



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ
ΑΕΡΟΛΥΜΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΗΤΣΙΟΥ Κ. ΙΑΣΟΝΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:

Μάριος Ι. Αναγνωστάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ
ΑΕΡΟΛΥΜΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΗΤΣΙΟΥ Κ. ΙΑΣΟΝΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης**
Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
2. **Ν.Π. Πετρόπουλος**
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. **Π.Κ. Ρούνη**
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης**
Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
2. **Ν.Π. Πετρόπουλος**
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. **Π.Κ. Ρούνη**
Λέκτορας Ε.Μ.Π.
4. **Δ. Μητράκος**
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
5. **Ι.Ε. Σταματελάτος**
Ερευνητής Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.
«Δημόκριτος»
6. **Κ. Ελευθεριάδης**
Ερευνητής Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.
«Δημόκριτος»
7. **Α. Ιωαννίδου**
Καθηγήτρια Α.Π.Θ.

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2023

«Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμτος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας».



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



«Η Έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την ανώτατη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»

Πρόλογος

Η παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος μέσω συστηματικών μετρήσεων φίλτρων αέρα, υγρών και στερεών δειγμάτων αποτελεί για περίπου 40 χρόνια μία από τις βασικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.. Ο στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν η διεύρυνση των δυνατοτήτων παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και η μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα μίας σειράς ραδιενεργών ισοτόπων που βρίσκουν εφαρμογή ως ιχνηλάτες ατμοσφαιρικών διεργασιών.

Για τον σκοπό αυτό, διερευνήθηκε η επίδραση της κύμανσης ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων στο υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων και προσδιορίστηκαν βέλτιστα σενάρια χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας και ανάλυσης, ώστε να επιτυγχάνονται τα καλύτερα δυνατά κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης ανά περίπτωση. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μεθοδολογία δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων υγρών και ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και λήφθηκε πλήθος δειγμάτων ατμοσφαιρικού αερολύματος, υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων καθώς και υγρασίας. Από τις δειγματοληψίες και αναλύσεις που έγιναν εκτιμήθηκε η συγκέντρωση ενεργότητας και ο ρυθμός απόθεσης φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα και μελετήθηκε η συσχέτισή τους με πλήθος μετεωρολογικών και άλλων παραμέτρων.

Η Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. κατά το χρονικό διάστημα Ιούνιος 2017 – Σεπτέμβριος 2023. Στο σημείο αυτό, κατ' αρχήν, θα ήθελα να εκφράσω της ευχαριστίες μου στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Στον κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη (επιβλέπων), Καθηγητή Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω το πάθος για την έρευνα της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και του οποίου οι γνώσεις, η υποστήριξη και η καθοδήγηση ήταν καθοριστικές για την εκπόνηση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

Στον κ. Ν.Π. Πετρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της Διδακτορικής Διατριβής.

Στην κα Π.Κ. Ρούνη, Λέκτορα Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη και το κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της Διδακτορικής Διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Δ. Μητράκο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., τον κ. Ι.Ε. Σταματελάτο, Ερευνητή Α' του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», τον κ. Κ. Ελευθεριάδη, Ερευνητή Α' του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» και την κα Α. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια του Α.Π.Θ., για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της Διατριβής.

Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον Δρ. Λαγουβάρδο Κωνσταντίνο, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, για την ευγενική διάθεση των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Ακόμα, ευχαριστώ τους Υποψήφιους Διδάκτορες Η. Πουλοπούλου, Κ. Κανούτο και Α. Μηλιώνη για την υποστήριξη και την άψογη συνεργασία.

Για την εκπόνηση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής έλαβα οικονομική ενίσχυση από τον Ε.Λ.Κ.Ε. Ε.Μ.Π., για τέσσερα έτη υπό μορφή υποτροφίας, και από το Ι.Κ.Υ., για 16 μήνες υπό μορφή υποτροφίας, στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας».

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Ευφροσύνη, και τον αδερφό μου Ορέστη, για την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Ελίζ, στην οποία και αφιερώνω την παρούσα Διδακτορική Διατριβή, η ολοκλήρωση της οποίας δε θα ήταν δυνατή χωρίς την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή της.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

Ιάσων Κ. Μήτσιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή	1
----------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ραδιενεργά ισότοπα στο αερόλυμα της ατμόσφαιρας και στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις	7
2.1 Το ατμοσφαιρικό αερόλυμα	7
2.1.1 Ραδιενεργά ισότοπα στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.....	8
2.1.2 Μέτρηση των ραδιενεργών ισωτόπων του ατμοσφαιρικού αερολύματος	10
2.1.3 Το ραδιενεργό ισότοπο ^7Be	12
2.1.4 Το ραδιενεργό ισότοπο ^{210}Pb	13
2.1.5 Τα ραδιενεργά ισότοπα ^{222}Rn και ^{220}Rn	15
2.1.5.1 Κύμανση του ^{222}Rn και του ^{220}Rn	16
2.2 Ατμοσφαιρικές αποθέσεις	17
2.2.1 Δειγματοληψία και ανάλυση ατμοσφαιρικών αποθέσεων	18
2.2.2 Συγκεντρώσεις ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις.....	21
2.2.3 Συσχέτιση με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους	22
2.3 Χρήση των ^7Be και ^{210}Pb ως ιχνηθέτες σε ατμοσφαιρικά και άλλα μοντέλα.....	24
2.4 Παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	28
2.4.1 Δειγματοληψίες και αναλύσεις χόματος.....	28
2.4.2 Δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικού αερολύματος	29
2.4.3 Δειγματοληψίες και αναλύσεις υγρών αποθέσεων.....	30
2.4.4 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	33
2.4.4.1 Οι ανιχνευτές γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ	34
2.4.4.2 Προσδιορισμός της ενεργότητας δείγματος.....	39
2.4.4.3 Επίδραση των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις	41
2.4.4.4 Τεχνικές περιορισμού της επίδρασης της κύμανσης του ραδονίου, του θορονίου και των θυγατρικών τους στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις.....	42
2.5 Βασικοί στόχοι Διδακτορικής Διατριβής.....	44
2.6 Συμπληρωματικοί πίνακες και σχήματα του 2^{ου} Κεφαλαίου	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις.....	56
3.1 Εισαγωγή.....	56
3.2 Κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας	57
3.2.1 Η 1 ^η δειγματοληψία.....	60
3.2.2 Η 2 ^η , 3 ^η & 4 ^η δειγματοληψία.....	61
3.2.3 Αποτελέσματα της μελέτης της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας.....	63
3.2.4 Συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας με εξωτερικές μετεωρολογικές παραμέτρους.....	67
3.2.5 Επίδραση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο υπόστρωμα των ανιχνευτών γερμανίου....	70
3.3 Μελέτη της επίδρασης της διάρκειας δειγματοληψίας στην εκτίμηση του υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	74
3.3.1 Συλλογή των φασμάτων υποστρώματος.....	75
3.3.2 Ανάλυση των φασμάτων υποστρώματος.....	76
3.4 Δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων αερολύματος.....	80
3.4.1 Τα σενάρια δειγματοληψίας φίλτρων αέρα.....	81
3.4.2 Αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των φίλτρων αέρα.....	82
3.5 Συμπεράσματα.....	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στη μέτρηση του ²¹⁰Pb στην ατμόσφαιρα.....	91
4.1 Εισαγωγή.....	91
4.2 Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του στην ατμόσφαιρα.....	92
4.3 Μεθοδολογία δειγματοληψίας και ανάλυσης.....	94
4.3.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεων θυγατρικών του ραδονίου πάνω στο φίλτρο 4''.....	97
4.3.1.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεων των θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.....	99
4.3.1.2 Υπολογισμός της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).....	108

4.3.2	Διερεύνηση της ευαισθησίας της επίλυσης του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης.....	110
4.3.2.1	Αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων	111
4.3.2.2	Προσδιορισμός τη συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα μέσω της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.....	115
4.3.2.3	Προσδιορισμός της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα μέσω της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012)	119
4.3.2.4	Σύγκριση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου μεταξύ των δύο μεθόδων	121
4.3.3	Συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ενεργότητα του ^{210}Pb που υπολογίζεται πάνω στο φίλτρο αέρα 8'x10'' κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.....	124
4.3.3.1	Συνολικό πλήθος πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα 8'x10'' μέσω της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.....	126
4.3.3.2	Συνολικό πλήθος πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα 8'x10'' μέσω της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012)	128
4.4	Συμπεράσματα	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μεθοδολογία προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις

132

5.1 Εισαγωγή

132

5.2 Δειγματοληψία και επεξεργασία ατμοσφαιρικών αποθέσεων

133

5.2.1 Υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις και υγρασία – ανάπτυξη μεθόδου

133

5.2.1.1 Βαθμονόμηση απόδοσης των ανιχνευτικών διατάξεων.....

141

5.2.1.2 Ανάλυση αβεβαιοτήτων.....

144

5.2.1.3 Σύγκριση των τριών διαδικασιών προετοιμασίας δείγματος υγρής απόθεσης

145

5.2.1.4 Οξίνιση του υγρού δείγματος για την αποφυγή προσρόφησης ραδιενεργών ισοτόπων στα τοιχώματα του δοχείου

147

5.2.1.5 Δειγματοληψία, προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων υγρασίας.....

148

5.2.1.6 Δειγματοληψία προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων χιονιού.....

150

5.2.2 Δειγματοληψία, προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων.....

151

5.2.2.1 Αναλυτικός υπολογισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας ραδιενεργών ισοτόπων στις ξηρές και στις ολικές αποθέσεις

153

5.3 Συμπεράσματα

155

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συστηματικές δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων και άλλων περιβαλλοντικών μεγεθών	156
6.1 Εισαγωγή	156
6.2 Δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.....	156
6.2.1 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε μεμονωμένα δείγματα βροχής.....	158
6.2.2 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα χιονιού.....	160
6.2.3 Σύγκριση της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στα δείγματα υγρών αποθέσεων	166
6.2.4 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα υγρασίας.....	167
6.2.5 Ρυθμός απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων στις ξηρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις.....	167
6.2.6 Ρυθμός απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις.....	170
6.2.7 Παράλληλη δειγματοληψία ατμοσφαιρικών αποθέσεων και ατμοσφαιρικού αερολύματος.....	172
6.2.8 Συνεχείς μετρήσεις ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων	179
6.3 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας των ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους και εφαρμογή σε ατμοσφαιρικά μοντέλα ...	184
6.3.1 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικά δεδομένα	185
6.3.1.1 Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα υγρών αποθέσεων	185
6.3.1.2 Συσχετίσεις της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα υγρασίας	188
6.3.1.3 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα ξηρών αποθέσεων.....	188
6.3.1.4 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα ολικών αποθέσεων.....	189
6.3.1.5 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους σε συνεχόμενα δείγματα αποθέσεων	192
6.3.1.6 Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb σε φίλτρα αέρα με μετεωρολογικές παραμέτρους	199
6.3.2 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με άλλους τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές.....	200
6.3.2.1 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα.....	201
6.3.2.2 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα	202
6.3.2.3 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα.....	203

6.3.2.4	Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στο αερόλυμα με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα.....	205
6.3.3	Συσχέτιση του ρυθμού απόθεσης του ^7Be με το πλήθος των ηλιακών κηλίδων	206
6.3.4	Συσχέτιση του ρυθμού απόθεσης του ^7Be με το ύψος της τροπόπαυσης στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων.....	209
6.3.5	Εκτίμηση της συνολικής επιφανειακής συγκέντρωσης ενεργότητας	216
6.3.6	Εκτίμηση της μέσης ταχύτητας απόθεσης.....	219
6.3.7	Υπολογισμός του κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστή εμπλουτισμού ραδιενεργών ισοτόπων της ατμόσφαιρας	222
6.3.8	Λοιπά ατμοσφαιρικά μοντέλα με προοπτική αξιοποίησης των μετρήσεων ατμοσφαιρικών αποθέσεων	223
6.4	Συμπεράσματα	227
6.5	Συμπληρωματικοί πίνακες κεφαλαίου 6.....	232

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Επίλογος.....	241
7.1 Συνοπτική Παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής.....	241
7.2 Επιτεύγματα και σημεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ.....	251
7.3 Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	252
7.4 Δημοσιεύσεις – Ανακοινώσεις σε Συνέδρια.....	254

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	257
---------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πιστοποιητικά ανιχνευτών γερμανίου.....	284
--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Προσδιορισμός συντελεστή ισορροπίας F.....	289
---	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Συμπληρωματικά μετεωρολογικά δεδομένα.....	290
---	------------

Γ.1	2 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	290
Γ.2	3 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	292
Γ.3	4 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	294

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Συμπληρωματικοί πίνακες και διαγράμματα κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του		296
Δ.1	2 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	296
Δ.2	3 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	307
Δ.3	4 ^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	319

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Διαγράμματα ρυθμού κρούσεων φωτοκορυφής ²¹⁴Bi ανιχνευτών γερμανίου ως προς τη συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του		330
E.1	3 ^η Δειγματοληψία Διερεύνησης Κύμανσης του Ραδονίου και των Θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	330
E.2	4 ^η Δειγματοληψία Διερεύνησης Κύμανσης του Ραδονίου και των Θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	334

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Διαγράμματα διαδοχικών φασμάτων φωτοκορυφών υποστρώματος ανιχνευτών γερμανίου		336
ΣΤ.1	Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή XtRa	336
ΣΤ.2	Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή LEGe	343
ΣΤ.3	Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή Ge1	351
ΣΤ.4	Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή Ge2	358

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Συνοπτική περιγραφή εργαλείου «Radical»	365
--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η

Υπολογισμός L_D και MDA	380
--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ

Διαγράμματα χρονική εξέλιξης cps των κυρίαρχων φωτοκορυφών των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στα φίλτρα αέρα383

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Χρονική εξέλιξη MDA επιλεγμένων ραδιενεργών ισοτόπων σε φίλτρα αέρα.....391

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΑ

Υπολογισμός σταθμισμένης μέσης τιμής.....395

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΒ

Βήματα δημιουργίας «SEQUENCE» στο GENIE2000..... 397

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΓ

Συντελεστές επίλυσης εξισώσεων με χρήση της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012).....403

ΙΓ.1 1^ο τρίμηρο Δειγματοληψίας φίλτρων αέρα 4''404

ΙΓ.2 2^ο τρίμηρο Δειγματοληψίας φίλτρων αέρα 4''407

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΔ

Συμπληρωματικές καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης 410

ΙΔ.1 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή XtRa410

ΙΔ.2 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή LEGe414

ΙΔ.3 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή Ge.....417

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΕ

Ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου419

ΙΕ.1 Υπολογισθείσες συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.....419

ΙΕ.2 Υπολογισθείσες συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).426

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΣΤ

Αντιπροσωπευτικά αρχεία εισόδου PENELOPE433

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΖ

Κωδικοί φίλτρων και υγρών κλασμάτων επεξεργασίας δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας454

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΗ

Συμπληρωματικά διαγράμματα συσχέτισεων συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών

απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους456

- ΙΗ.1 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις ως προς τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα456
- ΙΗ.2 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στις υγρές αποθέσεις ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους458
- ΙΗ.3 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be στα δείγματα υγρασίας ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους463
- ΙΗ.4 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους465
- ΙΗ.5 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους468
- ΙΗ.6 Συμπληρωματικά διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα συνεχόμενα δείγματα αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους473
- ΙΗ.7 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ^7Be και ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους475
- ΙΗ.8 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα478
- ΙΗ.9 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα485
- ΙΗ.10 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα492
- ΙΗ.11 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα499
- ΙΗ.12 Διαγράμματα συσχέτισης των μηνιαίων ρυθμών απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο πλήθος ηλιακών κηλίδων506
- ΙΗ.13 Διαγράμματα συσχέτισης των συγκεντρώσεων ενεργότητας και των ρυθμών απόθεσης του ^7Be ως προς το ύψος της τροπόπαυσης511
- ΙΗ.14 Διαγράμματα συσχέτισης των μέσων ταχυτήτων απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους514

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή (Δ.Δ.) εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Το ευρύτερο αντικείμενο της Δ.Δ. ήταν η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών προσδιορισμού φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων.

Από τις βασικές δραστηριότητες του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι η συστηματική παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος. Για περίπου σαράντα χρόνια γίνονται δειγματοληψίες και αναλύσεις πάσης φύσεως στερεών και υγρών δειγμάτων, καθώς και αερολύματος με χρήση φίλτρων αέρα, με στόχο τη διεύρυνση των δυνατοτήτων παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος – με έμφαση στην ατμόσφαιρα – και τη μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης μίας σειράς ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία βρίσκουν εφαρμογή ως ιχνηλάτες ατμοσφαιρικών διεργασιών. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της Δ.Δ. έλαβαν χώρα:

- i. Ανάπτυξη και βελτίωση τεχνικών δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης υγρών και ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Προς την κατεύθυνση αυτή έγινε ανάπτυξη μεθόδων δειγματοληψίας και προετοιμασίας δειγμάτων υγρών (βροχή, χιόνι), ξηρών και ολικών (υγρών + ξηρών) ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας. Όσον αφορά στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και την επίτευξη χαμηλών επιπέδων ανίχνευσης, έγινε διερεύνηση της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, καθώς και της επίδρασης που αυτή έχει κατά τη διαδικασία της μέτρησης. Τα ισότοπα ενδιαφέροντος ήταν κυρίως το ^7Be και ο ^{210}Pb . Ως αποτέλεσμα της μελέτης αυτής, γίνονται συγκεκριμένες προτάσεις για τον χειρισμό του υποστρώματος, αλλά και τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων αερολύματος πάνω σε φίλτρο, με χρήση δειγματολήπτη αέρα υψηλής παροχής. Καθώς ο ^{210}Pb , που ανιχνεύεται στα δείγματα αερολύματος που συλλέγονται, οφείλεται και σε κάποιο βαθμό στα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου τα οποία συλλέγονται και διασπώνται πάνω στο φίλτρο, κρίθηκε

απαραίτητο να μελετηθεί και αυτή η πτυχή της δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.

- ii. Συστηματικές δειγματοληψίες υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας της ατμόσφαιρας, σε συνδυασμό με δειγματοληψίες αερολύματος στην ατμόσφαιρα, αλλά και μετεωρολογικών και άλλων παραμέτρων. Ο όγκος των δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές επέτρεψε τη διαπίστωση αρκετών συσχετίσεων και οδήγησε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την κινητική των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα αλλά και στο έδαφος.

Η Δ.Δ. αποτελείται από 7 Κεφάλαια τα οποία συνοδεύονται από 18 Παραρτήματα.

Στο **2^ο Κεφάλαιο** αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στην εργασία και γίνεται η σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ειδικότερα, γίνεται μια εισαγωγή στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα, παρουσιάζονται τα βασικά ραδιενεργά ισότοπα που απαντώνται σε αυτό σε κανονικές συνθήκες, καθώς και οι βασικές μέθοδοι δειγματοληψίας και ανάλυσής τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις ιδιότητες του ^7Be και του ^{210}Pb , στους μηχανισμούς που διέπουν την κίνησή τους στην ατμόσφαιρα, στις χρήσεις τους ως ραδιοϊχνηθέτες, καθώς και στις εφαρμογές τους σε μοντέλα μεταφοράς αερίων μαζών και σε μελέτες διάβρωσης και ιζηματογένεσης εδαφών. Ακόμα, παρουσιάζονται τα ^{222}Rn και ^{220}Rn και τα βραχύβια θυγατρικά τους, καθώς αποτελούν παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις – ιδιαίτερα για μετρήσεις χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας – καθώς και βασικές τεχνικές μείωσης αυτής της επίδρασης. Ακολούθως, γίνεται περιγραφή των βασικών μηχανισμών με τους οποίους τα ραδιενεργά ισότοπα εναποτίθενται από το ατμοσφαιρικό αερόλυμα στο έδαφος. Εστιάζοντας στη μελέτη της εναπόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb , παρατίθενται οι βασικές μέθοδοι δειγματοληψίας και επεξεργασίας ατμοσφαιρικών αποθέσεων που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία και δίνεται ένας συγκεντρωτικός κατάλογος μελετών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, αναφορικά με τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις και την εκτίμηση του ρυθμού απόθεσης των υπό μελέτη ισοτόπων. Επιπροσθέτως, γίνεται ανασκόπηση των μετεωρολογικών και άλλων παραγόντων τα οποία είτε επηρεάζουν είτε συσχετίζονται με τις συγκεντρώσεις του ^7Be και του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις. Ολοκληρώνοντας το συγκεκριμένο Κεφάλαιο, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των δραστηριοτήτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ σχετικά με την παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, τις

μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δειγματοληψία χώματος, ατμοσφαιρικού αερολύματος και υγρών αποθέσεων, την ανάλυση με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους και τις σχετικές ανιχνευτικές διατάξεις του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διατριβής.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** μελετάται η επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις. Τα ισότοπα αυτά αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές υποστρώματος μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης, επιδρώντας σημαντικά στα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης, ιδιαίτερα για δείγματα χαμηλής ενεργότητας. Η μελέτη αυτή διαρθρώθηκε σε τρία βασικά μέρη:

- i. Αρχικά, μελετήθηκε η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας, χρησιμοποιώντας τη μετρητική διάταξη ALPHAGUARD-ALPHAPM η οποία συγκροτήθηκε για τον σκοπό αυτό. Η συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του μελετήθηκαν ως προς την ημερήσια κύμανσή τους, συσχετίστηκαν με τις εξωτερικές του εργαστηρίου μετεωρολογικές παραμέτρους και στη συνέχεια, συσχετίστηκαν με τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi στα 609.32 keV, η οποία αποτελεί σημαντική φωτοκορυφή του υποστρώματος, σε διαδοχικά φάσματα υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι φωτοκορυφές υποστρώματος χρησιμοποιούνται και ως δείκτης του συνεχούς υποστρώματος το οποίο παράγεται στο φάσμα λόγω των θυγατρικών του ραδονίου, και συνεπώς της κύμανσής του.
- ii. Στη συνέχεια, έχοντας επιβεβαιώσει το μέγεθος της επίδρασης που έχει η κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ, έγινε λήψη πολλαπλών διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος, διερευνήθηκαν οι διαφορές μεταξύ τους και συστάθηκε μια σειρά από κατευθυντήριες οδηγίες για χρήση των κατάλληλων φασμάτων υποστρώματος, ανάλογα με τη χρονική διάρκεια ανάλυσης του εκάστοτε δείγματος και τις ιδιαιτερότητες του υποστρώματος κάθε ανιχνευτή.
- iii. Η μελέτη του παρόντος Κεφαλαίου ολοκληρώνεται με τη δειγματοληψία και ανάλυση φίλτρων αέρα για μία σειρά σεναρίων χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, διερευνώντας την επίδραση που έχουν τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου που

συλλέγονται στο φίλτρο, στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης επιλεγμένων ραδιενεργών ισοτόπων. Η μελέτη αυτή ολοκληρώνεται προτείνοντας σενάρια χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα ανάλογα με τα επιθυμητά κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης, τους λόγους πραγματοποίησης δειγματοληψίας (μετρήσεις ρουτίνας ή έκτακτης ανάγκης), καθώς και τους χρόνους ημιζωής των μετρούμενων ραδιενεργών ισοτόπων.

Στις δειγματοληψίες αερολύματος γίνεται ταυτόχρονη δειγματοληψία, τόσο του ^{210}Pb όσο και των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, τα οποία εν τέλει, μετά τη διάσπασή τους προσμετρώνται στην τελική συγκέντρωση ενεργότητας του ^{210}Pb στο αερόλυμα. Για τον λόγο αυτό, και επειδή η παραγωγή, η μεταφορά στο περιβάλλον, καθώς και οι μηχανισμοί εναπόθεσής του ^{210}Pb έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επιστημονική κοινότητα, στο **4^ο Κεφάλαιο** της παρούσας Δ.Δ. κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί ο βαθμός της επίδρασης που έχουν τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου στα φίλτρα αέρα στην μετρούμενη συγκέντρωση ενεργότητας του ^{210}Pb στον αέρα. Ωστόσο, η συγκέντρωση του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του στον ατμοσφαιρικό αέρα παρουσιάζουν κύμανση επηρεαζόμενη από πλήθος παραμέτρων. Για τη συγκεκριμένη μελέτη έγινε λήψη πολλαπλών δειγμάτων αερολύματος μέσω φίλτρων αέρα μικρής χρονικής διάρκειας, παράλληλα με φίλτρα αέρα μεγάλης χρονικής διάρκειας, κάτι που επέτρεψε τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της συγκέντρωσης, τόσο του ^{210}Pb , όσο και των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Οι ταυτόχρονες αυτές μετρήσεις, σε συνδυασμό με την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης των θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια της συλλογής-αναμονής-ανάλυσης των δειγμάτων αερολύματος επέτρεψαν τον ακριβή προσδιορισμό του ^{210}Pb που συλλέγεται ως ^{210}Pb και αυτού που προκύπτει από τη διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα αντίστοιχων – απλούστερων – προσεγγίσεων της βιβλιογραφίας, οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη την παραγωγή-κατανάλωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε, εκτιμήθηκε η συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ενεργότητα του ^{210}Pb που υπολογίζεται από την ανάλυση των φίλτρων αέρα.

Για τη διεύρυνση των δυνατοτήτων παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας από το ΕΠΤ-ΕΜΠ στις υγρές (βροχή, χιόνι), τις ξηρές και τις ολικές

(υγρές + ξηρές) αποθέσεις, καθώς και στην υγρασία, έγινε ανάπτυξη μεθοδολογίας δειγματοληψίας, επεξεργασίας, και ανάλυσης ατμοσφαιρικών αποθέσεων, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο **5^ο Κεφάλαιο**. Χρησιμοποιώντας ως βάση τη μέθοδο δειγματοληψίας και επεξεργασίας δειγμάτων βροχής που αναπτύχθηκε στα πλαίσια παλαιότερης Διατριβής, αναπτύχθηκαν, τυποποιήθηκαν και ελέγχθηκαν ως προς την επαναληψιμότητά τους οι διαδικασίες δειγματοληψίας και προετοιμασίας υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο προσρόφησης ραδιενεργών ισοτόπων σε ρητίνη κατιόντων ως βασική μέθοδο επεξεργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν και νέες γεωμετρίες δειγμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και οι ανιχνευτές του ΕΤΠ-ΕΜΠ βαθμονομήθηκαν κατάλληλα με χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE.

Στο **6^ο Κεφάλαιο**, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 5, έγινε μια σειρά δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας. Το σύνολο των δειγμάτων αναλύθηκε με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας και προσδιορίστηκαν σε αυτά οι συγκεντρώσεις και οι ρυθμοί απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be και ^{210}Pb , καθώς και ^{137}Cs σε μικρό αριθμό δειγμάτων. Τα συλλεχθέντα δείγματα ομαδοποιήθηκαν βάσει του μηχανισμού ατμοσφαιρικής απόθεσής τους (υγρές, ξηρές, ολικές και υγρασία), καθώς και βάσει της χρονικής τους συνέχειας, και κάθε επιμέρους ομάδα συσχετίστηκε με μετεωρολογικές παραμέτρους, με συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών, με το πλήθος των ηλιακών κηλίδων και με το ύψος της τροπόπαυσης. Επίσης, έγινε εκτίμηση της ταχύτητας εναπόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, υπολογισμός της συνολικής επιφανειακής συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb , χρησιμοποιώντας τις χρονικά συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υπολογισμός του κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστή εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε ραδιενεργά ισότοπα. Επιπροσθέτως, παράλληλα με ορισμένες από τις δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων, έλαβαν χώρα και δειγματοληψίες φίλτρων αέρα, με στόχο τη συσχέτιση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων του ^7Be και του ^{210}Pb με τους ρυθμούς απόθεσής τους. Οι συστηματικές μετρήσεις που έγιναν επέτρεψαν την καταγραφή της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων στην επιφάνεια του εδάφους, μία πληροφορία πολύ σημαντική σε μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους. Ολοκληρώνοντας το παρόν Κεφάλαιο,

γίνεται ενδεικτικά παράθεση ατμοσφαιρικών μοντέλων όπου βρίσκουν εφαρμογή οι μετρήσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων, σε συνδυασμό με παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα και μετρήσεις και άλλων παραμέτρων.

Το 7^ο **Κεφάλαιο** αποτελεί τον επίλογο της παρούσας Δ.Δ. όπου συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζονται τα επιτεύγματα και τα στοιχεία πρωτοτυπίας της και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Τέλος, παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις και οι ανακοινώσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ..

Η Διατριβή ολοκληρώνεται με 18 **Παραρτήματα** (Α – ΙΗ) τα οποία περιέχουν πίνακες, σχήματα και πληροφορίες συμπληρωματικές στο κυρίως κείμενό της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ραδιενεργά ισότοπα στο αερόλυμα της ατμόσφαιρας και στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις

2.1 Το ατμοσφαιρικό αερόλυμα

Ως αερόλυμα (aerosol) ορίζεται μία ποσότητα σωματιδίων σε υγρή ή στερεά μορφή, η οποία είναι διασκορπισμένη σε ένα αέριο μέσο. Τα αιωρούμενα σωματίδια του αερολύματος μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο σχηματισμού τους σε διάφορες κατηγορίες, όπως (Jeřkowský, et al., 2019):

- i. Σκόνη – αποτελείται από στερεά σωματίδια που διασπείρονται στον ατμοσφαιρικό αέρα.
- ii. Καπνός/αναθυμιάσεις – αποτελείται από στερεά ή υγρά σωματίδια που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση ατμών.
- iii. Ομίχλη – αποτελείται από σταγονίδια νερού τα οποία βρίσκονται σε μορφή διαλύματος ή σε αιώρηση με άλλα σωματίδια.

Οι πηγές προέλευσης του ατμοσφαιρικού αερολύματος είναι είτε φυσικές (σταγόνες θαλασσινού νερού που εξατμίστηκαν, σκόνη, ηφαιστειακή τέφρα, βιογενή σωματίδια όπως η γύρη, προϊόντα χημικών αντιδράσεων αερίων της ατμόσφαιρας εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τη θερμότητα ή με την ηλιακή ακτινοβολία κ.α.) είτε ανθρωπογενείς (εκπομπές προϊόντων καύσης άνθρακα ή ξύλου, καυσαέρια από εργοστάσια ή οχήματα, σκόνη και αέρια από γεωργικές δραστηριότητες, προϊόντα καύσης από δασικές πυρκαγιές κ.α.).

Τα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αερολύματος προσφέρονται ως πυρήνες συσσώρευσης για νερό και άλλους υδρατμούς και χωρίζονται βάσει του μεγέθους τους σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- i. Πυρήνες Aitken ($<0.1 \mu\text{m}$)

- ii. Περιοχή Συσώρευσης ($>0.1 \mu\text{m}$ και $<2.0 \mu\text{m}$)
- iii. Περιοχή Χονδρόκοκκων Σωματιδίων ($>10.0 \mu\text{m}$)

Τα παραπάνω σωματίδια μπορούν να διακριθούν επίσης και σε εισπνεύσιμα (inhalable) και αναπνεύσιμα (respirable) βάσει των φυσικών τους χαρακτηριστικών και των επιπτώσεων που έχουν στην υγεία (Jeřkovský, et al., 2019). Στα εισπνεύσιμα σωματίδια κατατάσσονται τα σωματίδια τα οποία σε κανονικές συνθήκες μπορούν να εισέλθουν μέσω της μύτης ή του στόματος στο αναπνευστικό σύστημα και να εναποτεθούν στους πνεύμονες. Αποτελούνται από στερεά σωματίδια ή σταγονίδια με μέση αεροδυναμική διάμετρο από 2.5 έως $10 \mu\text{m}$ και ονομάζονται PM10. Στα αναπνεύσιμα σωματίδια κατατάσσονται τα σωματίδια με μέση διάμετρο $<2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5) τα οποία μπορούν να εισέλθουν μέχρι και την κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων χωρίς όμως αναγκαστικά να εναποτίθενται εκεί.

2.1.1 Ραδιενεργά ισότοπα στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα

Το ατμοσφαιρικό αερόλυμα – εκτός των άλλων – περιέχει τόσο φυσικά όσο και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία βρίσκονται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα, όχι μόνον από ραδιο-οικολογικής άποψης, λόγω της συνεισφοράς τους στην εσωτερική και εξωτερική δόση των έμβιων οργανισμών, αλλά και λόγω της χρήσης που μπορεί να έχουν ως ραδιοϊχνηθέντες για τη μελέτη μεταφοράς και ανάμιξης αερίων μαζών (Jeřkovský, et al., 2019). Το μεγαλύτερο μέρος των ραδιενεργών αυτών ισωτόπων βρίσκεται προσκολλημένο, ενσωματωμένο ή προσροφημένο στα αιωρούμενα σωματίδια του αερολύματος και κινείται μαζί με αυτό.

Τα σημαντικότερα¹ ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα είναι τα:

- ^{14}C : είναι ισότοπο του άνθρακα και εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα σε διάφορες μορφές όπως CO_2 , CO , CH_4 και άλλους πτητικούς υδρογονάνθρακες. Ο άνθρακας διαχωρίζεται σε στοιχειακό (EC), οργανικό (OC) και ανθρακικό (CC) άνθρακα. Ο χρόνος ημιζωής του ^{14}C είναι 5700 έτη.
- ^3H : εναλλακτικά συμβολίζεται ως “T”, παράγεται είτε λόγω της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα είτε λόγω πυρηνικών δοκιμών ή

¹ Λόγω κυρίως της επαναιώρησης από το έδαφος, στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα μπορεί να βρεθεί οποιοδήποτε ραδιενεργό ισότοπο βρίσκεται στο έδαφος, όπως ισότοπα των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών.

εκπομπών από πυρηνικά εργοστάσια. Εντοπίζεται στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα σε υδρατμούς ως HTO, DTO και T₂O, στο αέριο υδρογόνο ως HT, DT και T₂ καθώς και σε υδρογονάνθρακες ως CH₃T. Το ³H έχει χρόνο ημιζωής 12.312 έτη.

- ³⁷Ar, ³⁹Ar, ⁸¹Kr, ⁸⁵Kr, ^{131m}Xe, ¹³³Xe, ^{133m}Xe, ¹³⁵Xe : αποτελούν ραδιενεργά ισότοπα ευγενών αερίων, τα οποία παράγονται κυρίως από πυρηνικές δοκιμές και εκπομπές πυρηνικών εργοστασίων και σε πολύ μικρές ποσότητες μέσω της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιούνται για χρονολόγηση στην υδρο-οικολογία, για παρακολούθηση εκπομπών από πυρηνικά εργοστάσια ή εργοστάσια επανεπεξεργασίας πυρηνικού καυσίμου, καθώς και για την παρακολούθηση πυρηνικών δοκιμών.
- ²²²Rn, ²²⁰Rn : αποτελούν ραδιενεργά ισότοπα του ευγενούς αερίου Rn και μαζί με τα θυγατρικά τους προέρχονται από τις ραδιενεργές σειρές του ²³⁸U και του ²³²Th αντίστοιχα. Αποτελούν μέρος της μελέτης της παρούσας Δ.Δ. και για τον λόγο αυτό περισσότερες πληροφορίες δίνονται στις παραγράφους που ακολουθούν.
- ⁷Be : αποτελεί βραχύβιο ραδιενεργό ισότοπο και είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Αποτελεί σημαντικό κομμάτι της μελέτης που διενεργήθηκε στην παρούσα Δ.Δ., και για τον λόγο αυτό περισσότερες πληροφορίες δίνονται στις παραγράφους που ακολουθούν.
- ¹⁰Be : αντίστοιχα με το ⁷Be είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με πυρήνες της ατμόσφαιρας. Έχει χρόνο ημιζωής 1.5·10⁶ έτη και μαζί με το ⁷Be χρησιμοποιείται ως ραδιοϊχνηθέτης για τη μελέτη της στρατοσφαιρικής μεταφοράς αερίων μαζών, καθώς και της ανταλλαγής τους μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας.
- ²²Na : είναι προϊόν των αντιδράσεων κατακερματισμού της κοσμικής ακτινοβολίας με το στοιχείο Ar στην ατμόσφαιρα, έχει παρόμοια συμπεριφορά με το ⁷Be και χρόνο ημιζωής 2.602 έτη. Χρησιμοποιείται ως ραδιοϊχνηθέτης για τη μελέτη τη κατακόρυφης ανάμιξης αερίων μαζών, καθώς και την ανταλλαγή τους μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας.
- ²⁶Al : είναι προϊόν των αντιδράσεων κατακερματισμού της κοσμικής ακτινοβολίας με τα στοιχεία Ar και Si στην ατμόσφαιρα και έχει χρόνο ημιζωής 0.708·10⁶ έτη.
- ¹³¹I : είναι ένα βραχύβιο τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 8.02 ημέρες. Αποτελεί προϊόν της σχάσης του ουρανίου και του πλουτωνίου.

Απαντάται στην ατμόσφαιρα είτε προσκολλημένο σε σωματίδια, είτε σε αέρια ανόργανη μορφή (I_2 , H, HOI), είτε σε αέρια οργανική μορφή (CHI_3 , CH_2I_2 , $CH_3CH_2CH_2I$).

- ^{129}I : είναι το μακροβιότερο ισότοπο του ιωδίου με χρόνο ημιζωής $15.7 \cdot 10^6$ έτη. Παράγεται είτε φυσικά με αντιδράσεις κατακερματισμού μεταξύ της κοσμικής ακτινοβολίας με το Xe της ατμόσφαιρας είτε από τη σχάση του ουρανίου.
- ^{137}Cs : είναι ένα ανθρωπογενές ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 30.02 έτη. Οι πιο σημαντικές εκλύσεις του στην ατμόσφαιρα οφείλονται στις πυρηνικές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, καθώς και στα πυρηνικά ατυχήματα του Chernobyl (1986) και της Φουκουσίμα (2011). Σε κανονικές συνθήκες μπορεί να ανιχνεύεται στην ατμόσφαιρα σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις ως αποτέλεσμα επαναιώρησης
- ^{40}K : είναι ένα μακρόβιο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής $1.2504 \cdot 10^9$ έτη. Ο βασικός μηχανισμός εισαγωγής στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι μέσω της επαναιώρησης σκόνης από το επιφανειακό έδαφος, ή λόγω καύσης βιομάζας.

2.1.2 Μέτρηση των ραδιενεργών ισοτόπων του ατμοσφαιρικού αερολύματος

Η διάσπαση ενός ραδιενεργού ισοτόπου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του θυγατρικού του υπό τη μορφή ιόντος. Το φορτίο του θυγατρικού ραδιενεργού ισοτόπου οδηγεί στην προσκόλλησή του στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αερολύματος, τα οποία μπορούν να συλλεχθούν με κατάλληλες τεχνικές δειγματοληψίας, κάτι που επιτρέπει τελικά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενεργότητας των διαφόρων ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα (Eleftheriadis & Ioannidou, 2020).

Η μέτρηση των ραδιενεργών ισοτόπων που προσκολλώνται στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα γίνεται με χρήση ειδικών αντλιών και φίλτρων αέρα. Τα φίλτρα αυτά (χάρτινα φίλτρα, φίλτρα νιτρικής ή οξικής κυτταρίνης, φίλτρα από ίνες γυαλιού, πολυπροπυλενίου ή χαλαζία) στη συνέχεια υπόκεινται σε κατάλληλη μετρητική διαδικασία, με ή χωρίς προηγούμενη χημική επεξεργασία (καύση, χημική διάλυση, χημικό ξέπλυμα κλπ.) για την απομόνωση των συλλεχθέντων σωματιδίων και κατ' επέκταση των ραδιενεργών ισοτόπων. Στην περίπτωση που είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος ανάλογα με το μέγεθός

τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αδρανειακοί συλλέκτες πρόσκρουσης πολλαπλών σταδίων (cascade impactors), συλλέκτες κυκλώνα (cyclone collectors) και ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστήρες (electrostatic precipitators). Τέλος, για τη συλλογή συμυκνωμένων υδρατμών ή υγρών σωματιδίων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα μπορεί να γίνει η χρήση συσκευής συμπύκνωσης ή αφυγραντήρα (Engelbrecht, 2012), (Eleftheriadis & Ioannidou, 2020).

Καθώς η συγκέντρωση ενεργότητας² ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα μπορεί να είναι πολύ χαμηλή (της τάξης των $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) για τη στατιστικά σημαντική ανίχνευσή τους απαιτείται συνήθως η δειγματοληψία πολύ μεγάλης χρονικής διάρκειας (δεκάδες ώρες) και μεγάλων όγκων αέρα (χιλιάδες κυβικά μέτρα).

Μετά τη συλλογή και ενδεχομένως την επεξεργασία τα δείγματα οδηγούνται προς ανάλυση για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται:

- με χρήση αναλογικών μετρητών (proportional counters) για τον προσδιορισμό της ολικής-α ή ολικής-β ενεργότητας του δείγματος,
- με χρήση διατάξεων υγρού σπινθηρισμού (LSC) για μέτρηση ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν α- και β-σωματίδια κατά τη διάσπασή τους,
- με χρήση α-φασματοσκοπικών μεθόδων για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν α-σωματίδια κατά τη διάσπασή τους,
- με χρήση γ-φασματοσκοπίας για τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων των οποίων η διάσπαση συνοδεύεται και από την εκπομπή γ-ακτινοβολίας.

Στην παρούσα μελέτη το σύνολο των δειγμάτων αναλύθηκε με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας και το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε κυρίως στα ισότοπα ^7Be και ^{210}Pb . Για τον λόγο αυτό, περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας και τη συμπεριφορά και χρήση των ανωτέρω ραδιενεργών ισοτόπων δίνονται στις παραγράφους που ακολουθούν. Άλλα ισότοπα ενδιαφέροντος ήταν και τα βραχύβια θυγατρικά των ^{222}Rn , ^{220}Rn , καθώς αυτά μπορεί να επηρεάζουν τη διαδικασία της μέτρησης, όπως θα φανεί στο 3^ο Κεφάλαιο. Τέλος σε ορισμένες περιπτώσεις κατέστη δυνατή και η ανίχνευση των ισοτόπων ^{40}K και ^{137}Cs , λόγω επαναιώρησης.

² Πρόκειται για μετάφραση του όρου activity concentration.

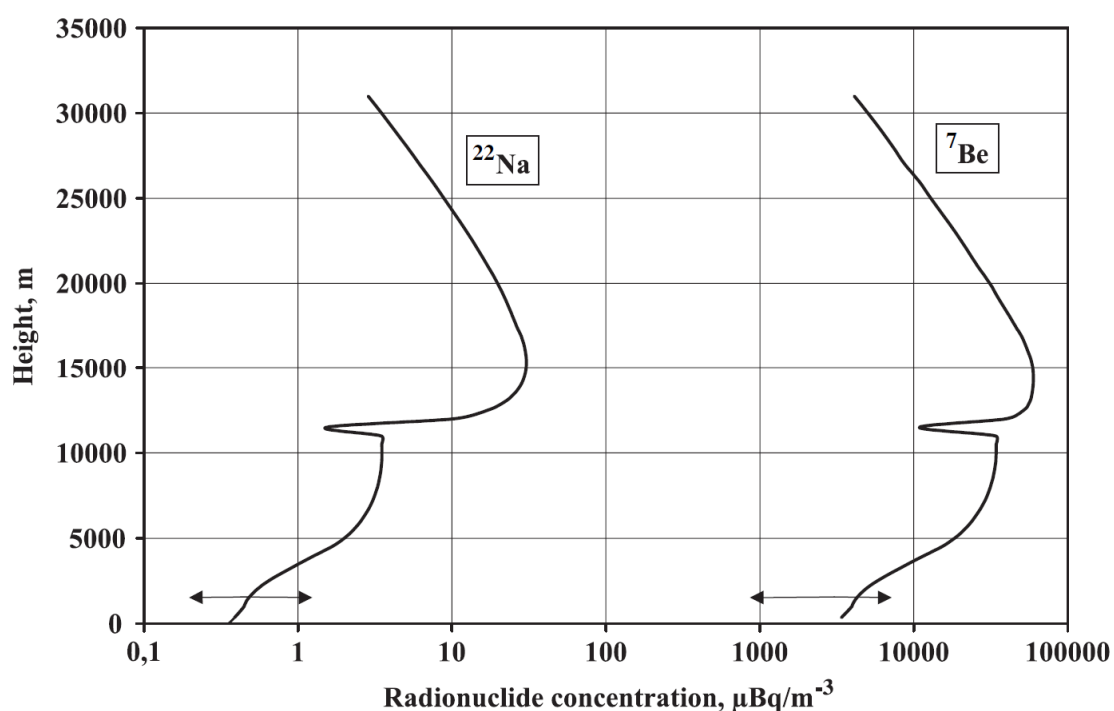
2.1.3 Το ραδιενεργό ισότοπο ^7Be

Το ^7Be είναι ένα βραχύβιο ραδιενεργό ισότοπο κοσμικής προέλευσης με χρόνο ημιζωής 53.22 ημέρες. Παράγεται κυρίως στη στρατόσφαιρα (~70%) και μερικώς στην τροπόσφαιρα (~30%) από αντιδράσεις κατακερματισμού μεταξύ της κοσμικής ακτινοβολίας με τους ελαφρείς ατμοσφαιρικούς πυρήνες του C, N και O (Lal & Peters, 1967). Διασπάται μέσω σύλληψης ηλεκτρονίου και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 477.6 keV με ποσοστό εκπομπής 10.44%, γεγονός που καθιστά δυνατή την ανίχνευσή του με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας (Lal, et al., 1958), (Cannizzaro, et al., 2004).

Εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής του, το μεγαλύτερο ποσοστό του ^7Be που παράγεται στη στρατόσφαιρα δε φτάνει στην τροπόσφαιρα, καθώς ο μέσος χρόνος παραμονής του στρατοσφαιρικού αερολύματος είναι περίπου 1 έτος. Στα μεσαία κυρίως γεωγραφικά πλάτη, κυρίως κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, η μείωση του πάχους της τροπόπαυσης και η έντονη ανάμιξη αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας οδηγούν σε εμπλουτισμό της τροπόσφαιρας με «στρατοσφαιρικής» προέλευσης ^7Be (Rastogi & Sarin, 2008), (Lal & Peters, 1967), (Feely, et al., 1989), (Dibb, et al., 1994), (Martin & McBride, 2012). Ο χρόνος παραμονής του ^7Be στην τροπόσφαιρα εκτιμάται από 22 έως 48 ημέρες (Bleichrodt, 1978), (Durana, et al., 1996), και η συγκέντρωσή του σε αυτήν εξαρτάται από την εποχή, το ύψος από την επιφάνεια της Γης (Jasiulionis & Wershofen, 2005) καθώς και το γεωγραφικό πλάτος (Lal & Peters, 1962). Όπως όλα τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης, το ^7Be , παρουσιάζει κύμανση εξαρτώμενη του 11-ετούς κύκλου του ήλιου (Papastefanou & Ioannidou, 2004), (Ioannidou, et al., 2014), εμφανίζοντας αρνητική συσχέτιση με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων (Mohan, et al., 2019), (Zalewska, et al., 2021), (Ioannidou, et al., 2005), (Chao, et al., 2012). Λόγω της αργής μεταφοράς του ^7Be από τη στρατόσφαιρα, έχει παρατηρηθεί ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του ^7Be στο επίπεδο του εδάφους ανταποκρίνεται στη μεταβολή του πλήθους των ηλιακών κηλίδων με χρονική καθυστέρηση της τάξης των 5 μηνών (Gerasopoulos, et al., 2003). Σύμφωνα με την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε από τους (Zhang, et al., 2021) η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του ^7Be σε παγκόσμιο επίπεδο κυμαίνεται από 0.33 έως 17.77 mBq/m³.

Το ^7Be είναι ένας χρήσιμος ιχνηθέτης για ατμοσφαιρικά μοντέλα μεταφοράς αερίων μαζών, για τη μελέτη γεωχημικών διεργασιών, καθώς και για τη μελέτη

διεργασιών διάβρωσης και ιζηματογένεσης (Sepulveda, et al., 2008), (Liu, et al., 2011), (Taylor, et al., 2016), (Wallbrink & Murray, 1994). Αφαιρείται συνεχώς από την ατμόσφαιρα κυρίως μέσω των υγρών αποθέσεων (Ishikawa, et al., 1995) και εισάγεται στο οικοσύστημα κυρίως ως Be^{2+} (Kaste, et al., 2002). Οι μετρήσεις της συγκέντρωσής του στις υγρές και ξηρές αποθέσεις επιτρέπουν την εκτίμηση της συνολικής ατμοσφαιρικής του εναπόθεσης (Jha, et al., 2015), (Chao, et al., 2012) (Baskaran, et al., 1993). Στο **Σχήμα 2.1** που ακολουθεί δίνεται η καθ' ύψος κατανομή της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be (και του ^{22}Na) στον ατμοσφαιρικό αέρα.



Σχήμα 2.1 : Κατανομή της μέσης συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be και του ^{22}Na καθ' ύψος, καθώς και το εύρος της κύμανσης των συγκεντρώσεών τους στον επιφανειακό ατμοσφαιρικό αέρα (δείκτης \leftrightarrow) (Jasiulionis & Wershofen, 2005).

2.1.4 Το ραδιενεργό ισότοπο ^{210}Pb

Ο ^{210}Pb είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 22.23 έτη το οποίο ανήκει στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου (^{238}U) και παράγεται από τη ραδιενεργό διάσπαση του ^{214}Po . Διασπάται με β -διάσπαση και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 46.54 keV με ποσοστό εκπομπής 4.25%, γεγονός που καθιστά δυνατή – αν και σχετικά δύσκολη – την ανίχνευσή του με μεθόδους γ -φασματοσκοπίας. Το ^{214}Po είναι ένα από τα βραχύβια θυγατρικά του ^{222}Rn , ενός ευγενούς ραδιενεργού αερίου που ανήκει στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου και εκλύεται κυρίως από το έδαφος στις ηπειρωτικές περιοχές, με

τη συγκέντρωσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα να μειώνεται με το ύψος από την επιφάνεια της γης. Ως συνέπεια, αντίστοιχη μείωση ακολουθεί και η συγκέντρωση του ^{210}Pb (Daish, et al., 2005), (Lee & Feichter, 1995). Το γεγονός ότι ο ^{210}Pb παράγεται κυρίως σε ηπειρωτικές περιοχές³ καθώς και η προσκόλλησή του σε σωματίδια του αερολύματος, τον καθιστά πολύ καλό ιχνηθέτη για σωματίδια του αερολύματος, όπως τα θειώδη, σωματίδια σκόνης και σωματίδια PM10, καθώς και για τη μελέτη της οριζόντιας μεταφοράς αερίων μαζών, αλλά και για τη διάκρισή τους σε ηπειρωτικής ή θαλάσσιας προέλευσης (Turekian, et al., 1983), (Mattsson, et al., 1993), (Martin & McBride, 2012), (Genthon & Armengaud, 1995).

Αντίστοιχα με το ^7Be , η συγκέντρωση του ^{210}Pb επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, όπως είναι η εποχή του έτους, η κύμανση της ατμοσφαιρικής πίεσης, η θερμοκρασία, η περιεχόμενη στο χόμα υγρασία⁴, οι ημερήσιες μεταβολές μετεωρολογικών παραμέτρων, η συχνότητα και το ύψος βροχόπτωσης καθώς και η χιονοκάλυψη των ηπειρωτικών περιοχών. Ο χρόνος παραμονής του ^{210}Pb στην τροπόσφαιρα σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους όπως η Ελλάδα ποικίλει από 5 μέρες το χειμώνα έως 10 μέρες το καλοκαίρι (Balkanski, et al., 1993), (Semertzidou, et al., 2016), (Papastefanou, 2006). Ειδικότερα, σύμφωνα με (Balkanski, et al., 1993), ο ^{210}Pb που παράγεται (ως αποτέλεσμα της διάσπασης του ^{222}Rn) σε υψόμετρο 9 km έχει χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα έως και 4 φορές μεγαλύτερο από αυτόν που παράγεται στο κατώτερο 0.5km της ατμόσφαιρας.

Ο ^{210}Pb από τον αέρα εναποτίθεται⁵ πάλι στο έδαφος μέσω υγρών και ξηρών αποθέσεων⁶, με τον κυρίαρχο ρόλο να έχουν οι υγρές κατακρημνίσεις (Baskaran, 2011), (Koch, et al., 1996), (Cannizzaro, et al., 1999), (Hirose, et al., 2011), (Melieres, et al., 2003), και αποτελεί σημαντικό ραδιοϊχνηθέτη για τη μελέτη της διάβρωσης των εδαφών (Matisoff, 2014). Σύμφωνα με την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε από τους (Zhang, et al., 2021) η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{210}Pb στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμιο επίπεδο κυμαίνεται από 0.003 έως 4.65 mBq/m³.

³ Η μέση παγκόσμια εκροή του ^{222}Rn εκτιμάται στα 15 έως 22 mBq/(m²·s) για τις ηπειρωτικές περιοχές και στα 0.2 mBq/(m²·s) για τους ωκεανούς (Rama, et al., 1961), (Samuelsson, et al., 1986), (Nazaroff, 1992).

⁴ Καθώς επηρεάζει την εκροή του ραδονίου από το έδαφος.

⁵ Ο επιπλέον αυτός ^{210}Pb , καθώς δεν είναι σε ισορροπία στο έδαφος με το ήδη υπάρχον ^{226}Ra , συνήθως χαρακτηρίζεται “unsupported” ^{210}Pb .

⁶ Ως αποτέλεσμα της απόθεσης αυτής στο έδαφος και της εν συνεχεία κατακόρυφης μετανάστευσης του ^{210}Pb , στα αδιατάρακτα επιφανειακά εδάφη παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ^{210}Pb στην επιφάνεια και εκθετική κατά βάθος μείωση της συγκέντρωσής του.

2.1.5 Τα ραδιενεργά ισότοπα ^{222}Rn και ^{220}Rn

Το Ραδόνιο (^{222}Rn) και το Θορόνιο (^{220}Rn) είναι δύο αέρια ραδιενεργά ισότοπα τα οποία εισέρχονται στην ατμόσφαιρα ως θυγατρικά του ^{226}Ra (σειρά του ^{238}U) και του ^{224}Ra (σειρά του ^{232}Th). Το ^{222}Rn έχει χρόνο ημιζωής 3.8232d, ενώ το ^{220}Rn έχει χρόνο ημιζωής 55.8s. Η σημαντική αυτή διαφορά στους χρόνους ημιζωής δίνει στο ραδόνιο τη δυνατότητα να μετακινηθεί σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις, να βρεθεί ευκολότερα στην ατμόσφαιρα και να αποθέσει τα θυγατρικά του ραδιενεργά ισότοπα αρκετά μακριά από το σημείο εκπομπής/παραγωγής του, συγκριτικά με το θορόνιο. Για τον λόγο αυτό το ραδόνιο έχει μεγαλύτερη ραδιοβιολογική σημασία και η κινητική του έχει διερευνηθεί περισσότερο στη βιβλιογραφία.

Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών αερολύματος πάνω σε φίλτρα, τα βραχύβια φορτισμένα θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου συλλέγονται στα φίλτρα, εισάγοντας «θόρυβο» στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που ακολουθούν. Επιπροσθέτως, καθώς το ραδόνιο και το θορόνιο παράγονται από τα οικοδομικά υλικά και απελευθερώνονται και στους εσωτερικούς χώρους, τα θυγατρικά τους συνεισφέρουν σημαντικά στο υπόστρωμα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων. Στον **Πίνακα 2.1** δίνονται τα θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου τα οποία παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις (Be, et al., 2008) (Be, et al., 2004).

Πίνακας 2.1: Κυρίαρχο ενδιαφέροντος θυγατρικά ραδιενεργά ισότοπα του ραδονίου (^{222}Rn) και του θορονίου (^{220}Rn).

Μητρικά ραδιενεργά ισότοπα	Θυγατρικά ραδιενεργά ισότοπα	Χρόνος ημιζωής	Ενέργειες κυρίαρχων εκπομπών φωτονίων (keV)	Ποσοστά εκπομπής (%)
^{222}Rn	^{214}Pb	26.916 min	295.224	18.414
			351.932	35.60
	^{214}Bi	19.8 min	609.312	45.49
			1120.287	14.91
			1764.494	15.31
^{210}Pb	22.23 a	46.539	4.252	
^{220}Rn	^{212}Pb	10.64 h	238.632	43.6
	^{208}Tl	3.058 min	583.187	85.0

2.1.5.1 Κύμανση του ^{222}Rn και του ^{220}Rn

Μεγάλος αριθμός μελετών έχει γίνει με αντικείμενο τη μελέτη της κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Βάσει των μελετών αυτών (El-Hussein, 1996), (Huet, et al., 2010), (Stochioiu, et al., 2008), (De Francesco, et al., 2010), (Steck, 2009), (Clouvas, et al., 2011), (Tchorz-Trzeciakiewicz & Klos, 2017), η συγκέντρωση του ραδονίου και του θορονίου μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το είδος του υπεδάφους και το περιεχόμενό του σε ουράνιο (και κατ' επέκταση ράδιο) και θόριο, σε συνδυασμό με το μέγεθος των πόρων του εδάφους, την υγρασία και άλλες παραμέτρους. Τα οικοδομικά υλικά και η συγκέντρωσή τους σε ράδιο, ο εξαερισμός των δωματίων καθώς και η απόσταση κάθε δωματίου-ορόφου ενός κτιρίου από το έδαφος – κατά κανόνα παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης όσο υψηλότερος είναι ο όροφος – έχουν πολύ μεγάλη επίδραση στις συγκεντρώσεις ραδονίου και θορονίου σε εσωτερικούς χώρους.

Η κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του επηρεάζεται ακόμα σημαντικά και από τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Robinson, 1996), (Kitto, 2005), (Xie, et al., 2015), (Schubert, et al., 2018), (Li, et al., 2018), (Aquilina & Fenech, 2019), (Baltrenas, et al., 2020), (Singh, et al., 2005), (Martin & McBride, 2012) η συγκέντρωση του ραδονίου συσχετίζεται:

- αρνητικά με την εξωτερική θερμοκρασία,
- αρνητικά με τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου,
- αρνητικά με την ταχύτητα του ανέμου,
- θετικά με την εξωτερική βαρομετρική πίεση,
- θετικά με την εξωτερική σχετική υγρασία,
- θετικά με τη διαφορά της εσωτερικής (μέσα στο κτίριο) από την εξωτερική πίεση ($\Delta P_{\text{out-in}}$),
- θετικά με τη διαφορά της εσωτερικής (μέσα στο κτίριο) με την εξωτερική θερμοκρασία ($\Delta T_{\text{out-in}}$).

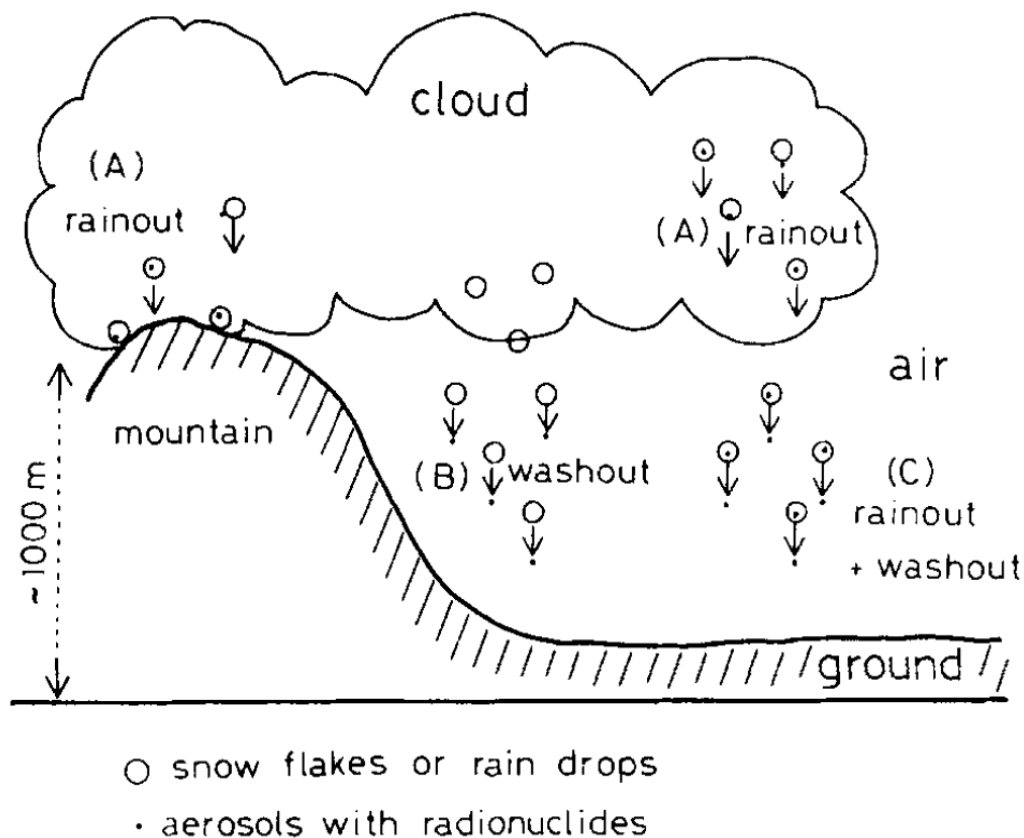
Καθώς η κύμανση του ραδονίου, του θορονίου και των θυγατρικών τους μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το υπόστρωμα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, ειδικά σε μετρήσεις πολύ χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, η κύμανση αυτή και η αντίστοιχη επίδραση στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις αποτελεί αντικείμενο ευρείας μελέτης στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ..

2.2 Ατμοσφαιρικές αποθέσεις

Τα ραδιενεργά ισότοπα, που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα με ποικίλους τρόπους, μετά την προσκόλλησή τους στα σωματίδια του αερολύματος ακολουθούν την κίνηση και συμπεριφορά του αερολύματος και τελικά αποτίθενται στις επιφάνειες που είναι διαθέσιμες – κυρίως στο έδαφος. Οι ατμοσφαιρικές αποθέσεις των ραδιενεργών ισωτόπων μπορούν να διακριθούν σε ξηρές και υγρές (βροχή, χιόνι).

