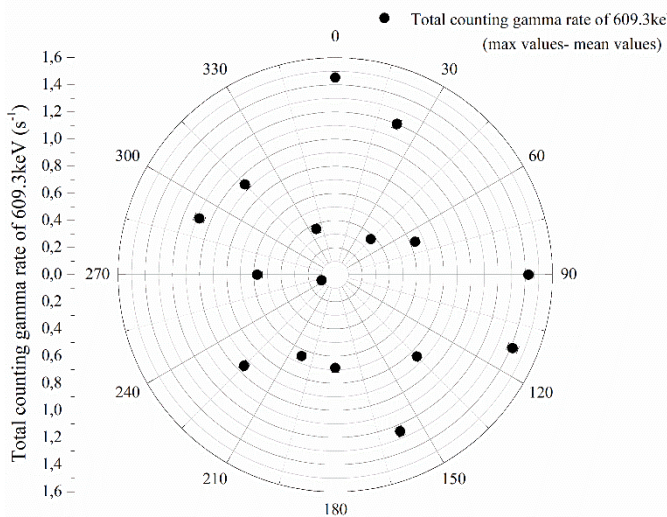
Ο ολικός ρυθμός ακτινοβολίας-γ και των ρυθμών μέτρησης των ^{214}Pb και ^{214}Pb (cps_{rain}) δίνεται συναρτήσει και των δεκαέξι (16) διευθύνσεων του αέρα. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι ρυθμοί μέτρησης των παραπάνω παραμέτρων εξαρτώνται σημαντικά από την διεύθυνση του ανέμου (Σχήματα 3.39-3.41).



Σχήμα 3.39: Διάγραμμα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία-γ $\overline{cps} - cps_{rain,max}$ συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.

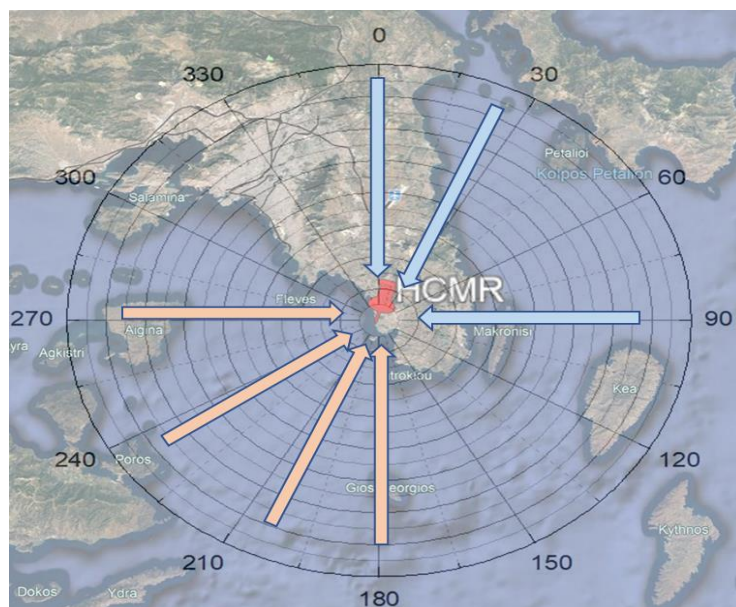


Σχήμα 3.40: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία-γ $\overline{cps}_{net} (351.9keV) - cps_{rain,max}$ για το ^{214}Pb , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.



Σχήμα 3.41: Διάγραμμα του ρυθμού γεγονότων ακτινοβολία-γ $\overline{cps}_{net} (609.3keV) - cps_{rain,max}$ για το ^{214}Bi , συναρτήσει των 16 διευθύνσεων του αέρα για δεδομένα με βροχές.

Παρατηρήθηκε ότι για τους ρυθμούς cps_{rain} , οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές έχουν την ίδια συμπεριφορά, τόσο για την ολική ακτινοβολία- γ όσο και για τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα, για την κάθε διεύθυνση αέρα. Παράλληλα, ύστερα από την αφαίρεση, οι κυριότερες διευθύνσεις με πιο αυξημένες τιμές των ρυθμών ακτινοβολίας γ παρατηρήθηκαν κυρίως στις N, NNE, E και ESE στην περιοχή της Αναβύσσου. Οι συγκεκριμένες περιοχές και κυρίως οι περιοχές με κατεύθυνση N και NNE, χαρακτηρίζονται από μεγάλη χερσαία εδαφική έκταση όπου υπάρχει αυξημένη εκροή ραδονίου, το οποίο διαφεύγει από το έδαφος προς το περιβάλλον. Επίσης οι περιοχές που βρίσκονται με κατεύθυνση E και ESE είναι οι περιοχές που βρίσκεται το Πάνειο όρος, ανάμεσα στις περιοχές της Αναβύσσου, και της Κερατέας, περιοχή δηλαδή με μεγάλη εδαφική επιφάνεια, και κατ' επέκταση αυξημένη εκροή ραδονίου. Τέλος οι περιοχές με κατεύθυνση ESE είναι οι περιοχές που βρίσκεται το Λαύριο, μια περιοχή με σχετικά αυξημένες τιμές σε συγκέντρωση ραδονίου. Το ραδόνιο και τα θυγατρικά, απελευθερώνεται στον ατμοσφαιρικό αέρα από το έδαφος και μεταφέρονται με τον άνεμο, από τις συγκεκριμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα όταν βρέχει, να καταγράφονται από τον ανιχνευτή. Από την αντίθετη πλευρά οι ελάχιστες τιμές παρατηρήθηκαν από τις κατευθύνσεις W, WSW, SSW, S, NNW και NE. Οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται από μεγάλες εκτάσεις που καλύπτονται από θάλασσα όπου η εκροή ραδονίου είναι χαμηλότερη. Συμπερασματικά, το συγκεκριμένο φαινόμενο, η αύξηση του ρυθμού γεγονότων cps και cps_{net} της ακτινοβολίας- γ σε βροχές, εξαρτάται από την κατεύθυνση του αέρα καθώς και από την εδαφική περιοχή διεξαγωγής του πειράματος.



Σχήμα 3.42: Απεικόνιση των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών του ρυθμού ακτινοβολίας- γ . Τα μπλε βέλη αναπαριστούν τις διευθύνσεις με τις μέγιστες τιμές και με πορτοκαλί βέλη τις διευθύνσεις με τις ελάχιστες τιμές.

3.3 Συσχέτιση με ατμοσφαιρικές παραμέτρους

Εξετάσθηκε πιθανή συσχέτιση των ρυθμών cps και cps_{net} για δεδομένα χωρίς βροχή και για δεδομένα με καταγραφή βροχής με τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους της θερμοκρασίας (T), πίεσης (P) και της υγρασίας (H) μέσω στατιστικής ανάλυσης. Παράλληλα, για τα δεδομένα βροχής, μελετήθηκε η συσχέτιση της ποσότητας του ρυθμού cps ανά ύψος βροχής με την ένταση της βροχής (rain rate) σε mm/hr.

3.3.1 Συσχέτιση ρυθμών ακτινοβολία-γ με θερμοκρασία (T), υγρασία (H), πίεση (P)

Για την διερεύνηση της συσχέτισης των δεδομένων υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman rho μέσω του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης SPSS. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής Pearson αποτελεί έναν αριθμητικό δείκτη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών και κυμαίνεται από τιμές $-1 < 0 < +1$. Για τιμή $+1$ η συσχέτιση Pearson αντιστοιχεί σε μία τέλεια αύξουσα γραμμική σχέση, για τιμή -1 αντιστοιχεί σε τέλεια φθίνουσα γραμμική σχέση και για τιμή 0 , δεν υπάρχει ένδειξη συσχέτισης των μεταβλητών. Παράλληλα ο συντελεστής συσχέτισης Spearman rho αποτελεί το μέτρο συσχέτισης βαθμίδας (rank order correlation) μεταξύ δύο μεταβλητών, όπου αξιολογεί πόσο καλά μπορεί να περιγράψει η μεταξύ τους σχέση. Στην ουσία, δείχνει εάν το μέγεθος α αυξάνεται με το μέγεθος β ή το αντίθετο, χωρίς να διευκρινίζεται ο τρόπος αύξησης (ή μείωσης). Εξαρτάται από τον αριθμό N του δείγματος μεταβλητών και οι τιμές κυμαίνονται από $-1 < 0 < +1$. Μια τέλεια συσχέτιση Spearman rho αντιστοιχεί για τιμή $+1$, που είναι μία θετική συσχέτιση βαθμίδας και -1 για μία αρνητική συσχέτιση βαθμίδας. Για τιμή 0 οι μεταβλητές δεν εμφανίζουν ένδειξη συσχέτισης. Σημαντικό ρόλο για την ανάλυση πιθανής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών, αποτελεί η σημαντικότητα συσχέτισης (Significance probability Sig.). Δηλώνει την πιθανότητα οι τιμές των συντελεστών (Pearson & Spearman rho), για τις υπό εξέταση μεταβλητές, να αλλάξουν, εάν επαναληφθεί το πείραμα από την αρχή. Παράλληλα κατά τον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης, ένα επίπεδο σημαντικότητας (significance level) ορίζεται από το πρόγραμμα SPSS. Στην παρούσα εργασία τα επίπεδα ορίστηκαν στο 1% (*), και στο 5% (**). Σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίστηκαν οι συντελεστές Pearson και Spearman rho για τα δεδομένα χωρίς βροχή και με βροχή. Τα μεγέθη που συσχετίστηκαν είναι η θερμοκρασία (T), η πίεση (P) και η υγρασία (H) με τους ρυθμούς cps και cps_{net} για το ^{214}Pb (351.2 keV), ^{214}Bi (609.3 keV), και στην περιοχή της φωτοκορυφής με ενέργεια 1460.8 keV. Οι συντελεστές συσχέτισης για τα δεδομένα χωρίς βροχή υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στους πίνακες 3.17 και 3.18.