Ως ξηρή απόθεση ορίζεται η διαδικασία της εναπόθεσης λόγω διάχυσης ή λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Στις υγρές αποθέσεις ο κυρίαρχος μηχανισμός που οδηγεί στην εναπόθεση από την ατμόσφαιρα στο έδαφος είναι οι υγρές κατακρημνίσεις, βροχή και χιόνι. Οι μηχανισμοί υγρής απόθεσης διακρίνονται σε rainout/snowout και washout. Ειδικότερα, στις συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός των νεφών, τα σωματίδια του αερολύματος είναι απαραίτητα καθώς προσφέρουν τους πυρήνες πάνω στους οποίους συμπυκνώνεται το νερό ή ο πάγος, οδηγώντας στον σχηματισμό σταγονιδίων και κατ' επέκταση των ίδιων των νεφών. Η ενσωμάτωση των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος στα σταγονίδια των νεφών οδηγεί στη συνέχεια στην απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα και την εναπόθεσή τους στο έδαφος μέσω των υγρών αποθέσεων (Kreidenweis, 2002). Η απομάκρυνση των ραδιενεργών ισωτόπων που βρίσκονται μέσα στα σταγονίδια του νέφους και απομακρύνονται με τις σταγόνες της βροχής ή του χιονιού αποτελεί το rainout ή το snowout αντίστοιχα. Παράλληλα, κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, οι σταγόνες ή οι χιονονιφάδες κατακρημνίζουν (συμπαρασύρουν) και σωματίδια του ατμοσφαιρικού αερολύματος που βρίσκονται μεταξύ του νέφους και του εδάφους. Αυτός ο μηχανισμός κατακρήμνισης ατμοσφαιρικών σωματιδίων και κατ' επέκταση ραδιενεργών ισωτόπων ονομάζεται washout. Εν γένει, κατά τη διάρκεια μίας βροχόπτωσης/χιονόπτωσης συνυπάρχουν και οι δύο μηχανισμοί απομάκρυνσης του αερολύματος από την ατμόσφαιρα. Καθώς το φαινόμενο υγρής απόθεσης εξελίσσεται, το μεγαλύτερο μέρος της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισωτόπων μεταξύ νέφους και εδάφους εξαντλείται, με αποτέλεσμα το rainout/snowout να κυριαρχεί στο υπόλοιπο του φαινομένου και οι μετρούμενες συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισωτόπων να οφείλονται στις περιεχόμενες στο νέφος συγκεντρώσεις. Για τη διάκριση των δύο φαινομένων ιδιαίτερα επεξηγηματικό είναι το **Σχήμα 2.2**. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Chen, et al., 2016), το φαινόμενο washout

κυριαρχεί στα πρώτα 20mm της βροχοπτώσης ενώ στη συνέχεια κυριαρχεί το φαινόμενο rainout. Επιπλέον, εκτιμάται ότι κατά το πρώτο 1mm της βροχοπτώσης συντελείται το 27% έως 34% του συνολικού washout (Ishikawa, et al., 1995).



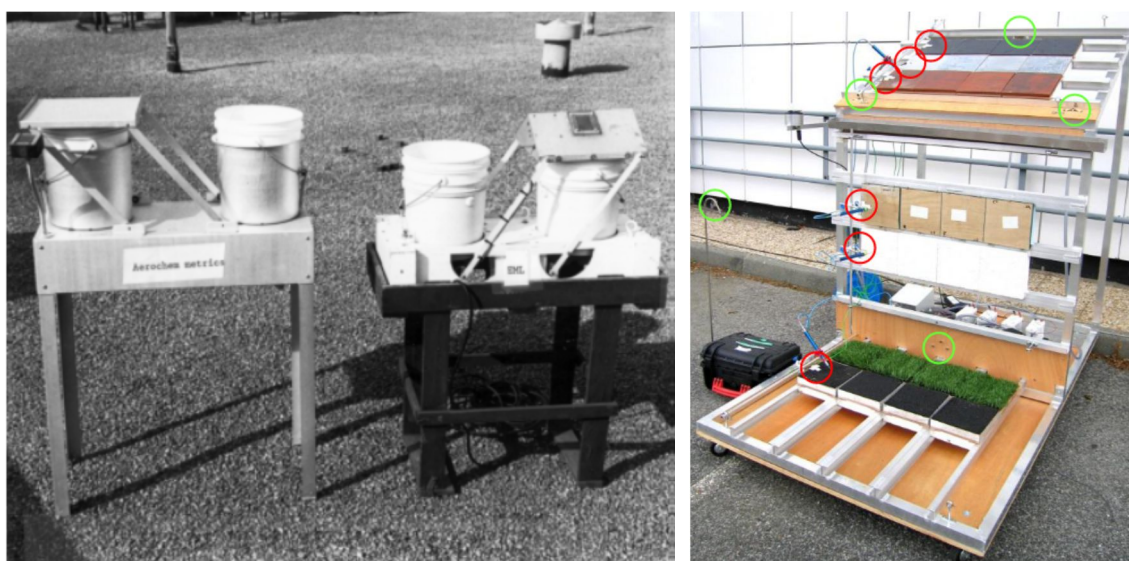
Σχήμα 2.2 : Σχηματική αναπαράσταση της υγρής κατακρήμνισης των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος και κατ' επέκταση των ραδιενεργών ισοτόπων από σταγόνες βροχής ή χιόνι, όπου (A) κατακρήμνιση αποκλειστικά μέσω rainout, (B) κατακρήμνιση αποκλειστικά από washout, και (C) κατακρήμνιση από συνδυασμό rainout και washout (Ishikawa, et al., 1995).

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος για μεγάλο πλήθος ερευνών, καθώς η μελέτη τους συνδράμει στην κατανόηση της κίνησης των αερίων μαζών και της συμπεριφοράς των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος, αλλά και στον έλεγχο και επιβεβαίωση διαφόρων μετεωρολογικών μοντέλων (Zhang, et al., 2021), (Baklanov & Sorensen, 2001).

2.2.1 Δειγματοληψία και ανάλυση ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Το μεγαλύτερο μέρος της παρούσας Δ.Δ. εστιάζει στη δειγματοληψία, την επεξεργασία και την ανάλυση ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Στη βιβλιογραφία, η χρονική

διάρκεια των δειγματοληψιών αυτών ποικίλει από μερικές ημέρες έως μερικούς μήνες, ανάλογα με τον στόχο της εκάστοτε μελέτης, ενώ τα δύο βασικά ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στην πλειοψηφία των δειγματοληψιών αυτών είναι το ^7Be και ο ^{210}Pb . Οι δειγματολήπτες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι μεταλλικά ή πλαστικά δοχεία συλλογής, κωνικές ή επίπεδες επιφάνειες, να καλύπτονται από κολλώδεις ουσίες (για τις ξηρές αποθέσεις) και να ξεπλένονται σε τακτά χρονικά διαστήματα με απιονισμένο ή οξινισμένο νερό (Σχήμα 2.3) (Roupsard, 2013), (Erickson, 1997). Εν γένει, η δειγματοληψία αυστηρά υγρών ή ξηρών κατακρημνίσεων απαιτεί αυτοματοποιημένα συστήματα επιλογής τους είδους της κατακρήμνισης ή συνεχή παρακολούθηση της διαδικασίας συλλογής δείγματος, σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Συχνά, μία δειγματοληψία μπορεί να γίνεται για καθορισμένη χρονική περίοδο, ανεξάρτητα από τις μετεωρολογικές συνθήκες – στην περίπτωση αυτή γίνεται συλλογή ολικών αποθέσεων, δηλαδή υγρών και ξηρών στο ίδιο δείγμα.



Σχήμα 2.3 : α) Φωτογραφία από αυτοματοποιημένους συλλέκτες ξηρής και υγρής απόθεσης (αριστερά) (Erickson, 1997), β) Φωτογραφία πειραματικής εγκατάστασης για τη σύγκριση διαφόρων τύπων επιφανειών για τη συλλογή ξηρής απόθεσης κατασκευασμένων από διάφορα υλικά (δεξιά) (Roupsard, 2013).

Για την επεξεργασία των υγρών ή ολικών αποθέσεων⁷, είναι ιδιαίτερα σημαντική η διαδικασία που θα ακολουθηθεί για τον περιορισμό του όγκου του δείγματος ή την απομόνωση των ραδιενεργών ισωτόπων από αυτό. Οι κυρίαρχες προσεγγίσεις που προτείνονται και έχουν υιοθετηθεί στη βιβλιογραφία συνοψίζονται στη συνέχεια:

⁷ Που μπορεί να περιέχουν και σημαντική υγρή συνιστώσα.

- A. Φιλτράρισμα του συνόλου του δείγματος ή ενός κλάσματος αυτού μέσα από χάρτινο φίλτρο διήθησης και στη συνέχεια γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φίλτρου (Papandreou, et al., 2011), (Juri Ayub, et al., 2009), ή χημική επεξεργασία του και α-φασματοσκοπική ανάλυση του υπολείμματος (Tateda & Iwao, 2008). Η προσέγγιση αυτή ωστόσο δεν επιτυγχάνει την πλήρη συγκράτηση των περιεχόμενων στο δείγμα ραδιενεργών ισοτόπων.
- B. Πλήρης ή μερική εξάτμιση του δείγματος για την επίτευξη μικρότερων και διαχειρίσιμων όγκων δειγμάτων (Rodenas, et al., 1997) η οποία όμως μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια έως και των 2/3 της συλλεχθείσας ποσότητας του ^7Be και συνεπώς σε εσφαλμένα τελικά αποτελέσματα (Jungck, et al., 2009).
- Γ. Ραδιοχημική επεξεργασία του υγρού που προέκυψε με κατάλληλες χημικές ουσίες για τη συγκαθίζηση με $\text{Fe}(\text{OH})_3$ και απομόνωση των ραδιενεργών ισοτόπων, και εν συνεχεία προσδιορισμός τους με μεθόδους γ- ή α-φασματοσκοπίας (Miyake & Ohtsuka, 1964). (Goel, et al., 1956).
- Δ. Ραδιοχημική επεξεργασία του δείγματος με κατάλληλες χημικές ουσίες για τη συγκαθίζηση με MnO_2 και απομόνωση των ραδιενεργών ισοτόπων, και εν συνεχεία προσδιορισμός τους με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας (Wallbrink & Murray, 1994), (Taylor, et al., 2016).
- E. Φιλτράρισμα του δείγματος μέσα από ρητίνες ιοντοανταλλαγής κατιόντων, ανιόντων ή συνδυασμό αυτών, με αποτέλεσμα τη συγκράτηση των ραδιενεργών ισοτόπων στις ρητίνες και εν συνεχεία γ-φασματοσκοπική ανάλυση των ρητινών (Jungck, et al., 2009), (Harvey & Matthews, 1989), (Tokuyama, et al., 1993).

Στον Πίνακα 2.3 που δίνεται στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου, γίνεται συνοπτικά μία ανασκόπηση των ερευνητικών εργασιών που επικεντρώθηκαν στη δειγματοληψία και ανάλυση ατμοσφαιρικών αποθέσεων και συγκεκριμένα παρατίθενται:

- οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών αποθέσεων του ^{210}Pb και του ^7Be , όπως αυτές μετρήθηκαν σε κάθε έρευνα,
- η χρονική περίοδος των δειγματοληψιών καθώς και η διάρκεια συλλογής των επιμέρους δειγμάτων,
- το υλικό και η συνολική επιφάνεια συλλογής των συλλεκτών που χρησιμοποιήθηκαν,
- η βασική μέθοδος επεξεργασίας των δειγμάτων που συλλέχθηκαν,

- η μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be και του ^{210}Pb στα δείγματα.

Οι βασικές μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης των δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων που εφαρμόστηκαν στις μελέτες που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3** δίνονται συνοπτικά στο **Σχήμα 2.12** στην παράγραφο 2.6 του παρόντος κεφαλαίου.

2.2.2 Συγκεντρώσεις ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις

Από τα αποτελέσματα των ερευνών που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3** προκύπτει ένα εύρος μέσων ετήσιων ατμοσφαιρικών αποθέσεων από 47 έως 1054 $\text{Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{y})$ για το ^{210}Pb και από 390 έως 6350 $\text{Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{y})$ για το ^7Be , ενώ είναι φανερό και το μεγάλο πλήθος των διαφορετικών προσεγγίσεων για τη δειγματοληψία, την επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων αυτών. Κατά κανόνα, η συγκέντρωση του ^7Be στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις παρουσιάζει θετική συσχέτιση με αυτήν του ^{210}Pb , ενώ η απουσία της ανωτέρω συσχέτισης αποτελεί ισχυρή ένδειξη ανάμιξης ηπειρωτικών και θαλάσσιων αερίων μαζών (Baskaran, et al., 1993), (McNeary & Baskaran, 2003), (Baskaran & Swarzenski, 2007), (Kim, et al., 2000).

Όσον αφορά στο μέγεθος των σωματιδίων με τα οποία συσχετίζονται τα ισότοπα ενδιαφέροντος, το 88% της ξηρής απόθεσης του ^7Be συσχετίζεται με σωματίδια $<1.1\mu\text{m}$, ενώ μόνο το 1% προσκολλάται σε σωματίδια $>7\mu\text{m}$ (Young & Silker, 1974), (Papastefanou & Ioannidou, 1996), (Ioannidou & Paatero, 2014). Η συνεισφορά της ξηρής απόθεσης στην ολική απόθεση κυμαίνεται από 1% έως 44% για το ^7Be και από 5% έως 51% για το ^{210}Pb (Zhang, et al., 2021), (Chao, et al., 2012). Όσον αφορά στην ταχύτητα εναπόθεσης, για το ^7Be έχει εύρος από 0.01 (Wallbrink & Murray, 1994) έως 8.4 cm/s και για τον ^{210}Pb από 0.1 έως 12.7 cm/s (Zhang, et al., 2021).

Από τις μελέτες που αναφέρονται στον **Πίνακα 2.3**, προσδιορίζεται και το εύρος της συγκέντρωσης του ^{210}Pb και του ^7Be και στις υγρές αποθέσεις – ως επί το πλείστον σε δείγματα βροχοπτώσεων. Βάσει των παραπάνω ερευνών, η συγκέντρωση του ^{210}Pb και του ^7Be κυμαίνεται στα δείγματα βροχόπτωσης από 0.01 Bq/L (Mohan, et al., 2019) έως 3.3 Bq/L (Caillet, et al., 2001) και από 0.02 Bq/L (Wallbrink & Murray, 1994) έως 10.45 Bq/L (Caillet, et al., 2001) αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, στη μελέτη των (Ishikawa, et al., 1995) μετρήθηκε η συγκέντρωση του ^7Be σε δείγματα χιονιού στα οποία είχε εύρος από $0.223 \pm 0.10 \text{ Bq}/\text{L}$ έως $4.1 \pm 0.03 \text{ Bq}/\text{L}$. Συγκριτικά, σύμφωνα με τους

(Ioannidou & Papastefanou, 2006), το χιόνι παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση στην απομάκρυνση των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα, σε σχέση με τη βροχόπτωση. Αντίστοιχα με τη βροχόπτωση, σε μεγάλης χρονικής διάρκειας χιονοπτώσεις ο κυρίαρχος μηχανισμός κατακρήμνισης των ραδιενεργών ισοτόπων είναι το snowout (αντίστοιχου του rainout).

Στις περισσότερες από τις μελέτες που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3** έγινε και υπολογισμός του λόγου $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, καθώς αποτελεί χρήσιμο δείκτη για τη μελέτη της κατακόρυφης και οριζόντιας μεταφοράς αερίων μαζών (Baskaran, 1995), (Koch, et al., 1996) (Lee, et al., 2007), (Tositti, et al., 2014), με τις τιμές του να βρίσκονται στο εύρος μεταξύ 0.004 έως 0.5 (Zhang, et al., 2021). Ο λόγος αυτός σχετίζεται αρνητικά με το πλήθος των υγρών κατακρημνίσεων, κάτι το οποίο αποδίδεται στο γεγονός ότι τους μήνες με τις περισσότερες υγρές κατακρημνίσεις η υγρασία στο έδαφος φτάνει σε κορεσμό, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η εκροή του ^{222}Rn από αυτό και κατά συνέπεια, να ανανεώνεται με χαμηλότερο ρυθμό η συγκέντρωση του ^{210}Pb στον αέρα. Υπολογίζεται ότι μετά από ένα συμβάν βροχόπτωσης οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του ^7Be και του ^{210}Pb ανανεώνονται κατά μέσο όρο σε 1 με 2 ημέρες (Caillet, et al., 2001). Ακόμα, το καλοκαίρι, λόγω συναγωγής, ο ^{210}Pb κινείται ανοδικά, ενώ αντίθετα η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη μεταφορά ^7Be από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας στα κατώτερα (Rogers & Nielson, 1991), οδηγώντας σε μείωση του λόγου τους στον επιφανειακό ατμοσφαιρικό αέρα (Koch, et al., 1996).

2.2.3 Συσχέτιση με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους

Οι συγκεντρώσεις του ^7Be και του ^{210}Pb στον ατμοσφαιρικό αέρα και τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις κυμαίνονται, επηρεαζόμενες από πλήθος διαφορετικών παραγόντων, όπως είναι οι τοπικές μετεωρολογικές διακυμάνσεις, οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στην ατμόσφαιρα, καθώς και η γεωγραφική θέση όπου έγινε η δειγματοληψία.

Ειδικότερα, το ^7Be και ο ^{210}Pb παρουσιάζουν παρόμοιες εποχικές μεταβολές, με τις μέγιστες επιφανειακές συγκεντρώσεις να παρατηρούνται τον χειμώνα και τις ελάχιστες το καλοκαίρι, κυρίως λόγω των αυξημένων υγρών κατακρημνίσεων τους χειμερινούς μήνες (Yamamoto, et al., 2006). Η συγκέντρωσή τους στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις εμφανίζει σε ορισμένες από τις σχετικές έρευνες θετική συσχέτιση με το ύψος των

υγρών κατακρημνίσεων (βροχή και χιόνι) (Doering & Akber, 2008), (Beks, et al., 1998), (Nishikawa, et al., 1984), (Melieres, et al., 2003), (Baskaran, et al., 1993). Στην έρευνα των (Taylor, et al., 2016) υποστηρίζεται ότι χαμηλής έντασης βροχόπτωση οδηγεί σε αποτελεσματικότερη κατακρήμνιση των ραδιενεργών ισοτόπων, συγκριτικά με την υψηλής έντασης βροχόπτωση.

Από την άλλη πλευρά, οι συγκεντρώσεις των εν λόγω ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα ακολουθούν διαφορετική τάση (Daish, et al., 2005) παρουσιάζοντας αρνητική συσχέτιση με το ύψος της βροχόπτωσης, την ένταση του ανέμου και τη σχετική υγρασία και θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία (Mohan, et al., 2019), (Zalewska, et al., 2021), (Ioannidou, et al., 2005), (Duenas, et al., 2009).

Στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη οι συγκεντρώσεις του ^7Be εξαρτώνται κυρίως από τη μεταφορά αερίων μαζών που προέρχονται από τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη, στα οποία παρατηρείται έντονη εποχική κατακόρυφη ανταλλαγή αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας-τροπόσφαιρας, με τις μέγιστες συγκεντρώσεις να παρατηρούνται τους θερμούς μήνες. Ακόμα, παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις του ^7Be σε παραθαλάσσιες περιοχές, καθώς υπάρχουν περισσότεροι διαθέσιμοι προς συμπύκνωση πυρήνες λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας του αερολύματος σε θειώδη (Feely, et al., 1989).

Καθώς η ατμοσφαιρική απόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, στην έρευνα των (Preiss, et al., 1996) έγινε προσπάθεια γεωγραφικής ομαδοποίησης των ατμοσφαιρικών αποθέσεων του ^{210}Pb . Οι περιοχές των δειγματοληψιών κατανεμήθηκαν βάσει του γεωγραφικού τους πλάτους και για κάθε ομάδα προσδιορίστηκε ο μέσος ετήσιος ρυθμός εναπόθεσης, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.2** που ακολουθεί. Επισημαίνεται ότι οι περιοχές δειγματοληψίας ατμοσφαιρικών αποθέσεων της παρούσας Δ.Δ. αντιστοιχούν στο εύρος $30^\circ\text{-}60^\circ\text{ N}$.

Πίνακας 2.2: Μέσος ετήσιος ρυθμός απόθεσης του ^{210}Pb ανά εύρος γεωγραφικού πλάτους σε παγκόσμιο επίπεδο (Preiss, et al., 1996).

Εύρος γεωγραφικού πλάτους	Μέσος ετήσιος ρυθμός απόθεσης ^{210}Pb [$\text{Bq}/(\text{y}\cdot\text{m}^2)$]
$60^\circ\text{-}80^\circ\text{ N}$	25
$30^\circ\text{-}60^\circ\text{ N}$	117
$10^\circ\text{-}30^\circ\text{ N}$	161
$10^\circ\text{-}30^\circ\text{ N}$	66
$30^\circ\text{-}50^\circ\text{ N}$	53
$60^\circ\text{-}90^\circ\text{ N}$	3.5

Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις συγκεντρώσεις του αερολύματος και διαφόρων ατμοσφαιρικών ρυπαντών. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ^{210}Pb και του ^7Be με τα σωματίδια PM_{10} του αερολύματος (Mohan, et al., 2019) καθώς και θετική συσχέτιση της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be με τη συγκέντρωση του O_3 και τη συγκέντρωση σκόνης στον ατμοσφαιρικό αέρα (Tositti, et al., 2014), (Huang, et al., 2022), (Zalewska, et al., 2021), κάτι το οποίο διερευνήθηκε και στη μελέτη των (Chao, et al., 2014) χωρίς όμως να οδηγήσει σε αντίστοιχα αποτελέσματα.

2.3 Χρήση των ^7Be και ^{210}Pb ως ιχνηθέτες σε ατμοσφαιρικά και άλλα μοντέλα

Η γνώση της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα και του ρυθμού απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων έχει πολύ μεγάλη σημασία και βρίσκει μία σειρά από εφαρμογές. Έχοντας γνώση του συνόλου των ατμοσφαιρικών αποθέσεων των ραδιενεργών ισοτόπων, σε συνδυασμό με τις ατμοσφαιρικές τους συγκεντρώσεις, καθώς και με την κατά βάθος κατανομή τους στο έδαφος ή στη στήλη του νερού υπάρχει η δυνατότητα:

- εκτίμησης της εξωτερικής δόσης στον άνθρωπο ((Pröhl, et al., 2012), (ICRP, 2020), (Müller & Prohl, 1993) μετά από πυρηνικό ή ραδιολογικό ατύχημα,
- υπολογισμού της συγκέντρωσής τους στην τροφική αλυσίδα, με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων όπως το NUREG 1.109 (Till & Meyer, 1983), το FARMLAND (Brown & Simmonds, 1995), το ECOSYS (Müller & Prohl, 1993), το PATHWAY (Whicker & Kirchner, 1987) και το RadCon (Crawford & Domel, 2000), (Crawford, et al., 2000),
- υπολογισμού των χρόνων παραμονής ραδιενεργών ισοτόπων και σωματιδίων αερολύματος στην ατμόσφαιρα, σε ποταμούς καθώς και στη στήλη του νερού σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Koch, et al., 1996), (Ciffroy, et al., 2003), (Baskaran & Swarzenski, 2007), (Dlugosz-Lisiecka, 2021), (Graustein & Turekian, 1986),
- εκτίμησης της συσσωρευτικής συνολικής εναπόθεσής τους στην επιφάνεια της Γης ((Feichter, et al., 1991), (Young & Silker, 1974),
- μοντελοποίησης των διεργασιών ξηρής και υγρής απόθεσης (Sportisse, 2007),

- μοντελοποίησης και προσδιορισμού διεργασιών διάβρωσης και ιζηματογένεσης εδαφών (Wallbrink & Murray, 1994), (Matisoff, 2014), (Taylor, et al., 2016),
- χρήσης σε μοντέλα οριζόντιας μεταφοράς αερίων μαζών ή κατακόρυφης ανάμιξης μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας (Zanis, et al., 2003), (Hongyu, et al., 2016), (Melieres, et al., 2003).

Ειδικότερα, η μελέτη της μεταφοράς αερίων μαζών βρίσκεται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας, και πλήθος μοντέλων έχουν δημιουργηθεί για την προσομοίωση και πρόβλεψή της. Συγκεκριμένα, γενικής κυκλοφορίας ατμοσφαιρικά μοντέλα (General Circulation Models – GCMs) όπως τα GISS (Hansen, et al., 1983) και LMD (Sadourny & Laval, 1984), καθώς και μοντέλα χημικών ραδιοϊχνηθετών (Chemistry Tracer Models – CTMs) χρησιμοποιούν τα ισότοπα ^{210}Pb και ^7Be ως ραδιοϊχνηθέτες, και σε συνδυασμό με μετεωρολογικές παραμέτρους επιβεβαιώνουν και βελτιώνουν τις προσομοιώσεις μεταφοράς αερίων μαζών (Gerasopoulos, et al., 2003), (Genthon & Armengaud, 1995), (Terzi & Kalinowski, 2017), (Heinrich & Jamelot, 2011), (Hongyu, et al., 2016), (Feichter, et al., 1991), (Preiss & Genthon, 1997) (Preiss, et al., 1996), (Liu, et al., 2001), (Lee, et al., 2004).

Ο ^{210}Pb χρησιμοποιείται κυρίως ως ραδιοϊχνηθέτης για τη μεταφορά αερίων μαζών πάνω από ηπειρωτικές (υψηλές συγκεντρώσεις ^{210}Pb) ή και θαλάσσιες (χαμηλές συγκεντρώσεις ^{210}Pb) περιοχές (Paatero & Hatakka, 2000), (Piliposian & Appleby, 2003), (Duenas, et al., 2011) καθώς και για τη μελέτη της ανάμιξης αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας (Jacobi & Andre, 1963), (Rehfeld & Heimann, 1995).

Το ^7Be χρησιμοποιείται κυρίως ως ραδιοϊχνηθέτης για την κατακόρυφη ανάμιξη αερίων μαζών (Genthon & Armengaud, 1995) καθώς και για τη μεταφορά αέρα μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας (Alonso Hernandez, et al., 2004), (Simon, et al., 2009), (Pacini, et al., 2015), (Rehfeld & Heimann, 1995). Οι υψηλές συγκεντρώσεις ^7Be στον επιφανειακό αέρα υποδεικνύουν εισροή αερίων μαζών από τα κατώτερα στρώματα της στρατόσφαιρας και τα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, (Alonso-Hernandez, et al., 2014). Ειδικότερα, σε φαινόμενα αναδίπλωσης της τροπόπαυσης, η εισβολή του ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα συνοδεύεται από τιμές σχετικής υγρασίας μικρότερες του 40%, καθώς και από αύξηση των επιφανειακών συγκεντρώσεων του όζοντος (Ακριτίδης, 2008), (Hernandez-Ceballos, et al., 2017), (Stohl, et al., 2000), οι οποίες

συσχετίζονται θετικά με τις συγκεντρώσεις του ^7Be (Huang, et al., 2022), (Zanis, et al., 2003), (Scheel, et al., 1999), (Allen, et al., 2003), (Cristofanelli, et al., 2003), (Cristofanelli, et al., 2006), (Mohan, et al., 2019). Σύμφωνα με τη μελέτη των (Ioannidou, et al., 2014), η συγκέντρωση του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα ανταποκρίνεται μέσα σε 3 μέρες στην αλλαγή του ύψους της τροπόπαυσης, το οποίο παρουσιάζει θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία. Στην περίπτωση που δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ ^7Be και του O_3 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς και για τη χρονική διάρκεια της μελέτης δεν υπάρχει ισχυρή επίδραση της στρατόσφαιρας στις συγκεντρώσεις των ανωτέρω στην τροπόσφαιρα (Liu, et al., 2004), ή ότι η παρουσία του O_3 οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες (ρυπαντές που εκλύονται από μηχανές εσωτερικής καύσης, εργοστάσια παραγωγή ενέργειας, διυλιστήρια κλπ.) που μπορεί να επηρεάσουν τις συσχετίσεις μεταξύ του O_3 και του ^7Be (Μπασιάς, 2013).

Επιπλέον των παραπάνω εφαρμογών σε μοντέλα, οι ραδιενεργοί ιχνηθέτες ^7Be και ^{210}Pb παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού μίας σειράς παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την εναπόθεση και κίνηση των ραδιενεργών ισοτόπων και του αερολύματος στο περιβάλλον, όπως:

A. Η ταχύτητα εναπόθεσης του αερολύματος

Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι ένα μέγεθος που προσδιορίζεται εμπειρικά βάσει της εξίσωσης (2.1) (Young & Silker, 1980):

$$u_d = \frac{F}{C} \quad (2.1)$$

Όπου

F: ο επιφανειακός ρυθμός απόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου σε $\text{Bq}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$

C: η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιενεργού ισοτόπου στον ατμοσφαιρικό αέρα
 Bq/m^3

και επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως:

- το μέγεθος των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αεροζόλ,
- τα χαρακτηριστικά της διεπαφής μεταξύ ατμοσφαιρικού αέρα και επιφάνειας εναπόθεσης,

- τις μετεωρολογικές συνθήκες,
- τη χημική μορφή στην οποία βρίσκονται οι προς απόθεση χημικές ουσίες και σωματίδια του αερολύματος.

Ως προς την ταχύτητα ξηρής απόθεσης, για μεγάλου μεγέθους σωματίδια κυρίαρχο ρόλο έχει η επίδραση της βαρύτητας ενώ για μικρού μεγέθους σωματίδια (<0.1μm) κυριαρχεί το φαινόμενο της διάχυσης (Pröhl, et al., 2012), με την ταχύτητα ξηρής απόθεσης να συσχετίζεται θετικά με την ταχύτητα του ανέμου και αρνητικά με τη θερμοκρασία και την υγρασία (Chen, et al., 2012), (Young & Silker, 1980).

B. Ο συντελεστής επαναιώρησης σκόνης

Η επαναιώρηση της σκόνης από το επιφανειακό έδαφος στην ατμόσφαιρα είναι κυρίως αποτέλεσμα (Hernandez, et al., 2007):

- της επίδρασης του ανέμου,
- της συνδυαστικής επίδρασης ισχυρών καταιγίδων με έντονους ανέμους,
- του παφλασμού των σταγόνων της βροχής (rainsplash),
- της κίνηση των οχημάτων,
- των αγροτικών εργασιών,
- των εργασιών εξόρυξης.

Η επαναιώρηση αξιολογείται μέσω του υπολογισμού του εμπειρικού συντελεστή επαναιώρησης “K” (m⁻¹), ο οποίος υπολογίζεται διαιρώντας την ατμοσφαιρική συγκέντρωση (Bq/m³) του εκάστοτε ραδιενεργού ισοτόπου με τη συγκέντρωση της επιφανειακής του εναπόθεσης (Bq/m²) βάσει της εξίσωσης (2.2) (IAEA, 1992), (Papastefanou, 2008):

$$k = \frac{C_{air}}{C_{dep}} \quad (2.2)$$

Όπου

C_{air}: η συγκέντρωση ραδιενέργειας του εκάστοτε ραδιενεργού ισοτόπου στον ατμοσφαιρικό αέρα Bq/m³

C_{dep}: η επιφανειακή συγκέντρωση ραδιενέργειας του εκάστοτε ραδιενεργού ισοτόπου Bq/m²

Οι τιμές του συντελεστή επαναιώρησης υπολογίζονται κυρίως για ραδιενεργά ισότοπα που απαντώνται στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα αποκλειστικά λόγω της επαναιώρησής τους από το έδαφος. Ωστόσο, βάσει παρελθοντικών ερευνών έχουν προσδιοριστεί και μέσω των συγκεντρώσεων του ^7Be , και κυμαίνονται από $0.16 \cdot 10^{-3} \text{m}^{-1}$ έως $0.42 \cdot 10^{-3} \text{m}^{-1}$ (Papastefanou & Ioannidou, 1991), (Papastefanou, et al., 1995).

2.4 Παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Από τις σημαντικές δραστηριότητες του ΕΠΤ-ΕΜΠ διαχρονικά είναι η συστηματική παρακολούθηση (monitoring) της ραδιενέργειας περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται με συνεχείς δειγματοληψίες και αναλύσεις του αερολύματος της ατμόσφαιρας (Papandreou, et al., 2011), υγρών και ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων (Savva, et al., 2018), (Mitsios & Anagnostakis, 2020), ενώ όποτε χρειάζεται πραγματοποιούνται δειγματοληψίες από το έδαφος (Anagnostakis, et al., 1996). Στο πλαίσιο των συστηματικών δειγματοληψιών και αναλύσεων, γίνεται μία συνεχής προσπάθεια για τη βελτίωση των τεχνικών δειγματοληψίας και ανάλυσης και την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας και χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης (Minimum Detectable Activity – MDA). Παράλληλα, γίνεται μία συνεχής προσπάθεια ανάπτυξης νέων πρωτοκόλλων δειγματοληψίας και ανάλυσης που να ανταποκρίνονται σε πλήθος περιπτώσεων, είτε αυτές αποτελούν συστηματικές μετρήσεις ρουτίνας είτε μετρήσεις για έκτακτα περιστατικά έκλυσης ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον (Potiriadis, et al., 2013). Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μία πολύ σύντομη περιγραφή των παραπάνω δραστηριοτήτων, με έμφαση σε αυτές που συνδέονται με την επιτήρηση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα.

2.4.1 Δειγματοληψίες και αναλύσεις χόματος

Η συλλογή, η επεξεργασία και η ανάλυση δειγμάτων χόματος βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος του ΕΠΤ-ΕΜΠ για περίπου 40 χρόνια. Πρακτικά ξεκίνησε το 1986 με αφορμή τη διασπορά ραδιενεργών ισωτόπων στον Ελλαδικό χώρο εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl. Έκτοτε, μεγάλο πλήθος δειγμάτων (> 2500) συλλέχθηκε και αναλύθηκε οδηγώντας στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης μίας σειράς ραδιενεργών ισωτόπων σε αυτό (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{125}Sb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{95}Zr , ^{141}Ce , ^{144}Ce ,

^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{54}Mn , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U , ^{210}Pb), καθώς και στη δημιουργία χαρτών που απεικονίζουν την κατανομή τους στο έδαφος της ηπειρωτικής Ελλάδας (Simopoulos, 1989), (Petropoulos, et al., 1995), (Anagnostakis, et al., 1996), (Petropoulos, et al., 2001).

Πέρα από την συλλογή επιφανειακών δειγμάτων χώματος, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ λαμβάνει χώρα και η μελέτη της κατά βάθος κατανομής των ραδιενεργών ισοτόπων (Papadakos, et al., 2017), καθώς και η κατανομή της συγκέντρωσής τους στα διάφορων μεγεθών κοκκομετρικά κλάσματά του (Padovani, et al., 2018), (Savva, et al., 2016), (Mitsios, et al., 2016). Οι τεχνικές δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης των ανωτέρω δειγμάτων έχουν αναπτυχθεί σε προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, (Αναγνωστάκης, 1998), (Καρφόπουλος, 2012), (Μήτσιος, 2016), (Σάββα, 2017).

2.4.2 Δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικού αερολύματος

Οι δειγματοληψίες και αναλύσεις του ατμοσφαιρικού αερολύματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ξεκίνησαν επίσης το 1986, πάλι με αφορμή το ατύχημα στο Chernobyl. Σήμερα, οι δειγματοληψίες αερολύματος λαμβάνουν χώρα σε τακτά χρονικά διαστήματα (μία εβδομάδα το μήνα) με στόχο την παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως φαινόμενα μεταφοράς σκόνης, η συχνότητα των δειγματοληψιών προσαρμόζεται ανάλογα. Για τη δειγματοληψία του ατμοσφαιρικού αερολύματος το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει μία αντλία υψηλής παροχής DH-50810E της εταιρείας F&J τοποθετημένη στην οροφή του Κτιρίου Κ που στεγάζεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ, σε ύψος 8 μέτρα από το έδαφος, καθώς και 5 μικρότερες φορητές αντλίες Staplex TFIA-2 οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στην οροφή του Κτιρίου Κ είτε σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.

Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τις δειγματοληψίες είναι κυρίως φίλτρα κατασκευασμένα από ίνες γυαλιού (glass fiber) και οι τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης που έχουν αναπτυχθεί έχουν οδηγήσει στη στατιστικά σημαντική ανίχνευση των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs από το ατύχημα της Φουκουσίμα (Potiriadis, et al., 2013), (Σάββα, 2017) με τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης να κυμαίνονται από 15 έως 30 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, καθώς και των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be , ^{22}Na , ^{210}Pb , με τα εύρη των συγκεντρώσεών τους να κυμαίνονται μεταξύ 1.0 ± 0.4

έως 10.9 ± 0.8 mBq/m³ για το ⁷Be, από 1.03 ± 0.55 έως 1.29 μBq/m³ για το ²²Na, και από 0.27 ± 0.01 έως 1.69 ± 0.06 mBq/m³ για τον ²¹⁰Pb (Papandreou, et al., 2011), (Καρφόπουλος, 2012), (Σάββα, 2017).



Σχήμα 2.4 : Οι αντλίες DH-50810E της F&J (αριστερά) και Staplex TFIA-2 (δεξιά)

2.4.3 Δειγματοληψίες και αναλύσεις υγρών αποθέσεων

Στα πλαίσια της παρακολούθησης της ραδιενέργειας στις υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχουν υπάρξει κατά καιρούς τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυσή τους. Στην 1^η προσέγγιση τοποθετήθηκαν δειγματολήπτες στην οροφή του Κτιρίου Κ καθώς και σε οροφή κτιρίου στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Στη 2^η και 3^η προσέγγιση, η συλλογή της υγρής απόθεσης – δείγματα βροχοπτώσεων – έγινε με την τοποθέτηση πλαστικών δοχείων στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν είναι συμβατές με τις διαδικασίες Α και Ε που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.12**.

Ειδικότερα, στην **1^η προσέγγιση** που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής του (Παπαδόπουλος, 2010) τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- i. Συλλογή δείγματος βροχόπτωσης σε δοχεία πολυαιθυλενίου μέσω κατάλληλα προσαρμοσμένων χοάνων επιφάνειας 0.04m^2 η κάθε μία.
- ii. Ξέπλυμα του δοχείου συλλογής με διάλυμα HNO_3 συγκέντρωσης 5% και προσθήκη του διαλύματος στο τελικό δείγμα που προορίζεται για προσυγκέντρωση.

- iii. Προσυγκέντρωση του δείγματος με εξάτμιση σε υδατόλουτρο σε θερμοκρασία 80°C, μέχρι τελικού όγκου 250mL.
- iv. Συσκευασία του δείγματος σε κατάλληλη γεωμετρία και γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του.

Η διαδικασία αυτή ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα, καθώς η προσυγκέντρωση μεγάλων όγκων δειγμάτων διαρκεί αρκετές ημέρες. Επίσης, το τελικό δείγμα προς γ-φασματοσκοπική ανάλυση δημιουργεί ίζημα στη βάση του δοχείου συσκευασίας μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων σε αυτό. Μία παραλλαγή της προσέγγισης αυτής ήταν η ραδιοχημική επεξεργασία του δείγματος και ο προσδιορισμός των περιεχόμενων σε αυτό ραδιενεργών ισοτόπων με μεθόδους α-φασματοσκοπίας, καθώς και με τη μέθοδο ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού (Kinetic Phosphorescence Analysis, KPA), οι οποίες όμως ξεφεύγουν από τα πλαίσια ενδιαφέροντος της παρούσας Δ.Δ.. Με χρήση των ανωτέρω μεθόδων προσδιορίστηκε στα δείγματα βρόχινου νερού από την περιοχή Αθηνών και Μεγαλόπολης συγκέντρωση ^{238}U με εύρος από 2.2 ± 0.6 mBq/kg έως 90 ± 14 mBq/kg. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία του (Παπαδόπουλος, 2010).

Στη **2^η προσέγγιση** που εφαρμόστηκε από τους (Papandreou, et al., 2011) τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- i. Συλλογή του δείγματος βροχόπτωσης σε πλαστικά δοχεία συνολικής επιφάνειας 1m^2 με παράλληλη παρακολούθηση του ύψους της βροχόπτωσης.
- ii. Ξέπλυμα των δοχείων με 1N HNO_3 και συλλογή του συνόλου του δείγματος σε μικρότερα πλαστικά δοχεία.
- iii. Φιλτράρισμα του δείγματος μέσα από φίλτρα Whatman no. 42 διαμέτρου 90mm και παράλληλο ξέπλυμα των πλαστικών δοχείων με 1N HNO_3 . (ένα φίλτρο ανά 2L δείγματος).
- iv. Συσκευασία του συνόλου των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κατάλληλα βαθμονομημένη γεωμετρία και ανάλυσή τους με γ-φασματοσκοπία, με στόχο τον προσδιορισμό του ^7Be .
- v. Αργή εξάτμιση του υγρού που προέκυψε από το φιλτράρισμα για μείωση του όγκου του και ανάλυσή με γ-φασματοσκοπία σε τυποποιημένη γεωμετρία όγκου.

Με τη διαδικασία αυτή η συγκέντρωση του ^7Be στα φίλτρα που αναλύθηκαν είχε εύρος από 0.09 ± 0.02 έως 3.24 ± 0.06 Bq/L (Papandreou, et al., 2011). Ωστόσο, μετρήθηκε ^7Be και στο υγρό που συλλέχθηκε από το φιλτράρισμα, γεγονός που αναδεικνύει την αδυναμία συγκράτησης του συνόλου του ^7Be από τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτός άλλωστε ήταν και ο λόγος για τον οποίο συνέχισε η προσπάθεια βελτίωσης της τεχνικής που οδήγησε στην 3^η προσέγγιση.

Στην 3^η προσέγγιση που τυποποιήθηκε και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής της (Σάββα, 2017) τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- i. Δειγματοληψία των υγρών κατακρημνίσεων με χρήση πλαστικών δοχείων συνολικής επιφάνειας 0.75m^2 .
- ii. Συλλογή του δείγματος και ρύθμιση του pH ≈ 5 , ώστε να αποφεύγεται η υδρόλυση των κατιόντων των μετάλλων.
- iii. Προσθήκη 1gr ρητίνης κατιόντων τύπου DOWEX[®] 50WX8 ανά 1L δείγματος με ελάχιστη ποσότητα τα 20gr ρητίνης για δείγματα έως 20L, ώστε να επιτευχθεί ελάχιστος τυποποιημένος όγκος ρητίνης προς ανάλυση.
- iv. Ανάδευση του δείγματος με τη ρητίνη για $\sim 1\text{h}$.
- v. Φιλτράρισμα του διαλύματος για την κατακράτηση της ρητίνης.
- vi. Ήπια ξήρανση της ρητίνης σε δοχείο που περιέχει Silica Gel.
- vii. Συσκευασία της ρητίνης σε τυποποιημένη γεωμετρία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση.
- viii. Προετοιμασία δείγματος όγκου 282cm^3 από το υγρό που προέκυψε από το φιλτράρισμα και γ-φασματοσκοπική ανάλυση για επιβεβαίωση απουσίας⁸ ραδιενεργών ισotόπων σε αυτό.

Με τη διαδικασία αυτή (3^η προσέγγιση) στα τελικά δείγματα ρητίνης μετρήθηκε (Savva, et al., 2018):

- συγκέντρωση ^7Be με εύρος από 0.67 ± 0.02 έως 2.21 ± 0.08 Bq/L,
- συγκέντρωση ^{210}Pb με εύρος από 22.4 ± 4.9 έως 278.0 ± 14.2 mBq/L
- συγκέντρωση ^{40}K με εύρος από 10.4 ± 7.8 έως 138.3 ± 33.2 mBq/L

ενώ δεν ανιχνεύεται κανένα από τα ισotόπα αυτά στο νερό μετά το φιλτράρισμα.

⁸ Στην πραγματικότητα αυτό που διαπιστώνεται στην περίπτωση μη-ανίχνευσης είναι ότι η ποσότητα ^7Be στο φίλτρο είναι κάτω από τα όρια ανίχνευσης.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των τριών παραπάνω προσεγγίσεων, η χρήση της ρητίνης είναι αποδοτικότερη και οδηγεί στην πλήρη συγκράτηση των ραδιενεργών ισοτόπων στη ρητίνη. Για τον λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. επιλέχθηκε να εφαρμοσθεί – ως βάση – η μεθοδολογία που στηρίζεται στη χρήση ρητίνης, αφού εξελιχθεί, τυποποιηθεί και προσαρμοστεί κατάλληλα για δείγματα υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

2.4.4 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα περιβαλλοντικά δείγματα που συλλέγονται και επεξεργάζονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ αναλύονται με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας. Αντιστοίχως, και στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ., το σύνολο των συλλεχθέντων δειγμάτων αναλύθηκε με τη μέθοδο αυτή.

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι μία μη καταστροφική μέθοδος προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων. Η λειτουργία της βασίζεται στην επεξεργασία του φάσματος των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων. Με τη γ-φασματοσκοπία επιτυγχάνεται ο ποιοτικός προσδιορισμός του είδους των πυρήνων που διασπώνται, δηλαδή του αντίστοιχου ραδιενεργού ισοτόπου. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται και η ποσοτική εκτίμηση του πλήθους των πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου, για κάθε είδος πυρήνα δηλαδή, υπολογίζεται η ραδιενέργεια του δείγματος. Η γ-φασματοσκοπία είναι μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ραδιομετρικές τεχνικές, καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, εν συγκρίσει με τις άλλες μεθόδους ανάλυσης, όπως για παράδειγμα με την α-φασματοσκοπία:

- Η πλειοψηφία των ραδιενεργών ισοτόπων που συνήθως μελετώνται εκπέμπουν ακτίνες-γ.
- Είναι μη καταστροφική μέθοδος.
- Αναλύει ταυτόχρονα όλα τα γ-ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται σε ένα δείγμα, χωρίς να απαιτείται ειδική διαδικασία για το κάθε ένα από αυτά.
- Δεν απαιτείται σύνθετη προετοιμασία ή ραδιοχημική επεξεργασία των δειγμάτων.

Η ανάλυση των γ-φασμάτων που συλλέγονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποιείται με τη χρήση του κώδικα SPUNAL (SPectrum UNix AnaLysis), ο οποίος είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN 77 και έχει εξ' ολοκλήρου αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Simopoulos, 1989). Οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του εν λόγω κώδικα έχουν

διερευνηθεί εκτενώς στις διδακτορικές διατριβές των (Αναγνωστάκης, 1998) και (Καρφόπουλος, 2012), και τα αποτελέσματά των αναλύσεων του κώδικα επιβεβαιώνονται μέσα από την τακτική συμμετοχή του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε Ασκήσεις Διασύγκρισης που οργανώνονται από το δίκτυο ALMERA⁹ του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας, καθώς και από Ασκήσεις Διασύγκρισης αντίστοιχων λογισμικών γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (Ali Santoro, et al., 2020). Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφονται οι ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιούνται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση και παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα θέματα που άπτονται της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ιδιαίτερα στην περίπτωση ανάλυσης δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας.

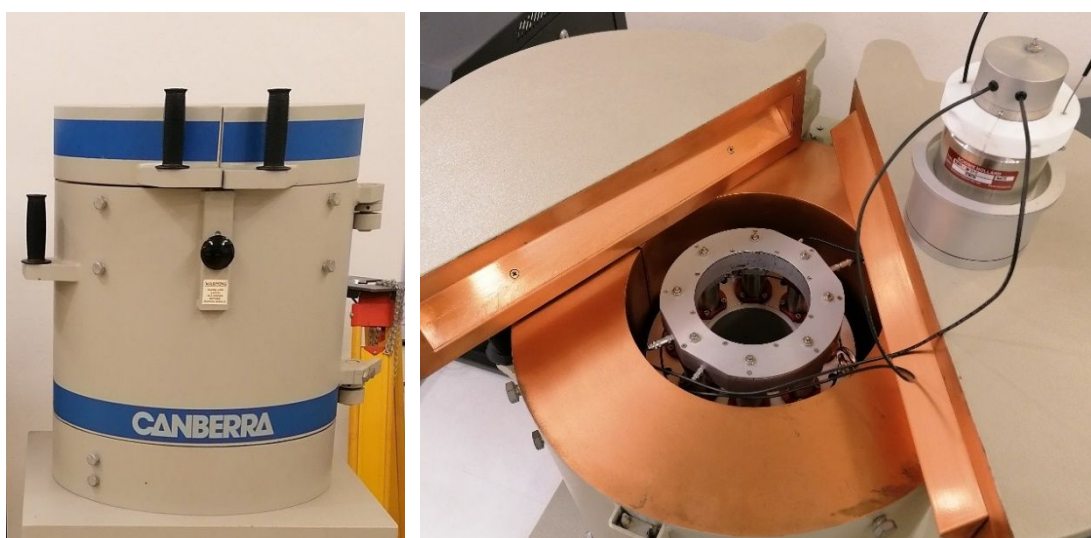
2.4.4.1 Οι ανιχνευτές γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το σύνολο των δειγμάτων που αναλύεται με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γίνεται με χρήση ανιχνευτών υπερκαθαρού γερμανίου (High Purity Germanium, HPGe). Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει 5 τέτοιους ανιχνευτές, εκ των οποίων οι 4 χρησιμοποιούνται για μετρήσεις στο εργαστήριο και ένας για μετρήσεις πεδίου (in-situ). Συνοπτικά, οι ανιχνευτές μαζί με τις ηλεκτρονικές συνιστώσες που συγκροτούν την ανιχνευτική διάταξη παρατίθενται στη συνέχεια:

- i. Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου εκτεταμένου εύρους (Extended Range, XtRa) με σύστημα μείωσης συνεχούς υποστρώματος (Compton Suppression System, CSS) (ΣΑΒΒΑ, 2017). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1999 (XtRa), ενώ η προσθήκη του συστήματος Compton Suppression έγινε αργότερα (Savva, et al., 2014). Οι επιμέρους συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης είναι:
 - a. Βασική ανιχνευτική διάταξη XtRa – συμβατικός κλάδος διάταξης:
 - Ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου εκτεταμένου εύρους (XtRa), της Canberra Industries (CI),
 - Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της CI,
 - Προενισχυτής τύπου 2002CSL της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη,
 - Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2026 της CI,
 - Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8701 της CI,
 - Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-556A της CI,
 - Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN₂), τύπου 1786A της CI,

⁹ Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity.

- Θωράκιση, τύπου 767 της CI.
- b. Κλάδος εγκατεστημένου συστήματος Compton Suppression:
- Δακτυλιοειδές τμήμα και τμήμα plug NaI,
 - Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3002D της CI,
 - Προενισχυτής, τύπου 2005 της CI,
 - Ενισχυτής, τύπου 2006 της CI,
 - Ενισχυτής, τύπου 2020 της CI,
 - Μονάδα ελέγχου σύμπτωσης, τύπου 2040 της CI,
 - Multiport II, της CI.



Σχήμα 2.5 : Η ανιχνευτική διάταξη XtRa-CSS του ΕΠΠ-ΕΜΠ.

Ο ομοαξονικός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου έχει διάμετρο 80 mm, ύψος 78 mm και σχετική απόδοση 104.5%. Η απόσταση του κρυστάλλου από τον κρυστάτη είναι 5 mm και το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα πάχους 0.5 mm. Το μέγεθος του ανιχνευτή σε συνδυασμό με το λεπτό παράθυρο από ανθρακονήματα τον καθιστούν κατάλληλο για ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών και του δίνουν υψηλή ανιχνευτική απόδοση σε μεγάλο ενεργειακό εύρος. Το δακτυλιοειδές τμήμα του ανιχνευτή NaI του CSS έχει εσωτερική διάμετρο $\varnothing 111$ mm, εξωτερική διάμετρο $\varnothing 195$ mm και ύψος 267 mm. Το τμήμα plug του ανιχνευτή NaI του CSS έχει διάμετρο κρυστάλλου $\varnothing 103$ mm και ύψος κρυστάλλου 51 mm. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνδυαζόμενα με το σύστημα Compton Suppression συνιστούν μια ανιχνευτική διάταξη που μπορεί να πετύχει εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους εύρους ημίσειας ύψους (FWHM) είναι:

- 1.03 keV για ενέργεια φωτονίων 122.06 keV,

- 2.043 keV για ενέργεια φωτονίων 1332.5 keV.

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 82.2:1.

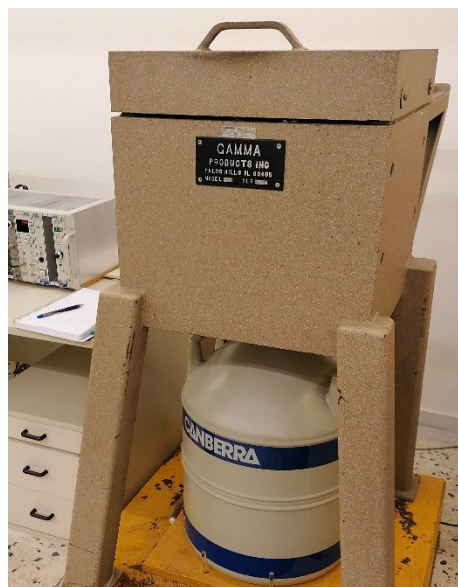
- ii. Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1983 και οι επιμέρους συνιστώσες της είναι:
 - Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), της CI,
 - Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της CI,
 - Προενισχυτής, τύπου 2001 της CI,
 - Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI,
 - Αναλογοψηφιακός μετατροπέας τύπου 8701 της CI,
 - Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI,
 - Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN₂), τύπου 1786 της CI.

Ο συγκεκριμένος ομοαξονικός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) έχει διάμετρο Ø55.3 mm, ύψος 65 mm και σχετική απόδοση 33.8%. Είναι τοποθετημένος σε κρυοστάτη από Al, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την απόδοσή του για φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Η διακριτική του ικανότητα σε όρους FWHM είναι:

- 0.85 keV για φωτόνια ενέργειας 122.06 keV,
- 1.78 keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV.

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 66.5:1.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής θα αναφέρεται ως ανιχνευτής «Ge1».



Σχήμα 2.6 : Η ανιχνευτική διάταξη Ge1 του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

iii. Ανιχνευτής γερμανίου χαμηλών ενεργειών (Low Energy Germanium Detector, LEGe). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1988 και είναι κατάλληλα βαθμονομημένη, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε στην ενεργειακή περιοχή 20-200 keV, είτε στην ενεργειακή περιοχή 20-2000 keV. Οι επιμέρους συνιστώσες της διάταξης είναι:

- Επίπεδος ανιχνευτής γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe) της CI,
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI,
- Προενισχυτής τύπου 2001CP της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη,
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI,
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8075 της CI,
- Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI,
- Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN₂), τύπου 1786A της CI.

Ο συγκεκριμένος επίπεδος ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου είναι τύπου n, κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου Ø50.5 mm, επιφάνειας 2000 mm² και ύψους 20 mm. Η χρήση του εν λόγω ανιχνευτή εστιάζει στην ανίχνευση χαμηλής ενέργειας φωτονίων, καθώς το κατασκευασμένο από Be και πάχους 0.5 mm παράθυρο του κρυοστάτη συμβάλλει στην πολύ μικρή εξασθένησή τους. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους FWHM είναι:

- 341 eV για φωτόνια ενέργειας 5.9 keV,
- 530 eV για φωτόνια ενέργειας 122 keV.



Σχήμα 2.7 : Η ανιχνευτική διάταξη LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

iv. Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 2012 και οι συνιστώσες της είναι:

- Ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου (HPGe) της CI,
- Μονάδα LYNX[®] της CI που περιέχει ενσωματωμένες όλες τις ηλεκτρονικές μονάδες παροχής υψηλής τάσης, λήψης και επεξεργασίας ηλεκτρικού σήματος που απαιτούνται για τη λειτουργία του ανιχνευτή.

Ο συγκεκριμένος ομοαξονικός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου έχει διάμετρο Ø59.5 mm, ύψος 61 mm και σχετική απόδοση 40.9%. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρυστάτη από Al γεγονός που μειώνει την απόδοση για φωτόνια που βρίσκονται στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους FWHM:

- 0.875 keV για ενέργεια φωτονίων 122.06 keV,
- 1.8 keV για ενέργεια φωτονίων 1332.50 keV.

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 63:1.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής θα αναφέρεται ως ανιχνευτής «Ge2».



Σχήμα 2.8 : Η ανιχνευτική διάταξη Ge2 του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

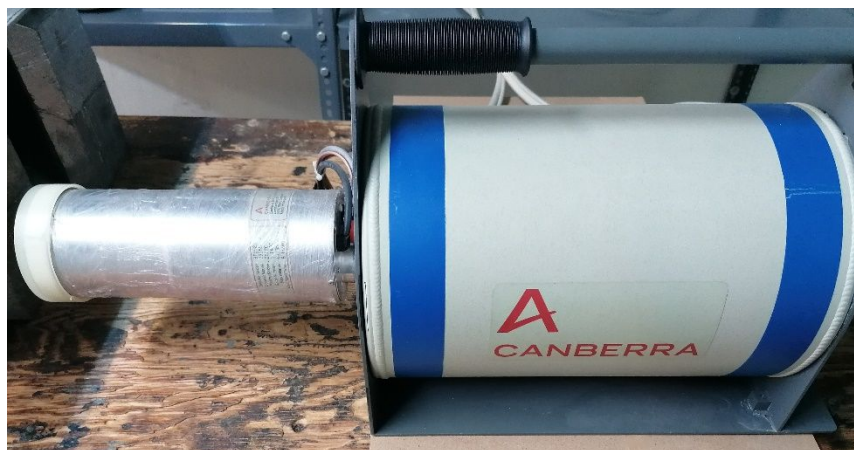
v. Ο ανιχνευτής γερμανίου ευρείας ενεργειακής περιοχής (Broad Energy Germanium Detector, BEGe). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 2003 και οι συνιστώσες της είναι:

- Ανιχνευτής BEGe, τύπου BE3825 της CI,

- Προενισχυτής, τύπου 7935-SL7 ενσωματωμένος στον κρυστάτη,
- Μονάδα Inspector 2000 της CI που περιέχει ενσωματωμένες όλες τις ηλεκτρονικές μονάδες παροχής υψηλής τάσης, λήψης και επεξεργασίας ηλεκτρικού σήματος που απαιτούνται για τη λειτουργία του ανιχνευτή.

Ο ανιχνευτής έχει διάμετρο $\varnothing 70$ mm, επιφάνεια 3800 mm² και πάχος 25 mm. Το παράθυρο από ανθρακονήματα που διαθέτει σε συνδυασμό με τη σχετικά καλή του απόδοση και διακριτική ικανότητα, επιτρέπει την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών και τη χρήση του σε όλο το επιθυμητό ενεργειακό εύρος. Βάσει της κατασκευής του η κυρίαρχη χρήση του είναι για μετρήσεις πεδίου (in situ). Τα χαρακτηριστικά του όμως, τον καθιστούν σημαντικό και για μετρήσεις μέσα στο εργαστήριο και για τον σκοπό αυτό έχουν γίνει μελέτες για τη δημιουργία θωράκισης, καθώς και κατάλληλης βαθμονόμησης ενέργειας, διακριτικής ικανότητας και απόδοσης (Σπανίδης, 2021). Η διακριτική του ικανότητα σε όρους FWHM είναι:

- 0.440 keV για ενέργεια φωτονίων 5.9 keV,
- 0.658 keV για ενέργεια φωτονίων 122 keV,
- 1.780 keV για ενέργεια φωτονίων 1332.50 keV.



Σχήμα 2.9 : Η ανιχνευτική διάταξη BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. χρησιμοποιήθηκαν οι ανιχνευτές 1-4 με τη σειρά που αναφέρονται στην παραπάνω λίστα. Τα πιστοποιητικά των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

2.4.4.2 Προσδιορισμός της ενεργότητας δείγματος

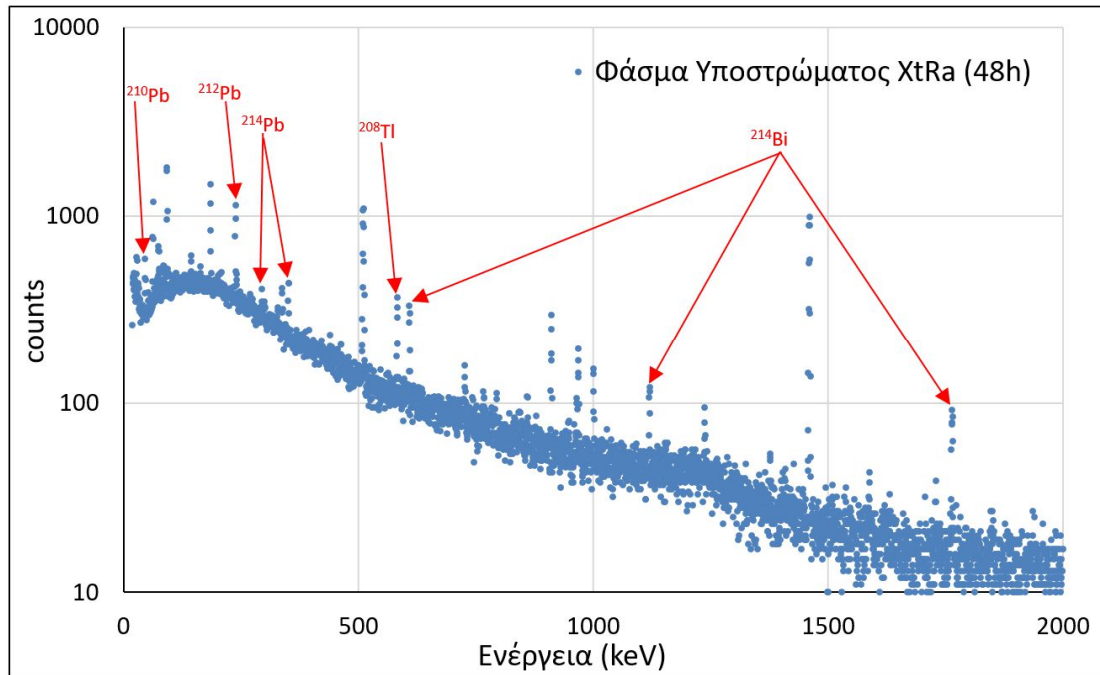
Ανεξαρτήτως της προέλευσης ενός δείγματος ή της διαδικασίας με την οποία επεξεργάστηκε και συσκευάστηκε, για τον προσδιορισμό της τελικής ενεργότητας των

περιεχόμενων σε αυτό ραδιενεργών ισοτόπων λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω βήματα, με το κάθε ένα από αυτά να εισάγει αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα:

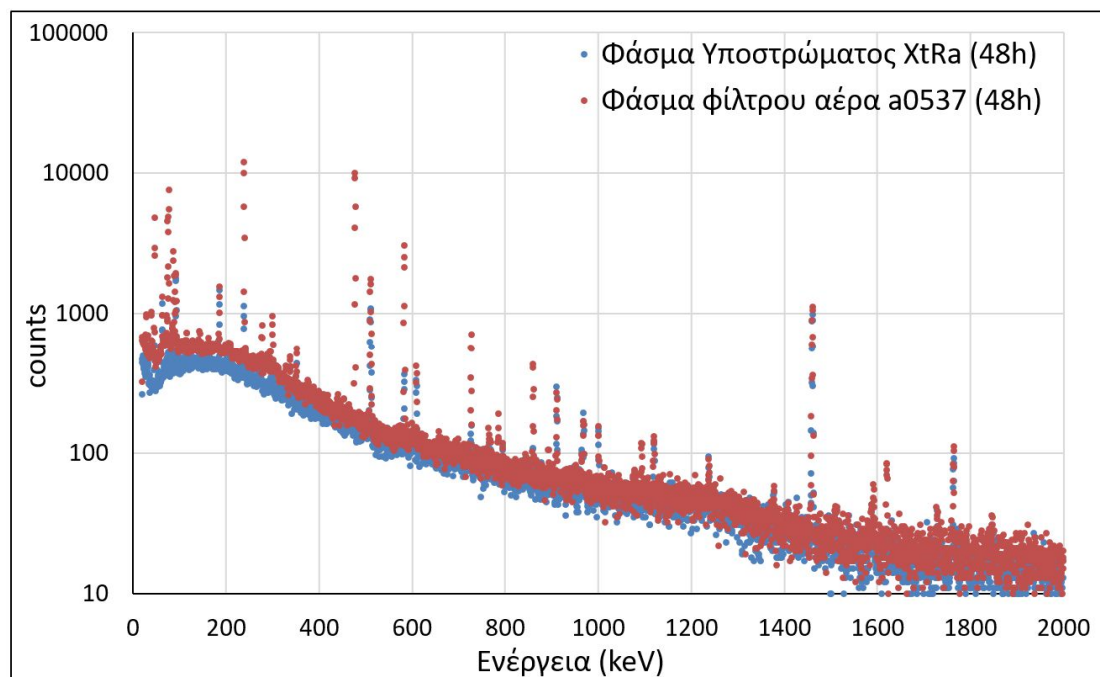
- i. Προσδιορισμός της καθαρής επιφάνειας της φωτοκορυφής. Υπολογίζεται απευθείας από το λογισμικό ανάλυσης του φάσματος (στην προκειμένη περίπτωση τον κώδικα SPUNAL).
- ii. Αφαίρεση του υποστρώματος λόγω φωτοκορυφών. Συνήθως γίνεται αυτόματα από το λογισμικό φασματοσκοπικής ανάλυσης, υπό την προϋπόθεση ότι έχει γίνει η κατάλληλη μέτρηση του υποστρώματος και εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη. Το υπόστρωμα αυτό παρουσιάζει κύμανση χρονικά, κυρίως το τμήμα του που οφείλεται στα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου (**Σχήμα 2.10**), τόσο μέσα στην ημέρα, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του ανιχνευτή. Όπως γίνεται σαφές από τα παραπάνω, έχει πολύ μεγάλη σημασία η ακριβής εκτίμηση του υποστρώματος, της κύμανσής του και της αντίστοιχης αβεβαιότητας που το συνοδεύει, ιδιαίτερα για δείγματα με πολύ χαμηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η συστηματική λήψη φασμάτων υποστρώματος, καθώς και η λήψη μέτρων για τον περιορισμό της κύμανσής του.
- iii. Επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης,¹⁰ συνοδευόμενη με την κατάλληλη αβεβαιότητα.
- iv. Εφαρμογή – εφόσον απαιτείται – κατάλληλων διορθώσεων λόγω του φαινομένου της αυταπορρόφησης.
- v. Εφαρμογή διορθώσεων για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης φωτονίων (true coincidence) για τα φωτόνια που είναι απαραίτητο (οι συντελεστές διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς της παρούσας Δ.Δ. υπολογίσθηκαν με χρήση του προγράμματος TrueCoinc, Version 1.5 (IAEA, 2002). Ειδικά για τις διορθώσεις αυτές πρέπει να τονισθεί ότι έχουν ιδιαίτερη σημασία για την περίπτωση μικρού πάχους δειγμάτων που βρίσκονται πολύ κοντά στον ανιχνευτή και για ανιχνευτές υψηλής απόδοσης, όπως είναι ο ανιχνευτής XtRa.