Pearson		<i>cps</i>	<i>cps_{net}^{214Pb}</i> 351.2keV	<i>cps_{net}^{214Bi}</i> 609.3keV	<i>cps_{net}^{40K}</i> 1460.8keV
Temperature	Pearson Correlation	-.200**	-.344**	-.340**	-.027
	Sig.	.000	.000	.000	.140
	N	3075	3075	3075	3075
Humidity	Pearson Correlation	-.003	.083**	.018	-.057**
	Sig.	.869	.000	.309	.002
	N	3075	3075	3075	3075
Pressure	Pearson Correlation	.148**	.145**	.126**	.051**
	Sig.	.000	.000	.000	.005
	N	3075	3075	3075	3075

Πίνακας 3.17: Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς *cps* & *cps_{net}* για το ²¹⁴Pb (351.9keV), ²¹⁴Bi(609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ⁴⁰K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Spearman rho		<i>cps</i>	<i>cps_{net}^{214Pb}</i> 351.2keV	<i>cps_{net}^{214Bi}</i> 609.3keV	<i>cps_{net}^{40K}</i> 1460.8keV
Temperature	Correlation Coefficient	-.214**	-.371**	-.334**	-.025
	Sig.	.000	.000	.000	.163
	N	3075	3075	3075	3075
Humidity	Correlation Coefficient	-.055**	.036*	-.017	-.071**
	Sig.	.002	.047	.338	.000
	N	3075	3075	3075	3075
Pressure	Correlation Coefficient	.162**	.145**	.170**	.074**
	Sig.	.000	.000	.000	.000
	N	3075	3075	3075	3075

Πίνακας 3.18: Υπολογισμός του συντελεστή μονότονης συσχέτισης Spearman rho για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς *cps* & *cps_{net}* για το ²¹⁴Pb (351.9keV), ²¹⁴Bi(609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ⁴⁰K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα χωρίς βροχή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω από την στατιστική ανάλυση, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική συσχέτιση ενώ σε αρκετές περιπτώσεις, η στατιστική ανάλυση δεν είναι ικανοποιητική για συσχέτιση και παρουσιάζεται ένδειξη για μη συσχέτιση. Στη συνέχεια

υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών που αναφέρθηκαν για τα δεδομένα με βροχές και παρουσιάζονται στους πίνακες 3.19 και 3.20.

Pearson		<i>cps</i>	<i>cps_{net}^{214Pb}</i> 351.2keV	<i>cps_{net}^{214Bi}</i> 609.3keV	<i>cps_{net}^{40K}</i> 1460.8keV
Temperature	Pearson Correlation	-.143*	-.168**	-.156**	-.141*
	Sig.	.014	.004	.007	.015
	N	296	296	296	296
Humidity	Pearson Correlation	.220**	.226**	.216**	.161**
	Sig.	.000	.000	.000	.006
	N	296	296	296	296
Pressure	Pearson Correlation	-.177**	-.162**	-.189**	-.117*
	Sig.	.002	.005	.001	.044
	N	296	296	296	296

Πίνακας 3.19: Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς *cps* & *cps_{net}* για το ²¹⁴Pb (351.9keV), ²¹⁴Bi(609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ⁴⁰K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα με βροχή.

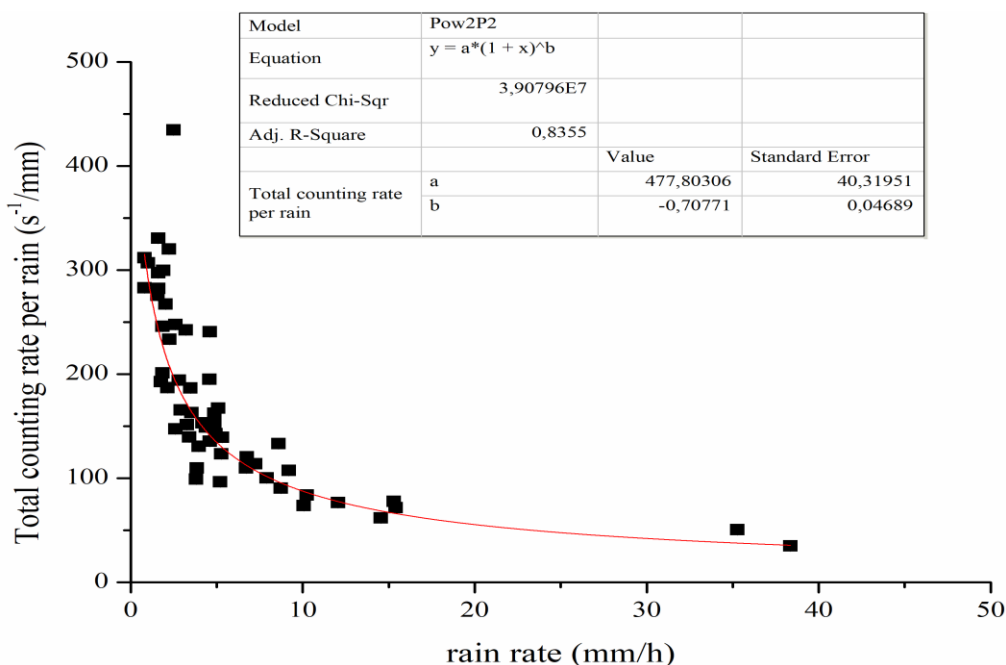
Spearman rho		<i>cps</i>	<i>cps_{net}^{214Pb}</i> 351.2keV	<i>cps_{net}^{214Bi}</i> 609.3keV	<i>cps_{net}^{40K}</i> 1460.8keV
Temperature	Correlation Coefficient	-.149*	-.210**	-.153**	-.146*
	Sig.	.010	.000	.008	.012
	N	296	296	296	296
Humidity	Correlation Coefficient	.153**	.182**	.154**	.149*
	Sig.	.008	.002	.008	.010
	N	296	296	296	296
Pressure	Correlation Coefficient	-.170**	-.139*	-.187**	-.116*
	Sig.	.003	.017	.001	.045
	N	296	296	296	296

Πίνακας 3.20: Υπολογισμός του συντελεστή μονότονης συσχέτισης Spearman rho για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους με τους ρυθμούς *cps* & *cps_{net}* για το ²¹⁴Pb (351.9keV), ²¹⁴Bi(609.3keV) και στην περιοχή που εκπέμπει το ⁴⁰K ενέργειας 1460.8keV για τα δεδομένα με βροχή.

Όπως και προηγουμένως από την στατιστική ανάλυση, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική συσχέτιση ενώ σε αρκετές περιπτώσεις, η στατιστική ανάλυση δεν είναι ικανοποιητική για συσχέτιση και παρουσιάζεται ένδειξη μη συσχέτισης.

3.3.2 Συσχέτιση με ατμοσφαιρικές παραμέτρους

Από προηγούμενες έρευνες, η συγκέντρωσή ραδιενέργειας στο βρόχινο νερό βρέθηκε να συσχετίζεται με την ένταση της βροχής και επιτρέπει τον προσδιορισμό της σε πραγματικό χρόνο έως και 0,2mm/h (Greenfield et al., 2003). Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η εξάρτηση της ποσότητας $\frac{\text{ολικός ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας-\gamma (s^{-1})}{\text{rain (mm)}}$ με την ένταση της βροχής. Πιο συγκεκριμένα, η έννοια 1mm βροχής σημαίνει ότι για κάθε επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου (1m²), μια δεξαμενή διαστάσεων 1m³, γεμίζει με νερό βροχής ύψους 1mm. Δηλαδή ένα γεγονός βροχής με ύψος 1mm νερού, παρέχει 0,001 m³ ή 1 λίτρο (1lt) νερού ή 1kg νερού. Συνεπώς η ποσότητα $\frac{\text{ολικός ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας-\gamma (s^{-1})}{\text{rain (mm)}}$ εκφράζει το ποσό των ακτινών-γ που μπορεί να καταγραφούν σε 1kg βρόχινου νερού. Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος OriginLab και την χρήση μιας δυναμικής εξίσωσης (power fit), βρέθηκε ότι η παραπάνω ποσότητα σχετίζεται με την ραγδιότητα της βροχής σύμφωνα με την εξίσωση της μορφής $y = a \cdot (1 + x)^b$ (Σχήμα 3.43).



Σχήμα 3.43: Η ποσότητα του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινών-γ ανά χιλιοστό βροχής $\frac{\text{cps}}{\text{mm}}$ συναρτίζει της ραγδιότητας της βροχής.