Στο **Σχήμα 2.11** γίνεται σύγκριση ενός φάσματος ανάλυσης φίλτρου αέρα στον ανιχνευτή XtRa, με ισόχρονο φάσμα υποστρώματος στον ίδιο ανιχνευτή.

¹⁰ Η οποία μπορεί να έχει προσδιορισθεί πειραματικά, μέσω προσομοίωσης ή με συνδυασμό.



Σχήμα 2.10: Φάσμα υποστρώματος του ανιχνευτή ΧtRa, όπου επισημαίνονται οι κυρίαρχες φωτοκορυφές υποστρώματος που οφείλονται στα θυγατρικά του ^{222}Rn και του ^{220}Rn .



Σχήμα 2.11: Σύγκριση φάσματος υποστρώματος 48h και ισόχρονου φάσματος φίλτρου αέρα στον ανιχνευτή ΧtRa.

2.4.4.3 Επίδραση των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις

Παρότι κατά τη διάσπαση του ραδονίου και του θορονίου δεν εκπέμπεται γ-ακτινοβολία που να επιδρά στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, τα θυγατρικά τους

ραδιενεργά ισότοπα (όπως δίνονται στον **Πίνακα 2.1**) εκπέμπουν γ-ακτινοβολία η οποία συνεισφέρει στο φυσικό ραδιενεργό υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων και δημιουργεί προβλήματα στον προσδιορισμό των περιεχόμενων στα δείγματα ραδιενεργών ισωτόπων, καθώς και στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, η αυξημένη συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου είτε στο δείγμα που αναλύεται, είτε στο χώρο όπου γίνεται η ανάλυση :

- δυσχεραίνει την ανίχνευση αυξάνοντας τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης άλλων ραδιενεργών ισωτόπων που βρίσκονται στο δείγμα σε χαμηλές συγκεντρώσεις,
- αυξάνει την αβεβαιότητα προσδιορισμού του ^{226}Ra και του ^{228}Ra στα δείγματα, μέσω των θυγατρικών τους, ενώ μπορεί να οδηγήσει και σε λανθασμένη θετική ή αρνητική ανίχνευση των εν λόγω ραδιενεργών ισωτόπων,
- μπορεί να οδηγήσει τους ερευνητές σε εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων για την ύπαρξη ραδιενεργών ισωτόπων που δε βρίσκονται στην πραγματικότητα στο δείγμα (false positive)¹¹ αλλά έχουν κοινές φωτοκορυφές με φωτοκορυφές των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου.

Για τον περιορισμό των παραπάνω επιδράσεων έχουν λάβει χώρα διάφορες μελέτες (Dragounova & Rulik, 2013) (Bossey, 2005) (Trnkova & Rulik, 2009), (Hyza, et al., 2019) (Banjanac, et al., 2013), με τις βασικές μεθόδους περιορισμού να περιγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

2.4.4.4 Τεχνικές περιορισμού της επίδρασης της κύμανσης του ραδονίου, του θορονίου και των θυγατρικών τους στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις

Μεγάλο πλήθος μελετών έχει λάβει χώρα με σκοπό την ανάπτυξη τεχνικών μείωσης και ελέγχου της επίδρασης του ραδονίου του θορονίου¹² και των θυγατρικών τους στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις (El-Hussein, 1996), (Mohamed, et al., 2008), (Trnkova & Rulik, 2009), (Banjanac, et al., 2013), (Radulescu, et al., 2013), (Zeng, et al., 2014), (Laubenstein & Lawson, 2020). Οι προτεινόμενες τεχνικές είναι είτε ενεργητικές είτε παθητικές.

¹¹ Αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση ασυνήθιστα μεγάλων συγκεντρώσεων ^{226}Ra , ^{228}Ra ή ^{224}Ra .

¹² Πρακτικά η συγκέντρωση θορονίου και των θυγατρικών του στον αέρα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αμελητέα και δεν αποτελεί πρόβλημα.

Βασική ενεργητική τεχνική είναι ο συνεχής αερισμός του χώρου του εργαστηρίου με φρέσκο ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος διέρχεται από σύστημα φίλτρων για τον καθαρισμό του από τη σκόνη και τα σωματίδια και την απορρόφηση του ραδονίου.

Στις παθητικές τεχνικές περιλαμβάνονται:

- η ερμητική θωράκιση των εσωτερικών επιφανειών του εργαστηρίου με σκοπό την αποτροπή της διάχυσης του ραδονίου και του θορονίου στον χώρο,
- η χρήση καθαρών υλικών από ραδιενεργά ισότοπα στις θωρακίσεις των ανιχνευτών και σε ό,τι εξάρτημα είναι αυτό δυνατό,
- η χρήση γυαλισμένου μολύβδου στις θωρακίσεις, ο οποίος θα καθαρίζεται συχνά εσωτερικά, ώστε να μην επηρεάζονται οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις από τα θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου τα οποία έχουν επικαθίσει στο εσωτερικό των θωρακίσεων,
- η πλήρωση του ελεύθερου όγκου μεταξύ δείγματος και θωράκισης με στεγανό και χαμηλής πυκνότητας υλικό ή με χρήση συστήματος Compton Suppression (Savva, et al., 2014) που λόγω του όγκου του περιορίζει τον διαθέσιμο όγκο ραδονίου που μπορεί να εισέλθει εσωτερικά της ανιχνευτικής διάταξης,
- η διοχέτευση της εξάτμισης του δοχείου αζώτου του εκάστοτε ανιχνευτή (dewar) στο εσωτερικό του ανιχνευτή, με στόχο τη μειωμένη εισροή ραδονίου και θορονίου καθώς και των θυγατρικών τους.

Οι τρεις τελευταίες τεχνικές έχουν κατά καιρούς εφαρμοσθεί είτε εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Ειδικά για την ανάλυση φίλτρων αερολύματος, μία ακόμα λύση για επίτευξη χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης είναι και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της λήψης ενός δείγματος-φίλτρου και της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσής του. Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει μελέτες οι οποίες ερευνούν διάφορα σενάρια δειγματοληψίας-καθυστέρησης-ανάλυσης του φίλτρου, με στόχο τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων (Bem, et al., 2002), (Korun, 2006), (Stochioiu, et al., 2008), (EPA, 2009), (Hyza, et al., 2019). Αντίστοιχη διερεύνηση έλαβε χώρα και στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ, ειδικά για δειγματοληψίες μεγάλης χρονικής διάρκειας.

2.5 Βασικοί στόχοι Διδακτορικής Διατριβής

Με βασικό στόχο την επέκταση των δυνατοτήτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ ως προς την ολοκληρωμένη παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. επιχειρείται επέκταση των τεχνικών δειγματοληψίας, ώστε να συμπεριληφθούν όλα τα είδη ατμοσφαιρικών αποθέσεων και να επιτευχθούν όσο το δυνατόν υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας των μετρήσεων και χαμηλότερα επίπεδα ανίχνευσης, ώστε να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση του ρυθμού ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Προς την κατεύθυνση αυτή η παρούσα Δ.Δ. κινήθηκε σε δύο κατευθύνσεις:

- i. Ανάπτυξη τεχνικών δειγματοληψίας και επεξεργασίας δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
- ii. Βελτίωση της ακρίβειας και των επιπέδων ανίχνευσης των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των δειγμάτων. Για τον σκοπό αυτό και λαμβάνοντας υπόψη όσα με λεπτομέρεια αναπτύχθηκαν στις παραγράφους που προηγήθηκαν, έγινε:
 - διερεύνηση της επίδρασης που έχει η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (^{222}Rn) και των θυγατρικών του στον εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας,
 - διερεύνηση της κύμανσης των φωτοκορυφών του υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ,
 - διερεύνηση της επίδρασης που έχει στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου πάνω στα φίλτρα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια δειγματοληψιών αέρα μεγάλης διάρκειας,
 - διερεύνηση της επίδρασης που έχουν τα θυγατρικά του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα στη συνολική ποσότητα του ^{210}Pb που συλλέγεται στα φίλτρα δειγματοληψίας αέρα.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων επέτρεψε εν συνεχεία τη συστηματική δειγματοληψία υγρών και ξηρών αποθέσεων και συσχέτιση των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων σε αυτές με διάφορες παραμέτρους καθώς και χρήση τους σε ατμοσφαιρικά μοντέλα.

2.6 Συμπληρωματικοί πίνακες και σχήματα του 2^ο Κεφαλαίου

Στον *Πίνακα 2.3* που ακολουθεί παρατίθενται ερευνητικές μελέτες που εστιάζουν στη δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων, οι βασικές μέθοδοι δειγματοληψίας και επεξεργασίας τους, καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους.

Πίνακας 2.3: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του ²¹⁰Pb και του ⁷Be στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις για πλήθος διαφορετικών περιοχών και μεθόδων επεξεργασίας.

²¹⁰ Pb Bq/(y·m ²)	⁷ Be Bq/(y·m ²)	Χρονικό βήμα δειγματοληψίας	Χρονική περίοδος	Μέθοδος δειγματοληψίας	Βασική μέθοδος επεξεργασίας	Μέθοδος ανάλυσης	Περιοχή	Βιβλιογραφική αναφορά
257	-	15 ημέρες	1999-2000	Βροχόμετρο 400cm ² , 20L	Φιλτράρισμα μέσα από φίλτρα κυτταρίνης ιοντοανταλλαγής (Macherey Nagel type MN616 LSA and LSB filters)	γ-φασματοσκοπία	Petit-Saut, French Guiana	(Melieres, et al., 2003)
47	700	1 μήνας	2010-2011	Δοχεία Πολυαιθυλενίου, 1.25m ² , 50L, οξεινισμένο με HCL	Πλήρης Ξήρανση	γ-φασματοσκοπία	Cienfuegos, Cuba	(Alonso-Hernandez, et al., 2014)
55	-	1 εβδομάδα	1987	Συλλέκτες Βροχής συνδεδεμένοι με δοχείο οξεινισμένο με νιτρικό οξύ	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb με χρήση Fe(OH) ₃	α-φασματοσκοπία για το ²¹⁰ Po μέσω του οποίου υπολογίστηκε ο ²¹⁰ Pb	Groningen, Holland	(Beks, et al., 1998)
60			1988					
56			1989					
47			1990					
57			1991					
85			1992					
100			1993					
91			1994					
479	2070	15 ημέρες	2006	Ατσάλινος συλλέκτης 3m ² με κεραμική επιφάνεια	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Shanghai, China	(Du, et al., 2008)

73 ± 8.0	-	από 1 έως 30 ημέρες	1997-1998	Συλλέκτης 1m ²	Φιλτράρισμα μέσα από φίλτρο Nucleopore με μέγεθος πόρου 0.22μm	α-φασματοσκοπία για το ²¹⁰ Po μέσω του οποίου υπολογίστηκε ο ²¹⁰ Pb	Odawa, Japan	(Tateda & Iwao, 2008)
197 ± 35							Tsuyazaki, Japan	
78.5 ± 8.0							Akajima, Japan	
103	1256	1 μήνας	2006-2007	Μέτρηση από το <i>Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire</i>			Bordeaux, France	(Saari, et al., 2010)
182	918	1 μήνας	2001	Πλαστικός συλλέκτης 4m ²	Πλήρης Ξήρανση	γ-φασματοσκοπία	Tsukuba, Japan	(Hirose, et al., 2004)
234	1474		2001	Πλαστικός συλλέκτης 3.7m ²			Nagasaki, Japan	
150 ± 3	2087 ± 23	από 1 έως 22 ημέρες	1997-1998	Κυλινδρικός συλλέκτης πολυαιθυλενίου 0.275m ²	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Versoix, Switzerland	(Caillet, et al., 2001)
1054	5300	1 μήνας	1991-2002	Δοχείο από ανοξείδωτο ατσάλι 0.5m ²	Φιλτράρισμα από ρητίνες ανιόντων και κατιόντων	γ-φασματοσκοπία	Tatsunokuchi, Japan	(Yamamoto, et al., 2006)
-	1536	από 3 έως 30 ημέρες	2009-2010	Πλαστικά δοχεία 0.05m ²	Συγκαθίζηση με MnO ₂	γ-φασματοσκοπία	Plymouth, UK	(Taylor, et al., 2016)
	1021						Chilton, UK	
	1548						Aberporth, UK	
-	1030 ± 100	1 μήνας	1988-1989	Υγρές αποθέσεις μέσω γαλινής οροφής 77.5m ² Ξηρές αποθέσεις μέσω κολλώδους επιφάνειας 2.4m ²	Συγκαθίζηση με MnO ₂ (για τις υγρές αποθέσεις)	γ-φασματοσκοπία	Black Mountain, Australia	(Wallbrink & Murray, 1994)
123	1468	ανά συμβάν βροχόπτωσης ή ανά 10 ημέρες	2003-2004	Δοχεία πολυαιθυλενίου επιφάνειας 0.28m ²	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Tampa Bay, Florida, USA	(Baskaran & Swarzenski, 2007)

-	861.4	ανά συμβάν βροχόπτωσης και μεταξύ αυτών	1987	Χοάνες συνολικής επιφάνειας 1.12m ²	Μερική εξάτμιση δείγματος για τελικό όγκο 1L	γ-φασματοσκοπία	Thessaloniki, Greece	(Ioannidou & Papastefanou, 2006)
	457.9		1988					
	487.0		1989					
	733.2		1990					
	712.8		1991					
	1164.1		1992					
172	2450	ανά συμβάν βροχόπτωσης και ανά 7 ή 14 ημέρες	1989-1991	Δοχεία πολυαιθυλενίου επιφάνειας 0.28m ²	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Galveston, Texas USA	(Baskaran, et al., 1993)
-	1070 ± 100	1 μήνας	2004	Χοάνη από ανοξειδωτο ατσάλι επιφάνειας 0.57m ²	Μερική εξάτμιση δείγματος για τελικό όγκο 1L	γ-φασματοσκοπία	Brisbane, Australia	(Doering & Akber, 2008)
	1164 ± 92		2005					
	1362 ± 100		2006					
-	841	ανά συμβάν βροχόπτωσης και μεταξύ αυτών	1987	Χοάνες επιφάνειας 1.12m ²	Μερική εξάτμιση δείγματος για τελικό όγκο 1L	γ-φασματοσκοπία	Thessaloniki, Greece	(Papastefanou & Ioannidou, 1991)
	540		1988					
	483		1989					
221	2026	ανά συμβάν βροχόπτωσης ή ανά μήνα για τις ξηρές αποθέσεις	2016-2017	Δοχείο πολυαιθυλενίου επιφάνειας 0.1017m ² για υγρές αποθέσεις & ατσάλινες επιφάνειες για ξηρές αποθέσεις	Πλήρη εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Mangalore, India	(Mohan, et al., 2019)
-	6350	1 εβδομάδα	1985-1986	Συλλέκτης από ανοξειδωτο ατσάλι επιφάνειας 0.93m ²	Χρήση ρητίνης ιοντοανταλλαγής	γ-φασματοσκοπία	Hokitika, New Zealand	(Harvey & Matthews, 1989)

-	767	-	1956	-	Συγκαθίζηση με χρήση E.D.T.A. (Goel, et al., 1959)	γ-φασματοσκοπία	Kodai Kanal, India	(Thor & Zutshi, 1958)
	677						Mumbai, India	
215	2155	Συλλογή φίλτρων αέρα ανά 2000m ³	1997-1999	-	Υπολογισμός των ρυθμών εναπόθεσης μέσω της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του ⁷ Be και του ²¹⁰ Pb και των ταχυτήτων εναπόθεσής τους	γ-φασματοσκοπία	Arabian Sea	(Rengarajan & Sarin, 2004)
275	1560						Bay of Bengal	
200	3783	1 μήνας	1977-1978	Δοχεία πολυαιθυλενίου διαμέτρου 25cm	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃ (Krishnaswami, et al., 1980), (Benninger, 1978)	γ-φασματοσκοπία	New Haven, Connecticut, USA	(Turekian, et al., 1983)
115	2850						Bermuda, USA	
-	1267	Αν 200-400 λίτρα συνολικής δειγματοληψίας βροχοπτώσεων	1970-1971	Χοάνη συνδεδεμένη με δοχείο	Συγκαθίζηση με χρήση E.D.T.A. (Goel, et al., 1959)	γ-φασματοσκοπία	Mumbai, India	(Lal, et al., 1979)
-	686.9	<15 ημέρες	2012	Δοχείο πολυαιθυλενίου επιφάνειας 0.437m ²	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Xiamen, China	(Zhang, et al., 2016)
	834.1		2013					
366	1467	1 μήνας	2006-2011	Μεταλλικό δοχείο με κεραμική βαμμένη επιφάνεια επιφάνειας 3m ²	Συγκαθίζηση του ²¹⁰ Pb και του ⁷ Be με χρήση Fe(OH) ₃	γ-φασματοσκοπία	Shanghai, China	(Du, et al., 2015)
226	1486	10 ημέρες	2001-2002	Πλαστικοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 0.26m ²	Πλήρης εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Kumamoto, Japan	(Momoshima, et al., 2006)
240	1693		2002-2003					
-	420	1 μήνας	1995	Συλλέκτης επιφάνειας 0.9m ²	Πλήρης εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Damascus, Syria	(Othman, et al., 1998)
	634		1996					
59	834	20 έως 40 ημέρες	2009-2010	4 δοχεία συνολικής επιφάνειας 0.412m ²	Πλήρης εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Huelva, Spain	(Lozano, et al., 2011)

144	1215	1 μήνας	2005-2015	-	Μερική εξάτμιση δείγματος για τελικό όγκο 1L	γ-φασματοσκοπία	Malaga, Spain	(Duenas, et al., 2017)
-	469 ± 145	1 μήνας	1995-1998	Βροχόμετρο διατομής 1m ²	Πλήρης εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Granada, Spain	(Gonzalez-Gomez, et al., 2006)
238	2133	-	1996-1998	Ξύλινος συλλέκτης με επιφανειακή επικάλυψη πολυαιθυλενίου επιφάνειας 10m ²	Η διαδικασία περιγράφεται από τους (Benitez-Nelson & Buesseler, 1998)		Woods Hole, Massachusetts, USA	(Benitez-Nelson & Buesseler, 1999)
235	1900	Ανά βροχόπτωση ή ανά 10 ημέρες ή ανά μήνα	1999-2001	Συλλέκτης Πολυαιθυλενίου Επιφάνειας 0.28m ²	Πλήρης Εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Detroit, Michigan, USA	(McNeary & Baskaran, 2003)
130	2167	2 εβδομάδες	1995-1996	2 δοχεία HDPE διαμέτρου 32cm το καθένα	Πλήρης Εξάτμιση	γ-φασματοσκοπία	Stillpond, Maryland, USA	(Kim, et al., 2000)
180	1200	1 μήνας	1998	Ατσάλινη Χοάνη επιφάνειας 4m ²	Εξάτμιση για τελικό όγκο 100 ml	γ-φασματοσκοπία	Monaco	(Pham, et al., 2013)
290	1300		1999					
340	2000		2000					
250	970		2001					
250	1400		2002					
120	820		2003					
170	1200		2004					
320	2000		2005					
230	1500		2006					
66	390		2007					
225	1500		2008					
115	1100		2009					
110	1000		2010					

Στο *Σχήμα 2.12* που ακολουθεί γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των βημάτων των βασικών κατηγοριών δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν από τις μελέτες που αναφέρονται στον *Πίνακα 2.3*.

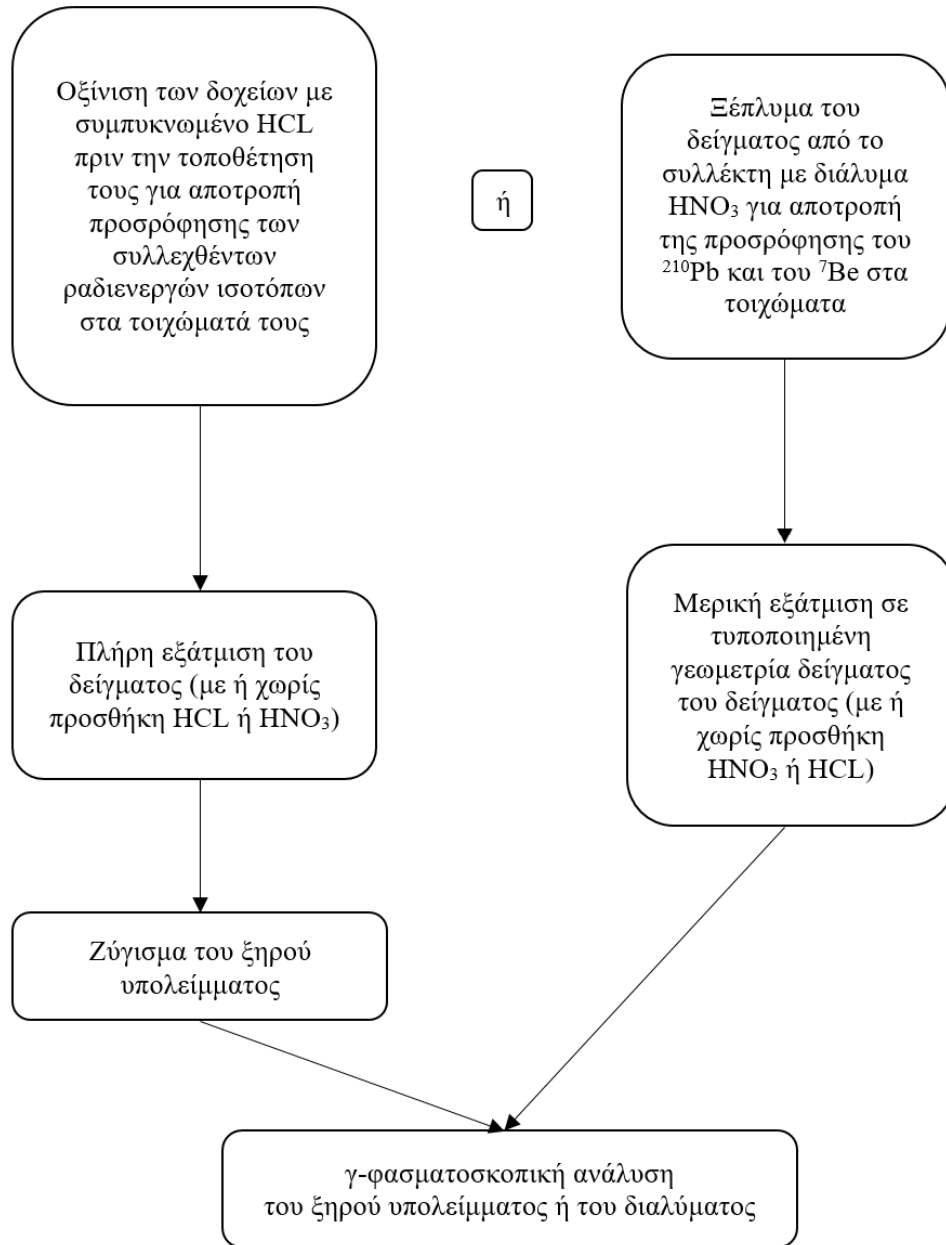
Συμπληρωματικά στο *Σχήμα 2.12*, τα βασικά είδη συλλεκτών που χρησιμοποιήθηκαν για τις περιγραφόμενες διαδικασίες είναι τα εξής:

- i. Βροχόμετρο,
- ii. Δοχείο πολυαιθυλενίου,
- iii. Συλλέκτης από ανοξείδωτο ατσάλι,
- iv. Ατσάλινος συλλέκτης με κεραμική επιφάνεια,
- v. Πλαστική χοάνη συνδεδεμένη με δοχείο πολυαιθυλενίου για τη συλλογή των υγρών αποθέσεων.

A. Φιλτράρισμα του δείγματος

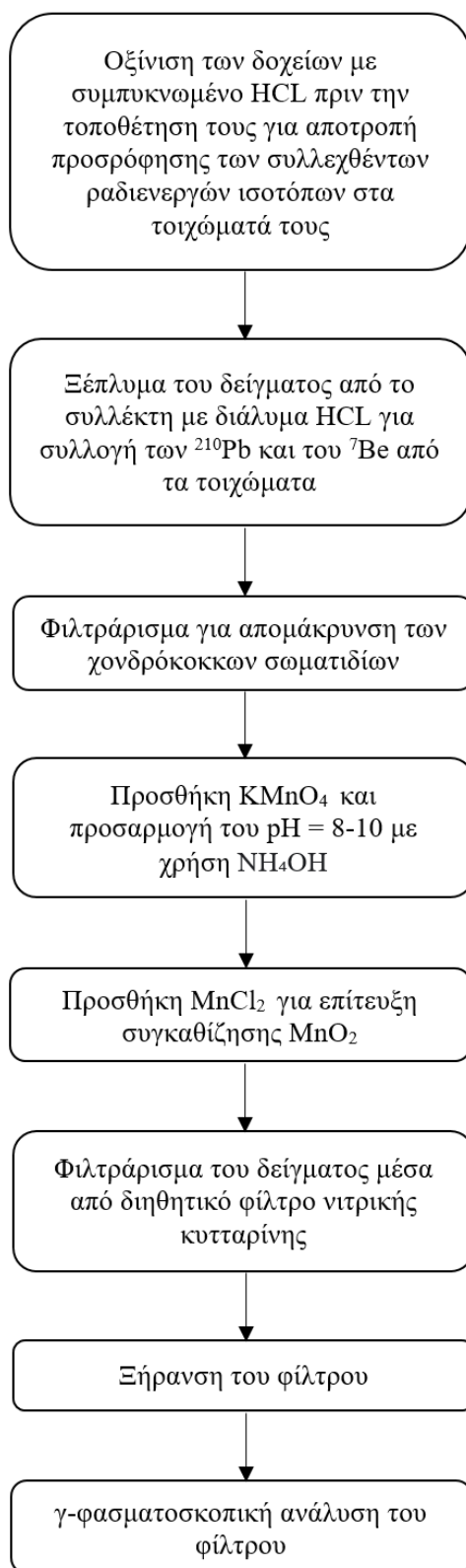


B. Εξάτμιση του δείγματος

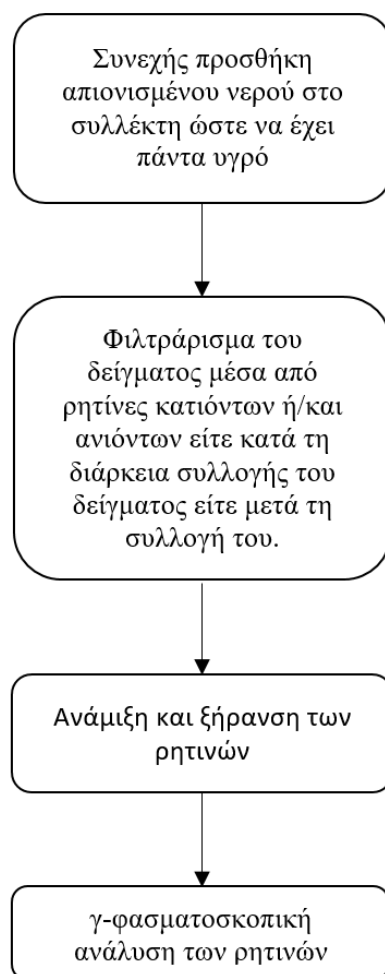




Δ. Συγκαθίζηση με MnO_2



Ε. Χρήση ρητινών ιοντοανταλλαγής



Σχήμα 2.12: Συνοπτική περιγραφή των βημάτων των βασικών κατηγοριών δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν από τις μελέτες που αναφέρονται στον **Πίνακα 2.3**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις

3.1 Εισαγωγή

Τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές υποστρώματος μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης. Κατά συνέπεια η κύμανση του ραδονίου (^{222}Rn) – κυρίως –, του θορονίου (^{220}Rn) και των θυγατρικών τους μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, ιδιαίτερα για δείγματα χαμηλής φυσικής ραδιενέργειας. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου σε ένα δείγμα μπορεί να επηρεάζει την ακρίβεια και τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης άλλων ισοτόπων ενδιαφέροντος. Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, έχει λάβει χώρα μεγάλο πλήθος μελετών για τον περιορισμό της επίδρασης αυτής και ορισμένες από τις αναπτυχθείσες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν ή εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Banjanac, et al., 2013) (El-Hussein, 1996) (Laubenstein & Lawson, 2020) (Radulescu, et al., 2013).

Στο τμήμα αυτό της παρούσας Δ.Δ. σκοπός ήταν:

- Να μελετηθεί η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικού του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ και να μελετηθεί η επίδραση της κύμανσης αυτής στα φάσματα υποστρώματος επιλεγμένων ανιχνευτών γερμανίου,
- Να προταθεί κατάλληλη μεθοδολογία προσδιορισμού του βέλτιστου υποστρώματος για επιλεγμένες φωτοκορυφές και επιλεγμένους ανιχνευτές γερμανίου,

- Να προσδιορισθούν κατάλληλα σενάρια δειγματοληψίας αερολύματος και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, με σκοπό την επίτευξη χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης και υψηλότερης ακρίβειας για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα που ενδιαφέρουν σε δειγματοληψίες ρουτίνας και σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

3.2 Κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας

Με στόχο τη βαθύτερη μελέτη του υποστρώματος των ανιχνευτών του ΕΠΤ-ΕΜΠ θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει διερεύνηση της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του μέσα στο εργαστήριο, παράλληλα με τη λήψη φασμάτων υποστρώματος σε επιλεγμένους ανιχνευτές γερμανίου, όπως δίνονται στον **Πίνακα 3.1**.

Πίνακας 3.1 : Βασικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Ανιχνευτής	Υλικό παραθύρου κρυστάτη	Εξάτμιση υγρού αζώτου εντός της θωράκισης	Ελεύθερος διαθέσιμος όγκος εντός της θωράκισης
XtRa-XtCSS*	Ανθρακονήματα	Ναι	~ 1L
LEGe	Βηρύλλιο	Ναι	~ 44L
Ge1	Αλουμίνιο	Ναι	~ 26L
Ge2	Αλουμίνιο	Όχι	~ 17L

*Η εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression στον ανιχνευτή XtRa μειώνει σημαντικά τον ελεύθερο όγκο στο εσωτερικό της θωράκισης.

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη μέτρηση του ραδονίου και των θυγατρικών του διατίθενται τα παρακάτω μετρητικά όργανα:

- ALPHAGUARD, Professional Radon Monitor, GENITRON Instruments GmbH, T: EF, S/N: 1232,
- ALPHAGUARD, Professional Radon Monitor, SAPHYMO GmbH, T: EF, S/N: 1991,
- ALPHAPM, SAPHYMO GmbH, T: APM, S/N: 0157.

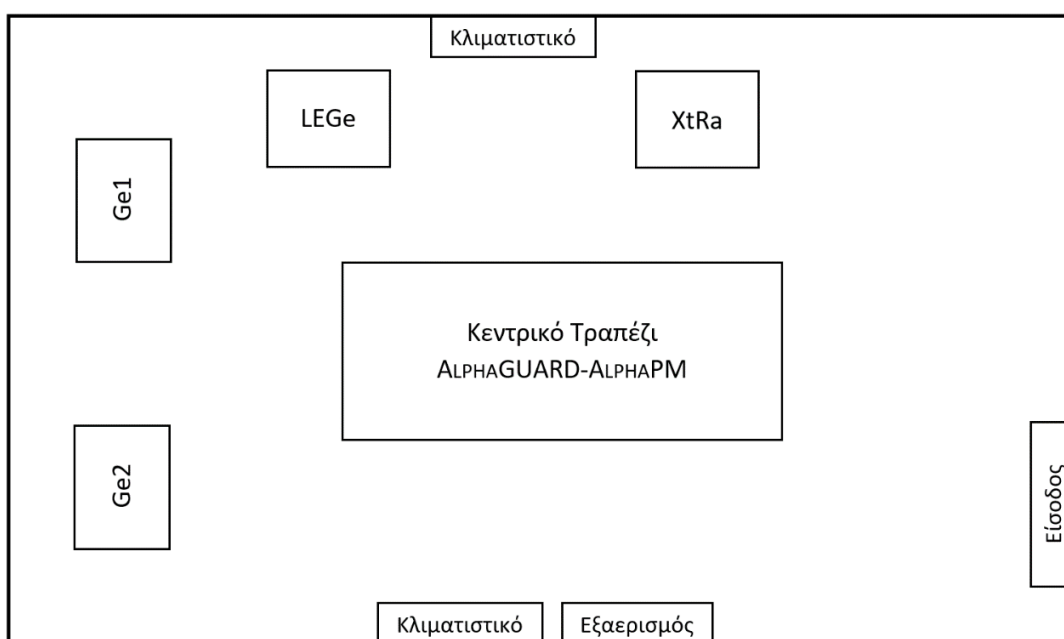
Από τα παραπάνω συστήματα, το ALPHAGUARD της εταιρείας GENITRON χρησιμοποιείται αποκλειστικά για μετρήσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου, δίνοντας αποτελέσματα σε Bq/m³. Το ALPHAGUARD της εταιρείας SAPHYMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις ραδονίου (Bq/m³), αλλά και να συνδυαστεί με το ALPHAPM, ώστε η διάταξη των δύο συστημάτων να παρέχει αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδονίου και συγκέντρωσης θυγατρικών ραδονίου (σε mWL), εκτιμώντας ταυτόχρονα και τον συντελεστή ισορροπίας (Equilibrium Factor) μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του. Το ALPHAPM μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα, αποκλειστικά για μετρήσεις της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου. Και τα δύο διαθέσιμα συστήματα ALPHAGUARD πραγματοποιούν επιπλέον μετρήσεις της θερμοκρασίας (°C), της πίεσης (mbar) και της σχετικής υγρασίας (%). Για τη συλλογή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των παραπάνω μετρητικών οργάνων χρησιμοποιείται το λογισμικό DATAEXPERT v.04.54.00 b.12.0113.1226 της εταιρείας SAPHYMO GmbH, Germany (<https://www.bertin-technologies.com/industry/nuclear/>, Τελευταία Πρόσβαση 4/8/2023).

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης έγιναν 4 δειγματοληψίες στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τα παραπάνω όργανα. Σε όλες τις δειγματοληψίες, στο σύστημα ALPHAGUARD, ορίστηκε σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης 60 min για επίτευξη καλύτερης στατιστικής και συλλογής μικρότερου όγκου δεδομένων¹³. Επιπροσθέτως, το ALPHAGUARD τέθηκε σε λειτουργία διάχυσης, που σημαίνει ότι το ραδόνιο εισέρχεται στον θάλαμο μέτρησης του οργάνου μέσω φίλτρου μόνο μέσω της διαδικασίας της διάχυσης. Αντίστοιχα, το ALPHAPM ρυθμίστηκε να πραγματοποιεί μετρήσεις με συλλογή αέρα ροής 2 L/min. Ο αέρας περνά μέσα από κατάλληλο φίλτρο της συσκευής, το οποίο αντικαθίσταται μετά από κάθε δειγματοληψία.

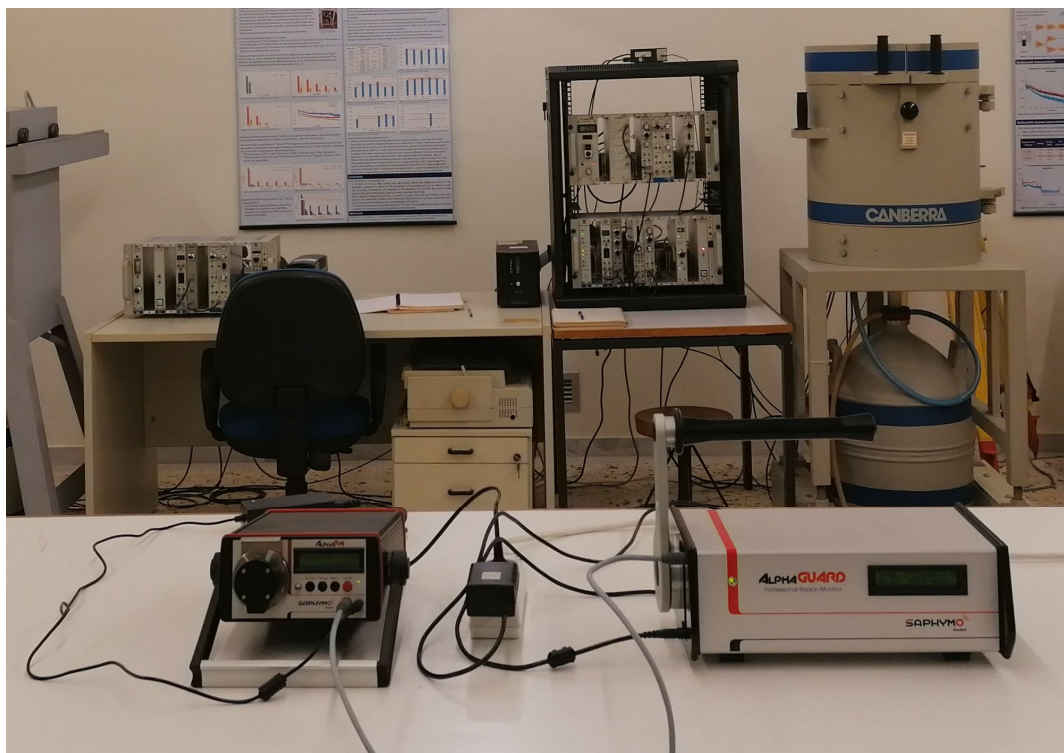
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, που βρίσκεται στο υπόγειο του Κτιρίου Κ, επικοινωνεί συνεχώς με τους άλλους χώρους του κτιρίου, καθώς οι πόρτες των επιμέρους δωματίων παραμένουν συνεχώς ανοιχτές. Επίσης, επικοινωνεί μέσω αγωγού εξαερισμού με τον εξωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία μονάδες κλιματισμού για ρύθμιση της θερμοκρασίας στην περιοχή 20-23 °C για την καλύτερη λειτουργία των

¹³ Η εναλλακτική επιλογή της συλλογής δεδομένων με ολοκλήρωση κάθε 10min δεν κρίθηκε ότι εξυπηρετεί τον σκοπό της παρούσας μελέτης.

ανιχνευτικών διατάξεων. Στο **Σχήμα 3.1** που ακολουθεί δίνεται ένα σκαρίφημα του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ όπου διακρίνονται οι τέσσερις ανιχνευτές γερμανίου, η θέση όπου τοποθετήθηκε η διάταξη ALPHAGUARD-ALPHAPM κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και οι θέσεις των κλιματιστικών, του εξαερισμού και της εισόδου. Στο **Σχήμα 3.2** διακρίνεται η διάταξη των ALPHAGUARD-ALPHAPM στο εσωτερικό του εργαστηρίου σε λειτουργία.



Σχήμα 3.1 : Σκαρίφημα εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας ΕΠΤ-ΕΜΠ.



Σχήμα 3.2 : Συγκρότηση της διάταξης ALPHAGUARD-ALPHAPM στο κέντρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Τα χαρακτηριστικά για τις δειγματοληψίες που έλαβαν χώρα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2** που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικά των τεσσάρων δειγματοληψιών.

Δειγματοληψία	Ημερομηνίες δειγματοληψίας	ALPHAGUARD - ALPHAPM	Συλλογή φάσματος υποστρώματος	Σχόλια
1 ^η	30/7/2020 έως 11/8/2020	Ναι	Όχι	Χρήση μόνο της συσκευής ALPHAGUARD
2 ^η	13/10/2020 έως 25/10/2020	Ναι	Όχι	Διερεύνηση της κύμανσης του ραδονίου μέσα στο εργαστήριο
3 ^η	1/3/2021 έως 13/3/2021	Ναι	XtRa, XtCSS LEGe, Ge1 Ge2	Παράλληλη συλλογή 6 διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος 48h το κάθε ένα
4 ^η	15/4/2022 έως 27/4/2022	Ναι	Ge1, Ge2	Παράλληλη συλλογή 48 διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος 6h το κάθε ένα

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για τις τέσσερις δειγματοληψίες που έγιναν και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

3.2.1 Η 1^η δειγματοληψία

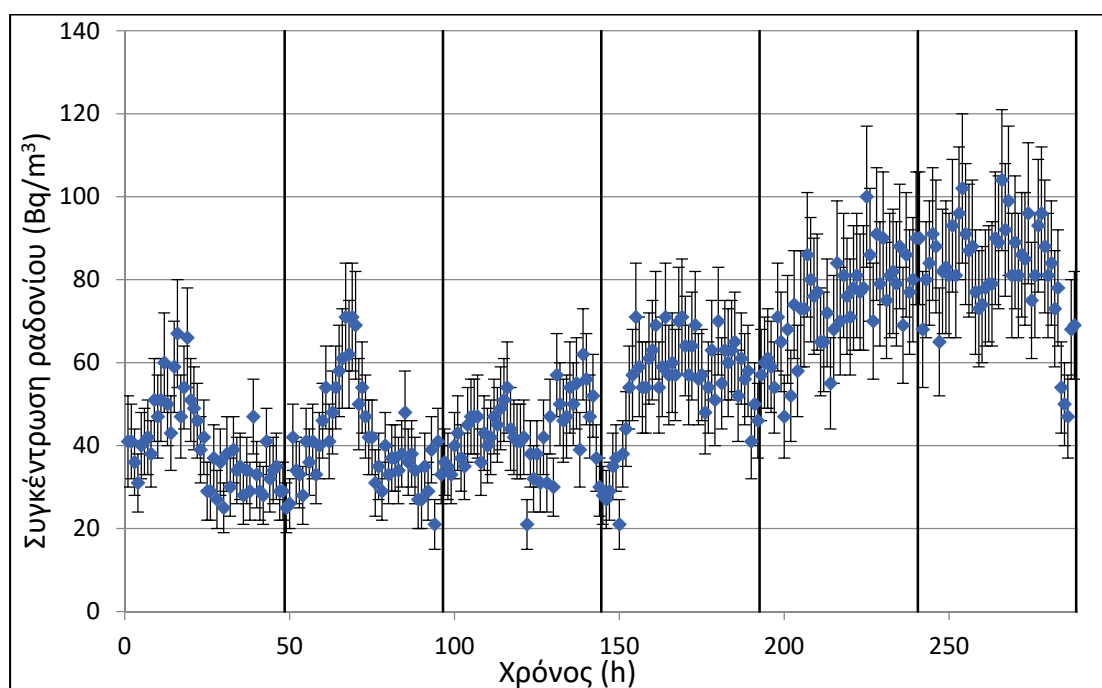
Κατά την πρώτη φάση των πειραμάτων, από τις 30 Ιουλίου του 2020 έως και τις 11 Αυγούστου 2020, χρησιμοποιήθηκε το όργανο ALPHAGUARD (Professional Radon Monitor, GENITRON Instruments GmbH, T: EF, S/N: 1232) το οποίο τοποθετήθηκε στο κεντρικό τραπέζι του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας και ξεκίνησε δειγματοληψία με στόχο την αρχική διερεύνηση του επιπέδου της κύμανσης της συγκέντρωσης του ραδονίου στον χώρο του εργαστηρίου.

Η αρχική αυτή δειγματοληψία επιβεβαίωσε την ύπαρξη κύμανσης της συγκέντρωσης του ραδονίου στον εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου. Ωστόσο, πέραν της επιβεβαίωσης που προσέφερε, δε θα χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν, καθώς κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας αυτής αστάθμητοι παράγοντες επηρέασαν τις συνθήκες λειτουργίας στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, μια εκτεταμένη διακοπή ρεύματος στις εγκαταστάσεις του ΕΜΠ οδήγησε στη διακοπή λειτουργίας των κλιματιστικών μονάδων του χώρου¹⁴. Η έλλειψη κλιματισμού προκάλεσε αύξηση της θερμοκρασίας στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας με

¹⁴ Επισημαίνεται ότι τόσο οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις, όσο και τα όργανα μέτρησης ραδονίου τροφοδοτούνται από σύστημα αδιάλειπτης παροχής ρεύματος και η λειτουργία τους συνέχισε κανονικά.

αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου. Το γεγονός αυτό, αν και αποτελεί σημαντικό δεδομένο που τονίζει τη σημασία διατήρησης σταθερών συνθηκών στο χώρο όπου πραγματοποιούνται οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, δε θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Με το πέρας της διακοπής ηλεκτροδότησης επανήλθε η λειτουργία των κλιματιστικών μονάδων και ο χώρος προσαρμόστηκε ξανά στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα της αρχικής αυτής μέτρησης δίνονται στο **Σχήμα 3.3**, όπου ο χρόνος της δειγματοληψίας παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα¹⁵. Η συγκέντρωση του ραδονίου δίνεται σε Bq/m³ και η αβεβαιότητα των μετρήσεων σε επίπεδο 1σ. Οι δειγματοληψίες που ακολουθούν διεξήχθησαν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του εργαστηρίου.



Σχήμα 3.3 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m³) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 30/7/2020-11/8/2020.

3.2.2 Η 2^η, 3^η & 4^η δειγματοληψία

Οι δειγματοληψίες 2, 3 και 4 μπορούν να ομαδοποιηθούν, καθώς αφορούν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά κάθε μίας από τις ανωτέρω δειγματοληψίες είναι τα εξής:

2^η δειγματοληψία

¹⁵ Για λόγους συσχέτισης με τα φάσματα 48 ωρών των ανιχνευτικών διατάξεων η κλίμακα του χρόνου έχει διαιρεθεί ανάλογα με κάθετες γραμμές.

Η δεύτερη χρονικά δειγματοληψία έγινε από τις 13 Οκτωβρίου του 2020 έως και τις 25 Οκτωβρίου του 2020. Στη φάση αυτή χρησιμοποιήθηκε η διάταξη των ALPHAGUARD (Professional Radon Monitor, SAPHYMO GmbH, T: EF, S/N: 1991) και ALPHAPM (SAPHYMO GmbH, T: APM, S/N: 0157) σε σύνδεση, ώστε να γίνει ταυτόχρονη παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ραδονίου, καθώς και των θυγατρικών του. Τα θυγατρικά του ραδονίου προσδιορίζονται ως σύνολο μέσω του υπολογισμού του PAEC (Potential Alpha Energy Concentration) και η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ισορροπίας F (Equilibrium Factor) παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

3^η δειγματοληψία

Η τρίτη χρονικά δειγματοληψία έγινε από την 1 Μαρτίου του 2021 έως και τις 13 Μαρτίου του 2021. Στη φάση αυτή χρησιμοποιήθηκε η διάταξη των ALPHAGUARD (Professional Radon Monitor, SAPHYMO GmbH, T: EF, S/N: 1991) και ALPHAPM (SAPHYMO GmbH, T: APM, S/N: 0157) σε σύνδεση, ώστε να γίνει ταυτόχρονη παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ραδονίου, καθώς και των θυγατρικών του.

Παράλληλα με την παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, έγινε και λήψη φασμάτων υποστρώματος των ανιχνευτών XtRa, XtCSS, LEGe, Ge1 και Ge2. Ως χρονικό βήμα λήψης των φασμάτων υποστρώματος επιλέχθηκαν οι 48h, καθώς αποτελούν ένα από τα συνήθη χρονικά διαστήματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης δειγμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ωστόσο, η έλλειψη ικανού πλήθους σημείων για την εξαγωγή στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων έκανε αναγκαία τη διεξαγωγή και 4^{ης} δειγματοληψίας που ακολουθεί.

4^η δειγματοληψία

Η 4^η δειγματοληψία έλαβε χώρα με στόχο τη συλλογή αρκετών δεδομένων για την επίτευξη στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων μεταξύ της κύμανσης της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, με την κύμανση επιλεγμένων φωτοκορυφών του υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για τη δειγματοληψία αυτή χρησιμοποιήθηκε η διάταξη των ALPHAGUARD (Professional Radon Monitor, SAPHYMO GmbH, T: EF, S/N: 1991) – ALPHAPM (SAPHYMO GmbH, T: APM, S/N: 0157) και πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία για χρονικό διάστημα 12 ημερών μεταξύ 15/4/2022 έως 27/4/2022. Ταυτόχρονα, ξεκίνησε και η

λήψη φάσματος με χρονικό βήμα 6h στους ανιχνευτές Ge1 και Ge2 με χρήση της επιλογής «SEQUENCE» του προγράμματος GENIE2000. Οι υπόλοιποι ανιχνευτές του εργαστηρίου δε συμμετείχαν στη συγκεκριμένη δειγματοληψία, καθώς δεν κρίθηκε απαραίτητο για την επίτευξη των προσδοκώμενων αποτελεσμάτων.

Για τις δειγματοληψίες 2, 3 και 4 έγινε παράλληλη παρακολούθηση και καταγραφή των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών που επηρεάζουν την εκροή του ραδονίου από το έδαφος και ενδεχομένως τη συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας (Robinson, 1996), (Kitto, 2005), (Xie, et al., 2015), (Schubert, et al., 2018), (Li, et al., 2018), (Aquilina & Fenech, 2019), (Baltrenas, et al., 2020), (Singh, et al., 2005), (Martin & McBride, 2012). Για την περιοχή που βρίσκεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ, κρίθηκε ως αντιπροσωπευτικότερος από τους πλησιέστερους μετεωρολογικούς σταθμούς ο σταθμός «Παπάγου». Για τον σταθμό ελήφθησαν μετεωρολογικά δεδομένα μέσω της ιστοσελίδας <https://meteosearch.meteo.gr/> (τελευταία πρόσβαση 24/7/2023). Στην ιστοσελίδα αυτή το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών¹⁶ διατηρεί χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων για πλήθος μετεωρολογικών σταθμών στην Ελλάδα. Το σύνολο των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ.

3.2.3 Αποτελέσματα της μελέτης της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων από την παρούσα μελέτη τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών 2, 3 και 4 αντιμετωπίζονται συγκεντρωτικά. Για τον λόγο αυτό, τα Σχήματα που δίνονται στην παράγραφο αυτή είναι τα πλέον αντιπροσωπευτικά. Τα Σχήματα και οι Πίνακες με τα επιμέρους δεδομένα για κάθε μία δειγματοληψία δίνονται στο Παράρτημα Δ. Σε όλους τους Πίνακες και τα Σχήματα που ακολουθούν, τα δεδομένα συνοδεύονται με το αντίστοιχο τυπικό τους σφάλμα (1σ). Ειδικότερα, το τυπικό σφάλμα για τις ωριαίες τιμές των συγκεντρώσεων του ραδονίου δίνεται απευθείας από το ALPHAGUARD.

¹⁶ Ορισμένα από τα δεδομένα διατέθηκαν ευγενώς μετά από προσωπική επικοινωνία από τον Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης Δρ. Κωνσταντίνο Λαγουβάρδο.

Κατά τη διάρκεια των ανωτέρω δειγματοληψιών, μέσα στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 20.6°C έως 23.4°C, η σχετική υγρασία κυμάνθηκε από 28.6% έως 61.5% και η πίεση από 980.3mbar έως 1007.8mbar. Δεν παρατηρήθηκε καμία στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία ή την πίεση στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας. Συγκεντρωτικά στοιχεία από τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του για κάθε μία από τις ανωτέρω δειγματοληψίες δίνονται στον **Πίνακα 3.3** που ακολουθεί.

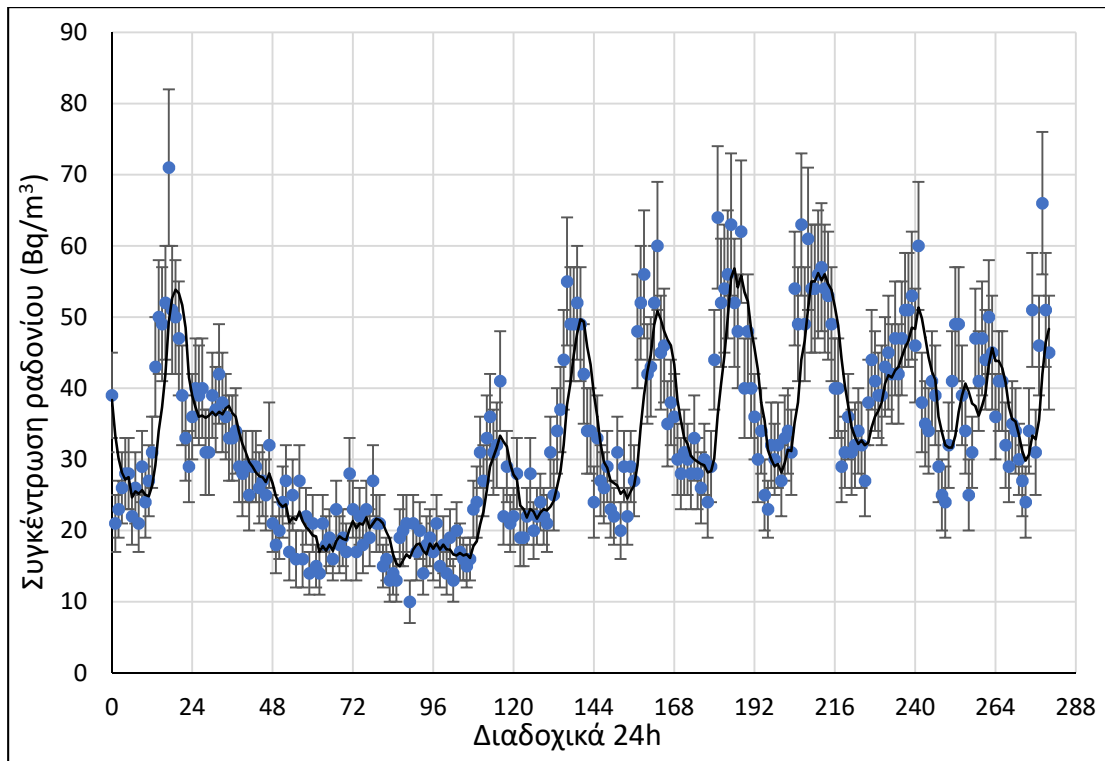
Πίνακας 3.3 : Ελάχιστες (min), Μέγιστες (max) και Μέσες Τιμές (Mean) των μετρήσεων του ραδονίου και των θυγατρικών του για κάθε μία από τις δειγματοληψίες 2, 3 και 4.

Δειγματοληψία	²²² Rn (Bq/m ³)			Θυγατρικά ²²² Rn (mWL)			Συντελεστής ισορροπίας*		
	Min	Max	Mean (± 1σ)	Min	Max	Mean (± 1σ)	Min	Max	Mean (± 1σ)
2 ^η	16	74	37.8 ± 9.3	0.6	9.3	4.3 ± 1.4	0.13	0.78	0.43 ± 0.10
3 ^η	13	56	27.3 ± 6.7	1.1	6.2	2.8 ± 0.9	0.16	0.75	0.39 ± 0.10
4 ^η	10	71	33.2 ± 12.5	0.8	10.9	4.2 ± 2.3	0.12	0.78	0.45 ± 0.13

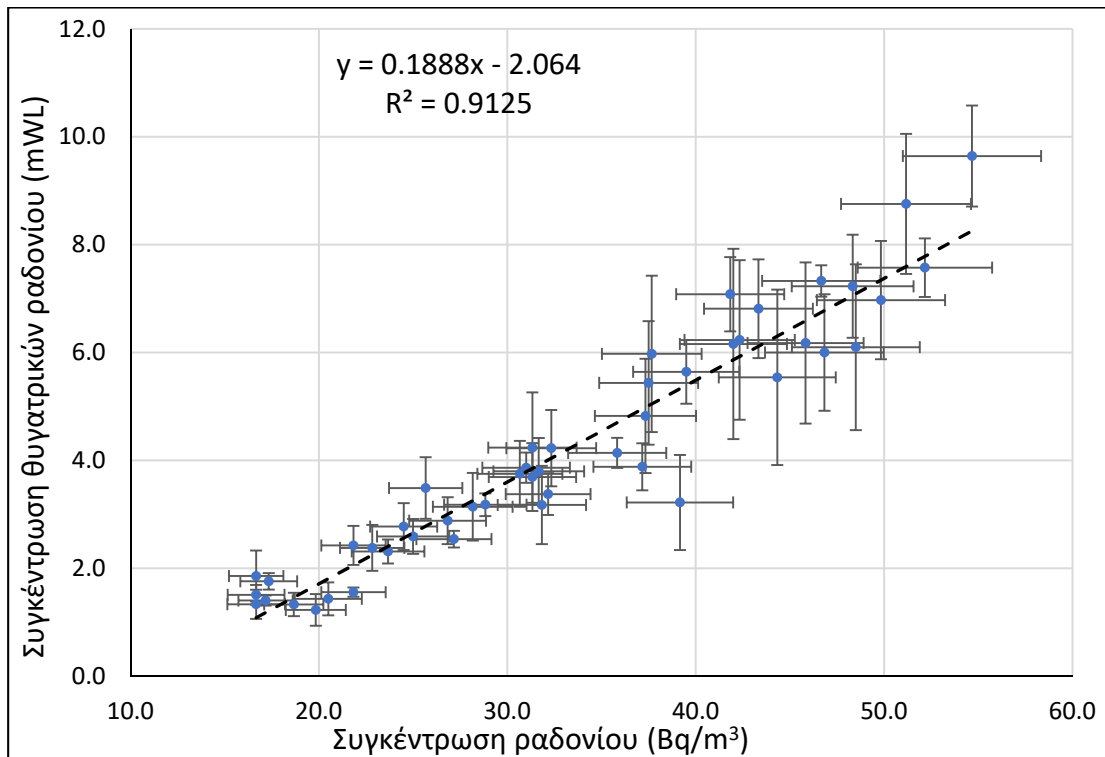
*Οι τιμές που προκύπτουν είναι αντίστοιχες με τη μέση τιμή 0.4 του συντελεστή ισορροπίας που δίνεται στο (UNSCEAR, 2000).

Στα αντιπροσωπευτικά **Σχήματα 3.4, 3.5** και **3.6** που ακολουθούν απεικονίζονται:

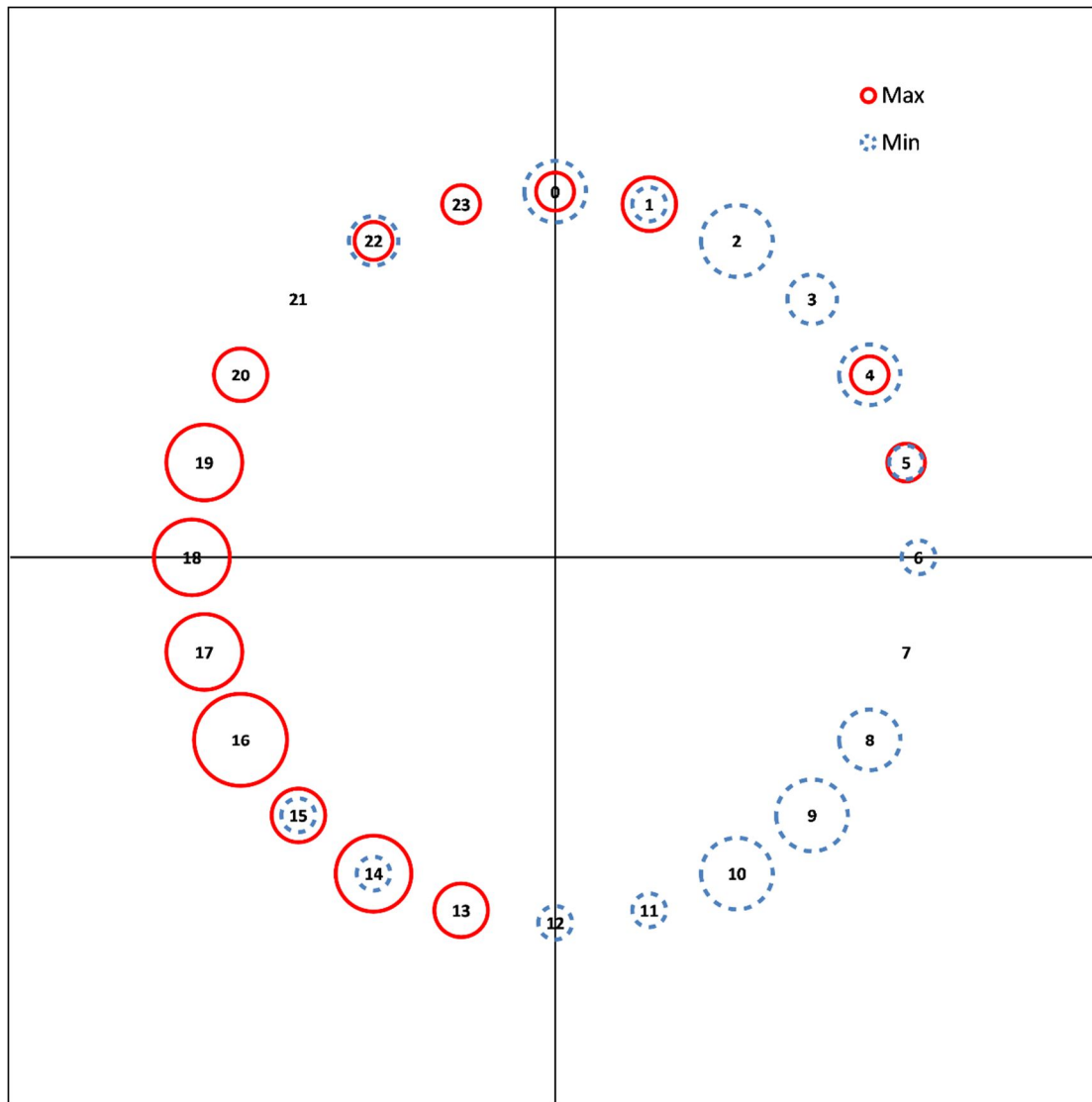
- i. η ωριαία κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου για την 4η δειγματοληψία (15/4/2022-27/4/2022) εφαρμόζοντας καμπύλη προσαρμογής κινούμενου μέσου 6 περιόδων για καλύτερη απεικόνιση της κύμανσης (σχήμα 3.4),
- ii. η συσχέτιση μεταξύ των μέσων 6h συγκεντρώσεων του ραδονίου και των θυγατρικών του για τη χρονική διάρκεια της 4^{ης} δειγματοληψίας (σχήμα 3.5),
- iii. η συχνότητα των παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m³) μέσα στο 24ωρο από τις συνδυαστικές μετρήσεις και των τριών ανωτέρων δειγματοληψιών (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.4 : Ωριαία Κύμανση της συγκέντρωσης του ^{222}Rn στον εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας κατά τη διάρκεια της 4^{ης} δειγματοληψίας (15/4/2022-27/4/2022), ξεκινώντας από τις 15/4/2022 στις 00:00.