Συμπεραίνεται ότι, μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα και σε πραγματικό χρόνο η ένταση της βροχής από δεδομένα ραδιενέργειας που λαμβάνονται από το ανιχνευτικό σύστημα, χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση ακόμα και για μικρής διάρκειας και μικρής ποσότητα βροχής. Επομένως η ολική ένταση ακτινοβολίας γάμμα μέσω του συστήματος GeoMAREA, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια και αξιοπιστία για τον υπολογισμό της έντασης της βροχής, εφαρμόζοντας in-situ φασματοσκοπία- γ στον ατμοσφαιρικό αέρα.

3.3 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των ρυθμών ακτινοβολίας γάμμα των φυσικών ραδιονουκλιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά την διάρκεια βροχών με τη χρήση in situ φασματοσκοπίας ακτινών γάμμα. Μελετήθηκαν τα ραδιενεργά ισότοπα που προέρχονται από την αποδιέγερση του ραδονίου, δηλαδή τα ^{214}Pb και ^{214}Bi καθώς και το θυγατρικό προϊόν του θορονίου το ^{208}Tl , και το φυσικό ισότοπο ^{40}K . Τα θυγατρικά ^{214}Pb και ^{214}Bi αποτελούν σημαντικούς ιχνηθέτες για την κατανόηση ατμοσφαιρικών διεργασιών λόγω της ικανότητάς τους να προσκολλώνται στα μόρια του ατμοσφαιρικού αέρα και η ανίχνευση τους μέσω φασματοσκοπίας γάμμα, γίνεται χωρίς να υπόκεινται σε περεταίρω χημικές διεργασίες.

Για τις μετρήσεις, αξιοποιήθηκε για πρώτη φορά στον ατμοσφαιρικό αέρα το υποθαλάσσιο ανιχνευτικό σύστημα μεσαία διακριτικής ικανότητας GeoMAREA το οποίο χρησιμοποιεί κρύσταλλο CeBr_3 , διαστάσεων $2'' \times 2''$ για την ανίχνευση της ακτινοβολίας γάμμα. Επίσης για την κατανόηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των βροχών συλλέχθηκαν και δεδομένα μετεωρολογικών παραμέτρων από τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή διεξαγωγής του πειράματος στην Ανάβυσσο. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται παρακάτω.

Όπως έδειξε το συγκεκριμένο πείραμα, ανιχνευτές αυτού του τύπου μπορούν με επιτυχία να αξιοποιηθούν σε ανάλογες εφαρμογές καθώς η διακριτική τους ικανότητα επιτρέπει την ανίχνευση φωτοκορυφών των κύριων θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου (^{214}Pb στα 295.2keV, 351.9keV, ^{214}Bi στα 609.3keV, 1764.5keV) του θορονίου (^{208}Tl στα 2614.5keV) και του φυσικού ραδιοϊσοτόπου του καλίου (^{40}K στα 1460.8 keV) στο ενεργειακό φάσμα. Ωστόσο απαιτείται προσοχή α) στην περιοχή των 609.3 keV καθώς στην φωτοκορυφή του ^{214}Bi συνεισφέρει η φωτοκορυφή 583.2 keV του ^{208}Tl και απαιτείται η αφαίρεσή της όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2, β.) στην περιοχή των 1460.8keV όπου δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός της φωτοκορυφής του ^{40}K από γειτονικές φωτοκορυφές του ^{214}Bi και γ) στην ενεργειακή περιοχή >1400 keV λόγω του εσωτερικού υποβάθρου από την αποδιέγερση του La του κρυστάλλου.

Μια δεύτερη σημαντική πειραματική παρατήρηση αφορά την μετατόπιση του ενεργειακού φάσματος λόγω της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όπου τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή επηρεάστηκαν με αποτέλεσμα μία μη ρεαλιστική αρχική εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Η μετατόπιση αντιμετωπίστηκε εκ των υστέρων με την κατάλληλη επεξεργασία των φασμάτων. Αναλυτικότερα, αναπτύχθηκε ειδικός αλγόριθμος αυτόματου εντοπισμού των τριών κύριων φωτοκορυφών των ραδιοϊσοτόπων ενδιαφέροντος (351.9 keV ^{214}Pb), (609.3 keV ^{214}Bi) και (1460.8 keV ^{40}K) ο οποίος σε κάθε ένα φάσμα αντιστοιχούσε τις ενέργειες με

τα αντίστοιχα κανάλια (E_γ, ch). Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη και το σημείο (0,0) ο αλγόριθμος προσαρμόζει τα τέσσερα ζεύγη (E_γ, ch) σε μια εξίσωση της μορφής $E_\gamma(keV) = a + b \cdot ch$, βάση της οποίας πραγματοποιούσε για κάθε φάσμα ξεχωριστά την ενεργειακή του βαθμονόμηση. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αν και αναπτύχθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε επόμενα πειράματα για την αυτόματη βαθμονόμηση φασμάτων που καταγράφει το σύστημα GeoMAREA.

Βασικό συμπέρασμα της συγκεκριμένης εργασίας αφορά η σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων όπως μελετήθηκαν το χρονικό διάστημα των πέντε (5) μηνών, από τον Νοέμβριο 2017 έως τον Μάρτιο 2018. Η μέγιστη αύξηση του ρυθμού καθαρών γεγονότων cps_{net} για το ^{214}Pb (351.9keV) μετρήθηκε έως και 441 % σε σχέση με συνθήκες χωρίς βροχές και για το ^{214}Bi (609.3keV) έως και 519%. Οι ρυθμοί ακτινοβολίας- γ cps_{net} για τα θυγατρικά του ραδονίου παρέμειναν αυξημένοι για περίπου τρεις (3) χρόνους ημιζωής (~1.5 ώρες) μετά την λήξη των βροχών, εφόσον να επανέλθουν σε τιμές υποβάθρου. Η μεγαλύτερη αύξηση του ^{214}Pb εμφανίστηκε τον Νοέμβριο 2017, ενώ η χαμηλότερη τον Ιανουάριο 2018. Αντίστοιχα η μεγαλύτερη αύξηση του ^{214}Bi εμφανίστηκε τον Δεκέμβριο 2017 ενώ η χαμηλότερη τον Ιανουάριο 2018. Αξίζει να σημειωθεί ότι το διάστημα 28/01/2018 έως 03/02/2018 καταγράφηκαν τρία μόνο γεγονότα βροχής όμως οι τιμές των ρυθμών cps_{net} για το ^{214}Bi , ήταν αυξημένες ακόμα και για δεδομένα χωρίς βροχές και αυτό ίσως οφείλεται σε μικρή ένταση βροχές που δεν μπόρεσε ο μετεωρολογικός σταθμός της Αναβύσσου να καταγράψει. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μεταβολές της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορούν να ανιχνευθούν ακόμα και σε πολύ χαμηλής έντασης ή/και διάρκειας βροχοπτώσεις.

Αντίθετα, καμία μεταβολή δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση των θυγατρικών του θορονίου έτσι όπως έδειξαν οι μετρήσεις που αφορούσαν το ^{208}Tl καθώς οι τιμές του ρυθμού cps_{net} παρέμειναν σχεδόν σταθερές σε συνθήκες με και χωρίς βροχοπτώσεις. Επιπροσθέτως μελετήθηκε η συμπεριφορά του ^{40}K μέσω της καταγραφής του ρυθμού cps_{net} στην περιοχή της φωτοκορυφής του στα 1460.8keV. Παρά το ότι ο ρυθμός αυτός παρουσίασε σημαντική αύξηση κατά την εκδήλωση βροχοπτώσεων, μια προσεκτικότερη ανάλυση του φάσματος οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση αυτή οφείλεται σε γεγονότα που αντιστοιχούν σε οκτώ (8) φωτοκορυφές του ^{214}Bi στην περιοχή κοντά στα 1460.8keV τα οποία δεν μπορούν να διαχωριστούν από την φωτοκορυφή του καλίου. Στο φάσμα το γεγονός αυτό αποτυπώνεται με αύξηση του εύρους FWHM της φωτοκορυφής ενώ το ύψος της φωτοκορυφής παρέμεινε ουσιαστικά αμετάβλητο. Έτσι, σε σχέση με τις βροχοπτώσεις, μόνο τα θυγατρικά του ^{222}Rn βρέθηκε ότι αυξάνουν τις συγκεντρώσεις τους οδηγώντας ωστόσο σε αναλογική αύξηση του συνόλου των γεγονότων που καταγράφονται.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μελέτη των πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των μεταβολών του ρυθμού γεγονότων ακτινών γάμμα των θυγατρικών του ραδονίου με χαρακτηριστικά μεγέθη των βροχοπτώσεων και με μετεωρολογικές παραμέτρους συμπεριλαμβάνοντας τον άνεμο. Από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι οι ατμοσφαιρικές παράμετροι της θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας, δεν εμφάνισαν κάποια στατιστική συσχέτιση με την αύξηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Ωστόσο, παρακινούμενοι από τη διεθνή βιβλιογραφία, εξετάστηκε η εξάρτηση της ποσότητας που ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού των ολικών γεγονότων ανά μονάδα ποσότητας βροχής $\left(\frac{\text{ολικός ρυθμός γεγονότων ακτινοβολίας-}\gamma \text{ (s}^{-1}\text{)}}{\text{rain (mm)}}\right)$.