Σχήμα 3.5 : Συσχέτιση (στατιστικά σημαντική) μεταξύ των μέσων 6h συγκεντρώσεων του ραδονίου και των θυγατρικών του για τη χρονική διάρκεια της 4^{ης} δειγματοληψίας (15/4/2022-27/4/2022).



Σχήμα 3.6 : Συχνότητα περιοδικών μέγιστων (max) και ελάχιστων (min) της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ από τις μετρήσεις της 2^η, της 3^η και της 4^η δειγματοληψίας. Το μέγεθος των κύκλων είναι ανάλογο της συχνότητας εμφάνισης κάθε συμβάντος.

Από τα αποτελέσματα των ανωτέρω δειγματοληψιών προκύπτει ότι:

- i. σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ημερήσια κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του μέσα στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας, με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές να απέχουν περίπου 12 ώρες μεταξύ τους (**Σχήμα 3.4**),
- ii. η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου παρουσιάζει πολύ καλή συσχέτιση με τη συγκέντρωση των θυγατρικών του (**Σχήμα 3.5**),
- iii. οι μέγιστες συγκεντρώσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του παρατηρούνται κυρίως τις απογευματινές ώρες (80% των μεγίστων παρατηρούνται μεταξύ 13:00 με 20:00), ενώ οι ελάχιστες παρατηρούνται από

τα μεσάνυχτα έως τις πρώτες πρωινές ώρες (81% των ελαχίστων παρατηρούνται μεταξύ 00:00 με 10:00) (**Σχήμα 3.6**).

Στο σύνολό της, η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου παρουσιάζει σχετική σταθερότητα περί τη μέση τιμή, γεγονός που σημαίνει ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις στην περίπτωση φασμάτων μεγάλης διάρκειας (π.χ. 24 ή 48 ώρες).

3.2.4 Συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας με εξωτερικές μετεωρολογικές παραμέτρους

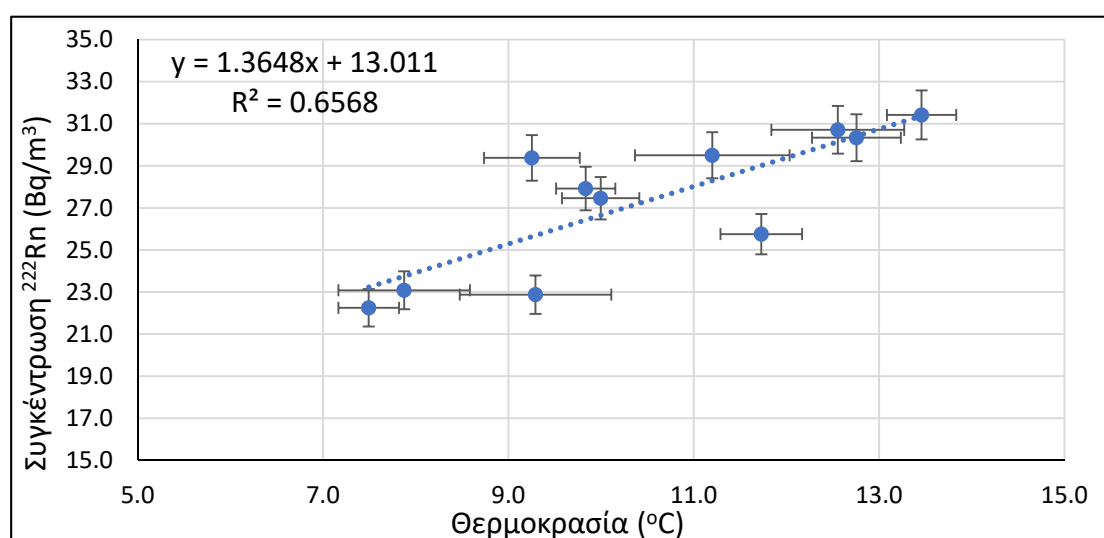
Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, η συγκέντρωση του ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους επηρεάζεται σημαντικά από τις εξωτερικές μετεωρολογικές συνθήκες (Baltrenas, et al., 2020), (Robinson, 1996), (Aquilina & Fenech, 2019), (Xie, et al., 2015), (Schubert, et al., 2018), (Li, et al., 2018), (Kitto, 2005). Χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα που έγιναν διαθέσιμα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, έγινε διερεύνηση για πιθανές συσχετίσεις μεταξύ των μέσων ημερήσιων τιμών της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εργαστήριο με τις μέσες ημερήσιες τιμές διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών δίνονται στον **Πίνακα 3.4** που ακολουθεί, ενώ αντιπροσωπευτικά διαγράμματα δίνονται στα **Σχήματα 3.7, 3.8, 3.9, 3.10** και **3.11**. Για διευκόλυνση του αναγνώστη, στους πίνακες που ακολουθούν οι συσχετίσεις οι οποίες διαπιστώνεται ότι είναι στατιστικά σημαντικές παρουσιάζονται με χρώμα «γκρι».

Πίνακας 3.4α : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) με τη μέση ημερήσια τιμή της εξωτερικής θερμοκρασίας (T_{out}) και της εξωτερικής πίεσης (P_{out}), καθώς και με τη μέση ημερήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

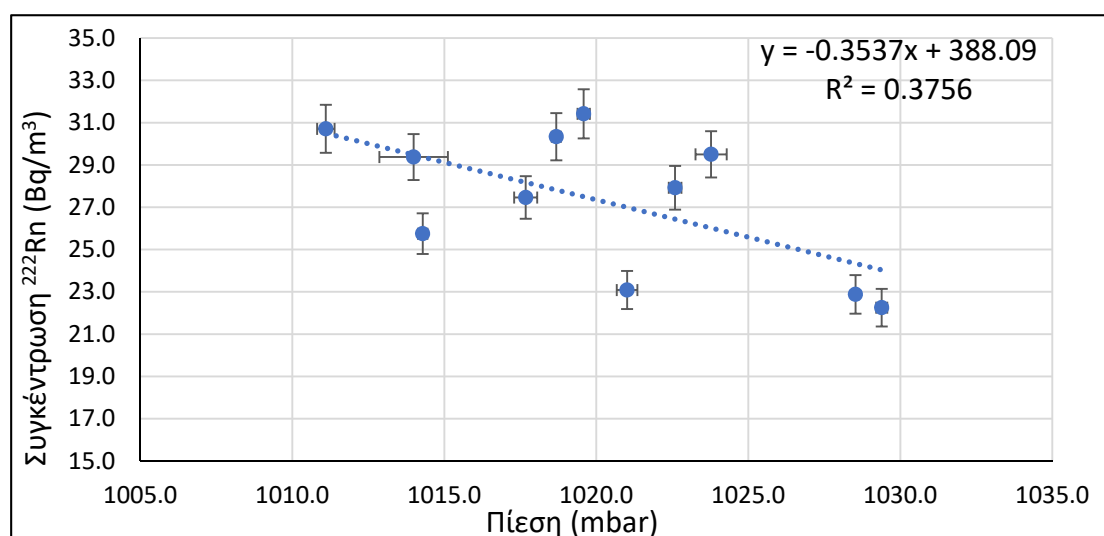
Δειγματοληψία	²²² Rn vs T_{out}		²²² Rn vs P_{out}		²²² Rn vs ταχύτητα ανέμου	
	R	p-Value	R	p-Value	R	p-Value
2 ^η	+ 0.7215	0.01220	- 0.6132	0.04483	- 0.7827	0.00440
3 ^η	+ 0.8104	0.00249	- 0.6129	0.04497	- 0.6226	0.04077
4 ^η	+ 0.9167	0.00007	- 0.1327	0.69731	- 0.5874	0.0574

Πίνακας 3.4β : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) με τη μέση ημερήσια τιμή της διαφοράς μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας ($\Delta T_{\text{out-in}}$) και πίεσης ($\Delta P_{\text{out-in}}$).

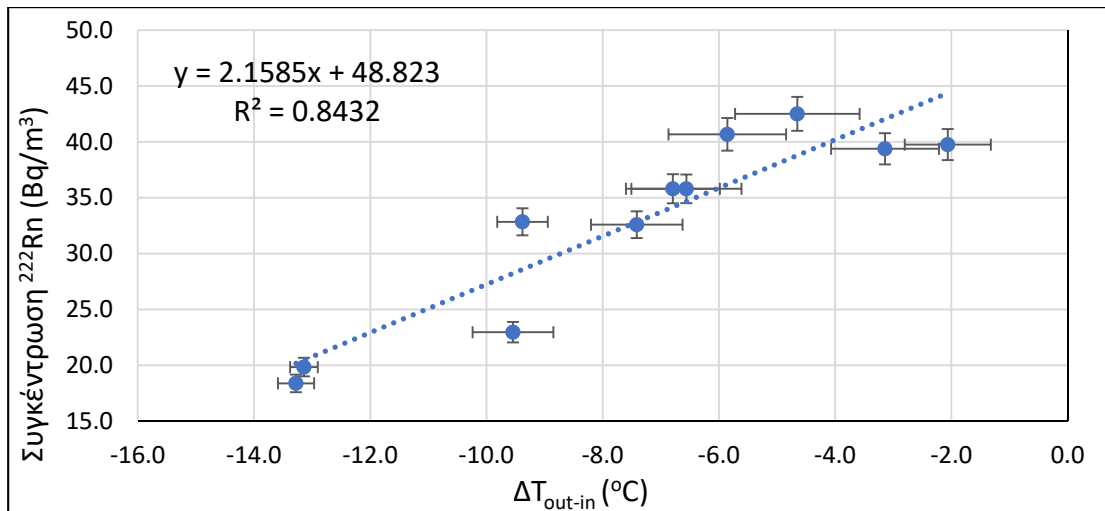
Δειγματοληψία	^{222}Rn vs $\Delta T_{\text{out-in}}$		^{222}Rn vs $\Delta P_{\text{out-in}}$	
	R	p-Value	R	p-Value
2 ^η	+ 0.7622	0.00639	- 0.3534	0.28636
3 ^η	+ 0.8161	0.00219	- 0.7632	0.00628
4 ^η	+ 0.9183	0.00007	- 0.8441	0.00109



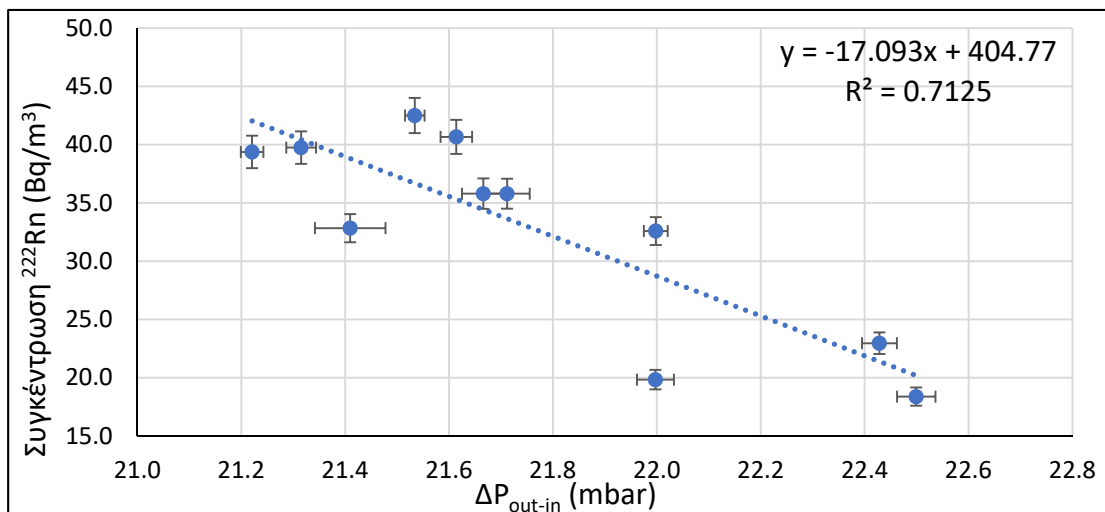
Σχήμα 3.7 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



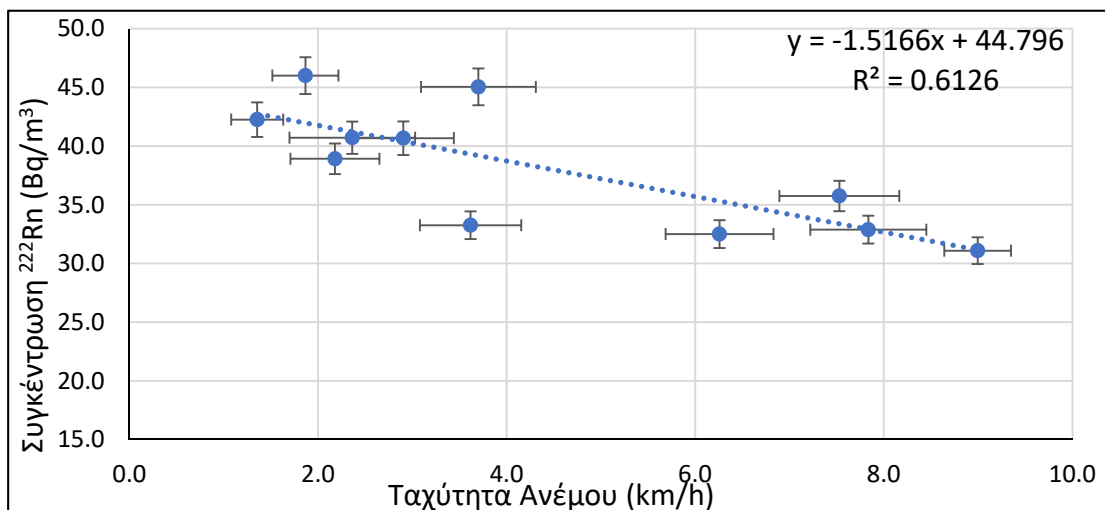
Σχήμα 3.8 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής πίεσης (mbar) για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα 3.9 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία (ΔT_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα 3.10 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση (ΔP_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα 3.11 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου (km/h) για τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας.

Από τα αποτελέσματα των ανωτέρω δειγματοληψιών προκύπτει ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας εμφανίζει:

- i. στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση με την εξωτερική θερμοκρασία καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία,
- ii. ασθενή αρνητική συσχέτιση στις περισσότερες περιπτώσεις με την εξωτερική βαρομετρική πίεση καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση,
- iii. ασθενή αρνητική συσχέτιση με την ταχύτητα του ανέμου.

3.2.5 Επίδραση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο υπόστρωμα των ανιχνευτών γερμανίου

Από τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου επιβεβαιώνεται η κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας καθώς και η επίδραση που έχουν σε αυτή την κύμανση οι μετεωρολογικές συνθήκες στο εξωτερικό περιβάλλον. Το επόμενο βήμα της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η κύμανση του ραδονίου στο υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για τον σκοπό αυτό, για τους ανιχνευτές που αναφέρονται στον **Πίνακα 3.2**, παράλληλα με την 3^η και 4^η δειγματοληψία γινόταν και λήψη φάσματος υποστρώματος. Για κάθε ένα από τα φάσματα που συλλέχθηκαν υπολογίστηκε ο ρυθμός κρούσεων (counts per second – cps) για τις φωτοκορυφές του υποστρώματος λόγω των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και θορονίου. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε η συσχέτιση των τιμών του ρυθμού κρούσεων της φωτοκορυφής¹⁷ του ²¹⁴Bi στα 609.32 keV, με την κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο. Τα σχετικά αποτελέσματα δίνονται στον **Πίνακα 3.5**. Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα για τις συσχετίσεις αυτές δίνονται στα **Σχήματα 3.12, 3.13, 3.14** και **3.15**, ενώ το σύνολο των σχετικών διαγραμμάτων δίνεται στο Παράρτημα Ε. Τα προς σύγκριση διαδοχικά φάσματα υποστρώματος είναι χρονικής διάρκειας 48h για την 3^η δειγματοληψία και 6h για την 4^η δειγματοληψία, συνεπώς οι συγκεντρώσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του με τις οποίες συγκρίνονται είναι οι αντίστοιχες χρονικής διάρκειας μέσες συγκεντρώσεις.

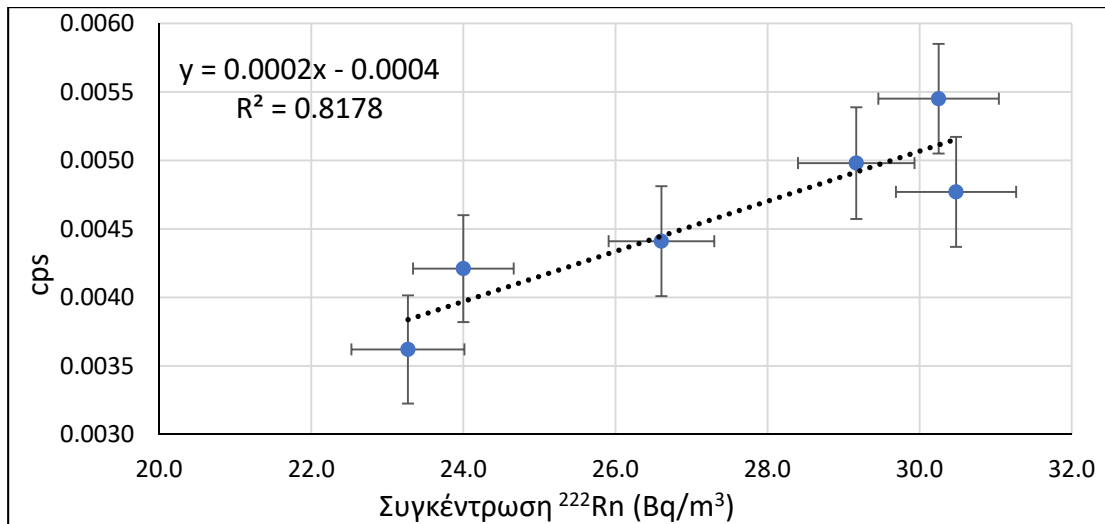
¹⁷ Η φωτοκορυφή αυτή λόγω του μεγάλου ποσοστού εκπομπής των φωτονίων θεωρείται η πλέον χαρακτηριστική εξ όλων των φωτοκορυφών που οφείλονται στα θυγατρικά του ραδονίου.

Πίνακας 3.5α : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με το ρυθμό καταγραφής (cps) της φωτοκορυφής του ^{214}Bi (609.32 keV) στα φάσματα υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ για την 3^η δειγματοληψία.

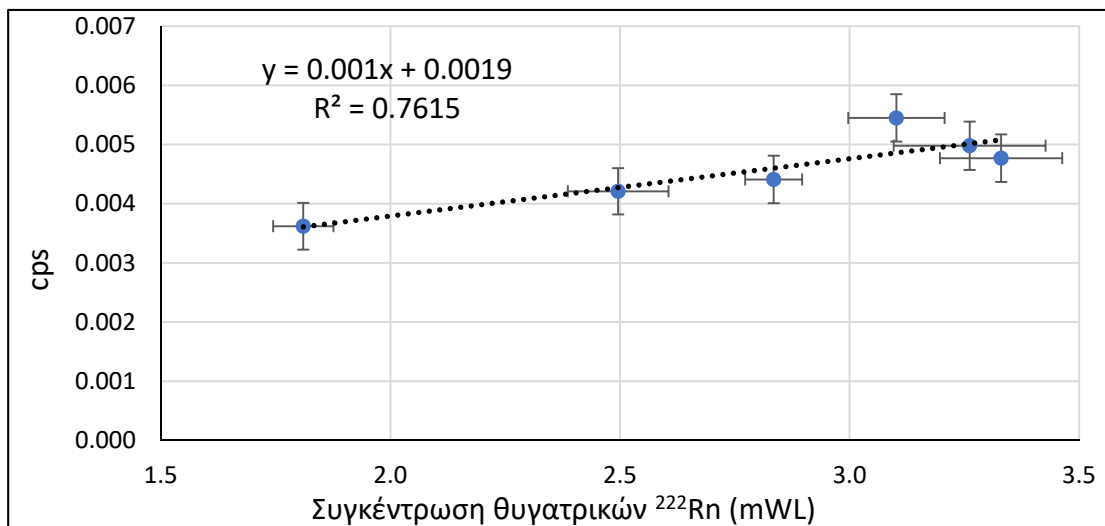
Cps της φωτοκορυφής υποστρώματος του ^{214}Bi (609.32 keV)	3 ^η Δειγματοληψία (6 x 48h φάσματα υποστρώματος)				Σχόλια
	^{222}Rn		Θυγατρικά ^{222}Rn		
	R	p-Value	R	p-Value	
XtRa	+ 0.7216	0.10547	+ 0.8239	0.04379	Πιθανόν καλές συσχετίσεις οι οποίες ωστόσο εξομαλύνονται λόγω της χρήσης 48h μέσω των τιμών. Καλύτερη συσχέτιση μπορεί να επιτευχθεί με χρήση περισσότερων πειραματικών δεδομένων.
XtCSS	+0.5619	0.24586	+0.4321	0.39219	
LEGe	+ 0.4390	0.38380	+ 0.2464	0.63790	
Ge1	+ 0.6824	0.13529	+0.7498	0.08607	
Ge2	+ 0.9043	0.01330	+0.8726	0.02331	

Πίνακας 3.5β : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi (609.32 keV) στα φάσματα υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ για την 4^η δειγματοληψία.

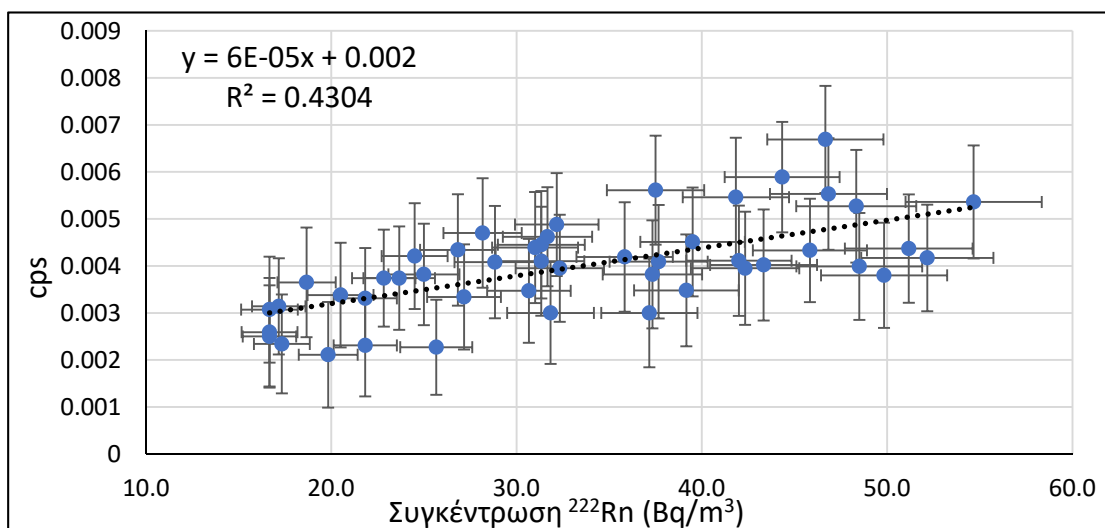
Cps της φωτοκορυφής υποστρώματος του ^{214}Bi (609.32 keV)	4 ^η Δειγματοληψία (48 x 6h φάσματα υποστρώματος)				Σχόλια
	^{222}Rn		Θυγατρικά ^{222}Rn		
	R	p-Value	R	p-Value	
Ge1	+ 0.6207	<0.00001	+ 0.5592	0.00004	Η συλλογή φασμάτων υποστρώματος με μικρότερο χρονικό βήμα (6h) οδήγησε σε περισσότερα πειραματικά δεδομένα που επέτρεψαν την εξαγωγή στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων.
Ge2	+ 0.6560	<0.00001	+ 0.6675	<0.00001	



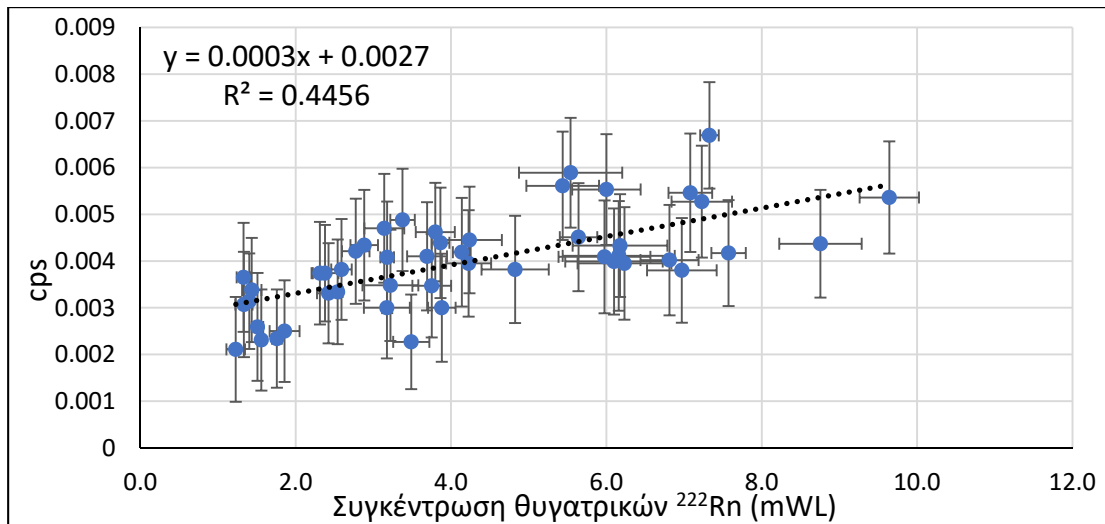
Σχήμα 3.12: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.



Σχήμα 3.13: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.



Σχήμα 3.14: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.



Σχήμα 3.5: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ²¹⁴Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παραπάνω γραφήματα προκύπτει ότι η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας επηρεάζει στατιστικά σημαντικά τα υποστρώματα των ανιχνευτών γερμανίου, αλλά η επίδραση αυτή λόγω της περιοδικότητας του φαινομένου τείνει να εξαφανίζεται σε μεγάλης διάρκειας φάσματα (48h). Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το γεγονός ότι οι ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ της κύμανσης του ραδονίου και του ρυθμού καταμέτρησης της φωτοκορυφής του υποστρώματος εμφανίζεται για τον ανιχνευτή Ge2, για τον οποίο δεν έχουν ληφθεί μέτρα μείωσης του υποστρώματος ραδονίου, μέσω της εισαγωγής στο εσωτερικό της θωράκισης της εξάτμισης του υγρού αζώτου. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η τεχνική αυτή για τη μείωση του υποστρώματος λόγω του ραδονίου, παρόλο που δεν εξαφανίζει την επίδραση των θυγατρικών του ραδονίου στο υπόστρωμα των ανιχνευτών γερμανίου, έχει τη δυνατότητα να την περιορίσει σημαντικά.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, καθώς κυμαίνεται το υπόστρωμα φωτοκορυφών λόγω των θυγατρικών ραδονίου και θορονίου, αντιστοίχως κυμαίνεται και το συνεχές υπόστρωμα του φάσματος το οποίο οφείλεται στις σκεδάσεις των φωτονίων των θυγατρικών ραδονίου και φωτονίου.

3.3 Μελέτη της επίδρασης της διάρκειας δειγματοληψίας στην εκτίμηση του υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ανίχνευση και τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενεργότητας των περιεχόμενων σε ένα δείγμα ραδιενεργών ισοτόπων είναι ο ακριβής προσδιορισμός του υποστρώματος κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Το υπόστρωμα της μέτρησης (background) διαχωρίζεται σε συνεχές υπόστρωμα (continuum background) και υπόστρωμα φωτοκορυφών (photopeak background). Το συνεχές υπόστρωμα μιας μέτρησης είναι κυρίως¹⁸ αποτέλεσμα της ανίχνευσης φωτονίων του δείγματος ή και του υποστρώματος μετά τη σκέδασή τους στη θωράκιση στο ίδιο το δείγμα ή και στον ανιχνευτή. Κατά τη συνήθη διαδικασία της γ-φασματοσκοπική ανάλυσης, το λογισμικό που χρησιμοποιείται αφαιρεί κατάλληλα το συνεχές υπόστρωμα, ώστε να προσδιορισθεί η καθαρή επιφάνεια (net area) της κάθε φωτοκορυφής. Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας ραδιενεργών ισοτόπων των οποίων οι φωτοκορυφές ανιχνεύονται στο υπόστρωμα του ανιχνευτή (photopeak background) χρειάζεται να γίνει επιπλέον με κατάλληλο τρόπο η αφαίρεση της επιφάνειας φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στο υπόστρωμα, ώστε να υπολογιστεί η καθαρή – διορθωμένη για υπόστρωμα – επιφάνεια φωτοκορυφής και εν συνεχεία η ενεργότητα του αντίστοιχου ραδιενεργού ισοτόπου. Προφανώς, αυτές οι καθαρές επιφάνειες φωτοκορυφών, που έχουν διορθωθεί με αφαίρεση του υποστρώματος, είναι ευαίσθητες στην κύμανση του υποστρώματος φωτοκορυφής, ειδικά σε χαμηλής ραδιενέργειας δείγματα¹⁹. Τέτοια δείγματα, για παράδειγμα, είναι τα δείγματα μικρού όγκου. Ένα σημείο ακόμα που παίζει μεγάλο ρόλο σε τέτοιου είδους αναλύσεις είναι η αβεβαιότητα της διορθωμένης φωτοκορυφής, η οποία επηρεάζεται τόσο από την αβεβαιότητα της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής, όσο και από την αβεβαιότητα της φωτοκορυφής του υποστρώματος²⁰.

¹⁸ Στο συνεχές υπόστρωμα συνεισφέρει και η αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με τον ανιχνευτή και τη θωράκιση, κάτι που ξεφεύγει από το αντικείμενο της διατριβής.

¹⁹ Και κατά συνέπεια μικρής επιφάνειας φωτοκορυφής.

²⁰ Για αβεβαιότητες σ_1 και σ_2 της επιφάνειας φωτοκορυφής του υποστρώματος και της επιφάνειας φωτοκορυφής του φάσματος ενός δείγματος αντίστοιχα, η αβεβαιότητα της διορθωμένης ως προς το υπόστρωμα επιφάνειας φωτοκορυφής είναι $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0.5}$.

Όπως έγινε εμφανές από τις προηγούμενες παραγράφους, στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ διαπιστώνεται κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, η οποία υπό προϋποθέσεις συσχετίζεται στατιστικά σημαντικά με το υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων. Για τον λόγο αυτό, στην παράγραφο αυτή της παρούσας Δ.Δ. μελετάται με λεπτομέρεια η χρονική κύμανση του υποστρώματος των ανιχνευτών που οφείλεται στο ραδόνιο και τα θυγατρικά ραδονίου και θορονίου²¹, και γίνεται σύγκριση μεταξύ μικρής και μεγάλης χρονικής διάρκειας φασμάτων υποστρώματος, με στόχο την ορθότερη επιλογή του φάσματος υποστρώματος λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους.

3.3.1 Συλλογή των φασμάτων υποστρώματος

Η χρονική διάρκεια συλλογής φάσματος υποστρώματος σε έναν ανιχνευτή επαφίεται στην κρίση του εκάστοτε ερευνητή. Μερικές από τις συνήθεις πρακτικές που ακολουθούνται είναι:

- i. η συλλογή φάσματος υποστρώματος για χρονική διάρκεια όση και η αναμενόμενη χρονική διάρκεια ανάλυσης του δείγματος,
- ii. η συλλογή φάσματος υποστρώματος μεγάλης χρονικής διάρκειας, ώστε να επιτευχθούν όσο το δυνατόν μικρότερες αβεβαιότητες στις φωτοκορυφές ενδιαφέροντος,
- iii. η συλλογή πολλών φασμάτων υποστρώματος και η χρήση της σταθμισμένης μέσης τιμής των αποτελεσμάτων²².

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μέχρι σήμερα ακολουθείται η πρακτική (ii) και συγκεκριμένα συλλέγεται ένα φάσμα υποστρώματος χρονικής διάρκειας 1000000s, απ' όπου προσδιορίζονται οι φωτοκορυφές υποστρώματος οι οποίες και πρέπει να αφαιρούνται κατάλληλα από τις αντίστοιχες φωτοκορυφές των αναλυόμενων δειγμάτων.

Το ερώτημα λοιπόν που τίθεται είναι κατά πόσον το υπόστρωμα κατά τη διάρκεια λήψης ενός φάσματος 48h, καθώς και η αβεβαιότητα που το συνοδεύει, εκτιμώνται κατάλληλα μέσω του φάσματος χρονικής διάρκειας 1000000s αυτού. Ειδικότερα, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί αν κάποια από τις προαναφερθείσες

²¹ Δε μελετήθηκε η κύμανση του ²²⁰Rn, ωστόσο οι φωτοκορυφές των θυγατρικών του ραδιενεργών ισοτόπων ανιχνεύονται στο υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων και παρουσιάζουν κύμανση.

²² Στο Παράρτημα ΙΑ δίνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σταθμισμένης μέσης τιμής.

περιπτώσεις (i) και (iii) οδηγούν στον υπολογισμό ενός πιο συντηρητικού²³ αποτελέσματος.

Με σκοπό τη διερεύνηση των ανωτέρω, και επιλέγοντας ως χρονική διάρκεια λήψης φάσματος υποστρώματος τα 172800sec (48h), που είναι και μία συνήθης χρονική διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, έγινε λήψη έξι διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος (Consecutive Spectra), με χρήση της επιλογής «SEQUENCE» του GENIE2000. Τα φάσματα συλλέχθηκαν ταυτόχρονα και για τους τέσσερις ανιχνευτές (XtRa, LEGe, Ge1, Ge2) με στόχο τον προσδιορισμό των κυρίαρχων φωτοκορυφών υποστρώματος, όπως αυτές δίνονται στον **Πίνακα 3.6**.

Πίνακας 3.6 : Οι φωτοκορυφές υποστρώματος που εξετάστηκαν.

Ραδιενεργό ισότοπο	Φωτοκορυφή (keV)	Ραδιενεργό ισότοπο	Φωτοκορυφή (keV)
Pb-210	46.54	Tl-208	583.19
Th-234	63.30		860.53
U-235 & Ra-226	185.99	Ac-228	338.32
Pb-212	87.20		911.20
	238.63		968.96
Pb-214	295.22	Cs-137 *	661.66
	351.93	Co-60**	1173.23
Bi-214	609.31		1332.49
	1120.29	K-40	1460.82
	1764.49		

* Εντοπίζεται στο υπόστρωμα του ανιχνευτή HPGe (33.8%) ο οποίος βρισκόταν σε λειτουργία πριν από το έτος 1986, οπότε έλαβε χώρα το ατύχημα του Τσερνόμπιλ

** Εντοπίζεται στο υπόστρωμα του ανιχνευτή LEGe λόγω της χρήσης ανακυκλωμένου μετάλλου για την κατασκευή της θωράκισής του που έγινε το 1987 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

3.3.2 Ανάλυση των φασμάτων υποστρώματος

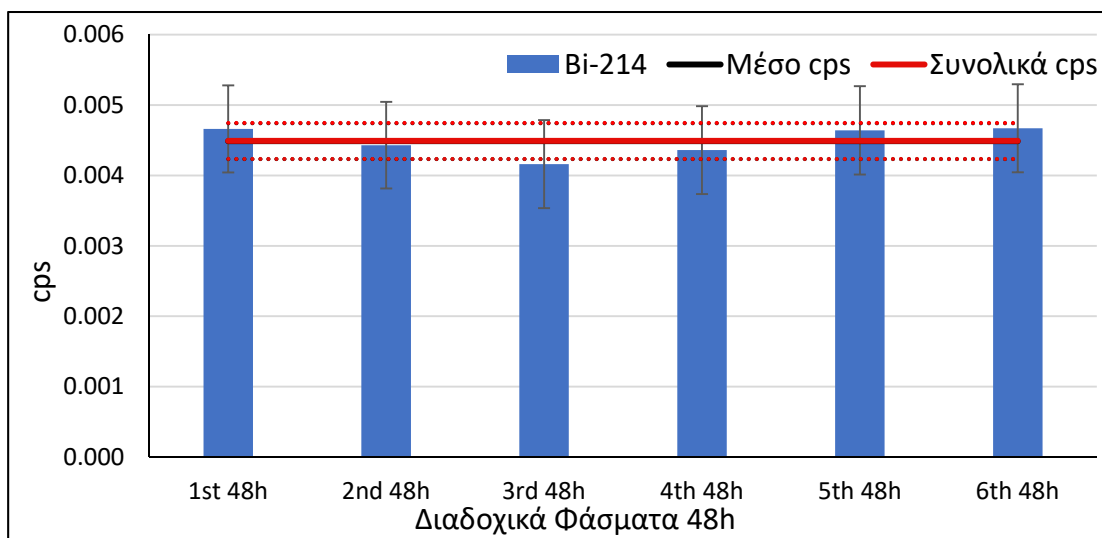
Για κάθε μία από τις φωτοκορυφές του **Πίνακα 3.6** προσδιορίστηκε ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και το αντίστοιχο σφάλμα για κάθε επιμέρους φάσμα χρονικής διάρκειας 172800sec και για κάθε ανιχνευτή. Ακολουθώς, υπολογίστηκαν για κάθε ανιχνευτή:

- ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και το αντίστοιχο σφάλμα για το φάσμα υποστρώματος που προέκυψε από την πρόσθεση των 6 επιμέρους διαδοχικών φασμάτων («**Συνολικά cps**») και την ανάλυσή τους ως ένα ενιαίο φάσμα,

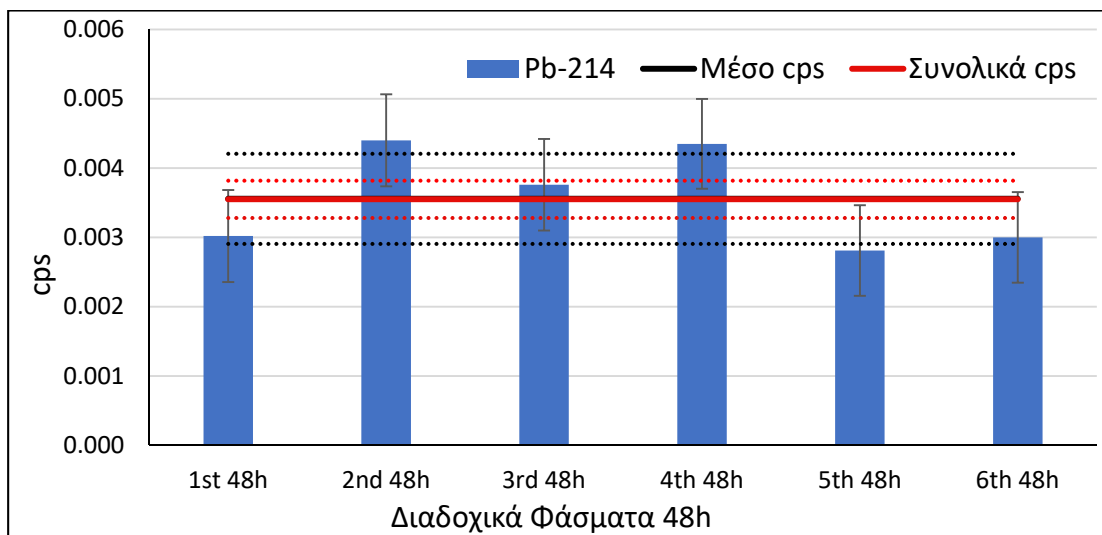
²³ Κατά τη μέτρηση, η υπερεκτίμηση της αβεβαιότητας είναι προτιμότερη από την υποεκτίμησή της, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη ανίχνευση ενός ισότοπου.

- η σταθμισμένη μέση τιμή του ρυθμού καταγραφής γεγονότων (cps) και το αντίστοιχο σφάλμα των 6 επιμέρους φασμάτων («Μέσο cps»).

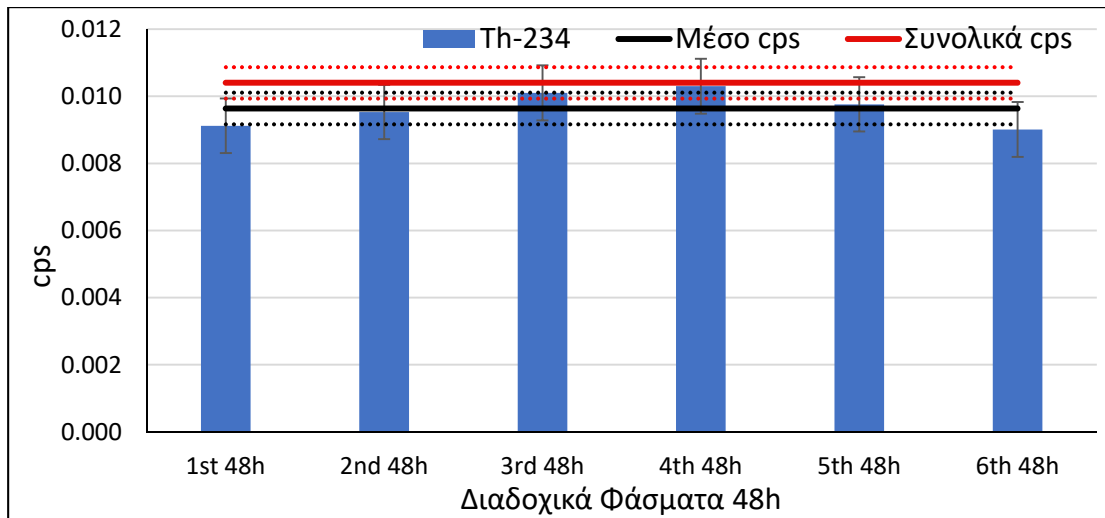
Στα Σχήματα 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 και 3.20 που ακολουθούν, καταγράφονται τα πλέον αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των αναλύσεων των φασμάτων υποστρώματος που συλλέχθηκαν. Το σύνολο των αποτελεσμάτων για κάθε φωτοκορυφή ενδιαφέροντος και για κάθε ανιχνευτή δίνεται στο Παράρτημα ΣΤ.



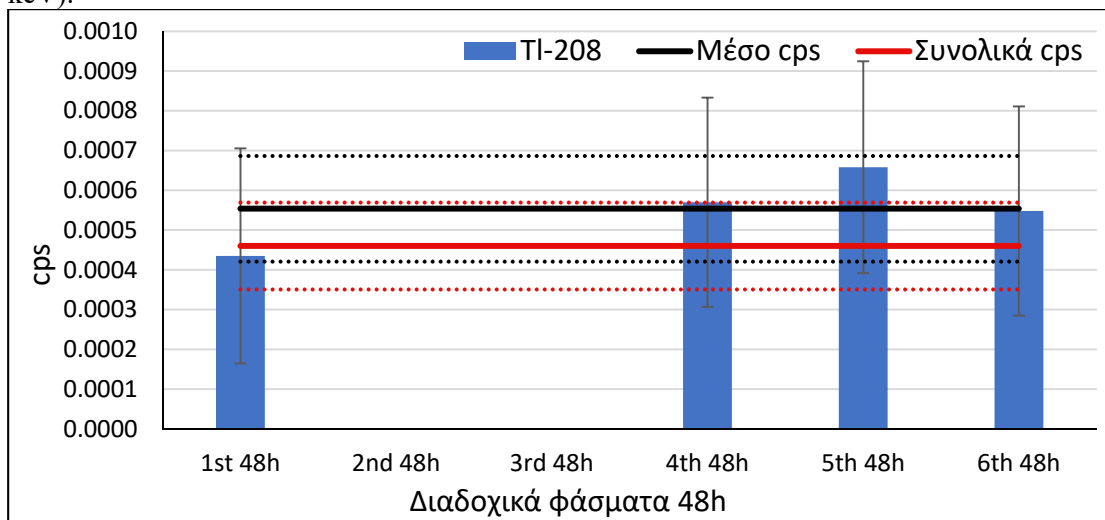
Σχήμα 3.16 : Σύγκριση διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος με τις τιμές των «Συνολικών cps» και του «Μέσου cps» για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (609.31 keV).



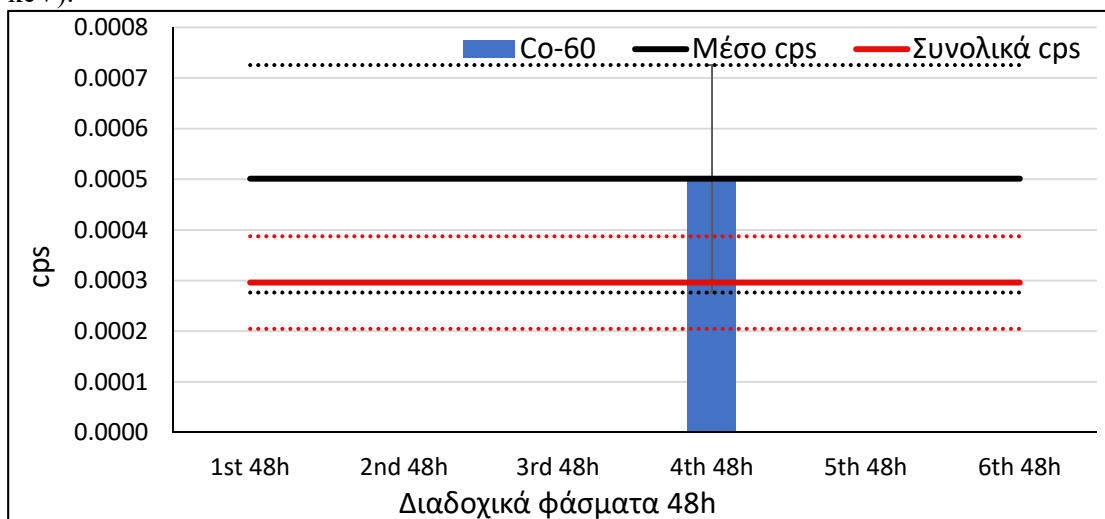
Σχήμα 3.17 : Σύγκριση διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος με τις τιμές του «Συνολικών cps» και του «Μέσου cps» για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (295.22 keV).



Σχήμα 3.18 : Σύγκριση διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος με τις τιμές των «Συνολικών cps» και του «Μέσου cps» για τον ανιχνευτή ΧtRa και τη φωτοκορυφή του ^{234}Th (63.30 keV).



Σχήμα 3.19 : Σύγκριση διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος με τις τιμές των «Συνολικών cps» και του «Μέσου cps» για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{208}Tl (583.19 keV).



Σχήμα 3.20 : Σύγκριση διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος με τις τιμές των «Συνολικών cps» και του «Μέσου cps» για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{60}Co (1173.23 keV).

Από τα αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 3.16, 3.17, 3.18, 3.19** και **3.20** εξάγονται μία σειρά συμπερασμάτων:

- i. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρούνται μικρές ως αμελητέες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών 48h φασμάτων καθώς και μεταξύ των «Συνολικών cps» με το «Μέσο cps» (**Σχήμα 3.16**). Η περίπτωση αυτή είναι και η ευκολότερη στην επιλογή της τιμής του υποστρώματος.
- ii. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται μεγάλη κύμανση μεταξύ των διαδοχικών 48h φασμάτων. Στις περιπτώσεις αυτές, παρόλο που η τιμή του «Μέσου cps» είναι πολύ κοντά στη τιμή των «Συνολικών cps», το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα του είναι πολύ μεγαλύτερο (**Σχήμα 3.17**).
- iii. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή «Μέσου cps» είναι σχετικά κοντά με την τιμή των «Συνολικών cps» και τα τυπικά σφάλματα είναι πολύ χαμηλά και περίπου ίδια (**Σχήμα 3.18**). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι αυτό ισχύει και για τη φωτοκορυφή του ^{234}Th , που δεν αποτελεί θυγατρικό του ραδονίου ή του θορονίου και παρουσιάζει κύμανση λόγω της στατιστικής της φωτοκορυφής.
- iv. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η φωτοκορυφή υποστρώματος είναι τόσο κοντά στα όρια ανίχνευσης που δεν ανιχνεύεται σε όλα τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος διάρκειας 48h (**Σχήμα 3.19**). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων διαφορών μεταξύ της τιμής του «Μέσου cps» με την τιμή των «Συνολικών cps» καθώς και μεταξύ των τυπικών τους σφαλμάτων (**Σχήμα 3.20**).

Τα παραπάνω συμπεράσματα δικαιολογημένα οδηγούν σε μία σειρά από ερωτήματα:

- i. Ποιο είναι το πιο αντιπροσωπευτικό φάσμα υποστρώματος και τυπικό σφάλμα που το συνοδεύει στην περίπτωση γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης χρονικής διάρκειας 2 ημερών (48h), όταν έχει συλλεχθεί φάσμα υποστρώματος 12 ημερών; Αν το «Μέσο cps» και τα «Συνολικά cps» έχουν περίπου την ίδια τιμή, η συντηρητική προσέγγιση θα ήταν να επιλεγεί το φάσμα υποστρώματος με την υψηλότερη αβεβαιότητα, που στις περισσότερες περιπτώσεις σχετίζεται με την τιμή του «Μέσου cps» (**Σχήμα 3.17**). Ωστόσο, αν η τιμή του «Μέσου cps» είναι πολύ διαφορετική από την τιμή των «Συνολικών cps» τότε η πιο συντηρητική προσέγγιση είναι να επιλεγεί το φάσμα υποστρώματος με την υψηλότερη τιμή cps μαζί με την αβεβαιότητά του (**Σχήμα 3.20**).

- ii. Ποιο είναι το αντιπροσωπευτικό φάσμα υποστρώματος και η αβεβαιότητα που το συνοδεύει στην περίπτωση μιας μικρής χρονικής διάρκειας μέτρησης, όταν οι φωτοκορυφές υποστρώματος είναι στα όρια ανίχνευσης και δεν εντοπίζονται πάντα στα διήμερα φάσματα υποστρώματος; Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αν χρησιμοποιηθεί διήμερο φάσμα υποστρώματος υπάρχει η πιθανότητα εσφαλμένα να αποδοθεί φωτοκορυφή από το υπόστρωμα στο δείγμα που έχει αναλυθεί (Σχήμα 3.19 και 3.20) ή να υπερεκτιμηθεί²⁴ μια υπαρκτή φωτοκορυφή του δείγματος. Συνεπώς, η συντηρητική προσέγγιση στην περίπτωση αυτή είναι η χρήση της τιμής του «Μέσου cps», που θα είναι και το υψηλότερο, και της αβεβαιότητάς που το συνοδεύει.

3.4 Δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων αερόλυματος

Μία από τις δραστηριότητες του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι και η παρακολούθηση της ραδιενέργειας στο αερόλυμα της ατμόσφαιρας. Αυτό γίνεται με κατάλληλη δειγματοληψία αέρα μέσα από ειδικά φίλτρα. Για τον σκοπό αυτό, το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει μία αντλία δειγματοληψίας αέρα υψηλής παροχής F&J DH-50810E η οποία βρίσκεται εγκατεστημένη στην οροφή του κτιρίου Κ, όπου στεγάζεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τις δειγματοληψίες είναι κατασκευασμένα από ίνες γυαλιού (glass fiber filters) διαστάσεων 8'x10'. Υπό κανονικές συνθήκες, και ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας, στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα ανιχνεύονται τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα ⁷Be και ²¹⁰Pb, και μερικές φορές ²²Na, παράλληλα με τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου (²²²Rn) και του θορονίου (²²⁰Rn). Σε περιπτώσεις καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, μπορεί να ανιχνευθούν και άλλα ραδιενεργά ισότοπα, όπως ¹³¹I, ¹³⁷Cs και ¹³⁴Cs (Potiriadis, et al., 2013), ενώ σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ακόμα και μη αναμενόμενα ραδιενεργά ισότοπα, όπως το ¹⁰⁶Ru (Masson, et al., 2019). Σε τέτοιες καταστάσεις, τα τεχνητά αυτά ραδιενεργά ισότοπα πρέπει να είναι ανιχνεύσιμα ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, της τάξης των mBq/m³ ή και μBq/m³, κάτι που σημαίνει ότι τα αντίστοιχα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα.

²⁴ Μία φωτοκορυφή υποστρώματος που δεν είναι ανιχνεύσιμη δε σημαίνει απαραίτητα ότι έχει επιφάνεια μηδενική. Στην περίπτωση αυτή η μη μηδενική επιφάνεια της μη ανιχνεύσιμης φωτοκορυφής του υποστρώματος θα αποδίδεται στο δείγμα, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της ραδιενέργειας του δείγματος.

Στόχος της έρευνας που παρουσιάζεται στην παράγραφο αυτή είναι η βελτίωση των κατώτερων επιπέδων ανίχνευσης (MDA) των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων δειγμάτων ατμοσφαιρικού αερολύματος²⁵ που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

3.4.1 Τα σενάρια δειγματοληψίας φίλτρων αέρα

Βάσει των δυνατοτήτων εξοπλισμού και προσωπικού του ΕΠΤ-ΕΜΠ, εμπειρίας προηγούμενων περιπτώσεων έκτακτης ανάγκης, καθώς και του προγράμματος συστηματικών δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αερολύματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, επιλέχθηκαν τα ακόλουθα σενάρια χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας: 6h, 24h, 48h, 120h & 168h. Η μέση παροχή αέρα κατά τη δειγματοληψία ήταν ~ 1160 SLPM. Για κάθε σενάριο έγινε συλλογή 2 φίλτρων αέρα με σκοπό τον έλεγχο της επαναληψιμότητας δειγματοληψιών και αναλύσεων. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί ότι στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων διερευνάται η απομείωση της ραδιενέργειας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου τα οποία συλλέγονται πάνω στο φίλτρο αέρα και τα οποία επιδρούν στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης άλλων ισοτόπων που ενδεχομένως συλλέγονται στο φίλτρο. Συνεπώς δεν ενδιαφέρει αυτή καθεαυτή η τιμή της ενεργότητας π.χ. ισοτόπων κοσμικής προέλευσης που ενδεχομένως συλλέγονται πάνω στα φίλτρα.

Τα φίλτρα που συλλέχθηκαν διπλώθηκαν σε γεωμετρία 5.08cm×6.35cm×0.9cm, η οποία έχει υιοθετηθεί και βαθμονομηθεί σε προηγούμενη εργασία (Savva, et al., 2018) και είναι η βασική γεωμετρία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα αυτού του τύπου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής XtRa (Savva, et al., 2014).

Μετά το πέρας της συλλογής ενός φίλτρου αέρα και έως την έναρξη της γ-φασματοσκοπικής του ανάλυσης, υπάρχει αναπόφευκτα μία μικρή καθυστέρηση (delay) λίγων λεπτών λόγω της μεταφοράς του φίλτρου από τη θέση δειγματοληψίας στον χώρο ανάλυσης, τη συσκευασία του φίλτρου σε κατάλληλη γεωμετρία, καθώς και την τοποθέτησή του μέσα στον ανιχνευτή. Για κάθε φίλτρο αέρα συλλέχθηκαν τα ακόλουθα φάσματα με χρήση της επιλογής «SEQUENCE» του προγράμματος GENIE2000:

²⁵ Δείγματα «φίλτρων αέρα» όπως θα αναφέρονται στο υπόλοιπο της παρούσας παραγράφου.

- i. ένα φάσμα χρονικής διάρκειας 2h, αμέσως μετά την τοποθέτηση του φίλτρου στον ανιχνευτή,
- ii. τέσσερα διαδοχικά φάσματα χρονικής διάρκειας 6h έκαστο (μετά το αρχικό 2h φάσμα),
- iii. τρία διαδοχικά φάσματα χρονικής διάρκειας 24h έκαστο (μετά το αρχικό 2h φάσμα και τα τέσσερα 6h φάσματα).

Η συλλογή του αρχικού φάσματος χρονικής διάρκειας 2h έγινε με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο υπόβαθρο της μέτρησης. Ο λόγος που επιλέχθηκαν να συλλεχθούν στη συνέχεια τα φάσματα σε τμήματα των 6h και 24h είναι για να επιτευχθεί καλύτερη εποπτεία της εξέλιξης του ρυθμού μείωσης της συγκέντρωσης ενεργότητας των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου, και κατ' επέκταση της επίδρασή τους στη βελτίωση του συνεχούς υποστρώματος και εντέλει των κατώτερων επιπέδων ανίχνευσης (MDA). Όλα τα συλλεχθέντα φάσματα αναλύθηκαν με τον κώδικα SPUNAL (Simopoulos, 1989), ενώ οι τελικοί υπολογισμοί ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου έγιναν με χρήση του εργαλείου RadCal που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. σε υπολογιστικό φύλλο excel (Παράρτημα Ζ). Τονίζεται ότι στη φάση αυτή της διερεύνησης, η επιφάνεια των φωτοκορυφών των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου παρέχει πληροφορία για το συνεχές υπόστρωμα που παράγεται στο φάσμα εξαιτίας τους και επιδρά εντέλει στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης.

3.4.2 Αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των φίλτρων αέρα

Για κάθε φίλτρο αέρα που συλλέχθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης και για κάθε σενάριο δειγματοληψίας και ανάλυσης που εφαρμόστηκε:

- i. υπολογίστηκε ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb (351.93 keV) και ^{214}Bi (609.31 keV), και του θορονίου ^{212}Pb (238.63 keV) και ^{208}Tl (583.19 keV),
- ii. υπολογίστηκαν τα MDAs των παρακάτω ραδιενεργών ισοτόπων: ^7Be (477.6 keV), ^{106}Ru (621.90 keV μέσω του ^{106}Rh), ^{22}Na (1274.54 keV), ^{137}Cs (661.66 keV), ^{134}Cs (604.72 keV) και ^{131}I (364.49keV), χρησιμοποιώντας τη

μεθοδολογία που περιγράφεται στο (Gilmore, 2008) και παρουσιάζεται στο Παράρτημα Η.

Στον **Πίνακα 3.7** δίνεται ο κατάλογος των φίλτρων αέρα που συλλέχθηκαν για τα διάφορα σενάρια δειγματοληψίας.

Πίνακας 3.7: Κατάλογος δειγμάτων φίλτρων αέρα που συλλέχθηκαν και τα αντίστοιχα σενάρια δειγματοληψίας.

Κωδικός φίλτρου αέρα	Σενάριο δειγματοληψίας (h)	Delay (min)	Συνολικός όγκος αέρα (m ³)
a0532	6	13.5	422.03
a0533	6	6.0	399.39
a0534	24	4.5	1574.8
a0535	24	10.0	1601.5
a0536	24	10.4	1627.8
a0537	48	9.2	3435.0
a0577	48	5.4	3727.2
a0538	120	9.3	8363.9
a0542	120	9.2	8680.2
a0539	168	9.2	12437
a0541	168	10.7	11769

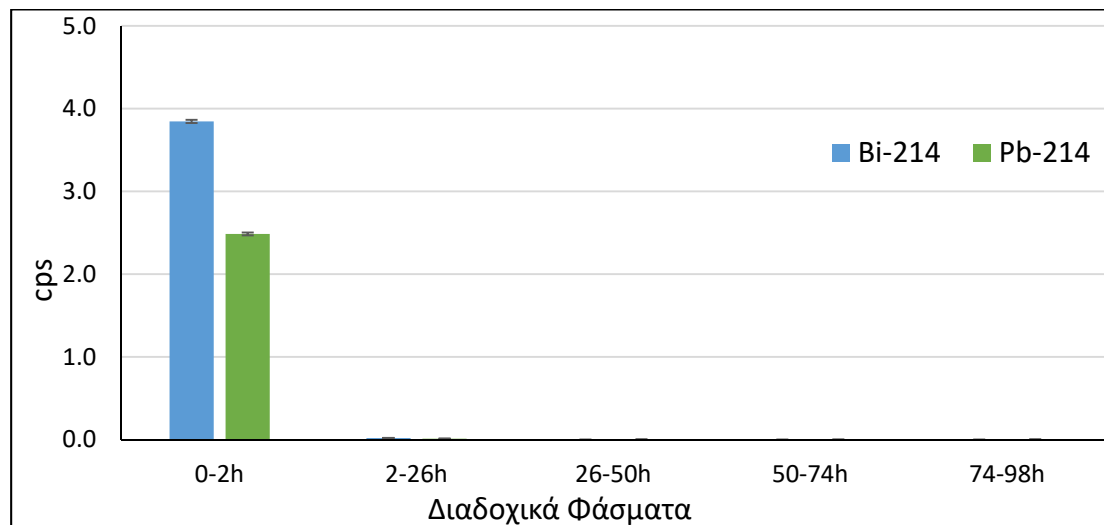
Από την ανάλυση των παραπάνω φασμάτων εκτιμήθηκε η επιφάνεια φωτοκορυφής για όλες τις ενέργειες φωτονίων που αναφέρονται παραπάνω και προσδιορίστηκε ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps). Ακολουθούν αντιπροσωπευτικά διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του cps των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου για τα διάφορα σενάρια δειγματοληψίας²⁶ και ανάλυσης. Το σύνολο των διαγραμμάτων για όλα τα σενάρια δειγματοληψίας και ανάλυσης και για όλα τα συλλεχθέντα φίλτρα δίνεται στο Παράρτημα Θ.

Από το **Σχήμα 3.21** που ακολουθεί προκύπτει ότι, ανεξαρτήτως από το σενάριο δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, η επίδραση των θυγατρικών του ραδονίου στο υπόστρωμα φωτοκορυφών και κατά συνέπεια και στο συνεχές²⁷ υπόστρωμα, μειώνεται σημαντικά μετά το πέρας των πρώτων 2h από τη συλλογή του

²⁶ Για το σενάριο δειγματοληψίας 24h έγιναν 3 δειγματοληψίες φίλτρων αέρα.