Η ποσότητα αυτή εκφράζει την συγκέντρωση των ακτινών- γ που μπορεί να καταγραφούν ανά κιλό βρόχινου νερού. Από την ανάλυση των δεδομένων βρέθηκε μια ισχυρή στατιστική συσχέτιση της ποσότητας αυτής με την ένταση των βροχοπτώσεων η οποία μάλιστα μπορεί να προσεγγισθεί με μια συνάρτηση της μορφής $y = a \cdot (1 + x)^b$. Από την μελέτη των παραμέτρων a, b στην προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων βρέθηκε καλή συμφωνία με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς. Έτσι, ο ρυθμός των ολικών γεγονότων ανά μονάδα μάζας βρόχινου νερού θα μπορούσε να αποτελέσει ιχνηθέτη της έντασης των βροχοπτώσεων σε πραγματικό χρόνο εφαρμόζοντας φασματοσκοπία γάμμα και να αξιοποιηθεί περαιτέρω σε μελλοντικά πειράματα.

Επιπροσθέτως μελετήθηκε η επίδραση του ανέμου στο φαινόμενο της αύξησης της ραδιενέργειας των θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε η συσχέτιση του ολικού ρυθμού γεγονότων ακτινοβολίας- γ cps και των καθαρών ρυθμών cps_{net} των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου με δεκαέξι (16) διευθύνσεις ανέμου (ανά 22.5° η κάθε διεύθυνση βάση του ανεμολογίου). Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ότι οι ρυθμοί cps και cps_{net} , μεταβλήθηκαν σημαντικά με την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Οι μέγιστες τιμές παρουσιάστηκαν στις διευθύνσεις N, NNE, E και ESE. Γεωγραφικά σε σχέση με την περιοχή της Αναβύσσου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, οι παραπάνω διευθύνσεις σχετίζονται με περιοχές όπου ο χαρακτηρίζονται από μεγάλη επιφάνεια εδάφους. Οι ελάχιστες τιμές τους παρουσιάστηκαν στις διευθύνσεις W, WSW, SSW, S, NNW και NE, οι οποίες σχετίζονται με περιοχές όπου καλύπτονται από θαλάσσιες εκτάσεις. Έτσι, σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η σχετική γεωγραφική θέση της περιοχής διεξαγωγής του πειράματος επηρεάζει την πιθανότητα να παρατηρηθεί το φαινόμενο. Επίσης, καταδεικνύει ως διευθύνσεις ανέμου που ευνοούν την παρατήρησή του αυτές από όπου οι αέριες μάζες διέρχονται ευρύτερων χερσαίων περιοχών. Σε αυτές η έκλυση ραδονίου από το υπέδαφος είναι εντονότερη, σε σχέση με θαλάσσιες εκτάσεις, και τροφοδοτεί την ατμόσφαιρα με μεγαλύτερες ποσότητες

θυγατρικών του ραδονίου τα οποία εμπλέκονται στο φαινόμενο κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων.

Τέλος οι χρονοσειρές με όλα τα δεδομένα που ελήφθησαν για το χρονικό διάστημα διεξαγωγής του πειράματος, για τους ρυθμούς cps και cps_{net} και αφορούν τα υπό μελέτη ραδιοϊσότοπα, παρατίθενται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας για μελλοντική περαιτέρω αξιοποίηση.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Berger M. J., Hubbell J. H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S. and Olsen K., XCOM: Photon Cross Section Database, version 1.5 (2010)

Cortès, G., Sempau, J., & Ortega, X. (2001). Automated measurement of radon daughters Bi-214 and Pb-214 in rainwater. *Nukleonika*, 46(4), 161–164.

Davidson, N. (1984). Measurement and Detection of Radiation by N. Tsoulfanidis. *Medical Physics*, 11, 732. <https://doi.org/10.1118/1.595625>

Dueñas, C., Pérez, M., Fernández, M. C., & Carretero, J. (1996). Radon concentrations in surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 31(1), 87–102. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00058-I](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00058-I)

Elperin, T., Fominykh, A., & Krasovitev, B. (2015). Scavenging of radioactive soluble gases from inhomogeneous atmosphere by evaporating rain droplets. *Journal of Environmental Radioactivity*, 143, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.001>

Florea, N., & Dului, O. G. (2012). Eighteen years of continuous observation of Radon and Thoron progenies atmospheric activity. *Journal of Environmental Radioactivity*, 104(1), 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.002>

Fujinami, N. (1996). Observational study of the scavenging of radon daughters by precipitation from the atmosphere, 22, 181–185.