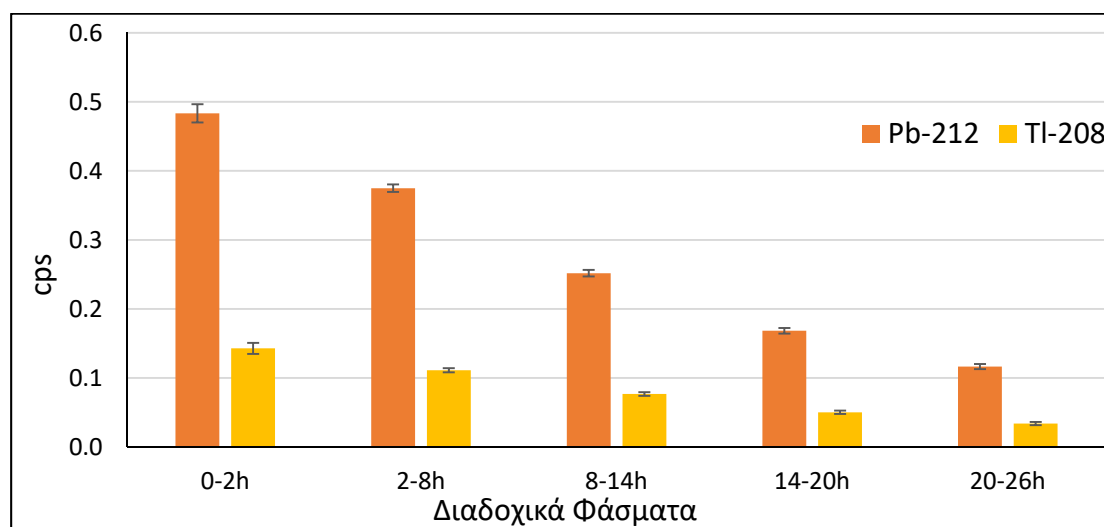
²⁷ Τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης επηρεάζονται από το συνεχές υπόστρωμα του φάσματος που οφείλεται στις σκεδάσεις των φωτονίων από τα βραχύβια θυγατρικά ραδονίου και θορονίου και όχι άμεσα από τις φωτοκορυφές του υποστρώματος. Οι φωτοκορυφές λόγω των βραχύβιων θυγατρικών ραδονίου και θορονίου όμως παρέχουν ένδειξη για το αντίστοιχο συνεχές υπόστρωμα.

δείγματος φίλτρου αέρα, ως αποτέλεσμα των μικρών χρόνων ημιζωής των ραδιενεργών ισωτόπων ^{214}Bi και ^{214}Pb .

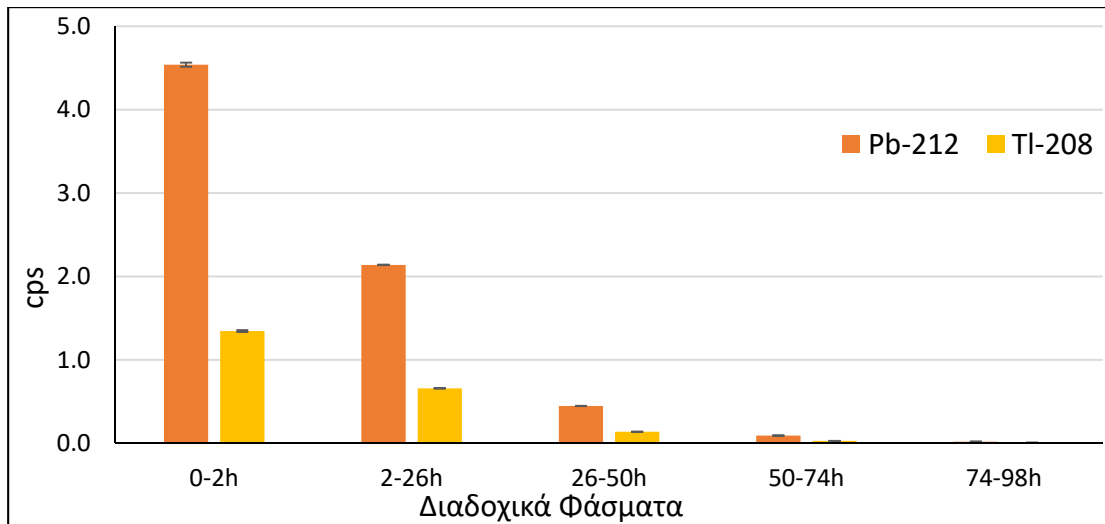


Σχήμα 3.21 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0538).

Σε αντίθεση με τα θυγατρικά του ραδονίου, τα θυγατρικά του θορονίου (^{212}Pb και ^{208}Tl), λόγω του μεγαλύτερου χρόνου ημιζωής του ^{212}Pb , έχουν σημαντική παρουσία στο υπόστρωμα φωτοκορυφών και κατά συνέπεια και στο συνεχές υπόστρωμα των μετρήσεων για αρκετές μέρες μετά το πέρας της δειγματοληψίας, όπως προκύπτει από τα **Σχήματα 3.22** και **3.23**. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι, προκειμένου να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο τα επίπεδα ανίχνευσης, χρειάζεται αναμονή της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του φίλτρου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να υπερβαίνει και τις 48 ώρες στην περίπτωση δειγματοληψίας αέρα πολύ μεγάλης διάρκειας.

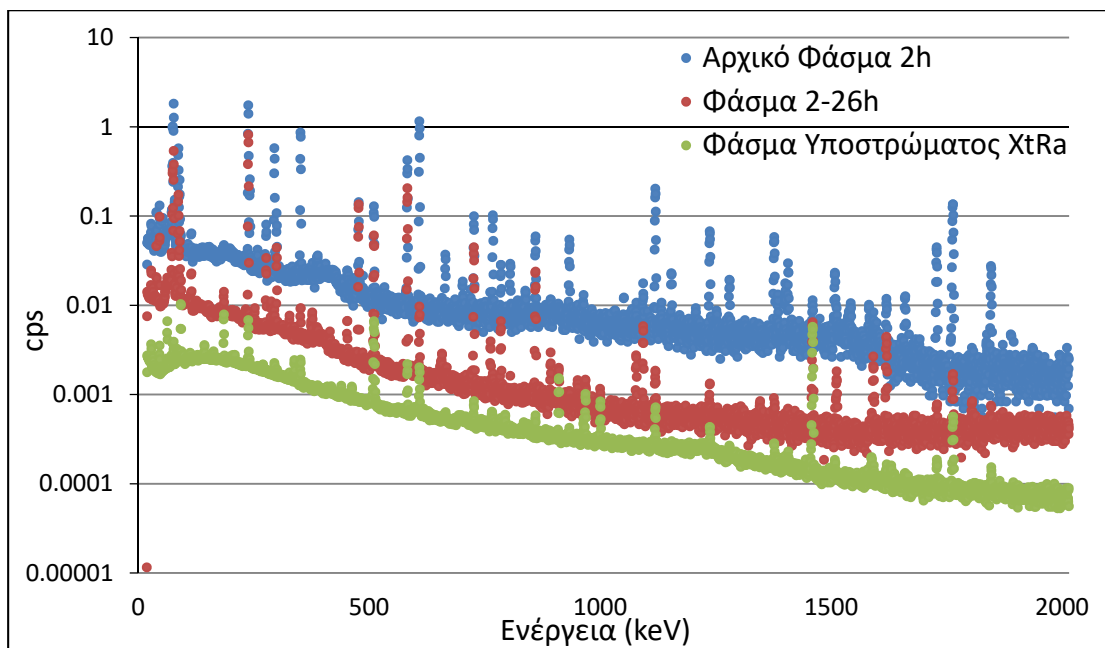


Σχήμα 3.22 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 6h (φίλτρο a0532).



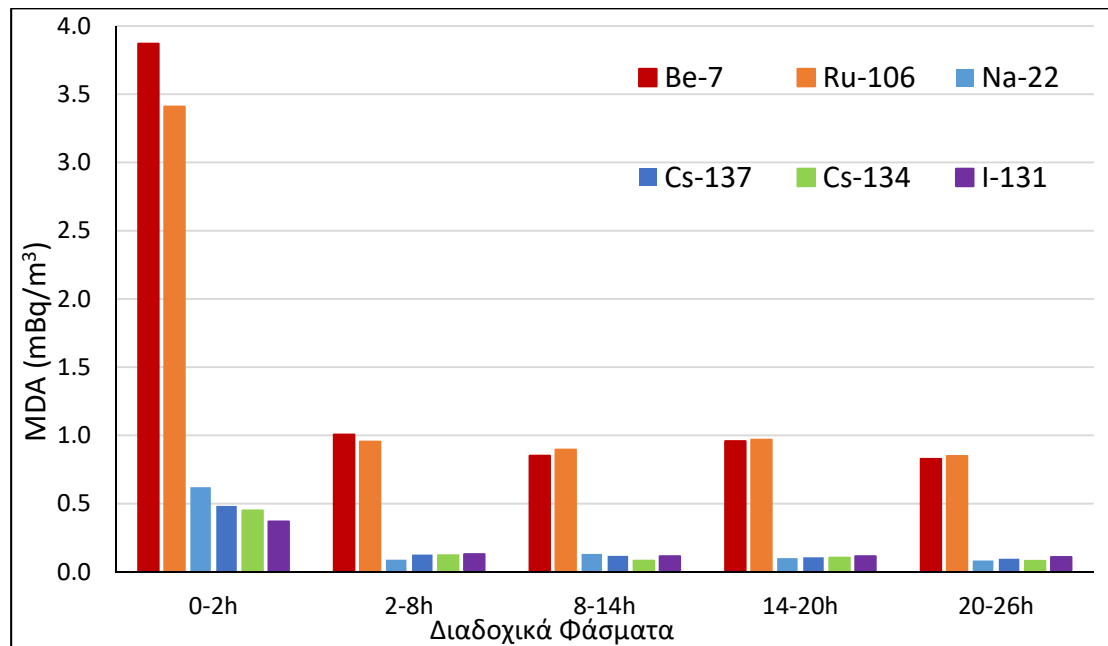
Σχήμα 3.23 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0538).

Στο **Σχήμα 3.24** που ακολουθεί γίνεται σύγκριση του φάσματος υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa με τα συλλεχθέντα φάσματα από την ανάλυση του φίλτρου a0538 (διάρκεια δειγματοληψίας 120h) για τις πρώτες 2h μετά το πέρας της δειγματοληψίας, καθώς και για το χρονικό διάστημα 2-26h. Από το σχήμα αυτό επιβεβαιώνεται η έντονη επίδραση των θυγατρικών του ραδονίου και θορονίου στο συνεχές υπόστρωμα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και τονίζεται το γεγονός πως μετά την παρέλευση 2 ωρών από το πέρας της δειγματοληψίας του φίλτρου αέρα, το συνεχές υπόστρωμα της μέτρησης έχει βελτιωθεί, αλλά δεν φτάνει ακόμα το φάσμα υποστρώματος του ανιχνευτή.

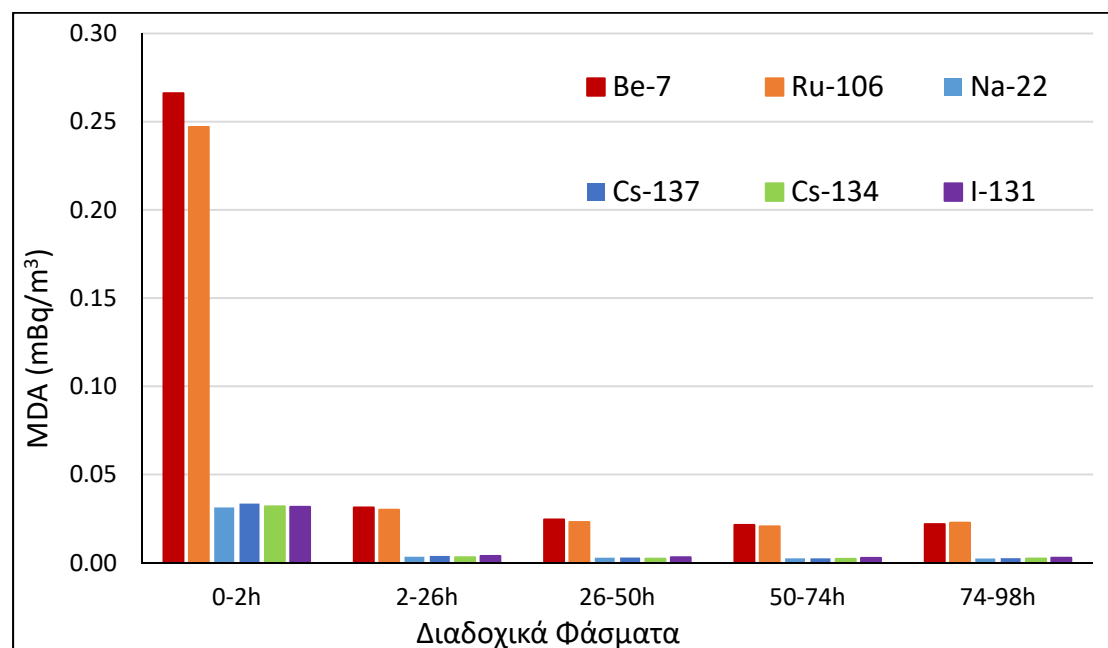


Σχήμα 3.24 : Σύγκριση φάσματος υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa με το αρχικό φάσμα 2h και το φάσμα 2-26h από τη δειγματοληψία 120h του φίλτρου αέρα a0538.

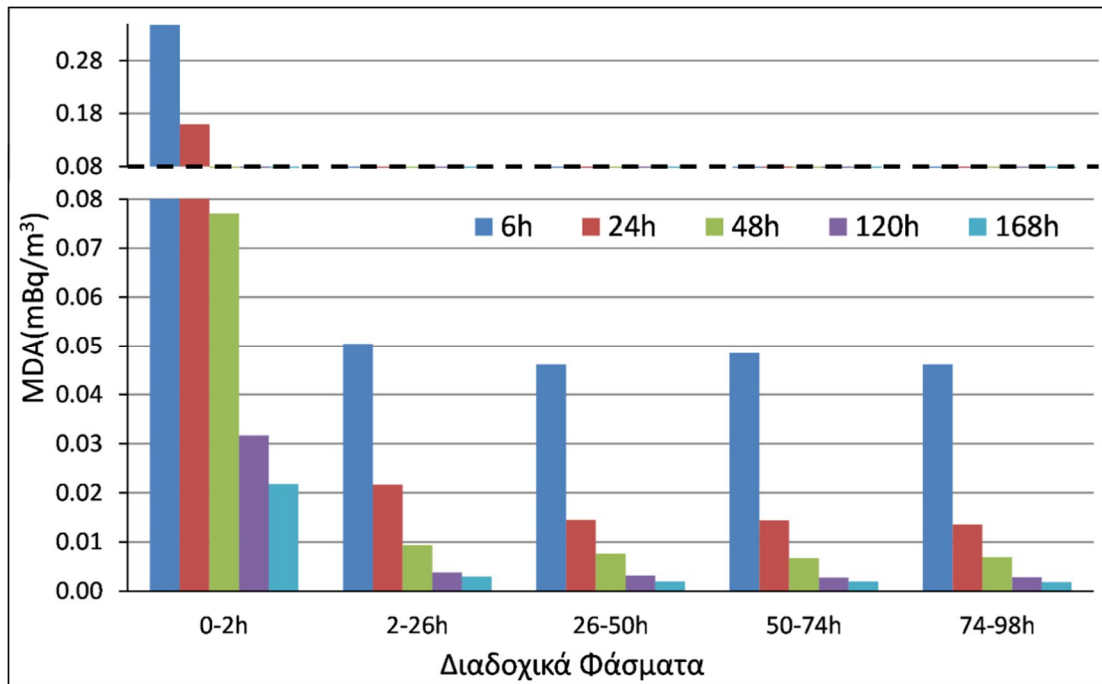
Επιπροσθέτως, στα *Σχήματα 3.25, 3.26* και *3.27* δίνονται αντιπροσωπευτικές τιμές για τη χρονική εξέλιξη των κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης (MDA) για μία σειρά φωτοκορυφών επιλεγμένων ραδιενεργών ισότοπων και για χαρακτηριστικά σενάρια δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα. Το σύνολο των διαγραμμάτων που αφορούν τη χρονική εξέλιξη του MDA για τα διάφορα σενάρια δειγματοληψίας δίνεται στο Παράρτημα Ι.



Σχήμα 3.25 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 6h.



Σχήμα 3.26 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 120h.



Σχήμα 3.27 : Χρονική εξέλιξη του MDA για το I-131 σε φίλτρα ατμοσφαιρικού αέρα διαφορετικής διάρκειας δειγματοληψίας.

Από τα αντιπροσωπευτικά γραφήματα που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 3.24, 3.25** και **3.26**, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i. μια αρχική καθυστέρηση χρονικής διάρκειας 2h μεταξύ της συλλογής του φίλτρου αέρα και της δειγματοληψίας βελτιώνει σημαντικά τα MDA,
- ii. όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση έναρξης της ανάλυσης του φίλτρου αέρα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η βελτίωση του MDA, ειδικά για μεγάλης διάρκειας δειγματοληψίες αέρα,
- iii. καθυστέρηση μεγαλύτερη των 50h έχει πολύ μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, ακόμα και για δειγματοληψίες πολλών ημερών,
- iv. για τον προσδιορισμό βραχύβιων ραδιενεργών ισοτόπων, όπως το ^{131}I , ο χρόνος ημιζωής τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του κατάλληλου χρόνου καθυστέρησης για την επίτευξη του βέλτιστου MDA.

Ένα ακόμα σημείο που είναι σημαντικό να τονισθεί στην περίπτωση δειγματοληψιών μεγάλης διάρκειας είναι ότι η πολύ υψηλή αρχική συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στα φίλτρα αέρα οδηγεί στην εμφάνιση αξιόλογων φωτοκορυφών από φωτόνια τα οποία έχουν πολύ χαμηλά ποσοστά εκπομπής. Οι φωτοκορυφές αυτές συνήθως δεν απαντώνται στα φάσματα ή δεν αξιολογούνται κατά τη διαδικασία της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Η εμφάνιση των φωτοκορυφών αυτών μπορεί να προκαλέσει σύγχυση στον ερευνητή, να

οδηγήσει σε παρερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και στην απόδοσή τους σε άλλα ραδιενεργά ισότοπα. Ενδεικτικά, μπορεί εσφαλμένως να αποδοθούν:

- οι φωτοκορυφές 277.37 keV και 763.45 keV του ^{208}Tl ως φωτοκορυφές των ^{239}Np (277.60 keV) και $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (763.49 keV) αντίστοιχα,
- η φωτοκορυφή 658.7 keV του ^{214}Bi ως φωτοκορυφή του $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (657.76 keV),
- η φωτοκορυφή 53.23 keV του ^{214}Pb ως φωτοκορυφή του ^{133}Ba (53.16 keV).

3.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας καθώς και η επίδραση της κύμανσης αυτής, στα φάσματα υποστρώματος των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από τις μετρήσεις που έγιναν διαπιστώθηκε ότι η συγκέντρωση του ραδονίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση με τα βραχύβια θυγατρικά του, καθώς και με τις αντίστοιχες φωτοκορυφές που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα των ανιχνευτών, ενώ παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη αέριου αζώτου στο εσωτερικό της θωράκισης των ανιχνευτών δεν επηρεάζει σημαντικά τη συσχέτιση αυτή. Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ότι οι εξωτερικές μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν στατιστικά σημαντικά την κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εσωτερικό του εργαστηρίου και κατ' επέκταση και το υπόστρωμα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων. Ειδικότερα παρατηρήθηκαν:

- i. Ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου με την εξωτερική θερμοκρασία, καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής (εντός του εργαστηρίου) από την εξωτερική θερμοκρασία ($\Delta T_{\text{out-in}}$).
- ii. Ασθενής αρνητική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου με την εξωτερική πίεση, καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής (εντός του εργαστηρίου) από την εξωτερική πίεση ($\Delta P_{\text{out-in}}$).
- iii. Ασθενής αρνητική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου με την ταχύτητα του ανέμου (εξωτερικά του εργαστηρίου).

Ένα άλλο θέμα που διερευνήθηκε ήταν η κύμανση των φωτοκορυφών των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στα φάσματα υποστρώματος και παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαδοχικών φασμάτων διάρκειας 48h στους επιλεγμένους ανιχνευτές γερμανίου. Από την ανάλυση και επεξεργασία

μεγάλου πλήθους φασμάτων υποστρώματος προέκυψε μία σειρά συμπερασμάτων και συστάσεων για τη χρήση των υποστρωμάτων, κυρίως κατά την ανάλυση δειγμάτων με χαμηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας:

- i. Το φάσμα υποστρώματος που θα χρησιμοποιηθεί για μιας μικρής χρονικής διάρκειας γ-φασματοσκοπική ανάλυση θα πρέπει να είναι το «Μέσο cps» από πολλαπλά φάσματα υποστρώματος ίσης χρονικής διάρκειας με τη χρονική διάρκεια ανάλυσης του δείγματος. Η χρήση των «Συνολικών cps» προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις όπου μια συγκεκριμένη φωτοκορυφή του φάσματος υποστρώματος δεν είναι παρούσα σε όλα τα επιμέρους μικρής χρονικής διάρκειας φάσματα υποστρώματος.
- ii. Για μεγάλης χρονικής διάρκειας γ-φασματοσκοπική ανάλυση προτείνεται η χρήση φάσματος υποστρώματος «Συνολικών cps».
- iii. Για γ-φασματοσκοπική ανάλυση χρονικής διάρκειας μικρότερη των 24h, η ημερήσια κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα.
- iv. Παρά το γεγονός ότι η διοχέτευση της εξάτμισης του υγρού αζώτου στο εσωτερικό της θωράκισης μειώνει σημαντικά το υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων, δεν απαλείφει την επίδραση της κύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου στις φωτοκορυφές του φάσματος υποστρώματος. Αυτό υποδεικνύει ότι επιπρόσθετα μέτρα για τη μείωση του υποστρώματος των ανιχνευτών χρειάζεται να λάβουν χώρα.
- v. Για μικρής χρονικής διάρκειας γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις φίλτρων αέρα, μια χρονική καθυστέρηση 2h μεταξύ της λήψης του δείγματος και της έναρξης της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης θεωρείται κρίσιμη για τη σημαντική βελτίωση των MDAs.
- vi. Για μεγάλης χρονικής διάρκειας γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις μια χρονική καθυστέρηση 24h μεταξύ της λήψης του δείγματος και της έναρξης της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης θα βελτιώσει σημαντικά τα MDAs.
- vii. Μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας καθυστέρηση θα οδηγήσει σε πολύ μικρή βελτίωση των MDAs και δεν προτείνεται, ειδικά όταν σκοπός είναι ο προσδιορισμός βραχύβιων ραδιενεργών ισοτόπων.
- viii. Στην περίπτωση δειγματοληψιών μεγάλης διάρκειας, η έντονη παρουσία τις πρώτες ημέρες των βραχύβιων θυγατρικών ραδονίου και θορονίου στο δείγμα,

μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη απόδοση φωτοκορυφών σε ισότοπα που δεν υπάρχουν στο δείγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στη μέτρηση του ^{210}Pb στην ατμόσφαιρα

4.1 Εισαγωγή

Το ραδιενεργό ισότοπο ^{210}Pb είναι το θυγατρικό του ^{222}Rn με το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής (22.23 έτη). Η παραγωγή του, η μεταφορά του στο περιβάλλον καθώς και οι μηχανισμοί εναπόθεσής του έχουν αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης μεγάλου πλήθους ερευνών, όπως παρουσιάστηκε και στο 2^ο κεφάλαιο. Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις και οι ρυθμοί εναπόθεσης του ^{210}Pb χρησιμοποιούνται για τη μελέτη μεταφοράς αερίων μαζών, για τον υπολογισμό χρόνων παραμονής σωματιδίων του αερολύματος στην ατμόσφαιρα, καθώς και για την αξιολόγηση μοντέλων προσομοίωσης της παγκόσμιας κυκλοφορίας αερίων μαζών (Li, et al., 2018), (Rangarajan, et al., 1986), (Vecchi, et al., 2005), (Baskaran, 1995), (Baskaran, 2011), (Gaggeler, et al., 1995). Παρά το γεγονός ότι σε παγκόσμιο επίπεδο, η συγκέντρωση του ^{210}Pb θεωρείται σταθερή²⁸, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του σε τοπικό επίπεδο επηρεάζονται σημαντικά από εποχικές μεταβολές, από μετεωρολογικές παραμέτρους καθώς και από ανθρωπογενείς παράγοντες (Rangarajan, et al., 1975), (Baskaran, 2011), (Balkanski, et al., 1993).

Στις δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αερολύματος με χρήση αντλιών και φίλτρων αέρα γίνεται ταυτόχρονη δειγματοληψία, τόσο του ^{210}Pb που βρίσκεται στον αέρα, όσο και των λοιπών βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Όλα τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου τα οποία συλλέγονται (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi και ^{214}Po) τελικά θα διασπαστούν πάνω στο φίλτρο σε ^{210}Pb , στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, πριν ακόμα αρχίσει η γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φίλτρου²⁹. Ως αποτέλεσμα, κατά τη

²⁸ Λόγω του σταθερού ρυθμού παραγωγής και κατανάλωσης.

²⁹ Ειδικά στην περίπτωση μεγάλης καθυστέρησης πριν τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

γ-φασματοσκοπική ανάλυση μετριέται κυρίως μόνο ^{210}Pb , ο οποίος οφείλεται (i) στο ^{210}Pb που συλλέχθηκε πάνω στο φίλτρο ως ^{210}Pb και (ii) στο ^{210}Pb που παρήχθη από τη διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που συλλέχθηκαν στο φίλτρο. Η εκτίμηση του ποια είναι τελικά η ποσότητα του ^{210}Pb που συλλέχθηκε ως ^{210}Pb στο φίλτρο³⁰ δεν είναι εύκολη, καθώς, εκτός των άλλων, τόσο η συγκέντρωση του ^{210}Pb , όσο και η συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στον ατμοσφαιρικό αέρα παρουσιάζει κύμανση. Η κύμανση αυτή εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου (Singh, et al., 2005), (Mostafa, et al., 2020), (Aquilina & Fenech, 2019), (Gaggeler, et al., 1995). Για τον λόγο αυτό, στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας Δ.Δ. κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία διερεύνηση, με στόχο να εκτιμηθεί το μέγεθος της επίδρασης που έχουν τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο, στη συνολική ποσότητα ^{210}Pb που ανιχνεύεται πάνω στο φίλτρο κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, και εντέλει στην ακρίβεια με την οποία γίνεται ο προσδιορισμός του ^{210}Pb που βρίσκεται στον αέρα.

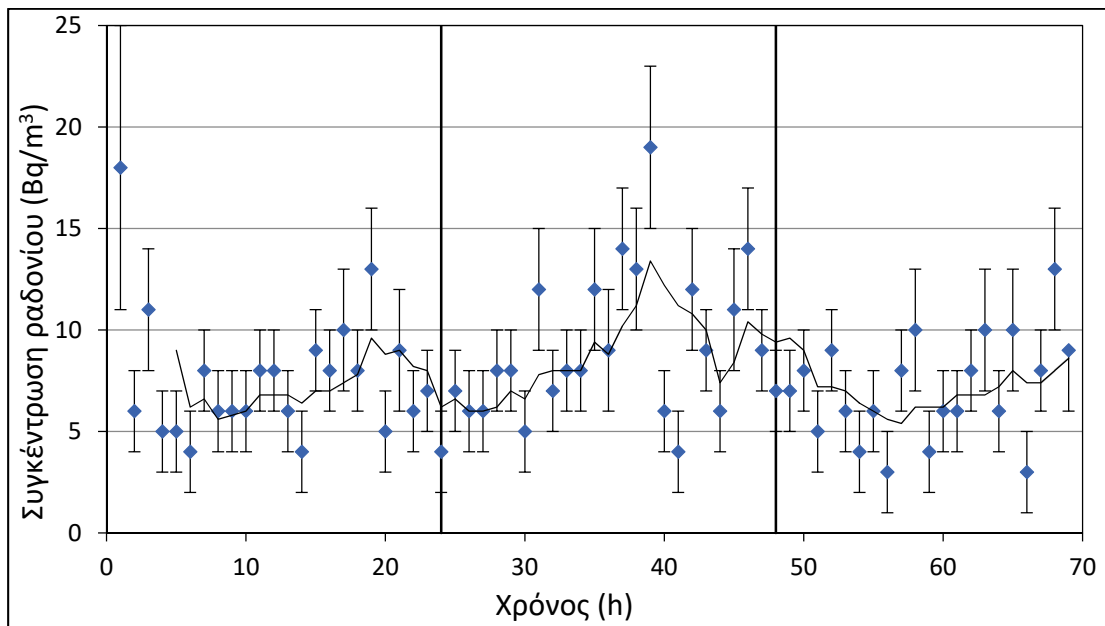
4.2 Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του στην ατμόσφαιρα

Στα πλαίσια της διερεύνησης, αρχικά, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει παρακολούθηση της κύμανσης που παρουσιάζει η συγκέντρωση του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του στο εξωτερικό περιβάλλον. Στην περίπτωση που η κύμανση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί αμελητέα, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου θα μπορούσε να επιτευχθεί σχετικά εύκολα με μία μόνο μέτρηση. Αντιθέτως, στην περίπτωση που η κύμανση που παρουσιάζεται είναι μεγάλη, θα έπρεπε να αναπτυχθεί μία διαδικασία για την παρακολούθηση και την καταγραφή της κύμανσης αυτής.

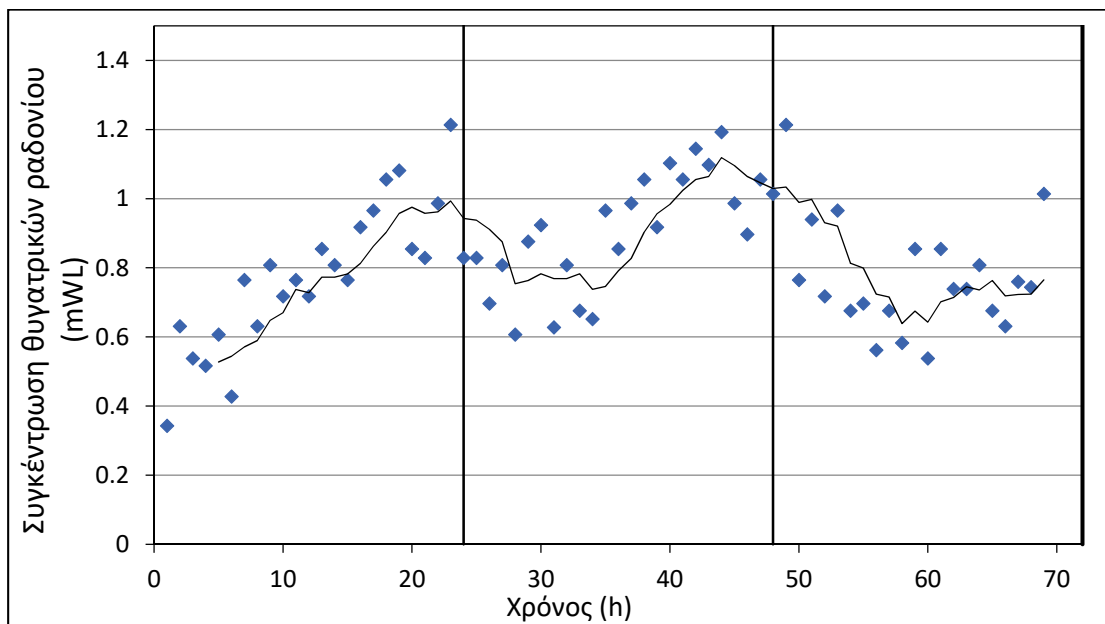
Για τον σκοπό αυτό, το χρονικό διάστημα μεταξύ 19/10/2021 – 22/10/2021 έγινε μία σειρά προκαταρκτικών μετρήσεων του ραδονίου και των θυγατρικών του με τη διάταξη ALPHAGUARD-ALPHAPM, η οποία τοποθετήθηκε στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε μεταξύ 13.8°C – 25.8°C, η σχετική υγρασία μεταξύ 42.3% – 74.5% και η

³⁰ Δηλαδή ποια είναι η συγκέντρωση του ^{210}Pb στο αερόλυμα.

ατμοσφαιρική πίεση μεταξύ 995.3mbar – 1003.8mbar. Στα **Σχήματα 4.1** και **4.2** που ακολουθούν, παρουσιάζεται η χρονική κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του. Από τα γραφήματα αυτά διαπιστώνεται η – αναμενόμενη – ύπαρξη σημαντικής κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, με το συντελεστή ισορροπίας F μεταξύ τους να εκτιμάται σε 0.44 ± 0.18 . Η επιβεβαίωση της χρονικής κύμανσης καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την παρακολούθηση των θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια μίας δειγματοληψίας μεγάλης διάρκειας που γίνεται με στόχο την ανίχνευση του ^{210}Pb .



Σχήμα 4.1 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 19/10/21-22/10/21.



Σχήμα 4.2 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 19/10/21-22/10/21.

4.3 Μεθοδολογία δειγματοληψίας και ανάλυσης

Για την διάκριση του ^{210}Pb που συλλέγεται στο φίλτρο ως ^{210}Pb από εκείνον που είναι αποτέλεσμα της διάσπασης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου τα οποία συλλέχθηκαν στο φίλτρο, χρησιμοποιήθηκαν δύο αντλίες:

- i. F&J DH-50810E High Volume Air Sampler με φίλτρα 8''x10'' (θα αναφέρεται ως «μεγάλη αντλία»). Η αντλία αυτή χρησιμοποιείται για τη συλλογή αερολύματος μεγάλης διάρκειας. Στην περίπτωση αυτή στα φίλτρα συλλέγεται και ο ^{210}Pb σε ανιχνεύσιμα επίπεδα.
- ii. Staplex TFIA-2 220 Volts AC/DC (s/n 21688N), με φίλτρα 4''³¹ (θα αναφέρεται ως «μικρή αντλία»). Η αντλία αυτή χρησιμοποιείται για τη συλλογή αερολύματος μικρής διάρκειας και τον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου.

Ο σχεδιασμών των δειγματοληψιών αυτών ήταν τέτοιος ώστε:

- i. να συλλεχθούν πολλαπλά φίλτρα αέρα 4'' μικρής διάρκειας, τα οποία θα αναλυθούν με γ-φασματοσκοπία αμέσως μετά το πέρας κάθε δειγματοληψίας, ώστε να προσδιορισθούν οι συγκεντρώσεις των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου (^{214}Pb , ^{214}Bi) στον ατμοσφαιρικό αέρα,
- ii. να συλλεχθεί παράλληλα με τα φίλτρα 4'' ένα φίλτρο 8''x10'' το οποίο θα αναλυθεί με γ-φασματοσκοπία και θα προσδιορισθεί η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{210}Pb σε αυτό,
- iii. να υπολογισθεί η συνεισφορά στο συνολικό ^{210}Pb που ανιχνεύεται στο φίλτρο, του ^{210}Pb που παράγεται στο φίλτρο 8''x10'' ως αποτέλεσμα της διάσπασης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που συλλέχθηκαν στο φίλτρο αυτό.

Προς την κατεύθυνση αυτή, η διαδικασία που περιγράφεται προηγουμένως επαναλήφθηκε δύο φορές, ώστε να ελεγχθούν τα τελικά αποτελέσματα για επαναληψιμότητα. Συγκεκριμένα, έγιναν δύο τριήμερες³² δειγματοληψίες (30/3/22 - 1/4/22 και 10/5/22 - 12/5/22). Σε κάθε τριήμερη δειγματοληψία συλλέχθηκαν 12 φίλτρα 4'' και ένα φίλτρο 8''x10''. Ειδικότερα, σε κάθε ημέρα δειγματοληψίας συλλέχθηκαν τέσσερα φίλτρα 4'' χρονικής διάρκειας 1h με 64min παύση μεταξύ των

³¹ Η βαθμονόμηση του φίλτρου από ίνες γυαλιού διαμέτρου 4'' (100 Staplex Type TFAGF41) για τον ανιχνευτή XtRa έγινε μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo, με χρήση του κώδικα PENELOPE και δίνεται στο Παράρτημα ΙΔ.

³² Η δειγματοληψία δεν ήταν 24ωρη, αλλά διαρκούσε 8 ώρες κάθε μέρα για τρεις ημέρες.

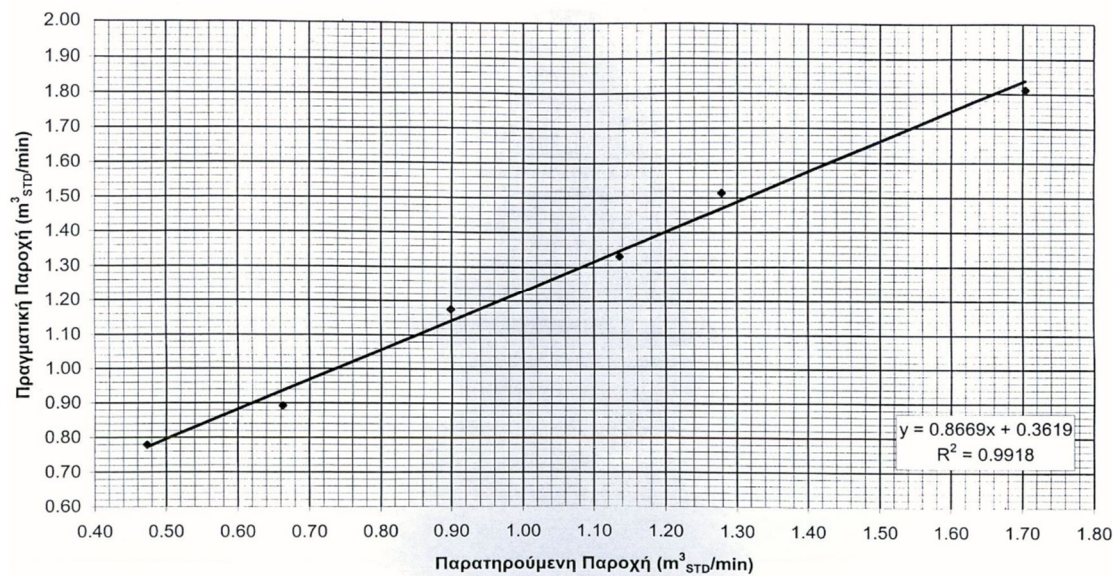
δειγματοληψιών. Παράλληλα με τη συλλογή των φίλτρων 4'' έγινε και συλλογή φίλτρου αέρα 8''x10''. Η συλλογή αέρα στο φίλτρο 8''x10'' ξεκινούσε κάθε ημέρα ταυτόχρονα με την έναρξη συλλογής των φίλτρων 4'' και σταματούσε με το τέλος συλλογής του τελευταίου φίλτρου της ημέρας. Μετά την ολοκλήρωση του τριημέρου των μετρήσεων το φίλτρο 8''x10'' αφαιρέθηκε από τη μεγάλη αντλία και οδηγήθηκε προς ανάλυση. Η διάταξη δειγματοληψίας φαίνεται στο **Σχήμα 4.3**.



Σχήμα 4.3 : Η διάταξη των αντλιών του πειράματος. Αριστερά διακρίνεται η μικρή αντλία και δεξιά η μεγάλη στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Η παροχή όγκου αέρα για τη μεγάλη αντλία μετριέται αυτόματα³³ κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, ενώ η παροχή όγκου αέρα για τη μικρή αντλία προσδιορίστηκε για κάθε φίλτρο χωριστά ως ο μέσος όρος 6 παρατηρήσεων στο ροόμετρο πλωτήρος της αντλίας που έγιναν ανά δεκάλεπτο και διορθώθηκε κατάλληλα βάσει της καμπύλης βαθμονόμησης παροχής της αντλίας. Ενδεικτικά στο **Σχήμα 4.4** που ακολουθεί δίνεται η καμπύλη βαθμονόμησης παροχής της αντλίας με s/n 21688N. Τα δύο τριήμερα δειγματοληψίας ακολούθησαν την ίδια ακριβώς μεθοδολογία δειγματοληψίας, η οποία δίνεται σχηματικά στο **Σχήμα 4.5**.

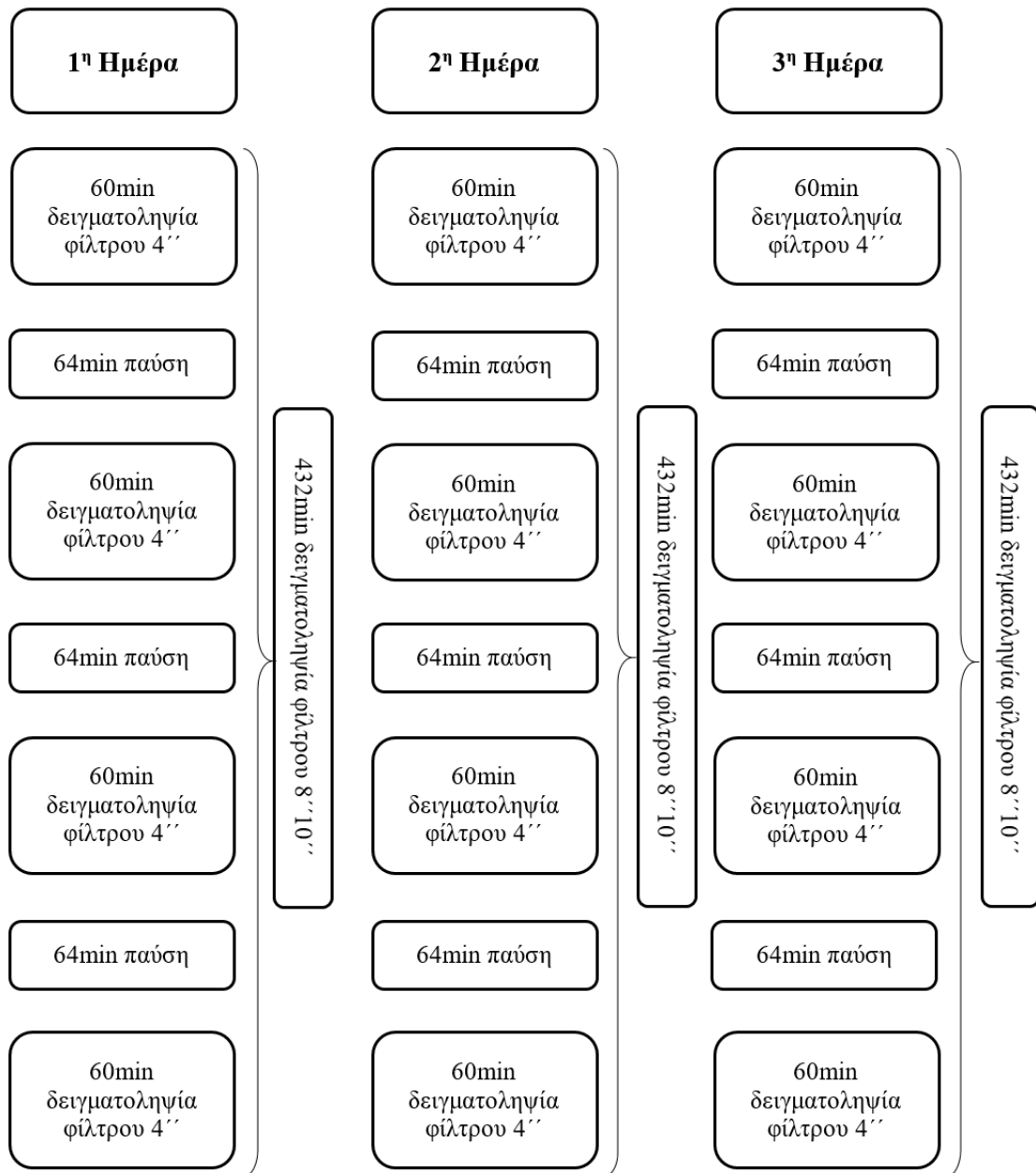
³³ Η συστηματική αβεβαιότητα που εισάγεται για την παροχή της αντλίας είναι 2.5% (ΣΑΒΒΑ, 2017).



Σχήμα 4.4 : Καμπύλη βαθμονόμησης παροχής της αντλίας 21688N.

Με τον τρόπο αυτό, κάνοντας την εύλογη υπόθεση ότι το δείγμα αερολύματος που συλλέχθηκε στην οροφή του Κτιρίου Κ από τη «μεγάλη» και από τη «μικρή» αντλία είχε την ίδια συγκέντρωση βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και ότι η συγκέντρωση αυτή παρέμενε σχετικά σταθερή σε κάθε επιμέρους δειγματοληψία διάρκειας 1h, η συνολική συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου (πυρήνες/m³) που υπολογίζεται από τις δειγματοληψίες των φίλτρων 4'' μπορεί να αποδοθεί αναλογικά και στο φίλτρο 8''x10''. Η γνώση πλέον της συνολικής συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο 8''x10'', προσφέρει τη δυνατότητα – με κατάλληλο υπολογισμό – διάκρισης του ²¹⁰Pb που συλλέχθηκε σε αυτό ως ²¹⁰Pb, από εκείνον που είναι αποτέλεσμα διάσπασης των συλλεχθέντων βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής περιγράφεται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

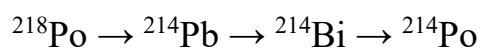
Η παύση 64min μεταξύ των δειγματοληψιών των φίλτρων 4'' είναι αναγκαία ώστε να «κρυώσει» η μικρή αντλία, και προσφέρει τον απαραίτητο χρόνο για τη μεταφορά και προετοιμασία του φίλτρου 4'' για γ-φασματοσκοπική ανάλυση.



Σχήμα 4.5 : Μεθοδολογία δειγματοληψίας τριήμερου δειγματοληψίας – συνολική συλλογή 12 φίλτρων 4'' και ενός φίλτρου 8''x10''.

4.3.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεων θυγατρικών του ραδονίου πάνω στο φίλτρο 4''

Τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου τα οποία ακολουθούν τη διάσπασή του και προηγούνται του ^{210}Pb είναι κατά σειρά τα:



με χρόνους ημιζωής 3.071min, 26.916min, 19.8min και 162.3μs αντίστοιχα. Από αυτά, μόνο ο ^{214}Pb και το ^{214}Bi εκπέμπουν αξιόλογα φωτόνια και μπορούν να ανιχνευθούν με μεθόδους γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (**Πίνακας 2.1**) και για τον λόγο αυτό σε αυτά τα ισότοπα επικεντρώνονται και οι υπολογισμοί που ακολουθούν. Ωστόσο, λόγω των μικρών χρόνων ημιζωής του ^{214}Pb και του ^{214}Bi , η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων πρέπει να λάβει χώρα το ταχύτερο δυνατόν μετά το πέρας της δειγματοληψίας του αερολύματος, για να επιτευχθεί καλή στατιστική στα τελικά αποτελέσματα.

Μέχρι σήμερα έχει υπάρξει πλήθος μελετών με στόχο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου που έχουν συλλεχθεί σε φίλτρα, με μεθόδους “α-”, “β-” ή γ-φασματοσκοπίας (Irfan & Fagan, 1979), (Martinez, et al., 2017), (Pressyanov, 1997), (El-Hussein, et al., 2001), (Forkapic, et al., 2012), (Bem, et al., 2002), (Stajic & Nikezic, 2015), (Stoulos & Ioannidou, 2020), (Rozas, et al., 2016), (Thomas, 1971), (Jimenez-Ramos, et al., 2006). Ειδικότερα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος γ-φασματοσκοπίας το κυρίαρχο ζήτημα προς επίλυση είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ^{218}Po , μέσω των συγκεντρώσεων του ^{214}Pb και του ^{214}Bi . Σε ορισμένες μελέτες, για την επίλυση των εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης που διέπουν τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου έγινε χρήση των προγραμμάτων H/Y όπως Mathematica (Forkapic, et al., 2012) ή Matlab (Martinez, et al., 2017). Σε άλλες μελέτες έγινε υπόθεση του λόγου των συγκεντρώσεων μεταξύ των θυγατρικών, βάσει δεδομένων προηγούμενων μελετών³⁴ (Stoulos & Ioannidou, 2020).

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων του ^{218}Po , του ^{214}Pb και του ^{214}Bi έγινε με δύο τρόπους, με στόχο να γίνει τελικά σύγκριση των αποτελεσμάτων:

- i. Ο $1^{\text{ος}}$ τρόπος υπολογισμού των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου έγινε μέσω της επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης που τα διέπει (Harms & Jerome, 2004), (Irfan & Fagan, 1979), λαμβάνοντας υπόψη και την παραγωγή-κατανάλωση

³⁴ Έγινε υπόθεση ότι ο λόγος μεταξύ των συγκεντρώσεων των θυγατρικών του ραδονίου είναι $^{218}\text{Po}/^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi} = 1/0.7/0.4$

κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης³⁵, το οποίο αποτελεί και την ουσιώδη διαφορά με τον 2^ο τρόπο που ακολουθεί. Στις παραγράφους που ακολουθούν, η ανωτέρω μέθοδος θα αναφέρεται ως «μέθοδος επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων».

- ii. Ο 2^{ος} τρόπος υπολογισμού των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου έγινε μέσω της επίλυσης των αναλυτικών εξισώσεων με χρήση του προγράμματος Mathematica, ακολουθώντας τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012). Στη μέθοδο αυτή δε λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή-κατανάλωση κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Στις παραγράφους που ακολουθούν, η ανωτέρω μέθοδος θα αναφέρεται ως «μέθοδος των (Forkaric, et al., 2012)».

Επιπλέον, επειδή ο χρόνος ημιζωής του ²¹⁴Po είναι 162.3μs, έγινε υπόθεση ραδιενεργού ισορροπίας με το μητρικό του ²¹⁴Bi. Επομένως, η συγκέντρωση ενεργότητας του ²¹⁴Po θεωρήθηκε ίση με τη συγκέντρωση ενεργότητας του ²¹⁴Bi που εκτιμήθηκε σε κάθε φίλτρο 4''^{36,37}.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται αναλυτικά οι δύο προσεγγίσεις προσδιορισμού των συγκεντρώσεων των βραχύβιων των θυγατρικών του ραδονίου στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα που ακολουθήθηκαν.

4.3.1.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεων των θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων

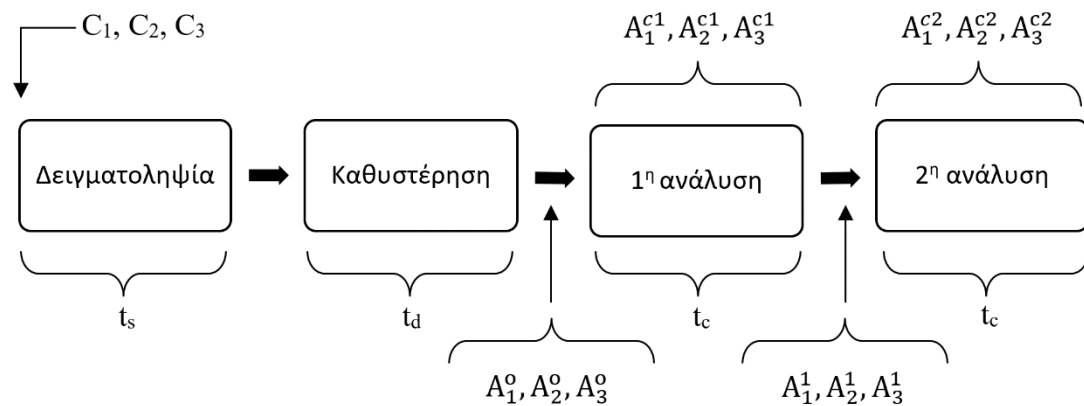
Τα θυγατρικά του ραδονίου που συλλέγονται στα φίλτρα 4'' και για τα οποία θα γίνει η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων που διέπουν την παραγωγή-κατανάλωσή τους, με στόχο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσής τους στον αέρα είναι τα: ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi και στις εξισώσεις που ακολουθούν θα συμβολίζονται με τους αριθμούς «1», «2» και «3» αντίστοιχα.

³⁵ Η διόρθωση για παραγωγή-κατανάλωση κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης θεωρείται απαραίτητη για ραδιενεργά ισότοπα με χρόνους ημιζωής ($t_{1/2}$) μικρότερους από 20 φορές τη χρονική διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (t_c), δηλαδή για $t_{1/2} < 20 \cdot t_c$ (IAEA & ALMERA, 2021).

³⁶ Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάσπαση του ²¹⁴Bi σε ²¹⁰Tl με ποσοστό 0.021% θεωρήθηκε αμελητέα.

³⁷ Η συνεισφορά των πυρήνων του ²¹⁴Po στο σύνολο των συλλεχθέντων πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου είναι οριακά αμελητέα. Ωστόσο συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς για λόγους πληρότητας.

Τα βασικά στάδια της διαδικασίας δειγματοληψίας και ανάλυσης που ακολουθήθηκε δίνονται στο **Σχήμα 4.6**.



Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα ροής δειγματοληψίας-ανάλυσης θυγατρικών ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα στα φίλτρα 4''.

Οι μεταβλητές που δίνονται στο **Σχήμα 4.6** είναι οι εξής:

- C_1, C_2, C_3 είναι οι συγκεντρώσεις πυρήνων (πυρήνες/m³) ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi στην ατμόσφαιρα αντίστοιχα.
- A_1^0, A_2^0, A_3^0 είναι οι ενεργότητες (Bq) των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi κατά την έναρξη της 1^{ης} γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.
- A_1^1, A_2^1, A_3^1 είναι οι ενεργότητες (Bq) των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi κατά την έναρξη της 2^{ης} γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.
- $A_1^{c1}, A_2^{c1}, A_3^{c1}$ είναι οι μη διορθωμένες³⁸ για παραγωγή-κατανάλωση ενεργότητες (Bq), όπως προέκυψαν από την 1^η γ-φασματοσκοπική ανάλυση.
- $A_1^{c2}, A_2^{c2}, A_3^{c2}$ είναι οι μη διορθωμένες για παραγωγή-κατανάλωση ενεργότητες (Bq), όπως προέκυψαν από την 2^η γ-φασματοσκοπική ανάλυση.
- t_s είναι η χρονική διάρκεια (sec) της δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αέρα.
- t_d είναι η χρονική διάρκεια (sec) της καθυστέρησης μεταξύ του τέλους της δειγματοληψίας και της έναρξης της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.
- t_c είναι η χρονική διάρκεια (sec) κάθε επιμέρους βήματος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.

³⁸ Πρόκειται για την ενεργότητα που υπολογίζεται από το πρόγραμμα φασματοσκοπικής ανάλυσης μέσω της απλής σχέσης: $activity = area / (time \cdot yield \cdot efficiency)$, χωρίς δηλαδή να λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή-κατανάλωση πυρήνων κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Καθώς μέσω της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης μπορούν να προσδιορισθούν μόνο τα ^{214}Pb και ^{214}Bi που εκπέμπουν φωτόνια, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ^{218}Po είναι μόνο έμμεσα δυνατός, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις παραγωγής-κατανάλωσης. Για επίλυση των εξισώσεων αυτών χρειάζεται να γίνουν τουλάχιστον δύο διαδοχικές και μικρής χρονικής διάρκειας γ -φασματοσκοπικές αναλύσεις. Για λόγους απλότητας, οι χρονικές διάρκειες δειγματοληψίας, καθυστέρησης και ανάλυσης κρατήθηκαν σταθερές σε όλα τα πειράματα. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι τα φίλτρα αέρα αναλύθηκαν στον ανιχνευτή XtRa , ο οποίος και έχει την υψηλότερη απόδοση και κατά συνέπεια, δυνατότητα επίτευξης καλύτερης στατιστικής.

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.6**, το συγκεκριμένο πείραμα χωρίζεται σε 3 διαφορετικές φάσεις (δειγματοληψία – καθυστέρηση – ανάλυση). Για τον λόγο αυτό, η κατάστροψη και επίλυση των εξισώσεων θα γίνει ανά φάση.

Η ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ($0 \leq t \leq t_s$)

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, η συγκέντρωση:

- του ^{218}Po στο φίλτρο αυξάνεται καθώς ο αέρας περνά μέσα από αυτό και ταυτόχρονα μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασής του,
- του ^{214}Pb στο φίλτρο αυξάνεται καθώς ο αέρας περνά μέσα από αυτό, αυξάνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ^{218}Po και μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ίδιου του ισοτόπου,
- του ^{214}Bi στο φίλτρο αυξάνεται καθώς ο αέρας περνά μέσα από αυτό, αυξάνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ^{214}Pb και μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ίδιου του ισοτόπου.

Συνεπώς, οι εξισώσεις υπολογισμού της συγκέντρωσης των παραπάνω ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι:

$$\frac{dN_1}{dt} = C_1 V \varepsilon - \lambda_1 N_1 \quad (4.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = C_2 V \varepsilon + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (4.2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = C_3 V \varepsilon + \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (4.3)$$

Όπου :

- N_1, N_2, N_3 : το πλήθος των πυρήνων των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα, πάνω στο φίλτρο,
- V : η παροχή της αντλίας (m^3/s),
- ε : ο βαθμός απόδοσης συγκράτησης σωματιδίων του φίλτρου,
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: οι σταθερές διάσπασης των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα,
- T_1, T_2, T_3 : οι χρόνοι ημιζωής των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα.

Με ολοκλήρωση των *Εξισώσεων 4.1, 4.2 και 4.3* ως προς τον χρόνο προκύπτουν οι εξισώσεις *4.4, 4.5 και 4.6* αντίστοιχα:

$$N_1(t) = C_1 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right] \Rightarrow N_1(t) = C_1 \mathbf{a} \quad (4.4)$$

$$N_2(t) = C_1 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + \frac{V\varepsilon}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) \right] + C_2 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right] \Rightarrow$$

$$N_2(t) = C_1 \mathbf{b} + C_2 \mathbf{c} \quad (4.5)$$

$$N_3(t) =$$

$$C_1 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t}) \right]$$

$$+ C_2 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t})(\lambda_2 - \lambda_1) \right]$$

$$+ C_3 \left[\frac{V\varepsilon}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) \right] \Rightarrow N_3(t) = C_1 \mathbf{d} + C_2 \mathbf{e} + C_3 \mathbf{f} \quad (4.6)$$

Όπου :

$$\mathbf{a} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t})$$

$$\mathbf{b} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + \frac{V\varepsilon}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

$$\mathbf{c} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\mathbf{d} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

$$\mathbf{e} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_3}(1 - e^{-\lambda_3 t}) + \frac{V\varepsilon}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)}(e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t})(\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$\mathbf{f} = \frac{V\varepsilon}{\lambda_3}(1 - e^{-\lambda_3 t})$$

Οι συντελεστές **a**, **b**, **c**, **d**, **e** και **f** προσδιορίζονται αποκλειστικά για $t = t_s$.

Η ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ($0 \leq t \leq t_d$)

Η καθυστέρηση είναι το χρονικό διάστημα που αναπόφευκτα μεσολαβεί από τη λήξη της δειγματοληψίας έως την έναρξη της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Στο χρονικό αυτό διάστημα λαμβάνει χώρα η συλλογή, η προετοιμασία και η μεταφορά του φίλτρου αέρα προς ανάλυση. Κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης αυτής:

- το ^{218}Po μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασής του,
- ο ^{214}Pb αυξάνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ^{218}Po και μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ίδιου του ισοτόπου,
- το ^{214}Bi αυξάνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ^{214}Pb και μειώνεται λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ίδιου του ισοτόπου.

Συνεπώς, οι εξισώσεις υπολογισμού της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου για τη διάρκεια της καθυστέρησης είναι:

$$\frac{dN_1'}{dt} = -\lambda_1 N_1' \quad (4.7)$$

$$\frac{dN_2'}{dt} = \lambda_1 N_1' - \lambda_2 N_2' \quad (4.8)$$

$$\frac{dN_3'}{dt} = \lambda_2 N_2' - \lambda_3 N_3' \quad (4.9)$$

Από τις **Εξισώσεις 4.4**, **4.5** και **4.6** για $t=t_s$ λαμβάνονται οι αρχικές συνθήκες για τη λύση των εξισώσεων της καθυστέρησης, οι οποίες είναι:

$$N_1(t_s) = C_1 \mathbf{a} = N_1'(0)$$

$$N_2(t_s) = C_1 \mathbf{b} + C_2 \mathbf{c} = N_2'(0)$$

$$N_3(t_s) = C_1 \mathbf{d} + C_2 \mathbf{e} + C_3 \mathbf{f} = N_3'(0)$$

Έχοντας τις παραπάνω αρχικές συνθήκες, θεωρώντας ως χρονική $t=0$ τη λήξη της δειγματοληψίας και ολοκληρώνοντας ως προς τον χρόνο προκύπτουν οι **Σχέσεις 4.10, 4.11 και 4.12** οι οποίες είναι οι λύσεις των **Εξισώσεων 4.7, 4.8 και 4.9**:

$$N_1'(t) = C_1(\mathbf{a}e^{-\lambda_1 t}) \Rightarrow N_1'(t) = C_1 \mathbf{g} \quad (4.10)$$

$$N_2'(t) = C_1 \left[\frac{\mathbf{a}\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) + \mathbf{b}e^{-\lambda_2 t} \right] + C_2(\mathbf{c}e^{-\lambda_1 t}) \Rightarrow N_2'(t) = C_1 \mathbf{h} + C_2 \mathbf{i} \quad (4.11)$$

$$N_3'(t) = C_1 \left[\frac{\mathbf{a}\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 - \lambda_3} \right) + \frac{\mathbf{b}\lambda_2 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t})}{\lambda_3 - \lambda_2} + \mathbf{d}e^{-\lambda_3 t} \right] \\ + C_2 \left[\frac{\mathbf{c}\lambda_2 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t})}{\lambda_3 - \lambda_2} + \mathbf{e}e^{-\lambda_3 t} \right] + C_3(\mathbf{f}e^{-\lambda_3 t}) \Rightarrow \\ N_3'(t) = C_1 \mathbf{j} + C_2 \mathbf{n} + C_3 \mathbf{l} \quad (4.12)$$

Όπου :

$$\mathbf{g} = \mathbf{a}e^{-\lambda_1 t}$$

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{a}\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) + \mathbf{b}e^{-\lambda_2 t}$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{c}e^{-\lambda_1 t}$$

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{a}\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 - \lambda_3} \right) + \frac{\mathbf{b}\lambda_2 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t})}{\lambda_3 - \lambda_2} + \mathbf{d}e^{-\lambda_3 t}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{c}\lambda_2 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t})}{\lambda_3 - \lambda_2} + \mathbf{e}e^{-\lambda_3 t}$$

$$\mathbf{l} = \mathbf{f}e^{-\lambda_3 t}$$

Επομένως, κατά τη λήξη της χρονικής διάρκειας της καθυστέρησης, υπολογίζοντας για $t=t_d$ τους συντελεστές \mathbf{g} , \mathbf{h} , \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{n} και \mathbf{l} ³⁹ οι **Εξισώσεις 4.10, 4.11 και 4.12** γίνονται:

$$N_1'(t_d) = C_1 \mathbf{g} \stackrel{\lambda_1}{\Rightarrow} \lambda_1 N_1'(t_d) = \lambda_1 C_1 \mathbf{g} \Rightarrow A_1^0 = \lambda_1 C_1 \mathbf{g} \quad (4.13)$$

$$N_2'(t_d) = C_1 \mathbf{h} + C_2 \mathbf{i} \stackrel{\lambda_2}{\Rightarrow} \lambda_2 N_2'(t_d) = \lambda_2 C_1 \mathbf{h} + \lambda_2 C_2 \mathbf{i} \Rightarrow A_2^0 = \lambda_2 C_1 \mathbf{h} + \lambda_2 C_2 \mathbf{i} \quad (4.14)$$

$$N_3'(t_d) = C_1 \mathbf{j} + C_2 \mathbf{n} + C_3 \mathbf{l} \stackrel{\lambda_3}{\Rightarrow} \lambda_3 N_3'(t_d) = \lambda_3 C_1 \mathbf{j} + \lambda_3 C_2 \mathbf{n} + \lambda_3 C_3 \mathbf{l} \Rightarrow$$

³⁹ Οι τιμές των συντελεστών \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} , \mathbf{e} και \mathbf{f} χρησιμοποιούνται όπως προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα της δειγματοληψίας.

$$A_3^0 = \lambda_3 C_1 \mathbf{j} + \lambda_3 C_2 \mathbf{n} + \lambda_3 C_3 \mathbf{l} \quad (4.15)$$

Λύνοντας το σύστημα *Εξισώσεων 4.13, 4.14 και 4.15* ως προς τις συγκεντρώσεις πυρήνων προκύπτουν οι σχέσεις:

$$C_1 = \frac{A_1^0}{\lambda_1 \mathbf{g}} \quad (4.16)$$

$$C_2 = \frac{A_2^0 - \lambda_2 C_1 \mathbf{h}}{\lambda_2 \mathbf{i}} \quad (4.17)$$

$$C_3 = \frac{A_3^0 - \lambda_3 C_1 \mathbf{j} - \lambda_3 C_2 \mathbf{n}}{\lambda_3 \mathbf{l}} \quad (4.18)$$

Για τον υπολογισμό των A_1^0, A_2^0, A_3^0 θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των φίλτρων αέρα.

Η γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ($0 \leq t \leq t_c$)

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ^{218}Po με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης γίνεται δυνατός μέσω του υπολογισμού της συγκέντρωσης των ^{214}Pb και ^{214}Bi σε δύο διαδοχικά φάσματα, όπου από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και των εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης προκύπτει η συγκέντρωσή του. Από τα αποτελέσματα των δύο φασμάτων της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του φίλτρου, προκύπτουν οι μη-διορθωμένες τιμές της ενεργότητας $A_2^{c1}, A_3^{c1}, A_2^{c2}, A_3^{c2}$. Ωστόσο, για ραδιενεργά ισότοπα των οποίων ο χρόνος ημιζωής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τον χρόνο της ανάλυσης είναι απαραίτητο να γίνουν διορθώσεις για την παραγωγή-κατανάλωσή τους και κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Οι διορθώσεις αυτές γίνονται σημαντικές, όταν ο χρόνος ημιζωής του ραδιενεργού ισότοπου είναι περίπου 20 φορές μεγαλύτερος από τη χρονική διάρκεια της ανάλυσης (IAEA & ALMERA, 2021). Επομένως, για τον υπολογισμό των διορθωμένων τιμών A_2^0 και A_3^0 χρειάζεται να γίνει ολοκλήρωση των *Εξισώσεων 4.19, 4.20 και 4.21* που ακολουθούν, ως προς τη χρονική διάρκεια της ανάλυσης, δηλαδή από $t=0$ έως και $t=t_c$.

Οπότε για την 1^η γ-φασματοσκοπική ανάλυση ισχύει:

$$A_1^{c1} = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (4.19)$$

$$A_2^{c1} = A_2^0 e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (4.20)$$

$$A_3^{c1} = A_1^0 \frac{\lambda_3 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 - \lambda_3} \right) + A_2^0 \lambda_3 \frac{(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t})}{\lambda_3 - \lambda_2} + A_3^0 e^{-\lambda_3 t} \quad (4.21)$$

Ολοκληρώνοντας τις παραπάνω εξισώσεις από $t = 0$ έως $t = t_c$ προκύπτουν οι **Εξισώσεις 4.22, 4.23 και 4.24** αντίστοιχα:

$$A_1^0 = A_1^{c1} \frac{\lambda_1 t_c}{1 - e^{-\lambda_1 t_c}} \quad (4.22)$$

$$A_2^0 = \lambda_2 \frac{A_2^{c1} t_c - \left[\frac{A_1^0 T_1}{(T_1 - T_2) \ln(2)} \right] \cdot [T_1(1 - e^{-\lambda_1 t_c}) - T_2(1 - e^{-\lambda_2 t_c})]}{1 - e^{-\lambda_2 t_c}} \quad (4.23)$$

$$A_3^0 = \frac{\lambda_3}{1 - e^{-\lambda_3 t_c}} \left\{ A_3^{c1} t_c - A_1^0 \frac{\lambda_3 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[\frac{1}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2 t_c}}{\lambda_2} - \frac{1 - e^{-\lambda_3 t_c}}{\lambda_3} \right) - \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_3} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_3 t_c}}{\lambda_3} - \frac{1 - e^{-\lambda_1 t_c}}{\lambda_1} \right) \right] - A_2^0 \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2 t_c}}{\lambda_2} - \frac{1 - e^{-\lambda_3 t_c}}{\lambda_3} \right) \right\} \quad (4.24)$$

Έχοντας ως βάση τις **Εξισώσεις 4.22 και 4.23**, για τη 2^η διαδοχική γ-φασματοσκοπική ανάλυση έχουμε:

$$A_1^1 = A_1^{c2} \frac{\lambda_1 t_c}{1 - e^{-\lambda_1 t_c}} \quad (4.25)$$

$$A_2^1 = \lambda_2 \frac{A_2^{c2} t_c - \left[\frac{A_1^1 T_1}{(T_1 - T_2) \ln(2)} \right] \cdot [T_1(1 - e^{-\lambda_1 t_c}) - T_2(1 - e^{-\lambda_2 t_c})]}{1 - e^{-\lambda_2 t_c}} \quad (4.26)$$

Επίσης, μεταξύ της αρχής της 1^{ης} και της αρχής της 2^{ης} γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ισχύει:

$$A_1^1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t_c} \quad (4.27)$$

$$A_2^1 = A_2^0 e^{-\lambda_2 t_c} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t_c} - e^{-\lambda_2 t_c}) \quad (4.28)$$

Λύνοντας το σύστημα των **Εξισώσεων 4.22, 4.23, 4.25, 4.26, 4.27 και 4.28** ως προς A_1^0 προκύπτουν οι σχέσεις:

$$A_1^0 = \frac{-\lambda_2 A_2^{c1} t_c e^{-\lambda_2 t_c} + \lambda_2 A_2^{c2} t_c}{-\lambda_2 k m e^{-\lambda_2 t_c} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_2 t_c}) (e^{-\lambda_1 t_c} - e^{-\lambda_2 t_c}) + \lambda_2 k m e^{-\lambda_1 t_c}} \quad (4.29)$$

οπότε το A_2^0 μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$A_2^0 = \lambda_2 \frac{A_2^{c1} t_c - A_1^0 k m}{1 - e^{-\lambda_2 t_c}} \quad (4.30)$$

Όπου :

$$k = \frac{T_1}{(T_1 - T_2) \ln(2)}$$

$$m = T_1(1 - e^{-\lambda_1 t_c}) - T_2(1 - e^{-\lambda_2 t_c})$$

Με γνωστές πλέον τις τιμές των A_1^0 , A_2^0 και A_3^{c1} μπορεί να υπολογισθεί η τιμή του A_3^0 από την Εξίσωση 4.24.

Επομένως, για χρονικό διάστημα δειγματοληψίας t_s , καθυστέρησης t_d και δύο διαδοχικές ισόχρονες γ -φασματοσκοπικές αναλύσεις χρονικής διάρκειας t_c η καθεμία, είναι δυνατός ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων (πυρήνες/ m^3) των ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi από τις **Εξισώσεις 4.16, 4.17 και 4.18** αντίστοιχα. Υποθέτοντας ραδιενεργό ισορροπία μεταξύ του ^{214}Bi και του ^{214}Po γίνεται υπολογισμός και των πυρήνων του ^{214}Po , το πλήθος των οποίων όμως είναι πρακτικά αμελητέο.

Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας και την επίλυση των εξισώσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές των παραμέτρων:

- $t_s = 3600\text{s} \rightarrow$ χρονική διάρκεια δειγματοληψίας φίλτρων 4''
- $t_d = 240\text{s} \rightarrow$ χρονική διάρκεια καθυστέρησης (σταθερή για όλα τα φίλτρα 4'')
- $t_c = 300\text{s} \ \& \ 600\text{s} \ \& \ 900\text{s} \rightarrow$ χρονική διάρκεια διαδοχικών γ -φασματοσκοπικών αναλύσεων για τρία διαφορετικά σενάρια χρονικής διάρκειας λήψης φασμάτων
- V : παροχή αέρα αντλίας (m^3/s) = όγκος αέρα (m^3) / t_s (s)
- $\varepsilon = 0.9998 \rightarrow$ ποσοστό συγκράτησης σωματιδίων στο φίλτρο 4'' (<http://www.staplex.com/airsamplers/filterpapers.htm>, τελευταία πρόσβαση 1/9/2022)
- $\lambda_1 = 0.003761789 \text{ s}^{-1}$
- $\lambda_2 = 0.000429204 \text{ s}^{-1}$
- $\lambda_3 = 0.000583457 \text{ s}^{-1}$
- $T_1 = 184.26 \text{ s}$
- $T_2 = 1614.96 \text{ s}$
- $T_3 = 1188 \text{ s}$

4.3.1.2 Υπολογισμός της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012)

Για λόγους πληρότητας έγινε εφαρμογή και της προσέγγισης των (Forkaric, et al., 2012) για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica.

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, αρχικά εισάγονται οι *διαφορικές εξισώσεις 4.1, 4.2 και 4.3* που εκφράζουν τη συλλογή των θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα αέρα καθώς και την παραγωγή-κατανάλωσή τους κατά της διάρκεια της δειγματοληψίας. Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών από το πρόγραμμα, απαιτούνται να δοθούν:

- οι τιμές των παραμέτρων $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, V, \varepsilon$ και t_s ,
- οι αρχικές συνθήκες $N_1(0) = N_2(0) = N_3(0) = 0$.

Το αποτέλεσμα επίλυσης του συστήματος διαφορικών εξισώσεων είναι της μορφής:

$$N_1(t_s) = N_1'(0) = \alpha_1 C_1 \quad (4.31)$$

$$N_2(t_s) = N_2'(0) = \alpha_2 C_1 + \alpha_3 C_2 \quad (4.32)$$

$$N_3(t_s) = N_3'(0) = \alpha_4 C_1 + \alpha_5 C_2 + \alpha_6 C_3 \quad (4.33)$$

όπου $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$, οι συντελεστές που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της επίλυσης των *εξισώσεων 4.1, 4.2 και 4.3* και είναι διαφορετικοί για κάθε φίλτρο αέρα.

Έχοντας πλέον ως αρχικές συνθήκες τις $N_1'(0), N_2'(0), N_3'(0)$ ⁴⁰ είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος διαφορικών *Εξισώσεων 4.7, 4.8, και 4.9* από το πρόγραμμα, όπου για χρόνο καθυστέρησης t_d και χρόνο γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης t_c οι λύσεις για τον υπολογισμό του ^{214}Pb και του ^{214}Bi είναι της μορφής:

$$N_2'(t_d) = \alpha_7 C_1 + \alpha_8 C_2 \quad (4.34)$$

$$N_2'(t_d + t_c) = \alpha_9 C_1 + \alpha_{10} C_2 \quad (4.35)$$

⁴⁰ Τα $N_1'(0), N_2'(0)$ και $N_3'(0)$ αφορούν το πλήθος πυρήνων των $^{218}\text{Po}, ^{214}\text{Pb}$ και ^{214}Bi αντίστοιχα, στα συλλεχθέντα φίλτρα 4'' στο πέρας της δειγματοληψίας τους, δηλαδή στην αρχή της περιόδου της καθυστέρησης.

$$N_2'(t_d + t_c + t_c) = \alpha_{11}C_1 + \alpha_{12}C_2 \quad (4.36)$$

$$N_3'(t_d) = \alpha_{13}C_1 + \alpha_{14}C_2 + \alpha_{15}C_3 \quad (4.37)$$

$$N_3'(t_d + t_c) = \alpha_{16}C_1 + \alpha_{17}C_2 + \alpha_{18}C_3 \quad (4.38)$$

Στο σημείο αυτό έγκειται και η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων (της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων και της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012)). Στη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, για τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης εφαρμόστηκαν κατάλληλες διορθώσεις για την παραγωγή-κατανάλωση κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Στη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012) που παρουσιάζεται στην παράγραφο αυτή γίνεται η υπόθεση ότι τα μετρούμενα συμβάντα (counts, κατάλληλα διορθωμένα ως προς την απόδοση και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης) στα φάσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων ταυτίζονται με τους πυρήνες που διασπάστηκαν κατά τη διάρκεια αυτών.

Από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων προκύπτει η μη διορθωμένη (ως προς την παραγωγή-κατανάλωση) συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/m³) για τον ²¹⁴Pb και το ²¹⁴Bi. Σύμφωνα με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012), από τη μη διορθωμένη συγκέντρωση ραδιενέργειας είναι δυνατός ο προσδιορισμός του πλήθους των πυρήνων που διασπάστηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, πολλαπλασιάζοντας τη συγκέντρωση ενεργότητας με τον όγκο αέρα (m³) που αντιστοιχεί σε κάθε φίλτρο και με τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Το πλήθος των πυρήνων που διασπάστηκαν κατά τη διάρκεια κάθε γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στη συνέχεια αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ του συνόλου των αδιάσπαστων πυρήνων πριν και μετά την ανάλυση.

Επομένως, αν κατά τη διάρκειά της 1^{ης} γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης οι πυρήνες ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi που διασπάστηκαν είναι N_2^{c1} και N_3^{c1} αντίστοιχα, και για τη 2^η γ-φασματοσκοπική ανάλυση οι πυρήνες του ²¹⁴Pb που διασπάστηκαν είναι N_2^{c2} , τότε σε συνδυασμό με τις εξισώσεις 4.34 έως και 4.38 προκύπτουν:

$$N_2^{c1} = N_2'(t_d) - N_2'(t_d + t_c) \quad (4.39)$$

$$N_2^{c2} = N_2'(t_d + t_c) - N_2'(t_d + t_c + t_c) \quad (4.40)$$

$$N_3^{c1} = N_3'(t_d) - N_3'(t_d + t_c) \quad (4.41)$$

Εισάγοντας τις **Εξισώσεις 4.39, 4.40 και 4.41** στο υπολογιστικό πρόγραμμα είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος και ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων C_1 , C_2 , C_3 (πυρήνες/ m^3) των θυγατρικών του ραδονίου ^{218}Po , ^{214}Pb και ^{214}Bi αντίστοιχα στην ατμόσφαιρα. Και στην προσέγγιση αυτή το υπολογιζόμενο πλήθος των πυρήνων του ^{214}Po είναι αμελητέο.

4.3.2 Διερεύνηση της ευαισθησίας της επίλυσης του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα μέσω γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης είτε με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων είτε με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012) οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα σε μικρές αποκλίσεις των μετρούμενων συγκεντρώσεων. Ακόμα και μια απόκλιση μέσα στο εύρος $\pm 1\sigma$ της μετρούμενης τιμής της ενεργότητας του ^{214}Pb ή του ^{214}Bi μπορεί να οδηγήσει τα προς επίλυση συστήματα εξισώσεων σε αρνητική λύση ή σε μη-λύση. Η υψηλή αυτή ευαισθησία έγκειται στον πολύ μικρό χρόνο ημιζωής του ^{218}Po και στο γεγονός ότι υπολογίζεται βάσει της διαφοράς στη συγκέντρωση του ^{214}Pb μεταξύ των δύο διαδοχικών φασμάτων.

Με στόχο να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα και να ελεγχθεί η ευαισθησία της μεθόδου που αναπτύχθηκε επιλέχθηκαν οι δύο ακόλουθες προσεγγίσεις:

- i. Κάθε φίλτρο 4'' που συλλέχθηκε αναλύθηκε με γ-φασματοσκοπία λαμβάνοντας 6 διαδοχικά φάσματα των 5min, χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα «SEQUENCE» του προγράμματος GENIE2000 (Παράρτημα IB). Τα συλλεχθέντα φάσματα στη συνέχεια υπέστησαν επεξεργασία σε ομάδες, σε τρία διαφορετικά σενάρια χρονικής διάρκειας λήψης του φάσματος⁴¹. Η επίλυση των συστημάτων εξισώσεων έγινε ξεχωριστά για κάθε σενάριο:

⁴¹ Η συλλογή διαδοχικών φασμάτων των 5min, επιτρέπει στη συνέχεια την ενοποίησή τους με λογιστικό τρόπο και δημιουργία νέων φασμάτων διάρκειας 10min, 15min κ.ο.κ.. Έτσι, από 6 διαδοχικά φάσματα διάρκειας 5min μπορούν να σχηματισθούν 3 διαδοχικά φάσματα διάρκειας 10min ή 2 διαδοχικά φάσματα διάρκειας 15min. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεγαλύτερης διάρκειας δειγματοληψίας δεν οδηγεί σε επίλυση του συστήματος, καθώς στο δεύτερο φάσμα η συνεισφορά του ^{218}Po στην αύξηση των πυρήνων ^{214}Pb θα είναι αμελητέα.

- a. Το 1^ο σενάριο χρησιμοποίησε τα πρώτα δύο διαδοχικά φάσματα 5min για κάθε φίλτρο.
 - b. Το 2ο σενάριο χρησιμοποίησε τα πρώτα δύο διαδοχικά φάσματα 10min για κάθε φίλτρο.
 - c. Το 3ο σενάριο χρησιμοποίησε τα δύο διαδοχικά φάσματα 15min για κάθε φίλτρο.
- ii. Για κάθε τιμή της ενεργότητας ^{214}Pb και ^{214}Bi που μετρήθηκε (τιμή $\pm 1\sigma$) σε κάθε φίλτρο 4'', από κάθε φάσμα και για κάθε ένα από τα τρία χρονικά σενάρια επεξεργασίας φασμάτων, εξετάστηκαν ως τιμές εισόδου στο αναλυτικό σύστημα εξισώσεων⁴² όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί τιμών μεταξύ ^{214}Pb και ^{214}Bi σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής. Δηλαδή, για κάθε ζεύγος τιμών ενεργότητας ^{214}Pb και ^{214}Bi που προέκυψαν από την ανάλυση ενός φίλτρου, και για κάθε χρονικό σενάριο επεξεργασίας φασμάτων (5min, 10min, 15min) εξετάστηκαν συνολικά $7 \times 7 = 49$ διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών ενεργότητας. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε ο προσδιορισμός θετικών λύσεων του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, ακόμα και σε περιπτώσεις που η χρήση της τιμής της ενεργότητας που μετρήθηκε οδηγούσε σε αρνητική ή μη-λύση του συστήματος.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων καθώς και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αυτών με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, καθώς και με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

4.3.2.1 Αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων

Στην παράγραφο αυτή δίνονται τα συνοπτικά αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων για κάθε φίλτρο 4'' και κάθε χρονικό σενάριο ανάλυσης για τα δύο τριήμερα δειγματοληψίας. Στον **Πίνακα 4.1** δίνονται πληροφορίες για το σύνολο των φίλτρων 4'' που συλλέχθηκαν και στα δύο τριήμερα δειγματοληψίας, καθώς και ο όγκος αέρα που συλλέχθηκε.

⁴² Η συγκεκριμένη διερεύνηση δεν εφαρμόστηκε στην προσέγγιση επίλυσης με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012), καθώς χρησιμοποιήθηκε καθαρά για σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων της με αυτά της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Πίνακας 4.1 : Σύνολο φίλτρων αέρα 4'' και από τα δύο τρίμηρα δειγματοληψίας.

Τρίμηρα δειγματοληψίας	Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4'' (ανά ημέρα)	Κωδικός φίλτρου	Όγκος αέρα (m ³)
1 ^ο	30/3/2022	1	a0595	63.33
		2	a0596	63.33
		3	a0597	62.28
		4	a0598	68.53
	31/3/2022	1	a0599	63.33
		2	a0600	68.53
		3	a0601	68.53
		4	a0602	68.53
	1/4/2022	1	a0603	68.01
		2	a0604	68.53
		3	a0605	68.53
		4	a0606	68.53
2 ^ο	10/5/2022	1	a0608	68.53
		2	a0609	68.53
		3	a0610	68.53
		4	a0611	68.53
	11/5/2022	1	a0612	68.53
		2	a0613	68.53
		3	a0614	68.53
		4	a0615	68.53
	12/5/2022	1	a0616	68.53
		2	a0617	68.53
		3	a0618	68.53
		4	a0619	68.53

Τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των ανωτέρω φίλτρων δίνονται στους **Πίνακες 4.2** και **4.3** που ακολουθούν. Όλα τα αποτελέσματα δίνονται συνοδευόμενα με αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ⁴³.

⁴³ Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κύμανση του υποστρώματος των ανιχνευτών λόγω των θυγατρικών του ραδονίου που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 3 δεν επιδρά σημαντικά στις παρούσες μετρήσεις καθώς: (i) λαμβάνουν χώρα αμέσως μετά τη λήψη του φίλτρου αέρα και η ενεργότητα των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου είναι σημαντικά υψηλότερη από τις φωτοκορυφές του υποστρώματος, και (ii) η γ-φασματοσκοπική ανάλυση ολοκληρώνεται μετά από 34min από το πέρας της δειγματοληψίας, όπου η επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου παραμένει πολύ ισχυρή ως προς το υπόστρωμα (βλ. **Σχήμα 3.24**).

Πίνακας 4.2 : Αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα 4'' για το 1^ο τρίμηρο δειγματοληψίας και για διαδοχικά φάσματα 5min, 10min και 15min.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	Ραδιενεργό ισότοπο	Συγκέντρωση ενεργότητας Bq/m ³						
			1 ^ο 5min	2 ^ο 5min	1 ^ο 10min	2 ^ο 10min	1 ^ο 15min	2 ^ο 15min	
			A ^{c1}	A ^{c2}	A ^{c1}	A ^{c2}	A ^{c1}	A ^{c2}	
30/3/2022	1	²¹⁴ Pb	0.56 ± 0.03	0.45 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.39 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.32 ± 0.02	
		²¹⁴ Bi	0.76 ± 0.05	0.71 ± 0.04	0.73 ± 0.04	0.65 ± 0.04	0.71 ± 0.04	0.59 ± 0.03	
	2	²¹⁴ Pb	0.50 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.47 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.28 ± 0.02	
		²¹⁴ Bi	0.69 ± 0.04	0.67 ± 0.04	0.68 ± 0.03	0.61 ± 0.05	0.66 ± 0.04	0.55 ± 0.03	
	3	²¹⁴ Pb	0.44 ± 0.03	0.48 ± 0.03	0.46 ± 0.02	0.31 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.29 ± 0.02	
		²¹⁴ Bi	0.66 ± 0.06	0.64 ± 0.04	0.65 ± 0.04	0.56 ± 0.03	0.62 ± 0.04	0.49 ± 0.03	
	4	²¹⁴ Pb	0.28 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.21 ± 0.01	0.25 ± 0.01	0.17 ± 0.02	
		²¹⁴ Bi	0.44 ± 0.03	0.39 ± 0.03	0.41 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.40 ± 0.01	0.32 ± 0.02	
	31/3/2022	1	²¹⁴ Pb	0.47 ± 0.03	0.41 ± 0.03	0.44 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.27 ± 0.01
			²¹⁴ Bi	0.61 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.60 ± 0.03	0.55 ± 0.03	0.59 ± 0.03	0.46 ± 0.02
		2	²¹⁴ Pb	0.28 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.16 ± 0.01
			²¹⁴ Bi	0.42 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.30 ± 0.02
3		²¹⁴ Pb	0.34 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.22 ± 0.01	
		²¹⁴ Bi	0.53 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.52 ± 0.03	0.47 ± 0.04	0.51 ± 0.02	0.40 ± 0.02	
4		²¹⁴ Pb	0.31 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.23 ± 0.01	0.27 ± 0.02	0.19 ± 0.01	
		²¹⁴ Bi	0.49 ± 0.05	0.42 ± 0.04	0.46 ± 0.03	0.36 ± 0.04	0.43 ± 0.02	0.34 ± 0.03	
1/4/2022		1	²¹⁴ Pb	0.35 ± 0.03	0.31 ± 0.03	0.33 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.31 ± 0.02	0.21 ± 0.01
			²¹⁴ Bi	0.54 ± 0.04	0.53 ± 0.03	0.53 ± 0.03	0.45 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.41 ± 0.02
		2	²¹⁴ Pb	0.43 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.31 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.25 ± 0.02
			²¹⁴ Bi	0.62 ± 0.04	0.62 ± 0.04	0.62 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.59 ± 0.03	0.45 ± 0.02
	3	²¹⁴ Pb	0.45 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.44 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.29 ± 0.02	
		²¹⁴ Bi	0.70 ± 0.04	0.64 ± 0.05	0.67 ± 0.03	0.60 ± 0.03	0.65 ± 0.03	0.55 ± 0.02	
	4	²¹⁴ Pb	0.43 ± 0.03	0.35 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.25 ± 0.01	
		²¹⁴ Bi	0.63 ± 0.04	0.60 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.52 ± 0.03	0.59 ± 0.03	0.47 ± 0.02	

Πίνακας 4.3 : Αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα 4'' για το 2^ο τρίμηρο δειγματοληψίας και για διαδοχικά φάσματα 5min, 10min και 15min.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	Ραδιενεργό ισότοπο	Συγκέντρωση ενεργότητας Bq/m ³					
			1 ^ο 5min	2 ^ο 5min	1 ^ο 10min	2 ^ο 10min	1 ^ο 15min	2 ^ο 15min
			A ^{c1}	A ^{c2}	A ^{c1}	A ^{c2}	A ^{c1}	A ^{c2}
10/5/2022	1	²¹⁴ Pb	0.55 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.53 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.50 ± 0.02	0.32 ± 0.02
		²¹⁴ Bi	0.63 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.50 ± 0.03
	2	²¹⁴ Pb	0.28 ± 0.02	0.27 ± 0.07	0.27 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.25 ± 0.01	0.17 ± 0.02
		²¹⁴ Bi	0.39 ± 0.02	0.43 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.34 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.32 ± 0.02
	3	²¹⁴ Pb	0.22 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.12 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.28 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.27 ± 0.01	0.22 ± 0.01
	4	²¹⁴ Pb	0.22 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.13 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.31 ± 0.02	0.31 ± 0.04	0.31 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.22 ± 0.02
11/5/2022	1	²¹⁴ Pb	0.36 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.21 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.46 ± 0.03	0.41 ± 0.05	0.44 ± 0.03	0.39 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.36 ± 0.02
	2	²¹⁴ Pb	0.37 ± 0.03	0.32 ± 0.03	0.34 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.22 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.56 ± 0.03	0.52 ± 0.03	0.54 ± 0.03	0.46 ± 0.03	0.52 ± 0.02	0.42 ± 0.02
	3	²¹⁴ Pb	0.26 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.21 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.17 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.42 ± 0.03	0.40 ± 0.03	0.41 ± 0.03	0.35 ± 0.02	0.40 ± 0.02	0.30 ± 0.02
	4	²¹⁴ Pb	0.28 ± 0.02	0.26 ± 0.03	0.26 ± 0.02	0.23 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.19 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.45 ± 0.03	0.41 ± 0.03	0.43 ± 0.03	0.39 ± 0.04	0.43 ± 0.03	0.34 ± 0.03
12/5/2022	1	²¹⁴ Pb	0.70 ± 0.05	0.62 ± 0.04	0.66 ± 0.04	0.48 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.40 ± 0.03
		²¹⁴ Bi	0.83 ± 0.05	0.78 ± 0.05	0.81 ± 0.05	0.75 ± 0.06	0.78 ± 0.05	0.65 ± 0.04
	2	²¹⁴ Pb	0.44 ± 0.03	0.36 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.27 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.61 ± 0.04	0.62 ± 0.04	0.61 ± 0.03	0.55 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.47 ± 0.02
	3	²¹⁴ Pb	0.39 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.53 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.36 ± 0.03	0.23 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.59 ± 0.03	0.57 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.56 ± 0.03	0.42 ± 0.03
	4	²¹⁴ Pb	0.40 ± 0.03	0.35 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.25 ± 0.01
		²¹⁴ Bi	0.62 ± 0.03	0.59 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.34 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.48 ± 0.02

4.3.2.2 Προσδιορισμός τη συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα μέσω της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων

Για κάθε φίλτρο αέρα και για κάθε σενάριο λήψης των διαδοχικών φασμάτων, έγινε διερεύνηση ως προς την ευαισθησία του τελικού αποτελέσματος της επίλυσης του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων συνδυάζοντας, τις μετρούμενες τιμές του ^{214}Pb και του ^{214}Bi , όπως αυτές δίνονται στους **Πίνακες 4.2** και **4.3**, σε εύρος $\pm 3\sigma$. Για τον λόγο αυτό, και επειδή οι μετρούμενες τιμές δεν έδωσαν σε όλες τις περιπτώσεις θετική λύση του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, η συνολική συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi και ^{214}Po) δίνεται ως εύρος λύσεων με «Κάτω» και «Άνω» όριο. Η απόδοση των χαρακτηρισμών «Κάτω» ή «Άνω» όριο βασίζεται στο άθροισμα των ελάχιστων και αντίστοιχα μέγιστων συγκεντρώσεων (πυρήνων/ m^3) του ^{218}Po , του ^{214}Pb , του ^{214}Bi και του ^{214}Po .

Στον **Πίνακα 4.4** που ακολουθεί δίνονται τα «Κάτω» και «Άνω» όρια για κάθε φίλτρο 4' και σενάριο λήψης διαδοχικών φασμάτων. Επιπροσθέτως, από τα επιμέρους «Κάτω» και «Άνω» όρια των διαφόρων σεναρίων, για κάθε φίλτρο υπολογίζονται και οι μέσοι όροι «Κάτω» και «Άνω» ορίων αντίστοιχα.

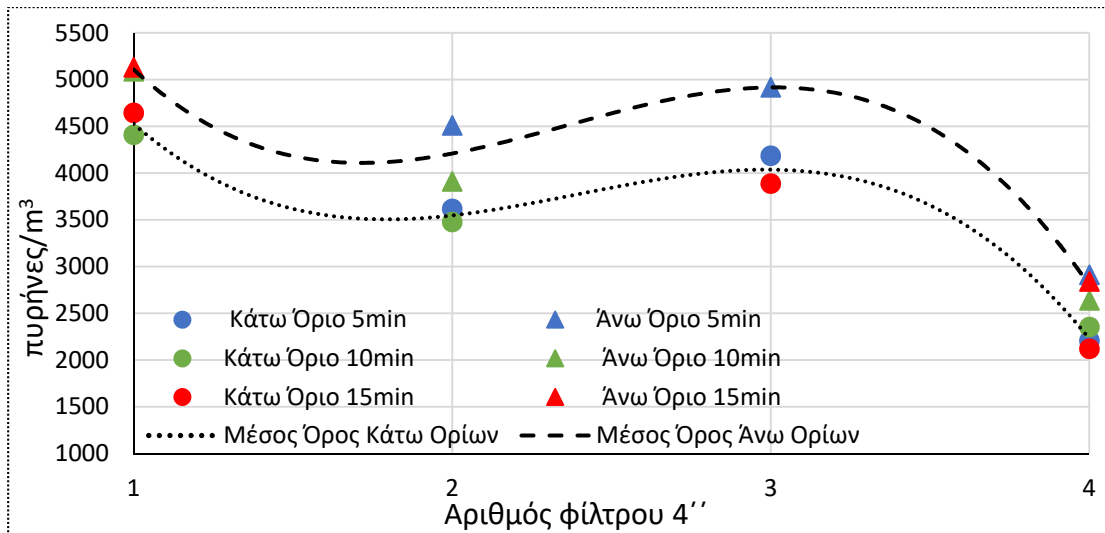
Όπως είναι εμφανές στα αποτελέσματα του **Πίνακα 4.4** που ακολουθεί, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση θετικής λύσης του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων για κάθε σενάριο λήψης διαδοχικών φασμάτων, σε εύρος $\pm 3\sigma$, γεγονός που τονίζει τη σημασία συνδυασμού των δύο προσεγγίσεων που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.3.2 για την αντιμετώπιση της ευαισθησίας επίλυσης του συστήματος.

Στον **Πίνακα 4.4** παρατίθενται τα «Κάτω» και «Άνω» όρια για το σύνολο της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα (πυρήνες/ m^3) και για τα δύο τριήμερα δειγματοληψίας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων. Η κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για κάθε ημέρα από τις $2 \times 3 = 6$ ημέρες δειγματοληψίας δίνεται στα **Σχήματα 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11** και **4.12**.

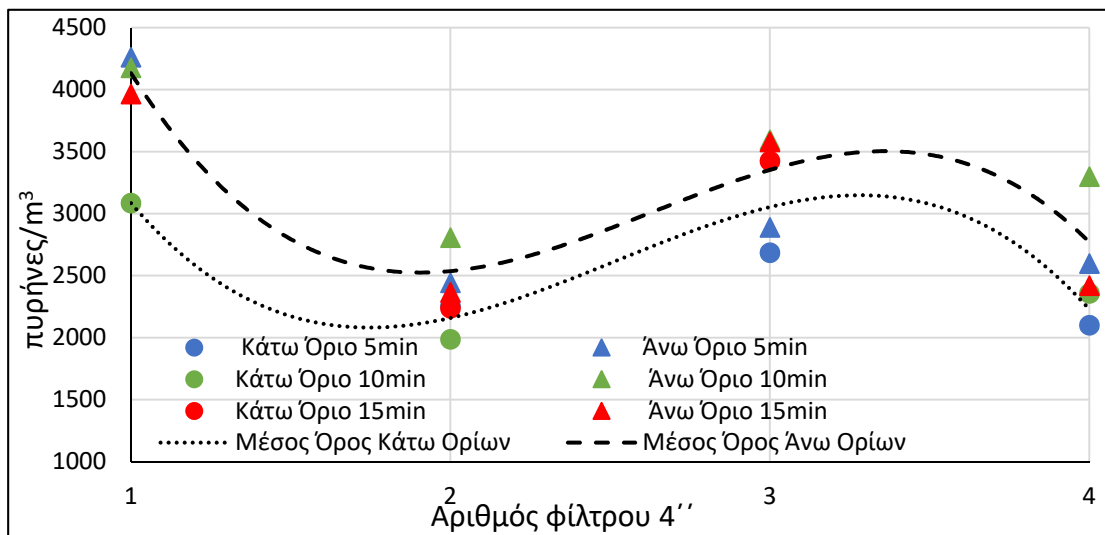
Πίνακας 4.4 : «Κάτω» και «Άνω» όρια για το σύνολο της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα (πυρήνες/m³) και για τα δύο τρίμηνα δειγματοληψίας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	Κάτω όριο πυρήνων/m ³				Άνω όριο πυρήνων/m ³			
		5min	10min	15min	Μέσος όρος κάτω ορίων	5min	10min	15min	Μέσος όρος άνω ορίων
30/3/2022	1	-	4410	4646	4528	-	5089	5131	5110
	2	3618	3478	-	3548	4510	3911	-	4211
	3	4187	-	3888	4038	4917	-	-	4917
	4	2209	2354	2122	2228	2913	2638	2840	2797
31/3/2022	1	-	3085	-	3085	4260	4175	3963	4133
	2	2256	1986	2236	2159	2441	2805	2364	2537
	3	2684	-	3424	3054	2888	3594	3578	3353
	4	2100	2357	-	2229	2596	3298	2418	2771
1/4/2022	1	3147	2876	-	3012	3415	3696	3589	3567
	2	3018	3537	3630	3395	4073	4273	3810	4052
	3	-	3434	3822	3628	4740	3849	4485	4358
	4	-	3501	3956	3729	-	4036	4128	4082
10/5/2022	1	-	-	3656	3656	-	4237	4180	4209
	2	2262	2357	2680	2433	3064	2846	-	2955
	3	-	-	1478	1478	1812	-	1910	1861
	4	1386	1739	1558	1561	1827	1871	2128	1942
11/5/2022	1	2188	2130	2346	2221	2895	2665	2493	2684
	2	2861	3434	-	3148	3469	3585	3639	3564
	3	2137	2298	2044	2160	2946	2797	2912	2885
	4	2412	2300	2505	2406	-	-	2692	2692
12/5/2022	1	4765	4078	4589	4477	5624	4347	5440	5137
	2	3595	3499	3311	3468	4029	4234	3489	3917
	3	3210	3168	3147	3175	4049	4004	3664	3906
	4	3208	3986	3362	3519	3402	4168	3698	3756

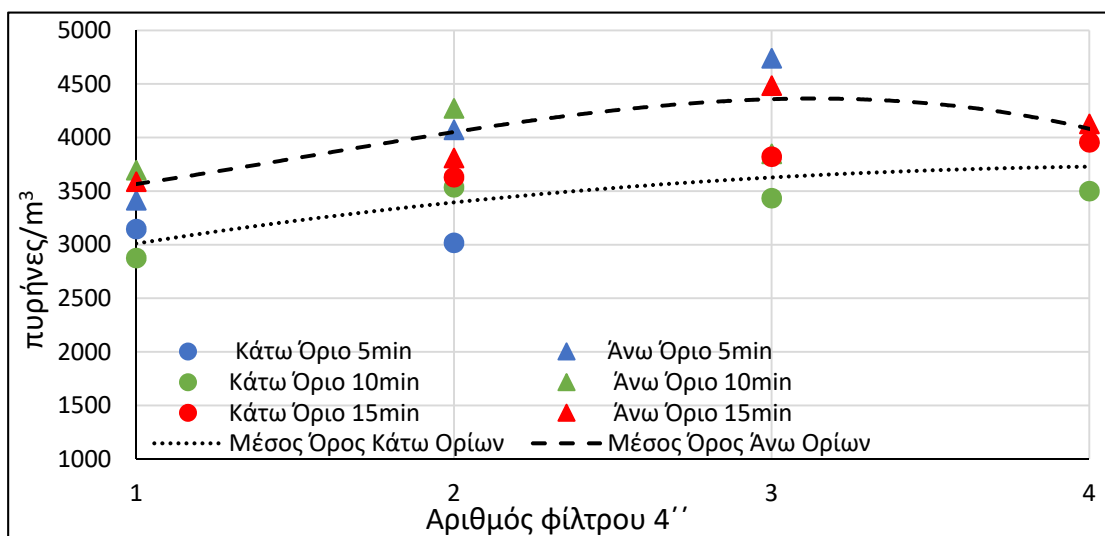
*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.



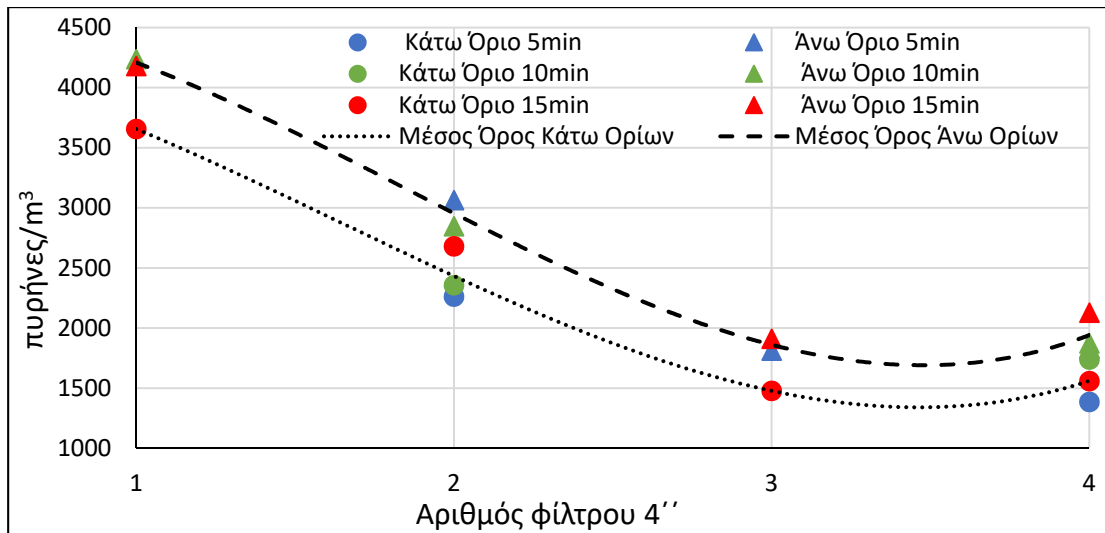
Σχήμα 4.7 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 30/3/2022.



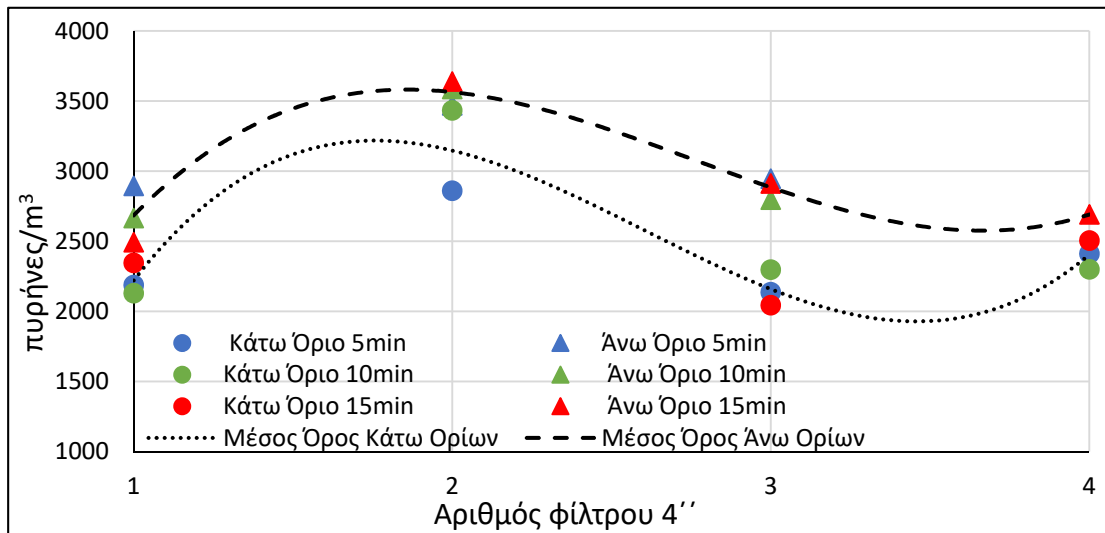
Σχήμα 4.8 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 31/3/2022.



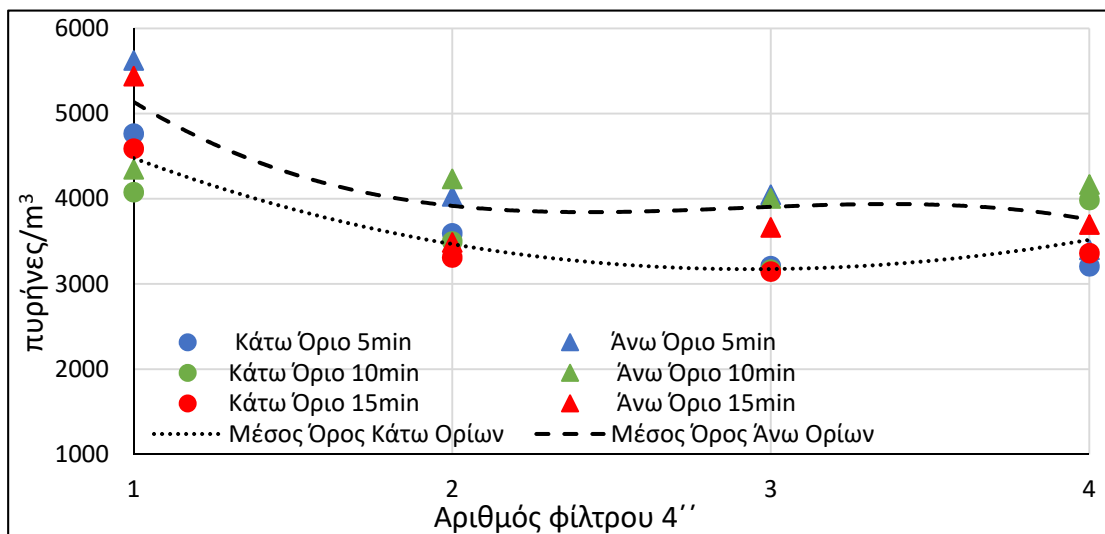
Σχήμα 4.9 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 1/4/2022.



Σχήμα 4.10 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 10/5/2022.



Σχήμα 4.11 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 11/5/2022.



Σχήμα 4.12 : Κύμανση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στις 12/5/2022.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι:

- κατά τη διάρκεια των ανωτέρω δειγματοληψιών η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα είχε εύρος από ~1400 έως ~5600 πυρήνες/m³,
- τα αποτελέσματα των συνολικών συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα παρουσιάζουν αξιόλογη κύμανση και κατά τη διάρκεια των ημερήσιων δειγματοληψιών και μεταξύ των τριών διαδοχικών ημερών της δειγματοληψίας,
- δεν επιτυγχάνονται θετικές λύσεις του αναλυτικού συστήματος εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής για κάθε σενάριο χρονικής διάρκειας λήψης διαδοχικών φασμάτων,
- τα εύρη της συγκέντρωσης των πυρήνων στην ατμόσφαιρα που προκύπτουν από τα τρία διαφορετικά σενάρια χρονικής διάρκειας λήψης διαδοχικών φασμάτων έχουν μεν διαφορές, αλλά σε μεγάλο βαθμό αλληλεπικαλύπτονται. Το γεγονός αυτό τονίζει την ευαισθησία της μεθόδου, αλλά οδηγεί και στο συμπέρασμα ότι η επιλογή πολλαπλών σεναρίων χρονικής διάρκειας λήψης διαδοχικών φασμάτων μπορεί να εφαρμοσθεί, ώστε να προσδιορισθούν θετικές λύσεις του συστήματος εξισώσεων για όλα τα φίλτρα αέρα, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

4.3.2.3 Προσδιορισμός της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα μέσω της μεθόδου των (Forkapic, et al., 2012)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε κυρίως για συγκριτικούς λόγους και για τον λόγο αυτό δεν έγινε διερεύνηση για εύρεση θετικών λύσεων του συστήματος σε εύρος $\pm 3\sigma$ επί των αποτελεσμάτων της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Στον **Πίνακα 4.5** που ακολουθεί δίνονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου (πυρήνες/m³) για κάθε φίλτρο 4'' και σενάριο λήψης διαδοχικών φασμάτων στη μορφή «τιμή $\pm 1\sigma$ ». Επίσης, προσδιορίζεται η μέση τιμή της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα, βάσει των αποτελεσμάτων των επιμέρους σεναρίων.

Οι συντελεστές α_1 έως και α_{18} (για τις **Εξισώσεις 4.31** έως **4.38**) για κάθε φίλτρο αέρα και για κάθε σενάριο λήψης διαδοχικών φασμάτων, όπως αυτοί προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα Mathematica δίνονται στο Παράρτημα ΙΓ.

Πίνακας 4.5 : Συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα (πυρήνες/m³) και για τα δύο τριήμερα δειγματοληψίας, όπως εκτιμήθηκε εφαρμόζοντας τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	Συγκέντρωση πυρήνων/m ³			
		5min	10min	15min	Μέσος όρος
30/3/2022	1	-	-	7253 ± 1395	7253 ± 1395
	2	-	-	-	-
	3	7061 ± 1325	-	6432 ± 1398	6746 ± 963
	4	4021 ± 856	3979 ± 777	3990 ± 1257	3997 ± 569
31/3/2022	1	-	-	-	-
	2	-	3847 ± 790	3778 ± 841	3812 ± 577
	3	5134 ± 997	5263 ± 920	5118 ± 1026	5172 ± 567
	4	-	4429 ± 973	4358 ± 1216	4393 ± 779
1/4/2022	1	4950 ± 1107	5055 ± 912	-	5003 ± 717
	2	-	5961 ± 1005	-	5961 ± 1005
	3	6614 ± 1165	6563 ± 1096	6612 ± 1245	6596 ± 676
	4	-	-	5880 ± 1119	5880 ± 1119
10/5/2022	1	6785 ± 1290	-	-	6785 ± 1290
	2	3971 ± 2167	-	3930 ± 1126	3950 ± 1221
	3	-	-	-	-
	4	-	3117 ± 670	3016 ± 750	3066 ± 503
11/5/2022	1	-	-	4481 ± 991	4481 ± 991
	2	-	5192 ± 1099	-	5192 ± 1099
	3	3874 ± 908	3991 ± 774	3992 ± 872	3952 ± 493
	4	4176 ± 1129	4274 ± 839	4359 ± 958	4270 ± 567
12/5/2022	1	8611 ± 1863	-	-	8611 ± 1863
	2	-	6076 ± 1039	6187 ± 1177	6131 ± 785
	3	5605 ± 1247	-	-	5605 ± 1247
	4	-	5912 ± 980	-	5912 ± 980

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Η απουσία διερεύνησης ευαισθησίας για εύρεση θετικών λύσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής είχε ως αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις να μην προκύψει θετική λύση του συστήματος εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, υπολογίζεται συστηματικά υψηλότερη συγκέντρωση του πλήθους πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα, συγκριτικά με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, με τη συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου να προσδιορίζεται σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί των υπολογιζόμενων μέσων όρων από ~ 300 έως ~ 14200 πυρήνες/ m^3 . Η διαφορά αυτή πιθανότατα οφείλεται στην απουσία διόρθωσης για παραγωγή-κατανάλωση κατά τη διάρκεια της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

4.3.2.4 Σύγκριση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου μεταξύ των δύο μεθόδων

Παρόλο που ο στόχος της συγκεκριμένης διερεύνησης είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των πυρήνων/ m^3 των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και η επίδρασή τους στο συνολικό ^{210}Pb στα φίλτρα αέρα, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των υπολογιζόμενων ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου μεταξύ της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων και της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012). Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε μία αντιπροσωπευτική ημέρα δειγματοληψίας, συγκεκριμένα η 30^η Μαρτίου του 2022 του 1^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας, για τους εν λόγω υπολογισμούς. Από τη στιγμή που έχει λάβει χώρα ο υπολογισμός της επιμέρους συγκέντρωσης πυρήνων/ m^3 για κάθε βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου⁴⁴, ο υπολογισμός των επιμέρους συγκεντρώσεων ενεργότητας γίνεται βάσει της εξίσωσης:

$$R = \lambda \cdot C \quad (4.42)$$

Όπου :

R: η συγκέντρωση ενεργότητας στον αέρα (Bq/m^3) του ραδιενεργού ισοτόπου,

⁴⁴ Το σύνολο των επιμέρους συγκεντρώσεων πυρήνων/ m^3 για κάθε συλλεχθέν φίλτρο και κάθε μέθοδο που εφαρμόστηκε για τα 2 τριήμερα δειγματοληψίας δίνεται στο Παράρτημα ΙΕ.

- λ: η σταθερά διάσπασης του εκάστοτε ραδιενεργού ισότοπου (s^{-1}),
 C: η ατμοσφαιρική συγκέντρωση πυρήνων/ m^3 του εκάστοτε ραδιενεργού Ισοτόπου.

Στους **Πίνακες 4.6** και **4.7** που ακολουθούν δίνονται οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου για κάθε φίλτρο 4'' που συλλέχθηκε στις 30/3/2022, όπως αυτοί υπολογίστηκαν και με τις 2 μεθόδους. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συνεισφορά των πυρήνων του ^{214}Po είναι αμελητέα, και για τον λόγο αυτό, παρά τη ραδιενεργό του ισορροπία με το ^{214}Bi , δε συμπεριλαμβάνεται στους κάτωθι υπολογισμούς. Επίσης, να σημειωθεί ότι τα «Κάτω» και «Άνω» όρια που προέκυψαν από τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων αφορούν ομάδες λύσεων του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων και κατηγοριοποιούνται ως «Κάτω» και «Άνω» βάσει του συνόλου των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και όχι από τον αριθμό των επιμέρους πυρήνων κάθε θυγατρικού.

Πίνακας 4.6 : Συγκέντρωση ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα στις 30/3/2022, όπως αυτή υπολογίστηκε με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων⁴⁵.

Φίλτρο αέρα 4''	Ραδιενεργό Ισότοπο	Μέσος όρος κάτω ορίων πυρήνων/ m^3	Μέσος όρος άνω ορίων πυρήνων/ m^3	Συγκέντρωση ενεργότητας κάτω ορίων Bq/m^3	Συγκέντρωση ενεργότητας άνω ορίων Bq/m^3	Σύνολο Bq/m^3 κάτω ορίων	Σύνολο Bq/m^3 άνω ορίων
a0595	^{218}Po	191	1547	0.7	5.8	2.8	7.6
	^{214}Pb	2758	1625	1.2	0.7		
	^{214}Bi	1580	1939	0.9	1.1		
a0596	^{218}Po	1357	1752	5.1	6.6	6.3	7.9
	^{214}Pb	936	893	0.4	0.4		
	^{214}Bi	1369	1566	0.8	0.9		
a0597	^{218}Po	685	1985	2.6	7.5	3.8	8.5
	^{214}Pb	1174	175	0.5	0.1		
	^{214}Bi	1297	1719	0.8	1.0		
a0598	^{218}Po	268	920	1.0	3.5	2.0	4.6
	^{214}Pb	1069	1045	0.5	0.4		
	^{214}Bi	945	1206	0.6	0.7		

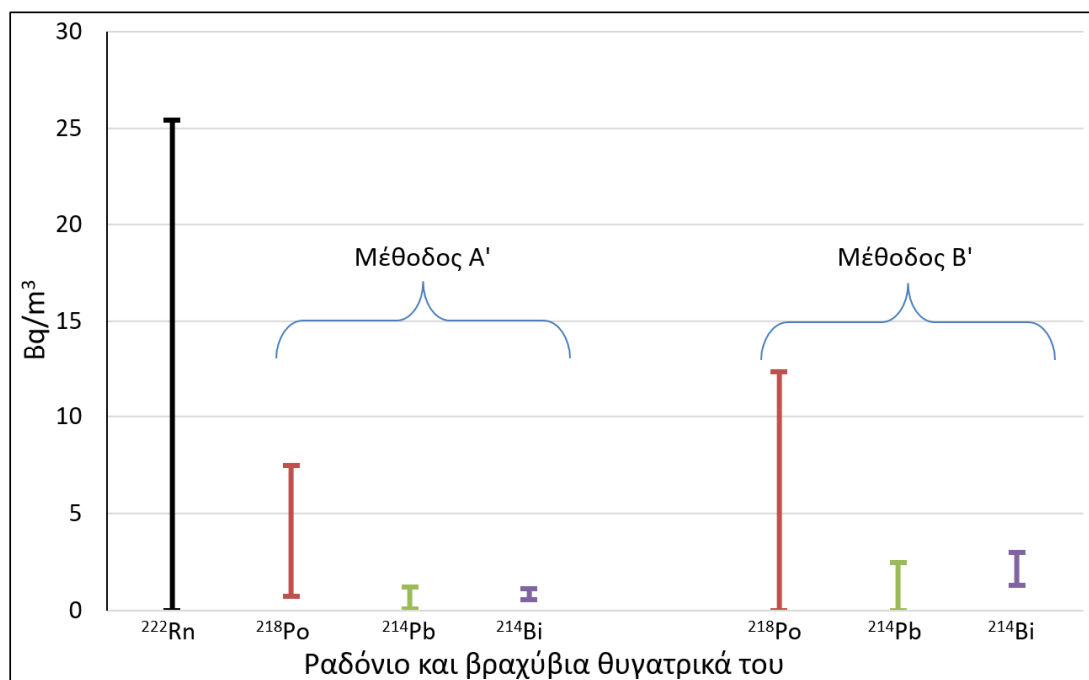
⁴⁵ Το άνω και κάτω όριο αναφέρεται στο **σύνολο** των πυρήνων όλων των βραχύβιων θυγατρικών

Πίνακας 4.7 : Συγκέντρωση ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα στις 30/3/2022, όπως αυτή υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Φίλτρο αέρα 4''	Ραδιενεργό Ισότοπο	Μέσος όρος πυρήνων/m ³	Συγκέντρωση ενεργότητας Bq/m ³	Σύνολο Bq/m ³
a0595	²¹⁸ Po	26 ± 967	0.1 ± 3.6	3.9 ± 3.7
	²¹⁴ Pb	2852 ± 973	1.2 ± 0.4	
	²¹⁴ Bi	4376 ± 255	2.6 ± 0.1	
a0596	²¹⁸ Po	Δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετική λύσης για το φίλτρο a0596 με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012)		
	²¹⁴ Pb			
	²¹⁴ Bi			
a0597	²¹⁸ Po	1198 ± 691	4.5 ± 2.6	7.5 ± 2.6
	²¹⁴ Pb	1597 ± 633	0.7 ± 0.3	
	²¹⁴ Bi	3952 ± 221	2.3 ± 0.1	
a0598	²¹⁸ Po	45 ± 413	0.2 ± 1.6	2.2 ± 1.6
	²¹⁴ Pb	1498 ± 382	0.6 ± 0.2	
	²¹⁴ Bi	2454 ± 87	1.4 ± 0.1	

Στο **Σχήμα 4.13** που ακολουθεί γίνεται σύγκριση μεταξύ των υπολογισθέντων συνολικών συγκεντρώσεων ενεργότητας των βραχύβιων θυγατρικών ραδονίου. Επειδή με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων οι υπολογισθείσες συγκεντρώσεις ενεργότητας προέκυψαν από διερεύνηση σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί των μετρούμενων τιμών από τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο **Σχήμα 4.13** δίνεται και το άνω και κάτω εύρος σε $\pm 3\sigma$ που προκύπτει από τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012) για λόγους σύγκρισης.

Για λόγους απλότητας της σύγκρισης μεταξύ των δύο μεθόδων, και μόνο για το **Σχήμα 4.13**, η μέθοδος επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων θα αναφέρεται ως «Μέθοδος Α'» και η μέθοδος των (Forkaric, et al., 2012) θα αναφέρεται ως «Μέθοδος Β'».



Σχήμα 4.13 : Ενδεικτικό⁴⁶ διάγραμμα μεταξύ του εύρους ($\pm 3\sigma$) της συγκέντρωσης ενεργότητας του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του, όπως αυτές εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων (Μέθοδος Α') και της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012) (Μέθοδος Β').

Από το παραπάνω **Σχήμα 4.13** προκύπτει ότι το εύρος λύσεων της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων βρίσκεται εντός του εύρους της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012).

4.3.3 Συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ενεργότητα του ^{210}Pb που υπολογίζεται πάνω στο φίλτρο αέρα 8''x10'' κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.1, πρωταρχικός στόχος όλης της διαδικασίας που παρουσιάζεται στις προηγούμενες παραγράφους, ήταν η εκτίμηση της συνεισφοράς των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, στην ενεργότητα του ^{210}Pb που υπολογίζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων αέρα 8''x10'', τα οποία χρησιμοποιούνται στις συστηματικές μετρήσεις που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς αυτής των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, για κάθε τριήμερο δειγματοληψίας, παράλληλα με τη δειγματοληψία των φίλτρων 4'' έγινε και δειγματοληψία φίλτρου 8''x10'', όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.5**. Η παράλληλη δειγματοληψία των φίλτρων 8''x10'' έγινε, ώστε να

⁴⁶ Οι μετρήσεις του ραδονίου και των θυγατρικών δεν έχουν γίνει την ίδια ημερομηνία.

συλλεχθεί ικανοποιητικός όγκος αέρα σε αυτά και να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη στατιστική για τον υπολογισμό του ^{210}Pb . Για τον ίδιο λόγο, κάθε φίλτρο $8''\times 10''$ αναλύθηκε για 1000000sec στον ανιχνευτή XtRa και τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στον **Πίνακα 4.8** που ακολουθεί.

Πίνακας 4.8 : Συγκέντρωση του ^{210}Pb που μετρήθηκε στα φίλτρα $8''\times 10''$ για τα δύο τριήμερα δειγματοληψίας.

Τριήμερο δειγματοληψίας	Κωδικός φίλτρου $8''\times 10''$	Συνολικός όγκος αέρα (m^3)	Συγκέντρωση ενεργότητας ^{210}Pb ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	Σύνολο πυρήνων ^{210}Pb στο φίλτρο
1 ^ο	a607	1478.22	1230 ± 62	$1.8 \cdot 10^9 \pm 0.1 \cdot 10^9$ ⁴⁷
2 ^ο	a620	1460.83	853 ± 62	$1.3 \cdot 10^9 \pm 0.1 \cdot 10^9$ ⁴⁸

Για να αποδοθούν οι συγκεντρώσεις των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που εκτιμήθηκαν από τα φίλτρα $4''$ τα οποία συλλέχθηκαν σε κάθε τριήμερο δειγματοληψίας, στο αντίστοιχο φίλτρο $8''\times 10''$ έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- i. Η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας κάθε επιμέρους φίλτρου $4''$.
- ii. Η παύση 64min μεταξύ των επιμέρους δειγματοληψιών φίλτρων $4''$ χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη 32min το κάθε ένα και η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που αποδίδεται σε κάθε μέρος είναι ίση με αυτή του πλησιέστερου φίλτρου $4''$ σε αυτό⁴⁹.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε οκτάωρο δειγματοληψίας⁵⁰ χωρίζεται σε 4 τμήματα, όπου σε κάθε τμήμα η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα θεωρείται ότι είναι ίση με αυτήν που προσδιορίζεται από το αντίστοιχο φίλτρο $4''$. Η χρονική διάρκεια καθενός από τα τέσσερα τμήματα ορίζεται στους **Πίνακες 4.9α** και **4.9β** ως «Αντιπροσωπευτικός χρόνος».

⁴⁷ Με ακρίβεια πυρήνα είναι 1838113480 ± 92096967 πυρήνες.

⁴⁸ Με ακρίβεια πυρήνα είναι 1260500834 ± 91932662 πυρήνες.

⁴⁹ Δηλαδή η υπολογισθείσα συγκέντρωση βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου από το 1^ο φίλτρο $4''$ αποδίδεται στα πρώτα 60min(δειγματοληψία 1^ο φίλτρου) + 32min(1^ο μισό της πρώτης παύσης)=92min, από το 2^ο φίλτρο $4''$ αποδίδεται σε 32min(2^ο μισό της πρώτης παύσης)+60min(δειγματοληψία 2^ο φίλτρου)+32min(1^ο μισό της δεύτερης παύσης)=124min, κ.ο.κ..

⁵⁰ Η τριήμερης διάρκειας δειγματοληψία των φίλτρων $8''\times 10''$ συνίσταται ουσιαστικά από τρία οκτάωρα, ένα κάθε μέρα, δηλαδή συνολικά 24 ώρες.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται οι συγκεντρώσεις των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, όπως αυτές αποδίδονται στα φίλτρα αέρα 8''x10'', για κάθε τριήμερο δειγματοληψίας, καθώς και για κάθε μία από τις δύο διαφορετικές μεθόδους επίλυσης του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

4.3.3.1 Συνολικό πλήθος πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα 8''x10'' μέσω της μεθόδου επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του **Πίνακα 4.4** από τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, το σύνολο των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που αποδίδεται στα φίλτρα 8''x10'' για κάθε μία ημέρα των δύο τριήμερων δειγματοληψιών δίνεται στους **Πίνακες 4.9α** και **4.9β**.

Πίνακας 4.9α : «Κάτω» και «Άνω» όρια του συνολικού πλήθους πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο 8''x10'' (α607) για το 1^ο τριήμερο δειγματοληψίας (30/3/2022-1/4/2022).

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	1 ^ο Τριήμερο δειγματοληψίας				
		Συνολικός Όγκος Αέρα (m ³)	Αντιπροσωπευτικός χρόνος δειγματοληψίας (min)	Αντιστοιχία όγκου αέρα σε κάθε αντιπροσωπευτικό τμήμα (m ³)	Κάτω όριο συνόλου πυρήνων	Άνω όριο συνόλου πυρήνων
30/3/2022	1	498.88	92	106.24	481068	542902
	2		124	143.20	508063	602931
	3		124	143.20	578158	704100
	4		92	106.24	236745	297162
31/3/2022	1	499.25	92	106.32	328003	439392
	2		124	143.30	309439	363513
	3		124	143.30	437648	480544
	4		92	106.32	236938	294582
1/4/2022	1	480.09	92	102.24	307900	364661
	2		124	137.80	467843	558380
	3		124	137.80	499952	600548
	4		92	102.24	381207	417349
ΣΥΝΟΛΟ		1478.22	1296	1478.22	4772964	5666064

Πίνακας 4.9β : «Κάτω» και «Άνω» όρια του συνόλου των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο 8'x10' (a620) για το 2^ο τρίμηρο δειγματοληψίας (10/5/2022-12/5/2022).