Fujinami, N. (1997). Observational study of the scavenging of radon daughters by precipitation from the atmosphere. *Environment International*, 22(SUPPL. 1), 181–185. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00106-7)

Gaso, M., Cervantes, M., Segovia, N., & Espindola, V. (1994). Atmospheric Radon Concentration Levels. *Radiation Measurements*, 23(I), 225–230.

Greenfield, M. B., Domondon, A. T., Okamoto, N., & Watanabe, I. (2002). Variation in γ -ray count rates as a monitor of precipitation rates, radon concentrations, and tectonic activity. *Journal of Applied Physics*, 91(3), 1628–1633. <https://doi.org/10.1063/1.1426248>

- Greenfield, M. B., Domondon, A. T., Tsuchiya, S., & Tomiyama, M. (2003). Monitoring precipitation rates using γ rays from adsorbed radon progeny as tracers. *Journal of Applied Physics*, *93*(9), 5733–5741. <https://doi.org/10.1063/1.1563313>
- Greenfield, M. B., Ito, N., Iwata, A., Kubo, K., Ishigaki, M., & Komura, K. (2008). Determination of rain age via γ rays from accreted radon progeny. *Journal of Applied Physics*, *104*(7), 1–9. <https://doi.org/10.1063/1.2990773>
- Hayakawa, H. (1985). Radon-Concentration-in-Cloud and Rainfall-Rate Dependency of Short-Lived Radon Daughters in Rainwater. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *22*(4), 292–300. <https://doi.org/10.1080/18811248.1985.9735659>
- Horng, M. C., & Jiang, S. H. (2004). In situ measurements of gamma-ray intensity from radon progeny in rainwater. *Radiation Measurements*, *38*(1), 23–30. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(03\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00285-3)
- Kalfas, C. A., Axiotis, M., & Tsabaris, C. (2016). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A SPECTRW : A software package for nuclear and atomic spectroscopy. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, *830*, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.098>
- Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. *Igarss 2014*.
- Livesay, R. J., Blessinger, C. S., Guzzardo, T. F., & Hausladen, P. A. (2014). Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors. *Journal of Environmental Radioactivity*, *137*, 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.010>
- Lutter, G., Hult, M., Billnert, R., Oberstedt, A., Oberstedt, S., Andreotti, E., ... Tzika, F. (2013). Radiopurity of a CeBr₃ crystal used as scintillation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *703*, 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.174>
- Mercier, J. F., Tracy, B. L., d'Amours, R., Chagnon, F., Hoffman, I., Korpach, E. P., ... Ungar, R. K. (2009). Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass. *Journal of Environmental Radioactivity*, *100*(7), 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.03.002>
- Minato, S. (2007). Notes A Simple Rainout Model for Radon Daughters, *8*(1), 6–9.
- Moriizumi, J., Kondo, D., Kojima, Y., Liu, H., Hirao, S., & Yamazawa, H. (2015). ²¹⁴Bi / ²¹⁴Pb Radioactivity ratio in rainwater for residence time estimation of cloud droplets, 1–4.

- Nishikawa, T., Tamagawa, Y., Aoki, M., Okabe, S. (1995). Analysis of the time variation of environmental gamma radiation due to the precipitation. *Applied Radiation Isotopes*, 46,603-604
- Paatero, J., & Hatakka, J. (1999). Wet deposition efficiency of short-lived radon-222 progeny in central Finland. *Boreal Environment Research*, 4(4), 285–293.
- Papastefanou C., (2008). Radioactive aerosols. 11-38
- Porstendörfer, J. (1994). Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25(2), 219–263. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9)
- Price, W. J. (1964). Nuclear Radiation Detection, 159–208.
- Takeyasu, M., Iida, T., Tsujimoto, T., Yamasaki, K., & Ogawa, Y. (2006). Concentrations and their ratio of ²²²Rn decay products in rainwater measured by gamma-ray spectrometry using a low-background Ge detector. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88(1), 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.01.001>
- Yuan, D., Guss, P., & Mukhopadhyay, S. (2011). Computational removal of lanthanumcerium bromide self-activity. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 644(1), 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.04.004>

Παράρτημα

Χρονοσειρές δεδομένων ραδιενέργειας όπου απεικονίζονται οι ολικοί ρυθμοί γεγονότων cps και οι καθαροί ρυθμοί γεγονότων cps_{net} για τα ^{214}Pb και ^{214}Bi για όλο το χρονικό διάστημα διεξαγωγής του πειράματος. Παράλληλα απεικονίζονται σε mm όλα τα γεγονότα βροχής που πραγματοποιήθηκαν στο παραπάνω διάστημα.