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4'	2 ^ο Τρίμηρο δειγματοληψίας				
		Συνολικός όγκος αέρα (m ³)	Αντιπροσωπευτικός χρόνος δειγματοληψίας (min)	Αντιστοιχία όγκου αέρα σε κάθε αντιπροσωπευτικό τμήμα (m ³)	Κάτω όριο συνόλου πυρήνων	Άνω όριο συνόλου πυρήνων
10/5/2022	1	491.75	92	104.72	382873	440733
	2		124	141.15	343419	417100
	3		124	141.15	208620	262681
	4		92	104.72	163475	203375
11/5/2022	1	486.35	92	103.57	230074	278029
	2		124	139.60	439392	497583
	3		124	139.60	301490	402747
	4		92	103.57	249166	278823
12/5/2022	1	482.73	92	102.80	460286	528102
	2		124	138.56	480577	542791
	3		124	138.56	439932	541175
	4		92	102.80	361732	386130
ΣΥΝΟΛΟ		1460.83	1296	1460.83	4061037	4779269

Το σύνολο των υπολογισθέντων πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στους παραπάνω πίνακες μετά τη διάσπασή τους (λίγες ώρες μετά το πέρας της συλλογής του φίλτρου) καταλήγουν σε ²¹⁰Pb και προσμετρώνται στη συγκέντρωση ενεργότητας του ²¹⁰Pb που υπολογίζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 4.8** προκύπτει ότι η συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο σύνολο της μετρούμενης συγκέντρωσης του ²¹⁰Pb έχει ένα εύρος από 0.26% έως 0.38%. Συγκρίνοντας το εύρος αυτό με την αβεβαιότητα των αναλύσεων με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας, η οποία για τον ²¹⁰Pb κυμαίνεται από 5% έως 7%, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συλλογή των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου πάνω στο φίλτρο δεν επηρεάζει στατιστικά σημαντικά τη μετρούμενη συγκέντρωση του ²¹⁰Pb στα φίλτρα αέρα και πρέπει να θεωρείται αμελητέα.

4.3.3.2 Συνολικό πλήθος πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα 8''x10'' μέσω της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012)

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του **Πίνακα 4.5** από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012), το σύνολο των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που αποδίδεται στα φίλτρα 8''x10'' για κάθε ημέρα δειγματοληψίας δίνεται στους **Πίνακες 4.10α** και **4.10β**.

Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, δεν προέκυψαν λύσεις του συστήματος εξισώσεων για κάθε φίλτρο 4'' μέσω της προσέγγισης με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012), η απόδοση των αποτελεσμάτων του συνόλου των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου από τα φίλτρα 4'' στο φίλτρο 8''x10'' προσαρμόστηκε ανάλογα, καταμερίζοντας τον χρόνο και τον όγκο δειγματοληψίας σε 3 αντί για 4 μέρη, όπου κρίθηκε αναγκαίο.

Πίνακας 4.10α : Σύνολο πυρήνων βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο 8''x10'' (a0607) κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας (30/3/2022-1/4/2022).

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	1 ^ο Τριήμερο δειγματοληψίας				
		Συνολικός όγκος αέρα (m ³)	Αντιπροσωπευτικός χρόνος δειγματοληψίας (min)	Αντιστοιχία όγκου αέρα σε κάθε αντιπροσωπευτικό τμήμα (m ³)	Σύνολο πυρήνων	
30/3/2022	1	498.88	154	177.84	1289826 ± 248077	
	2		Δεν αποδόθηκαν πυρήνες στο παρόν φίλτρο			
	3		186	214.80		1449103 ± 206877
	4		92	106.24		424604 ± 60475
31/3/2022	1	499.25	Δεν αποδόθηκαν πυρήνες στο παρόν φίλτρο		951667 ± 144005	
	2		216	249.63		741128 ± 81248
	3		124	143.30		467100 ± 82790
	4		92	106.32		511476 ± 73340
1/4/2022	1	480.09	92	102.24	821489 ± 138551	
	2		124	137.80	908962 ± 93115	
	3		124	137.80	601167 ± 114459	
	4		92	102.24		
ΣΥΝΟΛΟ		1478.22	1296	1478.22	8166522 ± 434208	

Πίνακας 4.10β : Σύνολο πυρήνων βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο 8''x10'' (a0620) κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας (10/5/2022-12/5/2022).

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Αριθμός φίλτρου 4''	2 ^ο Τριήμερο δειγματοληψίας			
		Συνολικός όγκος αέρα (m ³)	Αντιπροσωπευτικός χρόνος δειγματοληψίας (min)	Αντιστοιχία όγκου αέρα σε κάθε αντιπροσωπευτικό τμήμα (m ³)	Σύνολο πυρήνων
10/5/2022	1	491.75	92	104.72	710577 ± 135067
	2		186	211.73	836330 ± 258524
	3		Δεν αποδόθηκαν πυρήνες στο παρόν φίλτρο		
	4		154	175.30	537510 ± 88180
11/5/2022	1	486.35	92	103.57	464111 ± 102650
	2		124	139.60	724791 ± 153386
	3		124	139.60	551740 ± 68771
	4		92	103.57	442219 ± 58753
12/5/2022	1	482.73	92	102.80	885272 ± 191555
	2		124	138.56	849563 ± 108741
	3		124	138.56	776593 ± 172752
	4		92	102.80	607752 ± 100732
ΣΥΝΟΛΟ		1460.83	1296	1460.83	7386458 ± 472871

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 4.8** προκύπτει ότι η συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο σύνολο της μετρούμενης συγκέντρωσης του ²¹⁰Pb στην περίπτωση αυτή έχει ένα εύρος από 0.44% έως 0.59%. Παρά το γεγονός ότι με την προσέγγιση αυτή προκύπτει μεγαλύτερη συνεισφορά των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο σύνολο της μετρούμενης συγκέντρωσης του ²¹⁰Pb στα φίλτρα αέρα, και πάλι, η αβεβαιότητα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, που κυμαίνεται από 5% έως 7%, παραμένει σημαντικά μεγαλύτερη. Επομένως, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι και με την εφαρμογή της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012), η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα δεν επηρεάζει στατιστικά σημαντικά τη μετρούμενη συγκέντρωση του ²¹⁰Pb στα φίλτρα αέρα.

4.4 Συμπεράσματα

Στη μελέτη που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό, έλαβε χώρα η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων παραγωγής-κατανάλωσης κατά τη δειγματοληψία, την καθυστέρηση και την ανάλυση φίλτρων αέρα, με στόχο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα και τον υπολογισμό της συνεισφοράς τους στη μετρούμενη συγκέντρωση του ^{210}Pb στα φίλτρα αέρα. Για τον λόγο αυτό έλαβαν χώρα δύο τριήμερα δειγματοληψίας όπου σε κάθε τριήμερο συλλέχθηκαν 12 φίλτρα $4''$ παράλληλα με ένα φίλτρο $8'' \times 10''$. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν και συγκρίθηκαν με δύο τρόπους: (i) με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων, η οποία συμπεριέλαβε τις διορθώσεις παραγωγής-κατανάλωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και (ii) με την μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012). Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η πολύ υψηλή ευαισθησία επίλυσης του συστήματος εξισώσεων για τον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά συνδυάζοντας μετρήσεις από διαφορετικά σενάρια χρονικής διάρκειας λήψης φασμάτων, καθώς και αναζητώντας θετική λύση του συστήματος σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί την τιμή της μετρούμενης συγκέντρωσης του ^{214}Pb και του ^{214}Bi .
- Τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου κυμάνθηκαν σε εύρος από ~ 1400 έως ~ 5600 πυρήνες/ m^3 και κατά τη διάρκεια της ημέρας και μεταξύ των ημερών κάθε τριημέρου δειγματοληψίας.
- Οι συνολικές συγκεντρώσεις πυρήνων/ m^3 των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που προκύπτουν με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων είναι σταθερά μικρότερες από αυτές που προκύπτουν με τη χρήση της μεθόδου των (Forkaric, et al., 2012). Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι η προσέγγιση των (Forkaric, et al., 2012) δε συμπεριλαμβάνει διορθώσεις παραγωγής-κατανάλωσης κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.
- Παρά τη λεπτομερή προσέγγιση υπολογισμού των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, προκύπτει ότι το ποσοστό συνεισφοράς

τους στον συνολικό συλλεχθέντα ^{210}Pb (το οποίο κυμαίνεται από 0.26% έως 0.38%) είναι τόσο μικρό που δεν είναι στατιστικά σημαντικό συγκρινόμενο με τις αβεβαιότητες των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων (οι οποίες κυμαίνονται από 5% έως 7%).

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεράσματα, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση και παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσής τους, με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας, ακόμα και όταν τα επίπεδα ραδιενέργειας είναι πολύ χαμηλά, όπως στο εξωτερικό περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μεθοδολογία προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις

5.1 Εισαγωγή

Τα ραδιενεργά ισότοπα στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις αποτελούν αντικείμενο μελέτης για την επιστημονική κοινότητα εδώ και δεκαετίες (Zhang, et al., 2021). Ο ακριβής προσδιορισμός της συγκέντρωσης και της κύμανσης των παραπάνω ισοτόπων – εκτός των άλλων – προσφέρει σημαντικά δεδομένα για τη μελέτη της μεταφοράς αερίων μαζών και την αξιολόγηση ατμοσφαιρικών μοντέλων, ενώ αποτελεί και υψηλής αξίας πληροφορία για τον σχεδιασμό της απόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης σε περιπτώσεις ραδιολογικών ή πυρηνικών ατυχημάτων (IAEA, 1995), (ICRP, 2020).

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ στα πλαίσια της ερευνητικής του δραστηριότητας, καθώς και σε συνεργασία με την ΕΕΑΕ, ακολουθεί ένα σταθερό πρόγραμμα δειγματοληψίας του ατμοσφαιρικού αερολύματος, μέσω της συλλογής φίλτρων αέρα, και παρακολουθεί τις μεταβολές της συγκέντρωσης διαφόρων ραδιενεργών ισοτόπων σε αυτό (Potiriadis, et al., 2013). Επιπροσθέτως, στο παρελθόν έχουν λάβει χώρα αρχικές μελέτες για την επέκταση της παρακολούθησης της ραδιενέργειας στο νερό της βροχής (Παπαδόπουλος, 2010), (Papandreou, et al., 2011), (Savva, et al., 2018), (Σάββα, 2017).

Στο 5^ο κεφάλαιο της Δ.Δ. παρουσιάζεται η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνικών προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις⁵¹, που

⁵¹ Τα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία συνήθως ανιχνεύονται στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, χαρακτηρίζονται ως “Fallout RadioNuclides” (FRN) και βρίσκουν αρκετές εφαρμογές ως ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών.

περιλαμβάνουν και τη δειγματοληψία και ανάλυση ξηρών, υγρών (βροχή, χιόνι) και ολικών (ξηρών + υγρών) ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας.

5.2 Δειγματοληψία και επεξεργασία ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, έχουν γίνει πολλές μελέτες προσδιορισμού της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, στις οποίες γίνεται – ως επί το πλείστον – είτε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων σε υγρές αποθέσεις (κυρίως σε συμβάντα βροχοπτώσεων) είτε σε ολικές (ξηρές και υγρές αποθέσεις) με καθορισμένο χρονικό βήμα συλλογής του δείγματος, συνήθως ένα μήνα.

Στην παρούσα Δ.Δ. σκοπός ήταν να αναπτυχθεί μεθοδολογία για δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση των πάσης φύσεως δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας, με δυνατότητα μικρότερου χρονικού βήματος συλλογής, καθώς και μικρότερου όγκου δείγματος, κάτι που θα επιτρέψει την πιο λεπτομερή χρονικά παρακολούθηση της εξέλιξης της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στις αποθέσεις.

5.2.1 Υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις και υγρασία – ανάπτυξη μεθόδου

Βασικός στόχος ήταν η ανάπτυξη τεχνικής για την επεξεργασία και την ανάλυση δειγμάτων υγρών αποθέσεων και υγρασίας μικρού όγκου (~ 2 έως 4 λίτρα), ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση μεμονωμένων συμβάντων βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης.

Χρησιμοποιώντας ως βάση προηγούμενη μελέτη που έχει διεξαχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Σάββα, 2017), καθώς και τη μέθοδο που προτείνεται στην εργασία (Komura, et al., 2007), επιλέχθηκε ως βασική μέθοδος για την απομόνωση των ραδιενεργών ισοτόπων από τα δείγματα υγρών κατακρημνίσεων, η ανάμιξη των δειγμάτων με τη ρητίνη ιοντοανταλλαγής κατιόντων DOWEX[®] 50WX8 hydrogen form, 100-200 mesh. Η συγκεκριμένη ρητίνη αποτελείται από πορώδη σφαιρίδια διαμέτρου 100-200 mesh και όταν βρίσκεται στο ίδιο διάλυμα με ιόντα του ίδιου φορτίου, ανταλλάσσει ιόντα με αυτά του διαλύματος. Με αυτόν τον τρόπο, τα ιόντα

του διαλύματος – στην προκειμένη περίπτωση τα ραδιενεργά ισότοπα σε μορφή ιόντων που περιέχονται στο διάλυμα – παγιδεύονται στην επιφάνεια και στους πόρους της ρητίνης. Τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα στην ατμόσφαιρα βρίσκονται σε μορφή κατιόντων (Kaste, et al., 2002) και για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη ρητίνη κατιόντων. Σε αντίστοιχες δειγματοληψίες που έχουν λάβει χώρα σε παγκόσμιο επίπεδο, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, μπορεί να γίνει ταυτόχρονη χρήση ρητίνης κατιόντων με ρητίνη ανιόντων σε ανάμιξη, για την κάλυψη όλου του εύρους φορτίων. Με τη μέθοδο που προτείνεται, το τελικό δείγμα προς ανάλυση είναι πλέον η ρητίνη, η οποία και θα πρέπει να απομονωθεί από το υγρό δείγμα.

Στα πλαίσια της έρευνας που έγινε για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας επεξεργασίας και ανάλυσης των δειγμάτων υγρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων επιλέχθηκε να μελετηθούν τα παρακάτω:

- i. Η απόδοση της μεθόδου που βασίζεται στη χρήση της ρητίνης, ως προς τη συγκράτηση των ραδιενεργών ισωτόπων στις υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις, συγκριτικά με τη μέθοδο του φιλτραρίσματος του υγρού δείγματος που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Papandreou, et al., 2011).
- ii. Η ενδεχόμενη επίδραση που μπορεί να έχει η χρήση μαγνητικού αναδευτήρα για την ανάμιξη της ρητίνης με το υγρό δείγμα, στην τελική μετρούμενη συγκέντρωση ενεργότητας. Η διερεύνηση αυτή ήταν επιβεβλημένη, καθώς στις τεχνικές οδηγίες που συνοδεύουν τη ρητίνη αποθαρρύνεται η χρήση μαγνητικού αναδευτήρα (SIGMA-ALDRICH, 2011).
- iii. Η επαναληψιμότητα της μεθόδου.

Για τον σκοπό της παραπάνω διερεύνησης τοποθετήθηκαν στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ τρεις πλαστικοί συλλέκτες, συνολικής επιφάνειας $\sim 0.56\text{m}^2$ (Σχήμα 5.1) και συλλέχθηκε ένα δείγμα βροχής 22 λίτρων κατά τη διάρκεια συμβάντος έντονης βροχόπτωσης που έλαβε χώρα στις 16 Ιουνίου του 2018.

Το δείγμα που συλλέχθηκε και από τους τρεις συλλέκτες αναμίχθηκε, για να ομογενοποιηθεί, και στη συνέχεια, χωρίστηκε σε 6 υπο-δείγματα με τη μέθοδο του

scooping⁵². Με χρήση των παραπάνω υπο-δειγμάτων δοκιμάστηκαν προκειμένου να συγκριθούν οι τρεις παρακάτω διαδικασίες προετοιμασίας δείγματος:

- i. Ανάμιξη δείγματος με τη ρητίνη κατιόντων με χρήση μαγνητικού αναδευτήρα,
- ii. Ανάμιξη δείγματος με τη ρητίνη κατιόντων χειροκίνητα με χρήση γυάλινου αναδευτήρα,
- iii. Φιλτράρισμα του αρχικού δείγματος με χρήση φίλτρων Whatman 42 διαμέτρου 90mm.



Σχήμα 5.1 : Πλαστικοί συλλέκτες για δειγματοληψία ατμοσφαιρικών αποθέσεων στην οροφή του Κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Κάθε μία από τις τρεις αυτές διαδικασίες επαναλήφθηκε δύο φορές⁵³ για έλεγχο της επαναληψιμότητας της διαδικασίας. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για κάθε διαδικασία χωριστά δίνονται στο **Σχήμα 5.2** που ακολουθεί.

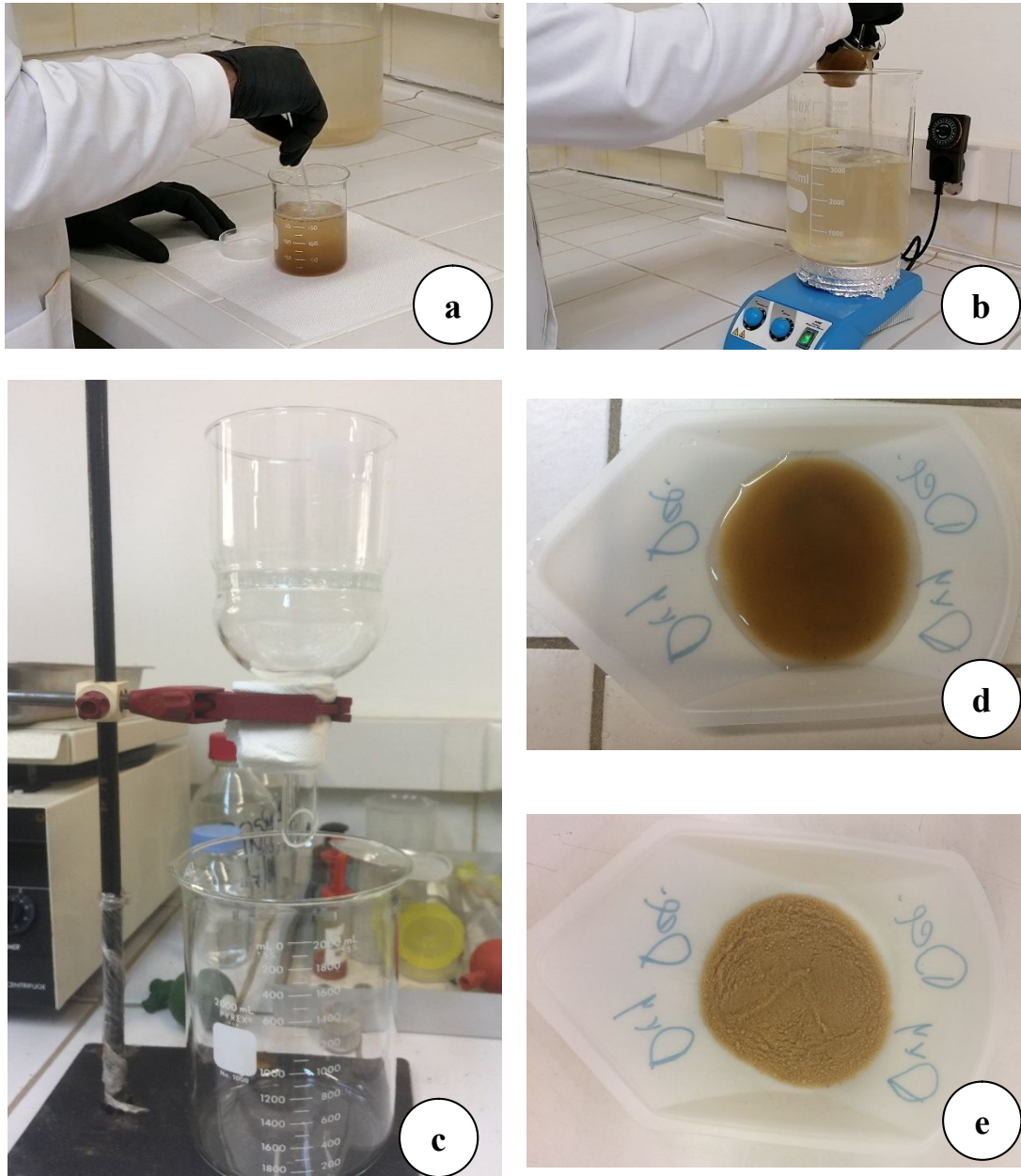
⁵² Πρόκειται για μία διαδικασία τυχαίας δειγματοληψίας υπο-δείγματος από ένα μεγαλύτερο όγκο δείγμα, το οποίο είναι κατά το δυνατόν ομογενοποιημένο.

⁵³ Έτσι, έγιναν συνολικά έξι δοκιμές, όσα και τα υπο-δείγματα που παρήχθησαν από το αρχικό δείγμα βροχόπτωσης.

Διαδικασία #1 Χρήση ρητίνης και μαγνητικού αναδευτήρα	Διαδικασία #2 Χρήση ρητίνης και χειροκίνητη ανάμιξη με γυάλινο αναδευτήρα	Διαδικασία #3 Χρήση φίλτρου Whatman 42 διαμέτρου 90mm	
Ζύγιση δείγματος			
Πέρασμα του δείγματος από κόσκινο διαμέτρου 45μm για την αφαίρεση σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου			
Μέτρηση υγρασίας της ρητίνης για προσδιορισμό της ποσότητας της αντίστοιχης απαιτούμενης ξηρής μάζας		Φιλτράρισμα του δείγματος μέσα από φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm	
Χρήση ρητίνης, ώστε η αντίστοιχη ξηρή μάζα της να είναι 5.5gr (για μέγιστη μάζα υγρού δείγματος \approx 3.7 L)			
Προετοιμασία της ρητίνης αναδεύοντάς τη σε 150mL απιονισμένου νερού			
Προσαρμογή του pH \approx 5 του δείγματος με προσθήκη HNO ₃			
Προσθήκη της ρητίνης στο δείγμα			
Ανάδευση της ρητίνης με το δείγμα για 120min με χρήση μαγνητικού αναδευτήρα	Ανάδευση της ρητίνης με το δείγμα για 120min χειροκίνητα με χρήση γυάλινου αναδευτήρα		
Ξεκούραση του δείγματος, ώστε να επιτευχθεί η καθίζηση της ρητίνης			
Φιλτράρισμα του δείγματος μέσα από φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm και συλλογή της ρητίνης			
Ξήρανση της συλλεχθείσας ρητίνης σε θερμοκρασία δωματίου (21 °C)			Ξήρανση του φίλτρου σε θερμοκρασία δωματίου (21 °C)
Συσκευασία της ρητίνης σε κυλινδρική γεωμετρία 8.72cm ³ και ανάλυσή της με γ-φασματοσκοπία			Δίπλωμα του φίλτρου σε γεωμετρία 3.2x3.2cm ² πάχους 15mm και ανάλυσή του με γ-φασματοσκοπία

Σχήμα 5.2 : Τα βήματα επεξεργασίας και προετοιμασίας των 6 υπο-δειγμάτων από το δείγμα βροχής που συλλέχθηκε στις 16/06/2018 για κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές διαδικασίες.

Χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τα επιμέρους βήματα των τριών διαδικασιών, που περιγράφονται στο **Σχήμα 5.2**, δίνονται στο **Σχήμα 5.3**.



Σχήμα 5.3 : a) Προετοιμασία ρητίνης σε απιονισμένο νερό, b) Ανάδευση υγρού δείγματος με ρητίνη, c) Φιλτράρισμα υγρού δείγματος για απομόνωση/συλλογή ρητίνης, d) Ρητίνη που συλλέχθηκε μετά το πέρας του φιλτραρίσματος, e) Δείγμα ρητίνης μετά το πέρας της ξήρανόσής της.

Στο σημείο αυτό, είναι βασικό να δοθούν επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με ορισμένα από τα βήματα των διαδικασιών που συγκρίθηκαν στο **Σχήμα 5.2**:

- Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, μεγάλα σωματίδια, έντομα και φύλλα μπορεί να παρασυρθούν και να καταλήξουν μέσα στους δειγματολήπτες. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, το μεγαλύτερο ποσοστό των ραδιενεργών ισοτόπων προσκολλάται σε αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου $<1.1\mu\text{m}$ με μόνο 1% αυτών να προσκολλάται σε σωματίδια $>7\mu\text{m}$ (Young &

Silker, 1974), (Papastefanou & Ioannidou, 1996), (Ioannidou & Paatero, 2014). Για τον λόγο αυτό, επιλέχτηκε το σύνολο του υγρού δείγματος να περνάει μέσα από κόσκινο 45 μ m, ώστε να γίνεται απομάκρυνση των μεγάλων σωματιδίων, φύλλων κλπ., κάτι που δεν επηρεάζει τελικά τη συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων στο τελικό δείγμα.

- Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για τις παραπάνω διαδικασίες βρίσκεται συσκευασμένη σε ερμητικά κλειστό δοχείο, περιέχοντας ποσοστό υγρασίας ~50%. Καθώς δεν ήταν γνωστό αν υπάρχει σημαντική απώλεια υγρασίας κατά το επαναλαμβανόμενο άνοιγμα του δοχείου, για κάθε ένα από τα δείγματα των διαδικασιών #1 και #2 έγινε μέτρηση της υγρασίας της ρητίνης πριν το ζύγισμά της.
- Με σκοπό την επίτευξη επαναλήψιμης γεωμετρίας του τελικού προς ανάλυση δείγματος ρητίνης, το ποσό της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για την ανάδευση κάθε δείγματος επιλέχτηκε κατάλληλα, ώστε ο όγκος της, μετά την ξήρανση να οδηγεί στην πλήρωση με ακρίβεια συγκεκριμένης γεωμετρίας δείγματος. (χρήση ~ 10.80 gr ρητίνης για την προετοιμασία κάθε δείγματος⁵⁴).
- Για υψηλότερη απόδοση της ιοντοανταλλαγής, η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε, χρειάζεται να αναδευτεί σε 150mL απιονισμένου νερού για ~ 5min, ώστε να διογκωθούν τα σφαιρίδια που την αποτελούν.
- Η προσαρμογή του pH \approx 5 έγινε για να αποτραπεί η υδρόλυση των κατιόντων των μετάλλων (Komura, et al., 2007).
- Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την ανάδευση της ρητίνης με τον μαγνητικό αναδευτήρα, ώστε να μην επιλεγεί και θέρμανση τους δείγματος, καθώς υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν απώλεια των ιδιοτήτων της ρητίνης (SIGMA-ALDRICH, 2011), (Aittola, et al., 1982).
- Μετά την ανάδευση της ρητίνης με το δείγμα, αν ακολουθήσει αμέσως φιλτράρισμα μέσα από φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm, τα σφαιρίδια της ρητίνης αποφράσσουν τους πόρους του φίλτρου, με αποτέλεσμα το φιλτράρισμα να γίνεται με πολύ αργό ρυθμό και να διαρκεί αρκετές ημέρες (3 με 4 ημέρες) για ένα δείγμα <4L. Αν όμως, το δείγμα αφεθεί να ηρεμήσει

⁵⁴ Στις μελλοντικές βελτιώσεις της παρούσας μεθόδου θα μπορούσε να εισαχθεί η διερεύνηση της ελάχιστης ποσότητας ρητίνης που απαιτείται για την πλήρη προσρόφηση των ραδιενεργών ισοτόπων, ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση ρητίνης για την προετοιμασία των δειγμάτων.

(~ 8h) και η ρητίνη καθιζάνει, τότε το φιλτράρισμα επιταχύνεται και ολοκληρώνεται σε μόλις λίγες ώρες (~ 4h).

- Με το πέρας του φιλτραρίσματος υπάρχει περίπτωση μικροποσότητα (<0.01% επί της συνολικής ποσότητας) ρητίνης να έχει προσκολληθεί στην επιφάνεια του φίλτρου Whatman 42. Για την απόσπαση της ρητίνης από αυτό και προσθήκη της στο υπόλοιπο δείγμα, προτείνεται το προσεκτικό τρίψιμο της επιφάνειας του φίλτρου.
- Η ρητίνη που συλλέχθηκε ξηραίνεται πλήρως αν παραμείνει εκτεθειμένη στον αέρα του εργαστηρίου στους ~ 21 °C, για χρονικό διάστημα ~ 2 ημερών. Για επιτάχυνση της διαδικασίας ξήρανσης μπορεί να τοποθετηθεί σε ερμητικά κλειστό δοχείο που περιέχει silica gel.

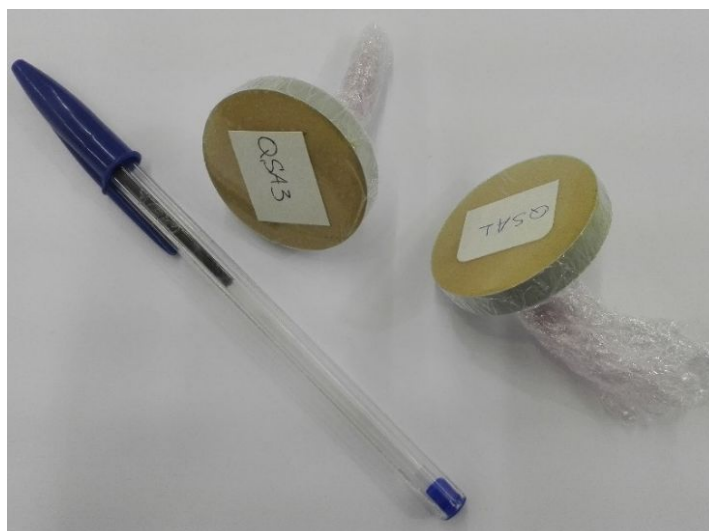
Συγκεντρωτικά, τα δείγματα προς ανάλυση που προέκυψαν από τις παραπάνω διαδικασίες είναι:

- i. δείγματα ρητίνης σε κυλινδρική γεωμετρία 8.72cm^3 . Η γεωμετρία αυτή περιέχεται σε ένα αλουμινένιο τρυβλίο εσωτερικής διαμέτρου 3.9cm, το οποίο καλύπτεται από δύο στρώσεις πλαστικής μεμβράνης (*Σχήμα 5.4*). Για τη μέτρηση, το τρυβλίο προσαρμόζεται στο κέντρο του ανιχνευτή με την πλευρά της πλαστικής μεμβράνης σε επαφή με αυτόν,
- ii. δείγματα φίλτρων Whatman 42 διαμέτρου 90mm, τα οποία διπλώνονται σε γεωμετρία $3.2 \times 3.2 \text{ cm}^2$ πάχους 1.5mm, (*Σχήμα 5.5*),
- iii. δείγματα φίλτρων Whatman 42 διαμέτρου 90mm τα οποία αναλύθηκαν χωρίς να διπλωθούν από τις διαδικασίες #1 και #2,
- iv. υγρά κλάσματα που συλλέχθηκαν μετά από το φιλτράρισμα των δειγμάτων. Τα δείγματα αυτά αναλύθηκαν σε γεωμετρία Marinelli.

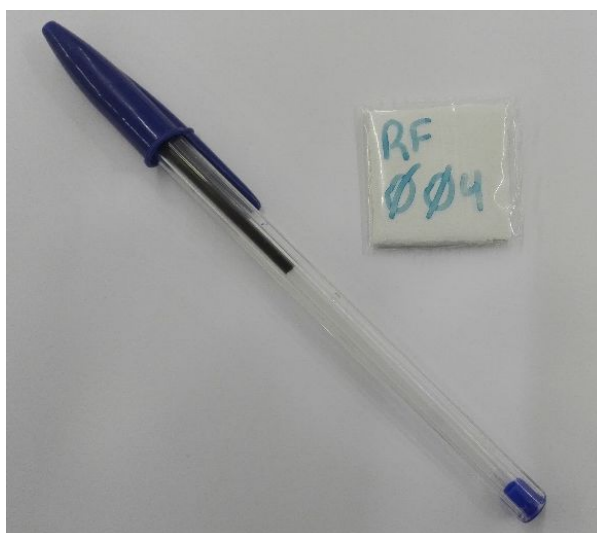
Όλα τα παραπάνω είδη δειγμάτων αναλύθηκαν με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας στους ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που έλαβαν χώρα για την ανάπτυξη της μεθόδου, αλλά και για το σύνολο των ατμοσφαιρικών αποθέσεων κατά τη διάρκεια της παρούσας Δ.Δ., δίνονται στον *Πίνακα 5.1*.

Πίνακας 5.1 : Οι βασικές γεωμετρίες δειγμάτων από την επεξεργασία ατμοσφαιρικών αποθέσεων της παρούσας Δ.Δ. και οι ανιχνευτές που βαθμονομήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μία από αυτές.

	XtRa	Ge2	LEGe
Ρητίνη σε κυλινδρική γεωμετρία 8.72cm ³	√	√	√
Φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm διπλωμένο σε γεωμετρία 3.2x3.2 cm ² πάχους 1.5mm		√	
Φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm	√	√	
Κλάσμα υγρού από φιλτράρισμα δείγματος σε γεωμετρία Marinelli		√	



Σχήμα 5.4 : Συσκευασία ρητίνης σε κυλινδρική γεωμετρία 8.72cm³.



Σχήμα 5.5 : Διπλωμένο Φίλτρο Whatman 42 διαμέτρου 90mm σε γεωμετρία 3.2x3.2 cm² πάχους 1.5mm.

5.2.1.1 Βαθμονόμηση απόδοσης των ανιχνευτικών διατάξεων

Για την ανάλυση των διαφόρων τύπων δειγμάτων που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο, έπρεπε να βαθμονομηθούν για απόδοση οι αντίστοιχες ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκαν. Όλες οι βαθμονομήσεις έγιναν με χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE (Salvat, et al., 2011) και ειδικότερα της έκδοσης του έτους 2011.

Ο κώδικας PENELOPE είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και είναι σχεδιασμένος να προσομοιώνει τη μεταφορά ποζιτρονίων, ηλεκτρονίων και φωτονίων μέσα στην ύλη μέσα από σύνθετες κατασκευές από ποικίλα υλικά. Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων, οι οποίες προσομοιώνουν τους μηχανισμούς που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης. Συγκεκριμένα, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης σημειακών πηγών β^+ , β^- ή γ -ακτινοβολίας στο ενεργειακό εύρος από 50eV έως 1GeV. Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης συγκεκριμένου προβλήματος, αρχικά απαιτείται η περιγραφή του, η οποία εισάγεται μέσω των αρχείων δεδομένων εισόδου (αρχείο εισόδου «.in», αρχείο γεωμετρίας «.geo», αρχείο υλικού «.mat»). Ενδεικτικά αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα Δ.Δ. δίνονται στο Παράρτημα ΙΣΤ. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον κώδικα PENELOPE και τις δυνατότητές του μπορούν να αναζητηθούν σε προγενέστερες εργασίες του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Νικολάου , 2006), (Καρφόπουλος, 2012), (Χαβιάρας, 2015), (Σάββα, 2017).

Για την προσομοίωση μίας ανιχνευτικής διάταξης πρέπει να είναι γνωστά και με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Η διαδικασία προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση περιγράφεται ως «χαρακτηρισμός του ανιχνευτή⁵⁵». Ο χαρακτηρισμός των ανιχνευτών XtRa, Ge2 και LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει λάβει χώρα σε προγενέστερες εργασίες σπουδαστών του ΕΠΤ-ΕΜΠ, (Χαβιάρας, 2015), (Σάββα, 2017), (Τσιαντή, 2018).

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, για κάθε συνδυασμό γεωμετρίας δείγματος-ανιχνευτή του **Πίνακα 5.1** προσδιορίστηκε η συνάρτηση της καμπύλης

⁵⁵ Detector characterization.

απόδοσης. Από τη μακροχρόνια εμπειρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει διαπιστωθεί ότι μία κατάλληλη συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης είναι της μορφής:

$$\ln(\text{eff}) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot \ln(E)^2 \quad (5.1)$$

όπου eff είναι η απόδοση φωτοκορυφής για την εκάστοτε ενέργεια φωτονίου και E είναι η ενέργεια του φωτονίου σε keV.

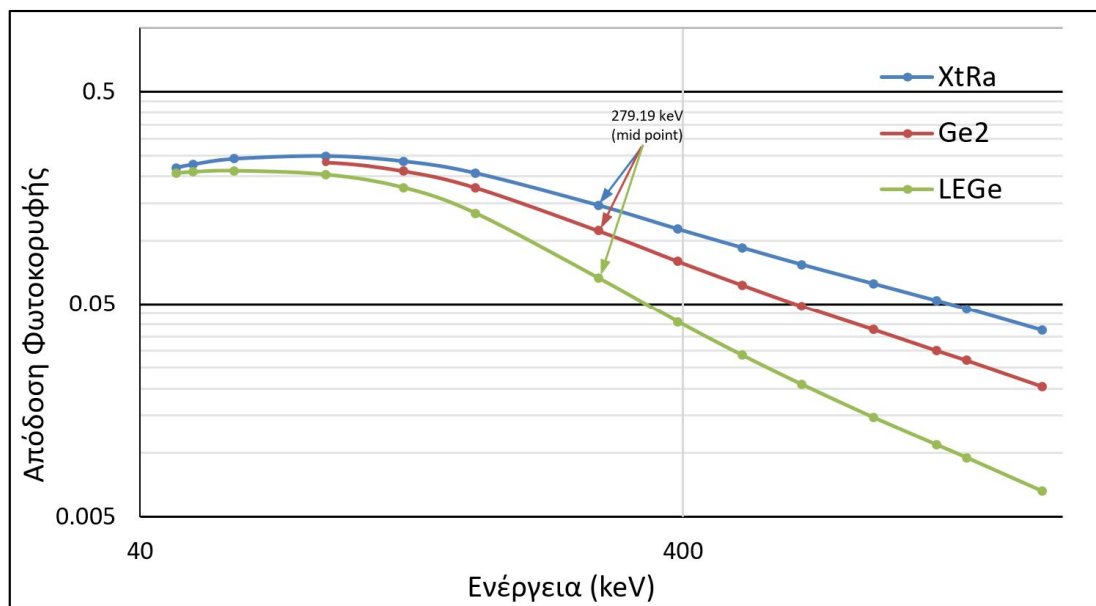
Επιπλέον, μία καλή πρακτική κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης είναι η ενεργειακή περιοχή 0-2000keV να διαιρείται σε δύο περιοχές – υψηλών και χαμηλών ενεργειών – με ενδιάμεσο σημείο περί την ενέργεια 250-300keV⁵⁶.

Στον **Πίνακα 5.2**, δίνονται οι συντελεστές των συναρτήσεων βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής, για τις γεωμετρίες όγκου 8.72cm³ στους ανιχνευτές XtRa, Ge2 και LGe. Οι αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης δίνονται στο **Σχήμα 5.6**.

Πίνακας 5.2 : Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για την κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm³ που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δειγμάτων ρητίνης για τους ανιχνευτές XtRa, Ge2 και LGe.

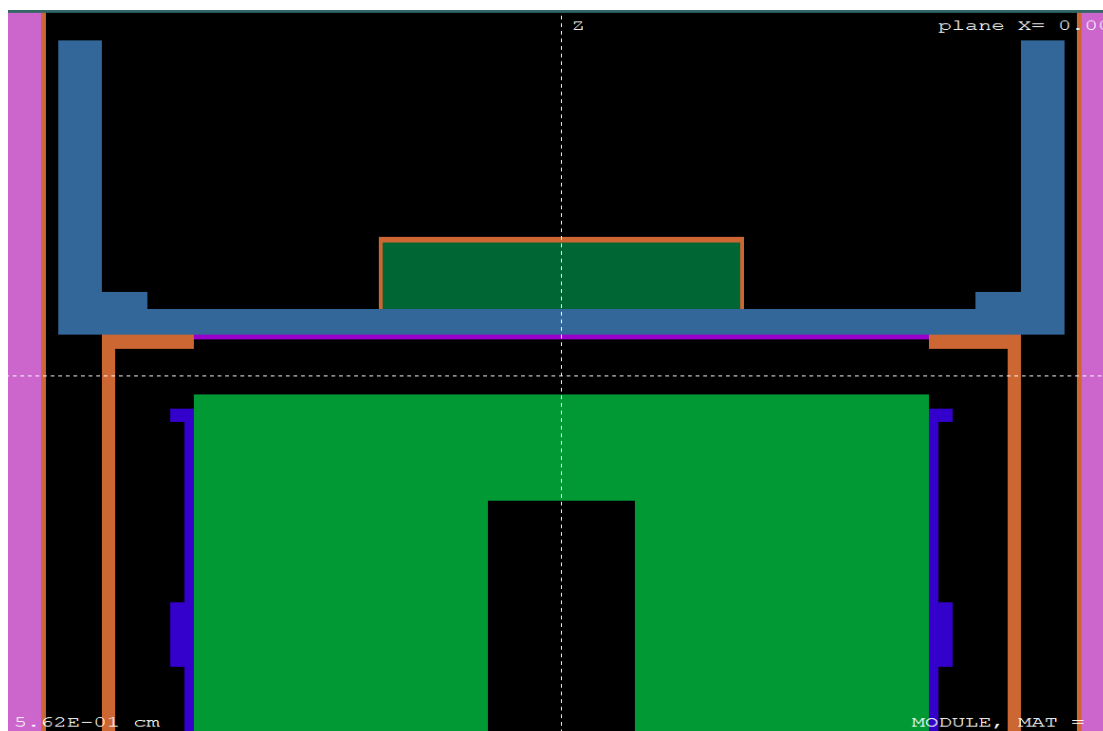
	XtRa		Ge2		LGe	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a ₀	-8.4127	2.7757	-9.8451	4.6170	-11.169	8.8227
a ₁	3.1838	-0.9233	3.8709	-1.4500	4.6209	-2.6753
a ₂	-0.3608	0.0157	-0.4463	0.0425	-0.5536	0.1112
RMS	0.68%	0.66%	0.74%	0.77%	1.39%	0.99%
R ²	0.9989	0.9998	0.9993	0.9998	0.9991	0.9998

⁵⁶ Το ενδιάμεσο σημείο που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι στην ενέργεια των 279.19 keV.



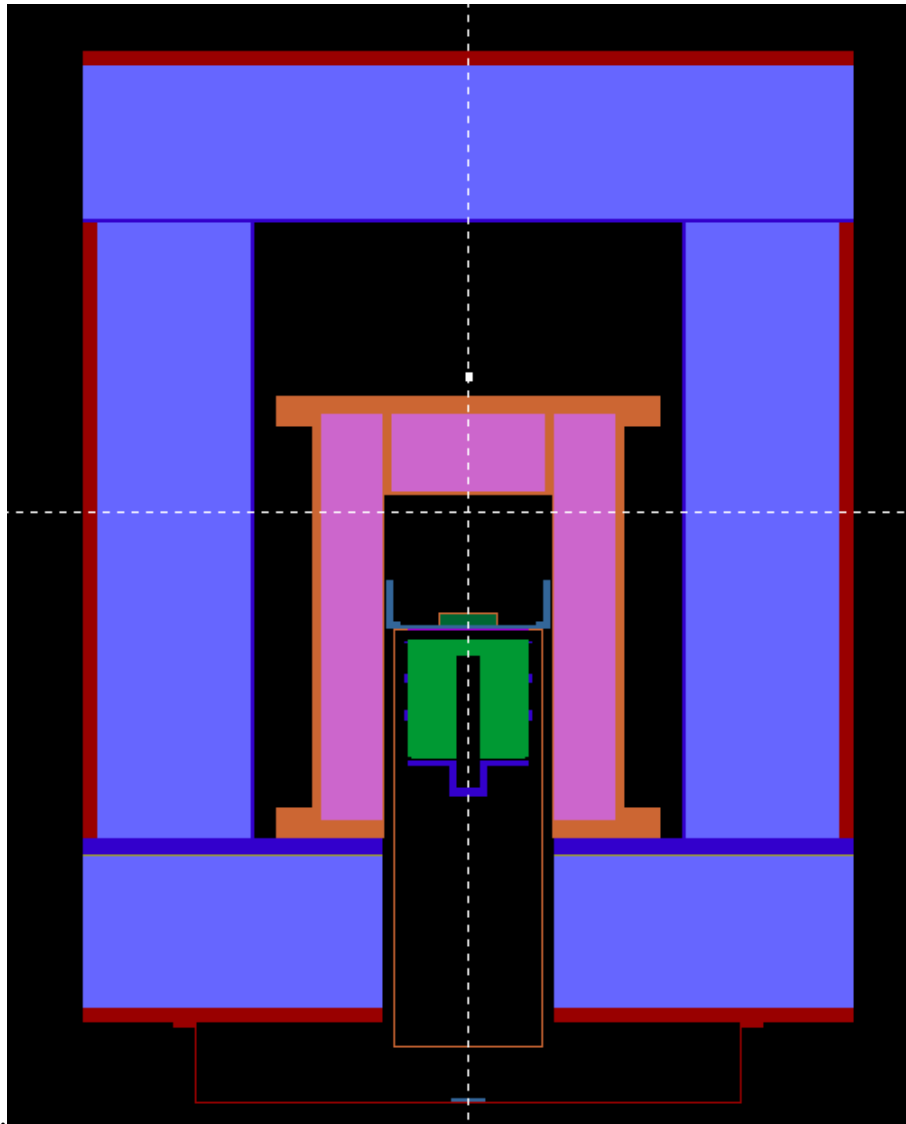
Σχήμα 5.6 : Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για την κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δειγμάτων ρητίνης για τους ανιχνευτές XtRa, Ge2 και LGe.

Στο **Σχήμα 5.7** διακρίνεται η γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή και στο **Σχήμα 5.8** δίνεται η απεικόνιση⁵⁷ του ανιχνευτή XtRa, του δείγματος γεωμετρίας όγκου 8.72cm^3 , τη θωράκισης καθώς και του συστήματος Compton Suppression.



Σχήμα 5.7 : Απεικόνιση της γεωμετρίας όγκου 8.72cm^3 τοποθετημένης πάνω από τον ανιχνευτή XtRa.

⁵⁷ Η απεικόνιση γίνεται μέσω του προγράμματος gview2D από το πακέτο προσομοίωσης του κώδικα PENELOPE το οποίο διαβάζει τη γεωμετρία από το αρχείο γεωμετρίας .geo της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.8 : Απεικόνιση της ανιχνευτικής διάταξης του ανιχνευτή XtRa με τη γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 (διακρίνεται η θωράκιση καθώς και το σύστημα Compton Suppression).

Οι βαθμονομήσεις απόδοσης για τη βασική κυλινδρική γεωμετρία των 8.72cm^3 , επιβεβαιώθηκαν μέσω της συμμετοχής του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε Ασκήσεις Διασύγκρισης του δικτύου ALMERA (ΙΑΕΑ-TEL-2018-04 & ΙΑΕΑ-TEL-2019-04). Το σύνολο των βαθμονομήσεων που έλαβαν χώρα στην παρούσα Δ.Δ. δίνονται στο Παράρτημα ΙΔ.

5.2.1.2 Ανάλυση αβεβαιοτήτων

Στην παρούσα Δ.Δ., όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας δειγματοληψίας και ανάλυσης δειγμάτων αποθέσεων, καθώς και τα αποτελέσματα του συνόλου των μετρήσεων που ακολουθούν στο

επόμενο κεφάλαιο, συνοδεύονται από συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα⁵⁸ που λαμβάνει υπόψη αβεβαιότητες τύπου A και τύπου B (JCGM/WG 1, et al., 2008).

Σχετικά με την αβεβαιότητα τύπου A, η αβεβαιότητα της επιφάνειας φωτοκορυφής, που υπολογίζεται μέσω της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων, θεωρείται επικρατούσα.

Όσον αφορά την αβεβαιότητα τύπου B, οι βασικές συνιστώσες της είναι:

- i. η συστηματική αβεβαιότητα της φωτοκορυφής του υποστρώματος – αφορά τον προσδιορισμό του ^{210}Pb (14.2% για τον ανιχνευτή XtRa, 12.2% για τον ανιχνευτή XtCSS και 12.9% για τον ανιχνευτή LEGe σε επίπεδο 1σ),
- ii. η ζύγιση του δείγματος, που εισάγει μια σχετική αβεβαιότητα $<1\%$ σε επίπεδο 1σ ,
- iii. η βαθμονόμηση απόδοσης, που εισάγει μια σχετική αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ της τάξης του:
 - a. 2.3% (συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης) για τον ανιχνευτή XtRa (Σάββα, 2017),
 - b. 1.2% (συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης) για τον ανιχνευτή Ge2 (Τσιαντή, 2018)
 - c. 1.4% (συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης) για τον ανιχνευτή LEGe

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δε συμπεριλαμβάνεται στο τελικό αποτέλεσμα αβεβαιότητα που αφορά το ποσοστό προσρόφησης των ραδιενεργών ισοτόπων στη ρητίνη, καθώς θεωρείται πλήρης η προσρόφησή τους σε αυτή, όπως θα δοθεί και στα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6 που ακολουθεί.

5.2.1.3 Σύγκριση των τριών διαδικασιών προετοιμασίας δείγματος υγρής απόθεσης

Και οι τρεις διαδικασίες προετοιμασίας δείγματος υγρής απόθεσης που αναφέρονται στο **Σχήμα 5.2** συγκρίθηκαν ως προς την συγκέντρωση ενεργότητας⁵⁹ του ^7Be του τελικού δείγματος. Εννοείται ότι σε κάθε περίπτωση έγιναν οι κατάλληλες διορθώσεις λόγω decay. Για κάθε μία από τις διαδικασίες υπολογίστηκε

⁵⁸ Combined standard uncertainty.

⁵⁹ Καθώς σε όλες τις διαδικασίες το αρχικό δείγμα βροχής ήταν το ίδιο, η σύγκριση μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα και επαναληψιμότητα της κάθε διαδικασίας προετοιμασίας δείγματος.

η τιμή U-score μεταξύ των αποτελεσμάτων των 2 υπο-δειγμάτων, ώστε η διαδικασία να ελεγχθεί ως προς την επαναληψιμότητα. Ο υπολογισμός του U-score έγινε βάσει της σχέσης (5.2) που ακολουθεί:

$$u - score = \frac{|Value_1 - Value_2|}{\sqrt{unc_1^2 + unc_2^2}} \quad (5.2)$$

όπου Value₁ και Value₂ είναι οι συγκεντρώσεις ενεργότητας και unc₁ και unc₂ οι συνολικές αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ για κάθε ένα από τα 2 υπο-δείγματα της κάθε διαδικασίας αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις θεωρείται ότι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για τιμή του U-score <1.96 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Στον **Πίνακα 5.3** δίνονται τα αποτελέσματα συγκέντρωσης του ⁷Be για κάθε υπο-δείγμα κάθε μιας από τις 3 διαδικασίες, καθώς και τα σχετικά U-score.

Πίνακας 5.3 : Σύγκριση των συγκεντρώσεων ενεργότητας του ⁷Be για τα υπο-δείγματα των 3 διαδικασιών προετοιμασίας δείγματος υγρής απόθεσης και τα αντίστοιχα U-score.

Διαδικασίες	Υπο-δείγμα	Όγκος υπο-δείγματος (L)	Συγκέντρωση ενεργότητας ± 1σ (Bq/L)	U-score
1	1	3.666	0.78 ± 0.02	1.27
	2	3.666	0.84 ± 0.03	
2	3	3.696	0.79 ± 0.04	0.33
	4	3.676	0.78 ± 0.04	
3	5	3.654	0.12 ± 0.01	1.86
	6	3.640	0.16 ± 0.02	

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η συλλογή των ραδιενεργών ισοτόπων από δείγμα υγρής απόθεσης αποκλειστικά με χρήση φίλτρου Whatman 42, (διαδικασία #3) γίνεται μόνο σε ένα μικρό ποσοστό και με «οριακά» αποδεκτή επαναληψιμότητα.

Οι διαδικασίες #1 και #2 δίνουν αντίστοιχα αποτελέσματα συγκέντρωσης ενεργότητας και παρουσιάζουν και οι δύο ικανοποιητική επαναληψιμότητα. Επιπροσθέτως, προκύπτει ότι η χρήση του μαγνητικού αναδευτήρα για την ανάμιξη της ρητίνης με το δείγμα δεν φαίνεται να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Συνεπώς, επειδή η χειροκίνητη χρήση του γυάλινου αναδευτήρα αποτελεί μια απαιτητική για τον ερευνητή διαδικασία, επιλέχθηκε να υιοθετηθεί η Διαδικασία #1 με χρήση του μαγνητικού αναδευτήρα.

Κλάσματα του νερού που συλλέχθηκε ως αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος για κάθε υπο-δείγμα των διαδικασιών #1 και #2, συσκευάστηκαν σε γεωμετρία Marinelli και αναλύθηκαν στον ανιχνευτή Ge2 προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπήρχαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις ^7Be σε αυτά. Αντιστοίχως, αναλύθηκαν στον ανιχνευτή Ge2 και σε γεωμετρία $3.2 \times 3.2 \text{ cm}^2$ πάχους 1.5mm και τα φίλτρα Whatman 42 που χρησιμοποιήθηκαν για φιλτράρισμα. Σε όλες τις παραπάνω αναλύσεις οι συγκεντρώσεις του ^7Be ήταν κάτω από το επίπεδο ανίχνευσης, που για τα υγρά κλάσματα ήταν 0.36Bq/L και για τα φίλτρα 0.02Bq/L. Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να προστεθεί ότι για επιβεβαίωση της απόδοσης κατακράτησης των ραδιενεργών ισοτόπων στη ρητίνη αναλύθηκε με γ-φασματοσκοπία το μεγαλύτερο ποσοστό των φίλτρων, καθώς και των υγρών κλασμάτων που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της προετοιμασίας των δειγμάτων τα οποία συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ, οι κωδικοί των οποίων δίνονται στο Παράρτημα ΙΖ.

Ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφονται στη διαδικασία #1, η οποία τελικά επιλέχθηκε ως καταλληλότερη, έγινε η προετοιμασία όλων των δειγμάτων υγρών αποθέσεων (βροχή και χιόνι) καθώς και υγρασίας, που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ..

5.2.1.4 Οξίνιση του υγρού δείγματος για την αποφυγή προσρόφησης ραδιενεργών ισοτόπων στα τοιχώματα του δοχείου

Ο όγκος των προς ανάλυση δειγμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μπορεί να είναι ανά περιόδους μεγάλος, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να δημιουργείται γραμμή αναμονής στην προετοιμασία και την ανάλυση δειγμάτων.

Όταν όμως ένα υγρό δείγμα παραμένει μέσα σε πλαστικό δοχείο για μεγάλο χρονικό διάστημα, υπάρχει πιθανότητα μέρος των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχει να προσκολληθούν στα τοιχώματα του δοχείου και κατά συνέπεια, να απομακρυνθούν από το προς ανάλυση δείγμα, οδηγώντας εν τέλει σε υποεκτίμηση της τελικής συγκέντρωσης ενεργότητας στο υγρό δείγμα. Για να μελετηθεί η έκταση του προβλήματος και να αναζητηθούν ενδεχόμενες λύσεις του, από δείγμα βροχής ~8.2L που συλλέχθηκε στις 18 Δεκεμβρίου του 2018, δημιουργήθηκαν, υπέστησαν επεξεργασία και αναλύθηκαν 3 υπο-δείγματα, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.4** που ακολουθεί:

Πίνακας 5.4 : Συγκέντρωση ^7Be στα υπο-δείγματα από τη βροχή στις 18/12/2018.

Υπο-δείγμα βροχής	Όγκος Δείγματος (L)	Συγκέντρωση ενεργότητας $\pm 1\sigma$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)
Άμεση προετοιμασία και ανάλυση μετά τη δειγματοληψία	2.738	1.92 ± 0.09	0.03
Αναμονή δύο εβδομάδων για προετοιμασία και ανάλυση	2.732	1.48 ± 0.07	0.02
Οξίνιση του δείγματος στο δοχείο με HNO_3 και αναμονή δύο εβδομάδων για προετοιμασία και ανάλυση	2.724	2.17 ± 0.10	0.02

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του παραπάνω πίνακα προκύπτει σαφώς ότι η οξίνιση του δείγματος στο δοχείο, εν αναμονή της επεξεργασίας και ανάλυσής του, είχε σημαντική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, η τιμή U-score μεταξύ του δείγματος που αναλύθηκε άμεσα με εκείνο που αναλύθηκε μετά από 2 εβδομάδες αλλά είχε οξινιστεί είναι 1.86^{60} , γεγονός που δείχνει ότι δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Αντιθέτως, το αντίστοιχο U-score με το δείγμα που ήταν σε αναμονή για δύο εβδομάδες χωρίς να οξινιστεί είναι 3.86, που υποδηλώνει στατιστικά σημαντική διαφορά. Ειδικότερα, η συγκέντρωση ενεργότητας ^7Be στο μη οξινισμένο δείγμα ήταν περίπου 25% χαμηλότερη, καθώς, όπως φαίνεται, ποσότητα ^7Be έχει προσροφηθεί στα τοιχώματα του δοχείου.

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να προστεθεί ότι το οξινισμένο δείγμα είχε $\text{pH} \approx 3$, λόγω της προσθήκης του HNO_3 , το οποίο είναι χαμηλότερο από αυτό που απαιτείται κατά τη διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος ($\text{pH} \approx 5$). Ωστόσο, επειδή η ρητίνη που χρησιμοποιείται είναι μια ισχυρά όξινη ρητίνη, διατηρεί τις ιδιότητές της ακόμα και σε πολύ χαμηλά pH (Helfferich, 1995).

5.2.1.5 Δειγματοληψία, προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων υγρασίας

Από τη στιγμή που επιλέχθηκε η διαδικασία #1, όπως περιγράφηκε στο **Σχήμα 5.2**, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί το κατά πόσον η χρήση της μεθόδου αυτής μπορεί να δώσει αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be , καθώς και άλλων ραδιενεργών ισοτόπων που ενδεχομένως υπάρχουν και σε δείγματα υγρασίας

⁶⁰ Η σχετικά υψηλή αυτή τιμή οφείλεται στην πολύ χαμηλή αβεβαιότητα των μετρήσεων και όχι τόσο στη μεγάλη διαφορά των δύο τιμών.

της ατμόσφαιρας. Για τον σκοπό αυτό, σε μία περίοδο με αυξημένη υγρασία και βροχοπτώσεις συλλέχθηκαν:

- i. υγρασία στις 15 και 16 Νοεμβρίου 2018.
- ii. βροχή στις 17 και 18 Νοεμβρίου 2018.
- iii. υγρασία στις 19 και 20 Νοεμβρίου 2018.

Στόχος των δειγματοληψιών αυτών ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο υπάρχουν ανιχνεύσιμες ποσότητες ^7Be στην υγρασία, καθώς και αν η βροχόπτωση επιδρά σημαντικά σε αυτές.

Για τη συλλογή του δείγματος υγρασίας χρησιμοποιήθηκε αφυγραντήρας ισχύος 320W με δοχείο συλλογής 2.8L, κατάλληλα τοποθετημένος, ώστε να προστατεύεται από την άμεση επαφή με τις υγρές κατακρημνίσεις, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.9**. Όλα τα υγρά δείγματα αναλύθηκαν ακολουθώντας τη διαδικασία #1 για την ανάλυση υγρών κατακρημνίσεων.



Σχήμα 5.9 : Αφυγραντήρας στην οροφή του Κτιρίου Κ για δειγματοληψία υγρασίας

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων που συλλέχθηκαν δίνονται στον **Πίνακα 5.5**.

Πίνακας 5.5 : Αποτελέσματα προσδιορισμού της συγκέντρωσης ενεργότητας σε νερό βροχής και ατμοσφαιρικής υγρασίας

Δείγμα	Όγκος δείγματος (L)	Συγκέντρωση ενεργότητας ${}^7\text{Be} \pm 1\sigma$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)	Συγκέντρωση ενεργότητας ${}^{210}\text{Pb} \pm 1\sigma$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)
Υγρασία προ βροχόπτωσης 15-16/11/2018	2.750	0.07 ± 0.02	0.02	<MDA	0.04
Βροχόπτωση 17-18/11/2018	3.506	0.80 ± 0.04	0.02	0.07 ± 0.02	0.03
Υγρασία μετά τη βροχόπτωση 19-20/11/2018	2.818	<MDA	0.02	<MDA	0.03

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέθοδος που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό συγκέντρωσης ενεργότητας σε δείγματα υγρασίας. Ωστόσο, παρατηρείται ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ στην υγρασία είναι ιδιαίτερα χαμηλά, και μάλιστα στο δείγμα υγρασίας που συλλέχθηκε μετά τη βροχόπτωση το ${}^7\text{Be}$ δεν ήταν ανιχνεύσιμο. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η βροχόπτωση κατακρημνίζει το υπάρχον ${}^7\text{Be}$ στην ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στο δείγμα βροχόπτωσης έδειξαν ανιχνεύσιμη συγκέντρωση ${}^{210}\text{Pb}$ στο νερό της βροχής, γεγονός που δείχνει τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου αυτής για τον ποσοτικό προσδιορισμό και άλλων ραδιενεργών ισοτόπων. Στα δύο δείγματα υγρασίας που αναλύθηκαν δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση ${}^{210}\text{Pb}$.

5.2.1.6 Δειγματοληψία προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων χιονιού

Για την ολοκληρωμένη εφαρμογή της μεθόδου επεξεργασίας και ανάλυσης υγρών κατακρημνίσεων, έγινε συλλογή και επεξεργασία χιονιού κατά τη διάρκεια χιονόπτωσης που έλαβε χώρα στις 8 Ιανουαρίου 2019. Η χιονόπτωση είχε συνολικό ύψος $\sim 9\text{cm}$. Το δείγμα χιονιού, αφού συλλέχτηκε, αφέθηκε να λιώσει σε θερμοκρασία δωματίου και στη συνέχεια υπέστη επεξεργασία όπως τα δείγματα βροχής και υγρασίας. Η ανάλυση του δείγματος χιονιού δίνεται στον **Πίνακα 5.6**.

Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα χιονιού

Δείγμα	Όγκος Δείγματος (L)	Συγκέντρωση ενεργότητας ${}^7\text{Be} \pm 1\sigma$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)	Συγκέντρωση ενεργότητας ${}^{210}\text{Pb} \pm 1\sigma$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)
Χιόνι 8/1/2019	3.521	0.14 ± 0.02	0.02	0.08 ± 0.01	0.03

Από τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της αναπτυχθείσας μεθόδου και σε δείγματα χιονιού, για τον ποσοτικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb στις πάσης φύσεως υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις.

5.2.2 Δειγματοληψία, προετοιμασία και ανάλυση δειγμάτων ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών αποθέσεων χρειάζεται η επέκταση της αναπτυχθείσας μεθόδου και στις ξηρές αποθέσεις. Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, ξηρές ονομάζονται οι αποθέσεις που λαμβάνουν χώρα κυρίως λόγω της βαρυτικής εναπόθεσης των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος.

Η πρώτη προσπάθεια επέκτασης της μεθόδου δειγματοληψίας και ανάλυσης ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων έγινε στα πλαίσια της Δ.Ε. του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Καρύδης, 2021) και συνεχίστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ.. Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται αρκετές προσεγγίσεις για τη δειγματοληψία ξηρής απόθεσης (Wallbrink & Murray, 1994), (Ioannidou & Papastefanou, 2006), (Baskaran & Swarzenski, 2007), (Chao, et al., 2012), (Gautam, et al., 2022), οι οποίες περιγράφονται στο 2^ο Κεφάλαιο. Στην παρούσα μελέτη επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθούν ως δειγματολήπτες ξηρής απόθεσης οι ίδιοι δειγματολήπτες που χρησιμοποιούνται και για τις υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις.

Η βασική διαφορά με τη δειγματοληψία υγρής απόθεσης είναι ότι στο πέρας της δειγματοληψίας το δείγμα μέσα στον δειγματολήπτη είναι σε μορφή σκόνης και σε ένα ποσοστό προσκολλημένο στα τοιχώματά του. Για τον λόγο αυτό απαιτείται το προσεκτικό «ξέπλυμα» της λεκάνης με αραιό οξύ, ώστε να γίνει συλλογή του αερολύματος και των ραδιενεργών ισοτόπων που έχουν αποτεθεί. Για τον σκοπό αυτό, όλοι οι δειγματολήπτες ξηρής απόθεσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη της μεθόδου, καθώς και για τα δείγματα που συλλέχθηκαν μετέπειτα, ξεπλύθηκαν με 500mL διάλυμα νιτρικού οξέος μοριακότητας 0.1M, με χρήση πιπέτας. Στη συνέχεια, οι δειγματολήπτες ξεπλύθηκαν πάλι με απιονισμένο νερό, μέχρι να προκύψει ένας συνολικός όγκος δείγματος ~ 3L. Το υγρό πλέον δείγμα που είχε προκύψει αναλυόταν στη συνέχεια με τη διαδικασία #1 ανάλυσης υγρών

δειγμάτων. Καθώς η χρήση αραιού διαλύματος νιτρικού οξέος κατέβαζε το pH του υγρού δείγματος σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ακολουθούσε η προσαρμογή του με την προσθήκη ~ 15mL διαλύματος αμμωνίας κανονικότητας 7.5N, έως ότου να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή pH \approx 5. Ωστόσο, όπως διαπιστώθηκε και στην παράγραφο 5.2.1.4, η ρητίνη που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη είναι μια ισχυρά όξινη ρητίνη και διατηρεί τις ιδιότητές της ακόμα και σε πολύ χαμηλά pH. Για τον λόγο αυτό, στα μετέπειτα δείγματα ξηρής απόθεσης που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ. δεν έγινε αντίστοιχη προσαρμογή του pH. Τα υπόλοιπα βήματα που ακολουθήθηκαν μέχρι τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων είναι ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.2.1.

Καθώς δεν ήταν εξ' αρχής γνωστό το απαιτούμενο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας ξηρής απόθεσης για τη συλλογή ανιχνεύσιμων συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων στους δειγματολήπτες, αρχικά έλαβαν χώρα 3 δειγματοληψίες διαφορετικής χρονικής διάρκειας, χρησιμοποιώντας κάθε φορά τρεις δειγματολήπτες συνολικής επιφάνειας 0.56m². Τα αποτελέσματα των τριών αυτών αρχικών δειγματοληψιών ξηρής απόθεσης δίνονται στον **Πίνακα 5.7**.

Πίνακας 5.7 : Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των αρχικών δειγματοληψιών και αναλύσεων δειγμάτων ξηρής απόθεσης

Δείγμα	Περίοδος συλλογής	Χρονική διάρκεια συλλογής (σε ημέρες)	Ρυθμός απόθεσης ⁷ Be Bq/(week·m ²)	MDA Bq/(week·m ²)	Ρυθμός απόθεσης ²¹⁰ Pb Bq/(week·m ²)	MDA Bq/(week·m ²)
#1	24/6/2019-8/7/2019	14	1.78 ± 0.05	0.01	0.39 ± 0.04	0.08
#2	19/7/2019-23/8/2019	35	0.78 ± 0.03	0.01	0.13 ± 0.02	0.04
#3	28/8/2019-19/9/2019	22	0.30 ± 0.02	0.01	<MDA	0.06

Από τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η δυνατότητα επέκτασης της μεθόδου που αναπτύχθηκε για δείγματα υγρών αποθέσεων και σε δείγματα ξηρής απόθεσης, οδηγώντας στον προσδιορισμό των ρυθμών απόθεσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb με καλή ακρίβεια. Οι ρυθμοί απόθεσης των παραπάνω ισοτόπων που βρέθηκαν σε αυτή τη φάση της διερεύνησης είναι συμβατές με αυτές της βιβλιογραφίας (Zhang, et al., 2021).

Συνοπτικά, οι βασικές αλλαγές για την εφαρμογή της μεθόδου σε δείγματα ξηρής απόθεσης, οι οποίες υιοθετήθηκαν και για όλες τις ξηρές αποθέσεις που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ., είναι οι εξής:

- Ξέπλυμα των δειγματοληπτών με 500mL διαλύματος νιτρικού οξέος μοριακότητας 0.1M,
- Επιπρόσθετο ξέπλυμα των δειγματοληπτών με απιονισμένο νερό έως ότου το συνολικό προς ανάμιξη με τη ρητίνη δείγμα να έχει όγκο ~ 3L,
- Επεξεργασία και ανάλυση του δείγματος ως δείγμα υγρής απόθεσης. Στην περίπτωση αυτή τα στερεά σωματίδια της ξηρής απόθεσης συγκρατούνται κατά το φιλτράρισμα μαζί με την ρητίνη, σχηματίζοντας ενιαίο δείγμα.

5.2.2.1 Αναλυτικός υπολογισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας ραδιενεργών ισοτόπων στις ξηρές και στις ολικές αποθέσεις

Μία βασική υπόθεση που γίνεται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στις ξηρές αποθέσεις⁶¹ είναι αυτή του «συνεχούς ρυθμού απόθεσης». Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια συλλογής ενός δείγματος ξηρής απόθεσης και εν γένει, ενός οποιουδήποτε δείγματος ατμοσφαιρικής απόθεσης, ο ρυθμός απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων στους δειγματολήπτες είναι σταθερός. Συνεπώς, για τους ραδιενεργούς πυρήνες που αποτίθενται κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας ισχύει:

$$\frac{dN}{dt} = n - \lambda N \quad (5.3)$$

Όπου:

N: ο αριθμός των πυρήνων του ραδιενεργού ισοτόπου

λ: η σταθερά διάσπασης του ραδιενεργού ισοτόπου (s^{-1})

n: ο συνεχής σταθερός ρυθμός απόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου (πυρήνες/s)

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (5.3) ως προς τον χρόνο t, με αρχική συνθήκη $N = N_0$ για $t = 0$ προκύπτει:

$$N = \frac{n}{\lambda} + (N_0 - \frac{n}{\lambda}) \cdot e^{-\lambda t} \quad (5.4)$$

⁶¹ Αυτό ισχύει σε κάθε περίπτωση αποθέσεων, αλλά έχει ιδιαίτερη σημασία όταν η διάρκεια δειγματοληψίας είναι μεγάλη, όπως στην περίπτωση ξηρών αποθέσεων.

Όπου:

N_0 : ο αριθμός των πυρήνων του ραδιενεργού ισοτόπου μέσα στους
δειγματοληπτες τη στιγμή έναρξης της δειγματοληψίας

N : ο αριθμός των πυρήνων του ραδιενεργού ισοτόπου στο πέρας της
δειγματοληψίας

Για $N_0 = 0$, όταν δηλαδή ο δειγματολήπτης αρχικά δεν περιέχει ραδιενεργούς πυρήνες, ο ρυθμός απόθεσης των πυρήνων (πυρήνες/s) υπολογίζεται από την (5.4) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$n = \frac{\lambda \cdot N}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (5.5)$$

όπου:

t : η χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας

$\lambda \cdot N$: η ενεργότητα του ραδιενεργού ισοτόπου τη στιγμή περάτωσης της
δειγματοληψίας (που υπολογίζεται από το αποτέλεσμα της γ-φασματοσκοπικής
ανάλυσης με διορθώσεις διάσπασης για την ημερομηνία περάτωσης της
δειγματοληψίας)

Το τελικό αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης δίνεται στη μορφή «Bq/(week·m²)», το οποίο στην πραγματικότητα εκφράζει ροή ενεργότητας του υπό μελέτη ισοτόπου ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου, και προκύπτει εφαρμόζοντας τα παρακάτω βήματα:

- i. μετατρέποντας στο αποτέλεσμα της εξίσωσης (5.5) τα sec σε week,
- ii. διαιρώντας το n με το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας των δειγματοληπτών,
- iii. πολλαπλασιάζοντας τον ρυθμό απόθεσης πυρήνων του ισοτόπου n , με τη σταθερά διάσπασης λ (s⁻¹) του εκάστοτε ραδιενεργού ισοτόπου.

Καθώς σε μία περίοδο δειγματοληψίας μπορεί να υπάρξουν τόσο ξηρές όσο και υγρές αποθέσεις, ιδιαίτερα σε μεγάλης διάρκειας δειγματοληψίες, το δείγμα στην περίπτωση αυτή πρέπει να θεωρείται ως δείγμα ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων (ξηρές και υγρές). Τέτοιου είδους δείγματα μπορεί κατά τη στιγμή δειγματοληψίας να

βρίσκονται σε ξηρή⁶² ή υγρή μορφή και τα δείγματα αυτά πρέπει να αναλύονται με την κατάλληλη κατά περίπτωση διαδικασία.

5.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η ανάπτυξη μεθοδολογίας δειγματοληψίας προετοιμασίας και ανάλυσης υγρών και ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Συλλέχθηκαν, επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν δείγματα βροχής, υγρασίας, χιονιού και ξηρών αποθέσεων. Τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων οδήγησαν στην ανίχνευση και τον προσδιορισμό με υψηλή ακρίβεια της συγκέντρωσης ενεργότητας για τα ραδιενεργά ισότοπα ^7Be και ^{210}Pb , καθώς και του ρυθμού απόθεσής τους, ο οποίος βρίσκεται εντός του αναμενόμενου από τη βιβλιογραφία εύρους. Τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης που επιτεύχθηκαν στις υγρές αποθέσεις ήταν αρκετά χαμηλά, της τάξης του $\sim 0.02 \text{ Bq/L}$ τόσο για το ^7Be όσο και για τον ^{210}Pb . Όσον αφορά στο ρυθμό απόθεσης στις ξηρές και ολικές αποθέσεις, τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης που επιτεύχθηκαν ήταν της τάξης του $0.01 \text{ Bq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$ για το ^7Be και $0.04 \text{ Bq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$ για το ^{210}Pb .

Στο 6^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη συστηματική εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας δειγματοληψίας, επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων, για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

⁶² Η υγρή φάση της απόθεσης μπορεί κατά τη στιγμή συλλογής του δείγματος να έχει εξατμισθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συστηματικές δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων και άλλων περιβαλλοντικών μεγεθών

6.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, μία από τις βασικές δραστηριότητες του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι η παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης και της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα. Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης μεθοδολογίας για τη δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατέστη πλέον δυνατή η επέκταση της συστηματικής παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, καθώς και στην υγρασία της ατμόσφαιρας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το σύνολο των δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. για χρονική περίοδο περίπου 4.5 ετών (06/2018 - 11/2022). Οι δειγματοληψίες κατά την περίοδο αυτή δεν ήταν συνεχείς – περιλαμβάνονται και περίοδοι παύσεων είτε λόγω του σχεδιασμού των πειραμάτων και των αναλύσεων είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων που απέτρεπαν την διεξαγωγή συνεχόμενων και συστηματικών δειγματοληψιών. Πάντως, έγινε προσπάθεια, πέραν από τις συστηματικές δειγματοληψίες που έγιναν, να γίνουν δειγματοληψίες και σε περιόδους με ιδιαίτερο ενδιαφέρον από μετεωρολογικής απόψεως, όπως καταγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

6.2 Δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν κωδικοποιήθηκαν κατάλληλα, ανάλογα με το είδος της απόθεσης που αντιπροσωπεύουν. Ο κωδικός κάθε δείγματος

αποτελείται από 5 χαρακτήρες, δύο γράμματα και τρεις αριθμούς, είναι δηλαδή της μορφής ΓΓΑΑΑ. Τα δύο γράμματα χαρακτηρίζουν τον τύπο του δείγματος (είδος απόθεσης) και συγκεκριμένα:

- Με “DR” ξεκινούν οι κωδικοί των δειγμάτων ξηρών αποθέσεων,
- Με “WR” ξεκινούν οι κωδικοί των δειγμάτων υγρών αποθέσεων είτε είναι χιόνι είτε βροχή,
- Με “TR” ξεκινούν οι κωδικοί των δειγμάτων ολικών αποθέσεων, δηλαδή δείγματα που περιέχουν και υγρές και ξηρές αποθέσεις,
- Με τα γράμματα “HR” ξεκινούν οι κωδικοί των δειγμάτων υγρασίας.

Τα τρία ψηφία που ακολουθούν αποτελούν τον αύξοντα αριθμό του κάθε είδους δείγματος. Συνολικά συλλέχθηκαν:

- 25 δείγματα ξηρής απόθεσης,
- 23 δείγματα υγρής απόθεσης (χιόνι ή βροχή),
- 12 δείγματα ολικής απόθεσης,
- 9 δείγματα ατμοσφαιρικής υγρασίας.

Το σύνολο των δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ. δίνονται με χρονολογική σειρά στον **Πίνακα 6.34** που βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου. Για κάθε δείγμα παρατίθενται και σχόλια σχετικά με τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε κάθε δειγματοληψία ή τους λόγους που την επέβαλαν. Στον πίνακα αυτόν περιλαμβάνονται στην αρχή και τέσσερα δείγματα με κωδικούς QSA1 έως QSA4, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αρχικές φάσεις δοκιμών της διαδικασίας επεξεργασίας των δειγμάτων απόθεσης.

Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για τα περισσότερα από τα δείγματα που συλλέχθηκαν, έγινε επικουρικά ανάλυση και των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά το φιλτράρισμά τους, καθώς και κλασμάτων του νερού που απομένει από το φιλτράρισμα. Για τα φίλτρα αυτά οι κωδικοί ξεκινούν με το γράμμα «F», ενώ για τα υγρά κλάσματα με το γράμμα «W» ακολουθούμενα από τα αντίστοιχα δύο γράμματα που συμβολίζουν το εκάστοτε είδος δείγματος. Σε όλα τα φίλτρα και κλάσματα υγρών που αναλύθηκαν, οι συγκεντρώσεις ενεργότητας για τα προς μελέτη ραδιενεργά ισότοπα ήταν χαμηλότερες από τα όρια ανίχνευσης (MDA). Το μεγάλο πλήθος δειγμάτων φίλτρων και υγρών κλασμάτων (νερού) που προέκυψαν από την επεξεργασία των δειγμάτων απόθεσης, σε συνδυασμό με το

γεγονός ότι τα υπό διερεύνηση ισότοπα ήταν πάντα κάτω από τα όρια ανίχνευσης στα δείγματα αυτά, οδήγησε τελικά στην απόφαση να μην αναλύονται όλα αυτά τα δείγματα, αλλά μόνον ορισμένα από αυτά ενδεικτικά. Το σύνολο των φίλτρων και υγρών κλασμάτων που αναλύθηκαν ήταν 109. Για λόγους πληρότητας, οι κωδικοί των δειγμάτων αυτών δίνονται στο Παράρτημα ΙΖ.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που ανιχνεύθηκαν στα δείγματα του **Πίνακα 6.34**, ομαδοποιημένα κατά κατηγορία, ενώ γίνεται και μία σειρά από συσχετίσεις με διάφορες παραμέτρους και άλλες μετρήσεις που έγιναν παράλληλα με τις δειγματοληψίες των αποθέσεων. Για διευκόλυνση του αναγνώστη, στους πίνακες που ακολουθούν οι συσχετίσεις οι οποίες διαπιστώνεται ότι είναι στατιστικά σημαντικές παρουσιάζονται με χρώμα «γκρι».

Το σύνολο αυτών των δεδομένων στη συνέχεια αξιοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για τις ξηρές και ολικές αποθέσεις τα αποτελέσματα δίνονται ως μέσος εβδομαδιαίος ρυθμός απόθεσης σε $\text{Bq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$ ή $\text{mBq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$.

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι, στην προσπάθεια άντλησης της μεγαλύτερης δυνατής πληροφορίας από τα δείγματα που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν, καθώς και της διερεύνησης πιθανών συσχετίσεων, τα δείγματα ομαδοποιήθηκαν και υπέστησαν στατιστική επεξεργασία και διερεύνηση συσχέτισεως με διάφορους τρόπους, συγκεκριμένα: ως δείγματα ξηρών αποθέσεων, ως δείγματα ολικών (υγρές και ξηρές) αποθέσεων και ως δείγματα συνεχόμενων αποθέσεων (περιλαμβάνουν δείγματα υγρών και ξηρών αποθέσεων). Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η εύρεση μίας στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεγεθών δεν μπορεί να θεωρηθεί απόδειξη ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των δύο μεγεθών.

6.2.1 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε μεμονωμένα δείγματα βροχής

Με εξαίρεση τα αποτελέσματα των δειγμάτων βροχής που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της μεθόδου δειγματοληψίας και επεξεργασίας υγρών αποθέσεων, τα οποία δίνονται στο κεφάλαιο 5, συλλέχθηκε νερό βροχής από ακόμα πέντε

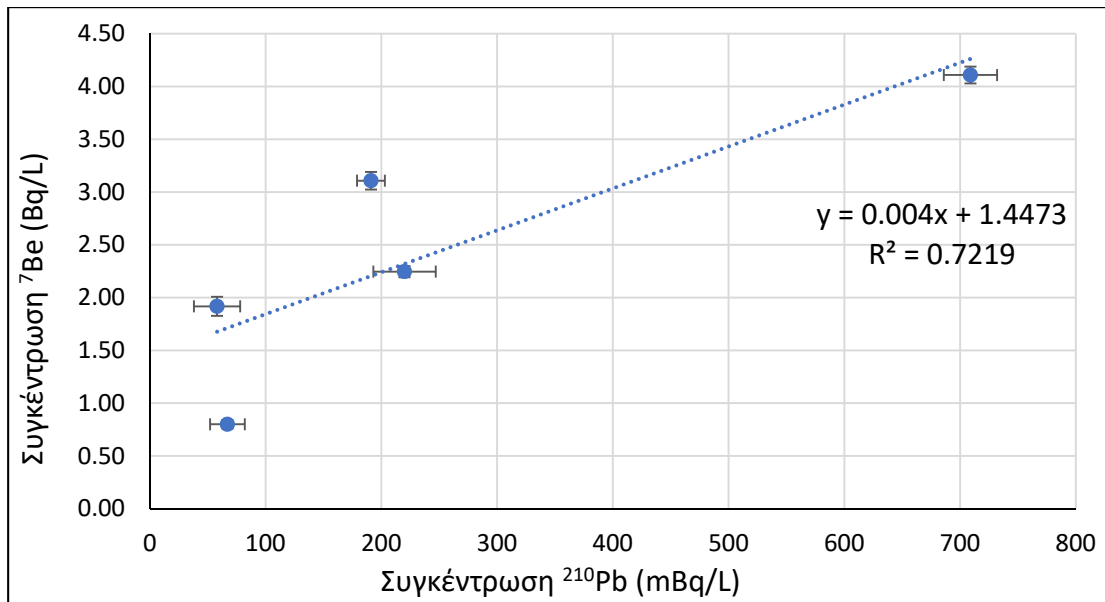
ανεξάρτητα συμβάντα βροχόπτωσης. Στον **Πίνακα 6.1** που ακολουθεί δίνονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα επεξεργασίας και ανάλυσης μεμονωμένων δειγματοληψιών βροχής.

Κωδικός Δείγματος	⁷ Be		²¹⁰ Pb	
	Bq/L	MDA (Bq/L)	mBq/L	MDA (mBq/L)
QSA2	0.83 ± 0.03	0.01	<MDA	30
WR001	0.80 ± 0.04	0.02	67 ± 15	32
WR002	1.92 ± 0.09	0.01	58 ± 20	41
WR007	2.25 ± 0.05	0.01	220 ± 27	53
WR008	3.11 ± 0.08	0.01	191 ± 12	29
WR021	4.11 ± 0.08	0.01	709 ± 23	37

Οι μεμονωμένες περιπτώσεις βροχόπτωσης που συλλέχθηκαν δεν είναι πολλές, καθώς τα περισσότερα δείγματα της Δ.Δ. ήταν δείγματα ολικών αποθέσεων. Ωστόσο, από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συστηματικά ανιχνεύεται ⁷Be και ²¹⁰Pb στις βροχοπτώσεις, σε συγκεντρώσεις που είναι αναμενόμενες βάσει βιβλιογραφίας (Caillet, et al., 2001), (Mohan, et al., 2019), (Mohan, et al., 2019). Τα αποτελέσματα συνοδεύονται από ικανοποιητική αβεβαιότητα που επιτρέπει τη στατιστική τους διαφοροποίηση και τη σύγκρισή τους. Ακόμα, τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης είναι ιδιαίτερα χαμηλά για το ⁷Be, και ικανοποιητικά για τον ²¹⁰Pb, οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του οποίου είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές του ⁷Be.

Αν και το μικρό πλήθος των μεμονωμένων δειγμάτων βροχόπτωσης δεν επιτρέπει την εξαγωγή στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων μεταξύ ⁷Be και ²¹⁰Pb, παρατηρείται μια έντονη τάση συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητάς τους και αρκετά υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης ($R^2=0.7219$), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.1**, γεγονός που διαπιστώνεται και σε αντίστοιχες μελέτες στη βιβλιογραφία (Chen, et al., 2016), (Mohan, et al., 2019).



Σχήμα 6.1 : Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας ⁷Be-²¹⁰Pb σε δείγματα βροχής.

6.2.2 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα χιονιού

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Δ.Δ. έλαβαν χώρα τρία σημαντικά συμβάντα χιονόπτωσης στην περιοχή της Αττικής:

i. *Κακοκαιρία “Τηλέμαχος”*

Το δείγμα χιονιού από τη συγκεκριμένη κακοκαιρία που έπληξε τη χώρα συλλέχθηκε στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, όπου βρίσκεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ, στις 8/1/2019 και χρησιμοποιήθηκε για επιβεβαίωση της αναπτυχθείσας μεθόδου επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων, όπως αυτή περιγράφηκε στο 5^ο κεφάλαιο, και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δίνονται στον **Πίνακα 5.6**

ii. *Κακοκαιρία “Μήδεια”*

Η κακοκαιρία Μήδεια διήρκησε μεταξύ 13 και 16 Φεβρουαρίου 2021, και εξελίχθηκε σε χιονοκαταιγίδα. Η θέση δειγματοληψίας ήταν στον Λόφο Ανθέων στην περιοχή Άνοιξη της Αττικής (38°07'34.4''N, 23°51'50.7''E). Το συνολικό ύψος της χιονόπτωσης στη θέση δειγματοληψίας έφτασε τα 80cm. Ωστόσο, το δείγμα που συλλέχθηκε και αναλύθηκε αφορά τα πρώτα 20cm της χιονόπτωσης, τα οποία συλλέχθηκαν στις 15/2/2021, κατά τη διάρκεια μιας παύσης του φαινομένου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.2**.



Σχήμα 6.2 : Δειγματοληψία των πρώτων 20cm χιονιού από τη χιονόπτωση της κακοκαιρίας "Μήδεια"

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συγκεκριμένου δείγματος δίνονται στον **Πίνακα 6.2** που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2 : Συγκέντρωση ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στο δείγμα χιονιού της κακοκαιρίας "Μήδεια"

Κωδικός Δείγματος	^7Be		^{210}Pb	
	Bq/L $\pm 1\sigma$	MDA (Bq/L)	mBq/L $\pm 1\sigma$	MDA (mBq/L)
WR006	0.74 \pm 0.02	0.01	40 \pm 15	31

Όπως και στο δείγμα χιονιού της κακοκαιρίας "Τηλέμαχος", έτσι και στο δείγμα της κακοκαιρίας "Μήδεια" ανιχνεύθηκε και ^7Be και ^{210}Pb . Ωστόσο, το γεγονός ότι το δείγμα που συλλέχθηκε αφορά μόνο τα πρώτα 20cm της χιονόπτωσης δεν το κάνει αντιπροσωπευτικό του συνόλου της ενεργότητας των δύο ισοτόπων που αποτέθηκε στο έδαφος.

iii. Κακοκαιρία "Ελπίς"

Η κακοκαιρία "Ελπίς" διήρκησε από 24/1/2022 έως και 25/1/2022. Η θέση δειγματοληψίας ήταν και πάλι στον Λόφο Ανθέων στην περιοχή Άνοιξη της Αττικής. Καθώς ήταν αναμενόμενο το μεγάλο ύψος χιονόπτωσης, από την προηγούμενη ημέρα (23/1/22) είχε προετοιμασθεί η θέση δειγματοληψίας, με την τοποθέτηση πάνω σε επίπεδη επιφάνεια πλαστικού φύλλου, ώστε να διευκολυνθεί η συλλογή του δείγματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.3**.



Σχήμα 6.3 : Επιφάνεια συλλογής δείγματος χιονιού από την κακοκαιρία "Ελπίς".

Ο αρχικός σχεδιασμός της συγκεκριμένης δειγματοληψίας ήταν η συλλογή της χιονόπτωσης ανά εκατοστό πάνω από την επιφάνεια δειγματοληψίας. Ωστόσο, η κακοκαιρία εξελίχτηκε σε χιονοκαταιγίδα και η σφοδρότητα της χιονόπτωσης δεν επέτρεπε τη συνεχή συλλογή κάθε εκατοστού που αποτίθετο. Για τον λόγο αυτό η συλλογή των κλασμάτων του χιονιού από το ανώτερο προς το κατώτερο έγινε μετά το πέρας της χιονόπτωσης στις 25/1/22. Το συνολικό ύψος της χιονόστρωσης ήταν 45cm και γι' αυτό, κάνοντας την υπόθεση ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων βρίσκεται στα πρώτα εκατοστά (όπου κυριαρχεί το φαινόμενο του washout), επιλέχθηκαν τα κλάσματα της χιονόστρωσης να είναι τα 0-1cm, 1-2cm, 2-3cm, 3-4cm, 4-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-30cm και 30-45cm. Η υπόθεση αυτή βασίστηκε στη διαπίστωση των (Ishikawa, et al., 1995) ότι το πρώτο 1mm της βροχόπτωσης αποτελεί το 27% έως 34% του συνολικού washout, και θεωρήθηκε ότι ανάλογη τάση θα ακολουθηθεί και από το φαινόμενο της χιονόπτωσης.

Τα κλάσματα που συλλέχθηκαν τοποθετήθηκαν σε πλαστικά δοχεία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.4**, και στη συνέχεια οξινίστηκαν με προσθήκη HNO_3 και οδηγήθηκαν στο εργαστήριο για επεξεργασία και ανάλυση. Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων δίνονται στον **Πίνακα 6.3**.

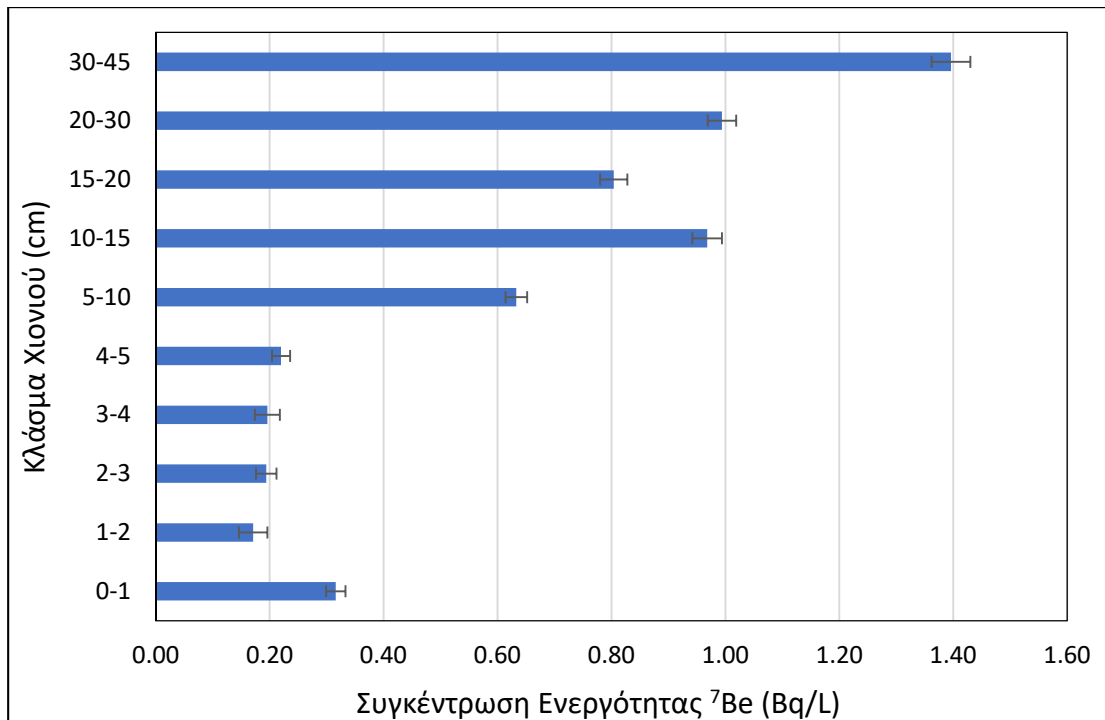


Σχήμα 6.4 : Τα κλάσματα χιονόστρωσης της κακοκαιρίας "Ελπίς".

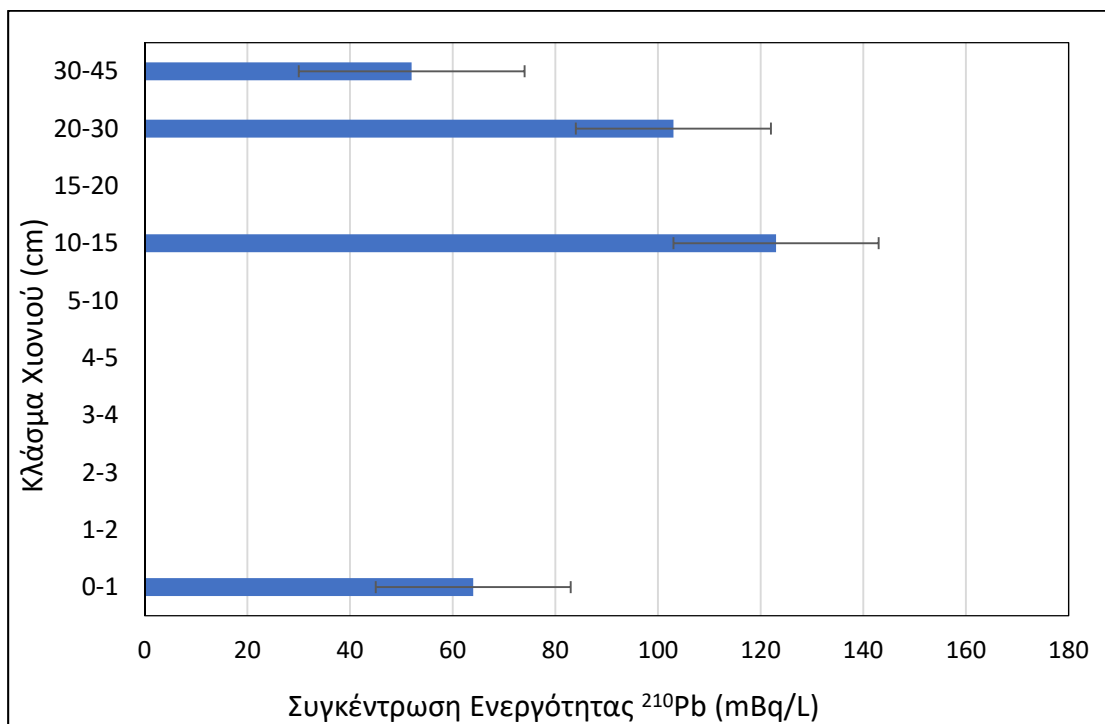
Πίνακας 6.3 : Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων στα διάφορα κλάσματα επί του συνολικού ύψους της χιονόστρωσης της κακοκαιρίας "Ελπίς".

Κωδικός Δείγματος	Κλάσμα Χιονιού (cm)	⁷ Be		²¹⁰ Pb	
		Bq/L	MDA (Bq/L)	mBq/L	MDA (mBq/L)
WR010	30-45	1.40 ± 0.03	0.01	52 ± 22	47
WR011	20-30	0.99 ± 0.03	0.01	103 ± 19	40
WR012	15-20	0.80 ± 0.02	0.01	<MDA	43
WR013	10-15	0.97 ± 0.03	0.01	123 ± 20	42
WR014	5-10	0.63 ± 0.02	0.01	<MDA	35
WR015	4-5	0.22 ± 0.02	0.01	<MDA	44
WR016	3-4	0.20 ± 0.02	0.01	<MDA	61
WR017	2-3	0.19 ± 0.02	0.01	<MDA	50
WR018	1-2	0.17 ± 0.03	0.01	<MDA	66
WR019	0-1	0.32 ± 0.02	0.01	64 ± 19	41

Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω μετρήσεων δίνεται στα **Σχήματα 6.5** και **6.6**.



Σχήμα 6.5 : Συγκέντρωση ενεργότητας ⁷Be στα κλάσματα της χιονόπτωσης της κακοκαιρίας "Ελπίς".



Σχήμα 6.6 : Συγκέντρωση ενεργότητας ²¹⁰Pb στα κλάσματα της χιονόπτωσης της κακοκαιρίας "Ελπίς".

Είναι εμφανές, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων εντοπίζεται στα τελευταία (ανώτερα) εκατοστά της χιονόστρωσης, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την αρχική υπόθεση. Κατά τη διάρκεια της χιονόπτωσης, τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στην επιφάνεια της Γης

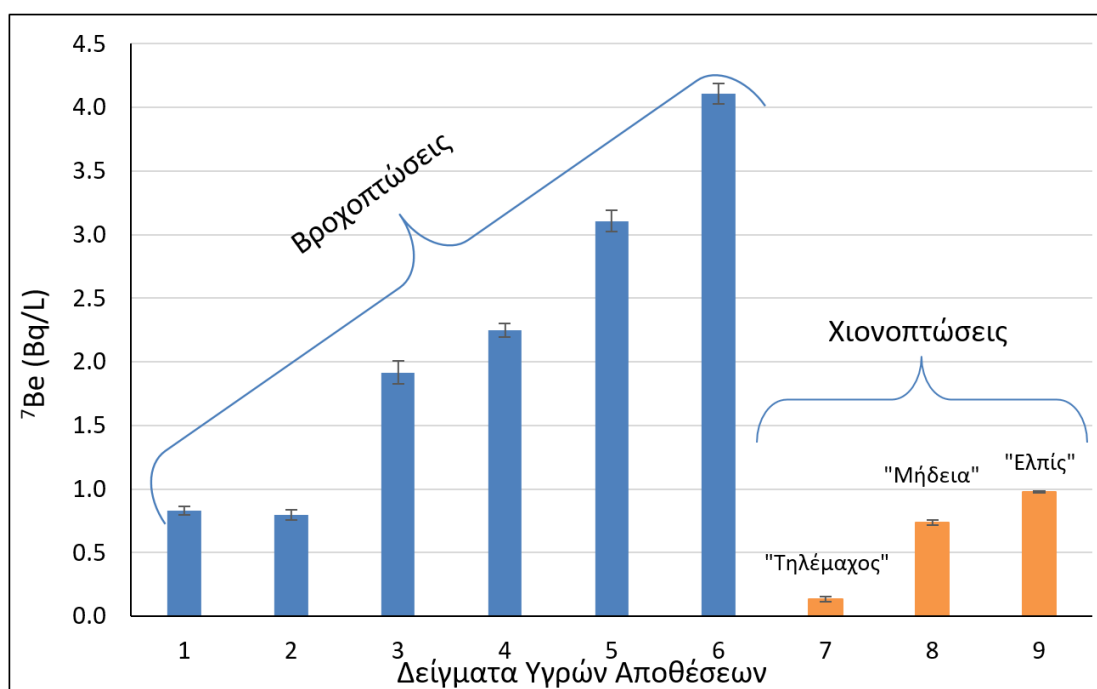
προέρχονται είτε από τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω της κατακρήμνισής τους από τις νιφάδες του χιονιού (αντίστοιχο του washout) ή από τις νιφάδες τις ίδιες στην περίπτωση που βρίσκονται μέσα στο νέφος κατά τη συμπύκνωσή τους (snowout - αντίστοιχο του rainout). Συνεπώς, τα παραπάνω αποτελέσματα θα μπορούσαν να ερμηνευτούν βάσει των δύο παρακάτω υποθέσεων ή του συνδυασμού τους:

- i. Κατά την εξέλιξη της χιονόπτωσης, χιονονιφάδες όλο και υψηλότερης συγκέντρωσης σε ραδιενεργά ισότοπα εναποτέθηκαν στο έδαφος λόγω του snowout.
- ii. Κατά την εξέλιξη της χιονόπτωσης, λόγω των υψηλής ταχύτητας ανέμων νέες αέριες μάζες πλούσιες σε ^7Be και ^{210}Pb μετακινήθηκαν στη περιοχή της χιονόπτωσης με αποτέλεσμα την κατακρήμνιση των ραδιενεργών ισοτόπων που μετέφεραν.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να προστεθεί ότι από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας “Ελπίς” δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της έντασης της χιονόπτωσης συναρτήσει του χρόνου, κάτι το οποίο μπορεί να αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ερμηνεία των παραπάνω αποτελεσμάτων. Πάντως, αυτό που μπορεί να λεχθεί εμπειρικά είναι ότι στη συγκεκριμένη χιονοκαταιγίδα τα πρώτα εκατοστά εναποτέθηκαν σε χρονικό διάστημα λίγων λεπτών, ενώ τα υπόλοιπα σε χρονικό διάστημα μίας ημέρας. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Caillet, et al., 2001), σε υψηλής έντασης υγρές αποθέσεις τα περιεχόμενα ραδιενεργά ισότοπα μεταξύ νέφους και εδάφους κατακρημνίζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (washout), ενώ το φαινόμενο του rainout/snowout είναι το κυρίαρχο στην υπόλοιπη διάρκεια του φαινομένου. Επιπροσθέτως, υποστηρίζεται ότι οι χαμηλής έντασης υγρές αποθέσεις οδηγούν σε αποδοτικότερη κατακρήμνιση των ατμοσφαιρικών ραδιενεργών ισοτόπων (Ioannidou & Papastefanou, 2006) (Taylor, et al., 2016). Επομένως, πιθανότατα στη συγκεκριμένη χιονοκαταιγίδα, η αρκετά χαμηλότερη ένταση του φαινομένου μετά την αρχικά έντονη χιονόπτωση, σε συνδυασμό με τους υψηλής έντασης ανέμους να επέτρεψε τη συνεχή εισροή αερίων μαζών πλούσιων σε ^7Be και ^{210}Pb τα οποία κατακρημνίζονταν με τη χιονόπτωση, καθώς και την απόθεση χιονονιφάδων υψηλής συγκέντρωσης σε ραδιενεργά ισότοπα λόγω του snowout.

6.2.3 Σύγκριση της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στα δείγματα υγρών αποθέσεων

Στο σημείο αυτό, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των συγκεντρώσεων ενεργότητας του ^7Be που υπολογίστηκαν από το σύνολο των δειγμάτων καθαρών υγρών αποθέσεων (βροχής και χιονιού). Επισημαίνεται ότι η συνολική συγκέντρωση ενεργότητας για τη χιονόπτωση της χιονοκαταιγίδας «Ελπίς» υπολογίστηκε αποδίδοντας σε κάθε εκατοστό τη συγκέντρωση που αναλογεί και υπολογίζοντας τον μέσο όρο από τις επιμέρους συγκεντρώσεις ενεργότητας όλων των εκατοστών. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η συγκέντρωση ενεργότητας της χιονοκαταιγίδας «Μήδεια» αφορά μόνο τα πρώτα 20cm της χιονόπτωσης (η χιονόπτωση έφτασε συνολικό ύψος τα 80cm). Η ανωτέρω σύγκριση γίνεται στο **Σχήμα 6.7** που ακολουθεί. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η συγκέντρωση ενεργότητας ^7Be στα δείγματα βροχής είναι εν γένει πολύ υψηλότερη από ότι στα δείγματα χιονόπτωσης.



Σχήμα 6.7 : Σύγκριση συγκέντρωσης ενεργότητας για όλα τα δείγματα αμιγώς υγρών αποθέσεων που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ..

*Να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση ενεργότητας της χιονοκαταιγίδας «Μήδεια» αφορά μόνο τα πρώτα 20cm της χιονόπτωσης.

6.2.4 Συγκέντρωση ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα υγρασίας

Πέρα από τα δύο αρχικά δείγματα υγρασίας, τα οποία συλλέχθηκαν στη φάση των δοκιμών της μεθόδου, συλλέχθηκαν ακόμα 7 δείγματα. Η χρονική διάρκεια της κάθε δειγματοληψίας υγρασίας είχε εύρος από 1 έως 8 ημέρες, ώστε να συλλεχθεί ικανοποιητική ποσότητα δείγματος, καθώς η συλλογή της εξαρτάται από τη σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα δείγματα δίνονται στον **Πίνακα 6.4**, από όπου προκύπτει ότι το εύρος συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be είναι από 0.04 έως 0.15 Bq/L, με το MDA να κυμαίνεται από 0.003 έως 0.020 Bq/L. Σε κανένα δείγμα δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση ^{210}Pb , του οποίου η απόθεση, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, συσχετίζεται θετικά με τη σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα (Pham, et al., 2011), (Mohan, et al., 2018).

Πίνακας 6.4 : Συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων στα δείγματα υγρασίας που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ..

Κωδικός Δείγματος	^7Be		^{210}Pb	
	Bq/L	MDA (Bq/L)	mBq/L	MDA (mBq/L)
HR001	0.07 ± 0.01	0.02	<MDA	~ 40
HR002	<MDA	0.02		
HR003	<MDA	0.01		
HR004	0.08 ± 0.05	0.01		
WR020	0.15 ± 0.02	0.01		
HR005	0.05 ± 0.01	0.01		
HR006	0.06 ± 0.01	0.01		
HR007	0.04 ± 0.01	0.01		
HR008	0.05 ± 0.01	0.01		

6.2.5 Ρυθμός απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων στις ξηρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις

Η δειγματοληψία και επεξεργασία δειγμάτων ξηρής απόθεσης αποτέλεσε μεγάλο μέρος της παρούσας Δ.Δ., καθώς η εισαγωγή της στις συστηματικές περιβαλλοντικές

μετρήσεις που διεξάγονται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι αναγκαία για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος.

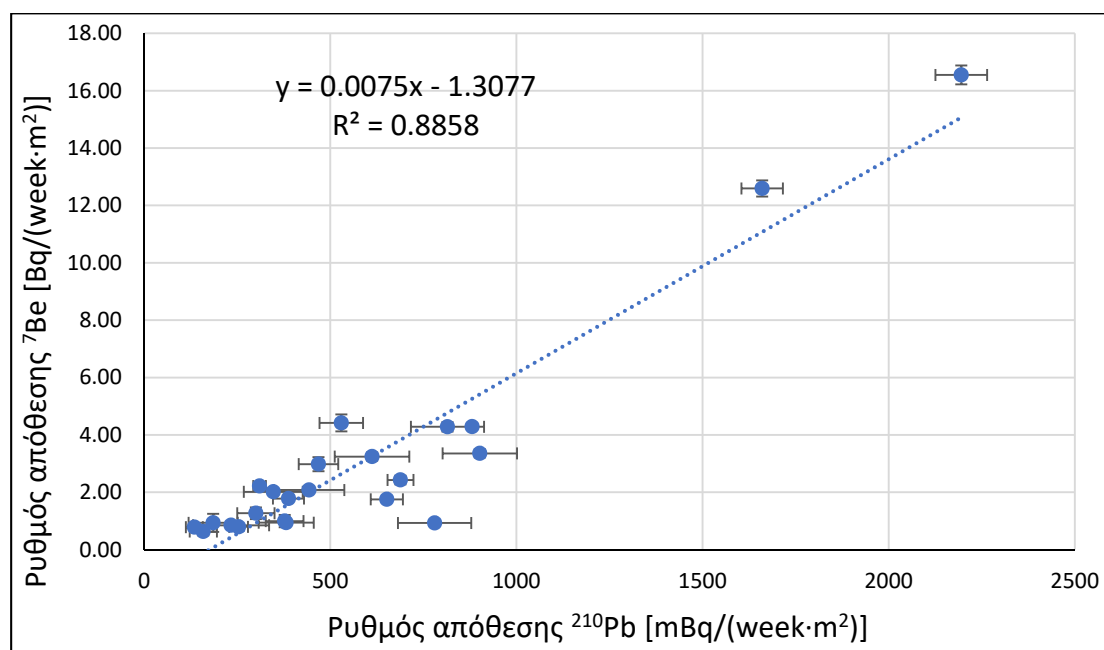
Πέρα από τα 3 αρχικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της μεθόδου, συλλέχθηκαν επιπροσθέτως ακόμα 22 δείγματα ξηρής απόθεσης. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των δειγμάτων ξηρής απόθεσης δίνονται στον **Πίνακα 6.5**.

Πίνακας 6.5 : Αποτελέσματα ρυθμού απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων, όπως εκτιμήθηκε από τα δείγματα ξηρής απόθεσης που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ..

Κωδικός Δείγματος	⁷ Be		²¹⁰ Pb	
	Bq/(week·m ²)	MDA Bq/(week·m ²)	mBq/(week·m ²)	MDA mBq/(week·m ²)
DR001	1.78 ± 0.05	0.01	388 ± 42	78
DR002	0.78 ± 0.03	0.01	135 ± 23	42
DR003	0.30 ± 0.02	0.01	<MDA	64
DR004	1.75 ± 0.06	0.01	652 ± 43	83
DR005	0.80 ± 0.03	0.01	254 ± 25	50
DR006	12.60 ± 0.28	0.01	1660 ± 56	85
DR007	0.93 ± 0.07	0.02	780 ± 99	200
DR008	3.36 ± 0.14	0.02	902 ± 100	200
DR009	4.29 ± 0.10	0.01	881 ± 1	87
DR010	2.02 ± 0.08	0.02	347 ± 79	165
DR011	0.85 ± 0.09	0.02	233 ± 102	204
DR012	2.08 ± 0.10	0.02	443 ± 95	192
DR013	0.94 ± 0.06	0.02	381 ± 74	151
DR014	3.24 ± 0.14	0.02	612 ± 100	203
DR015	4.28 ± 0.16	0.02	815 ± 98	199
DR016	16.55 ± 0.33	0.01	2195 ± 69	106
DR017	0.72 ± 0.13	0.02	<MDA	200
DR018	0.93 ± 0.32	0.06	185 ± 66	171
DR019	2.43 ± 0.15	0.02	689 ± 35	83
DR020	2.22 ± 0.09	0.01	310 ± 17	39
DR021	0.63 ± 0.13	0.03	159 ± 37	96
TR013	4.42 ± 0.30	0.04	529 ± 59	145
DR022	2.98 ± 0.25	0.04	468 ± 53	136
TR014	0.99 ± 0.22	0.04	377 ± 51	129
DR023	1.27 ± 0.21	0.04	300 ± 50	129

Εκτός από ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}$, σε ένα δείγμα, συγκεκριμένα στο δείγμα DR009, έγινε οριακή ανίχνευση και του ισότοπου ${}^{137}\text{Cs}$ με τον ρυθμό απόθεσης να προσδιορίζεται στα $65 \pm 58 \text{ mBq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας για την παρακολούθηση και άλλων ραδιενεργών ισότοπων στην ατμόσφαιρα, πέραν του ${}^7\text{Be}$ και του ${}^{210}\text{Pb}$. Μετά από την ανίχνευση και του ${}^{137}\text{Cs}$, για κάθε ένα από τα δείγματα του **Πίνακα 6.5** έγινε υπολογισμός του MDA και για το ${}^{137}\text{Cs}$. Το εύρος του MDA, το οποίο εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας καθώς και τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του δείγματος, βρέθηκε στην περιοχή 2 έως 31 $\text{mBq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανής η μεγάλη κύμανση των μετρούμενων συγκεντρώσεων του ${}^7\text{Be}$ και του ${}^{210}\text{Pb}$ στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, με το ${}^7\text{Be}$ να παρουσιάζει ρυθμό απόθεσης από 0.30 έως 16.55 $\text{Bq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$ και το ${}^{210}\text{Pb}$ από 135 έως 2195 $\text{mBq}/(\text{week}\cdot\text{m}^2)$. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο ροών απόθεσης ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}$ στις ξηρές αποθέσεις δίνεται στο **Σχήμα 6.8**.



Σχήμα 6.8 : Συσχέτιση ρυθμών απόθεσης ${}^7\text{Be}$ - ${}^{210}\text{Pb}$ στις ξηρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι παρά τη διαφορετική προέλευση των δύο ραδιενεργών ισότοπων ενδιαφέροντος υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ τους στις ξηρές αποθέσεις, με τον συντελεστή συσχέτισης να είναι στατιστικά σημαντικός και $p\text{-value} < 0.00001$, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από αντίστοιχες ερευνητικές μελέτες, όπως αυτές αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

6.2.6 Ρυθμός απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.1, η ολική απόθεση περιλαμβάνει ξηρές και υγρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις. Η δειγματοληψία και επεξεργασία ολικών αποθέσεων αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας, καθώς επιτρέπει τη συστηματική της παρακολούθηση, με μικρή επέμβαση από τον ερευνητή, καθώς δεν απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση των μετεωρολογικών συνθηκών και η αλλαγή των δειγματοληπτών ή η χρήση ειδικών δειγματοληπτών ξηρής/υγρής απόθεσης. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. έγινε συλλογή 12 δειγμάτων ολικής απόθεσης. Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων αυτών δίνονται στον **Πίνακα 6.6**.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για τα δείγματα ολικής απόθεσης που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ.

Κωδικός Δείγματος	⁷ Be		²¹⁰ Pb	
	Bq/(week·m ²)	MDA Bq/(week·m ²)	mBq/(week·m ²)	MDA mBq/(week·m ²)
TR001	6.98 ± 0.14	0.01	430 ± 15	23
TR003	8.82 ± 0.17	0.01	1085 ± 23	18
TR002	19.2 ± 0.4	0.07	3335 ± 122	205
TR004	18.4 ± 0.4	0.01	1925 ± 49	56
TR005	29.9 ± 0.6	0.02	2349 ± 114	205
TR006	27.3 ± 0.8	0.03	1553 ± 187	374
TR007	17.3 ± 0.3	0.01	1960 ± 83	144
TR008	14.6 ± 0.3	0.02	1889 ± 113	201
TR009	40.2 ± 0.8	0.02	6629 ± 180	231
TR010	26.1 ± 0.5	0.01	2959 ± 68	68
TR011	22.6 ± 0.4	0.01	1462 ± 74	135
TR012	31.4 ± 0.6	0.02	1342 ± 95	183

Τα παραπάνω αποτελέσματα αναδεικνύουν υψηλότερες συγκεντρώσεις για το ⁷Be και τον ²¹⁰Pb στις ολικές αποθέσεις συγκριτικά με τα αποτελέσματα των ξηρών

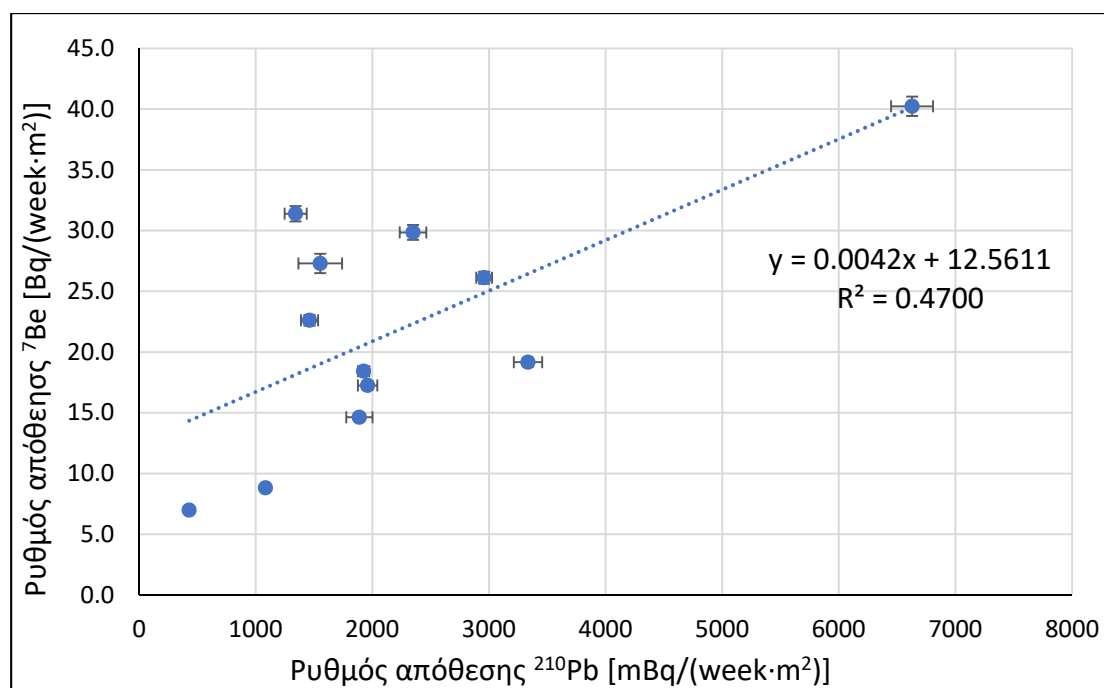
αποθέσεων του **Πίνακα 6.5**, κάτι το οποίο αναμενόταν. Ειδικότερα, για το ${}^7\text{Be}$ παρατηρείται ένα εύρος ρυθμού απόθεσης από 6.98 έως 40.23 Bq/(week·m²), και για το ${}^{210}\text{Pb}$ από 430 έως 6629 mBq/(week·m²). Επιπροσθέτως, όπως προαναφέρθηκε, σε ορισμένα από τα δείγματα ολικών αποθέσεων έγινε ανίχνευση και του ραδιενεργού ισοτόπου ${}^{137}\text{Cs}$. Τα αποτελέσματα για τα εν λόγω δείγματα μαζί με τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης που κυμαίνονται από 1 έως 17 mBq/(week·m²)⁶³ δίνονται στον **Πίνακα 6.7**. Η υψηλότερη συγκέντρωση ${}^{137}\text{Cs}$ μετρήθηκε στο δείγμα TR001 το οποίο ελήφθη για μία περίοδο περίπου δύο μηνών και συμπίπτει χρονικά με δασικές πυρκαγιές στη ζώνη αποκλεισμού του Chernobyl. Τα δείγματα TR007 και TR010 στα οποία επίσης ανιχνεύθηκε ${}^{137}\text{Cs}$, δεν συλλέχθηκαν παράλληλα με κάποιο συμβάν που άμεσα να δικαιολογεί την παρουσία του ${}^{137}\text{Cs}$ σε αυτά, ωστόσο, το Μάρτιο του 2021 οπότε ελήφθη το δείγμα TR007 έλαβε χώρα συμβάν μεταφοράς αφρικανικής σκόνης, η οποία πολύ πιθανό να οδήγησε στην παρουσία ${}^{137}\text{Cs}$ στην ατμόσφαιρα, ενώ την ίδια περίοδο έγινε και έκρηξη του ηφαιστείου της Αίτνας.

Πίνακας 6.7 : Ρυθμός απόθεσης ${}^{137}\text{Cs}$ στα δείγματα ολικής απόθεσης που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ..

Κωδικός Δείγματος	${}^{137}\text{Cs}$	
	mBq/(week·m ²)	MDA mBq/(week·m ²)
TR001	51 ± 30	1
TR003	<MDA	1
TR002	<MDA	7
TR004	<MDA	2
TR005	<MDA	8
TR006	<MDA	17
TR007	12 ± 7	5
TR008	<MDA	9
TR009	<MDA	9
TR010	10 ± 2	2
TR011	<MDA	5
TR012	<MDA	8

⁶³ Ο υπολογισμός ενός εβδομαδιαίου ρυθμού απόθεσης, ειδικά για το Cs-137 το οποίο μπορεί να οφείλεται σε γεγονότα πολύ μικρής διάρκειας, δεν είναι και η πλέον ενδεδειγμένη προσέγγιση. Μια ακριβέστερη προσέγγιση θα έπρεπε να λάβει υπόψη τη χρονική διάρκεια παραμονής του υπόψη νέφους στην περιοχή και άλλες παραμέτρους

Αντίστοιχα με τις ξηρές αποθέσεις, μελετήθηκε και η συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων του ^7Be και του ^{210}Pb στις ολικές αποθέσεις, η οποία δίνεται στο **Σχήμα 6.9**, από όπου προκύπτει ότι υπάρχει μια ασθενής συσχέτιση μεταξύ ^7Be και ^{210}Pb στις ολικές αποθέσεις με τον συντελεστή συσχέτισης να είναι οριακά μόνον στατιστικά σημαντικός με $p\text{-value} = 0.013851$.



Σχήμα 6.9 : Συσχέτιση ρυθμού απόθεσης ^7Be - ^{210}Pb στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις.

6.2.7 Παράλληλη δειγματοληψία ατμοσφαιρικών αποθέσεων και ατμοσφαιρικού αερολύματος

Για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα, παράλληλα με ορισμένες από τις δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων έλαβαν χώρα και δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αερολύματος, όπως περιγράφεται στα σχόλια του **Πίνακα 6.34**. Οι δειγματοληψίες αυτές έγιναν με χρήση της αντλίας υψηλής παροχής F&J DH-50810E, που χρησιμοποιήθηκε και για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα στα κεφάλαια 3 και 4. Συνολικά, συλλέχθηκαν 16 φίλτρα $8'' \times 10''$ τα οποία συσκευάστηκαν στην τυπική γεωμετρία $5.08\text{cm} \times 6.35\text{cm} \times 0.9\text{cm}$ που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Savva, et al., 2018) και αναλύθηκαν με γ -φασματοσκοπία στον ανιχνευτή XtRa. Τα χαρακτηριστικά της δειγματοληψίας κάθε φίλτρου δίνονται στον **Πίνακα 6.8**. Για καθαρά πρακτικούς λόγους, η διάρκεια κάθε δειγματοληψίας – με εξαίρεση μία

περίπτωση – δεν υπερέβη τις επτά ημέρες, κάτι που σημαίνει ότι περίπου στις μισές περιπτώσεις δεν γινόταν δειγματοληψία αέρα καθ’ όλη την περίοδο δειγματοληψίας αποθέσεων. Τα ποσοστά αλληλοεπικάλυψης της δειγματοληψίας αέρα και συλλογής αποθέσεων δίνονται στον **Πίνακα 6.8**.

Πίνακας 6.8 : Χαρακτηριστικά δειγματοληψίας φίλτρων αέρα που ελήφθησαν παράλληλα με δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Κωδικός Φίλτρου αέρα	Κωδικός δείγματος ατμοσφαιρικής απόθεσης που λήφθηκε παράλληλα	Χρονική διάρκεια δειγματοληψίας φίλτρου αέρα (ημέρες)	Ποσοστό χρονικής αλληλοεπικάλυψης δειγματοληψίας αέρα και δειγματοληψίας ατμοσφαιρικής απόθεσης
a0548	DR003	13	59%
a0554	DR004	7	47%
a0559	DR007	7	100%
a0560	TR007	7	50%
a0562	TR008	7	100%
a0563	TR010	7	33%
a0564	DR010	7	100%
a0567	DR012	7	100%
a0568	TR011	7	100%
a0569	DR014	7	100%
a0570	DR016	7	78%
a0571	DR018	7	100%
a0572	DR020	7	29%
a0573	DR021	4.2	60%
a0574	DR022	7	100%
a0575	DR023	7	100%

Στους πίνακες που ακολουθούν (**Πίνακας 6.9** και **Πίνακας 6.10**) παρατίθενται τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των φίλτρων αέρα.

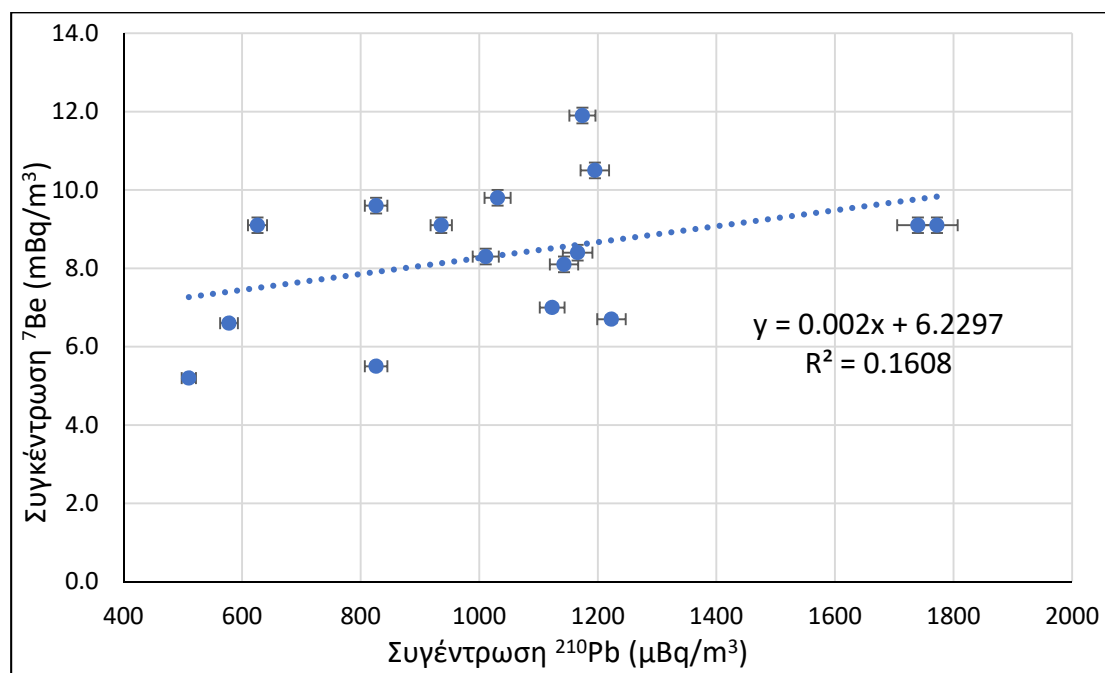
Πίνακας 6.9 : Συγκεντρώσεις ενεργότητας των ισοτόπων ^7Be και ^{210}Pb στα φίλτρα αέρα που συλλέχθηκαν παράλληλα με δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Κωδικός Φίλτρου αέρα	^7Be		^{210}Pb	
	mBq/m ³		μBq/m ³	
a0548	11.9	± 0.2	1174	± 22
a0554	9.1	± 0.2	936	± 18
a0559	7.0	± 0.1	1123	± 21
a0560	5.5	± 0.1	826	± 19
a0562	5.2	± 0.1	510	± 12
a0563	6.6	± 0.1	578	± 15
a0564	9.1	± 0.2	626	± 16
a0567	8.3	± 0.2	1011	± 22
a0568	9.8	± 0.2	1031	± 22
a0569	9.1	± 0.2	1740	± 35
a0570	10.5	± 0.2	1195	± 24
a0571	9.6	± 0.2	826	± 19
a0572	8.4	± 0.2	1166	± 25
a0573	8.1	± 0.2	1143	± 24
a0574	9.1	± 0.2	1772	± 35
a0575	6.7	± 0.1	1223	± 24

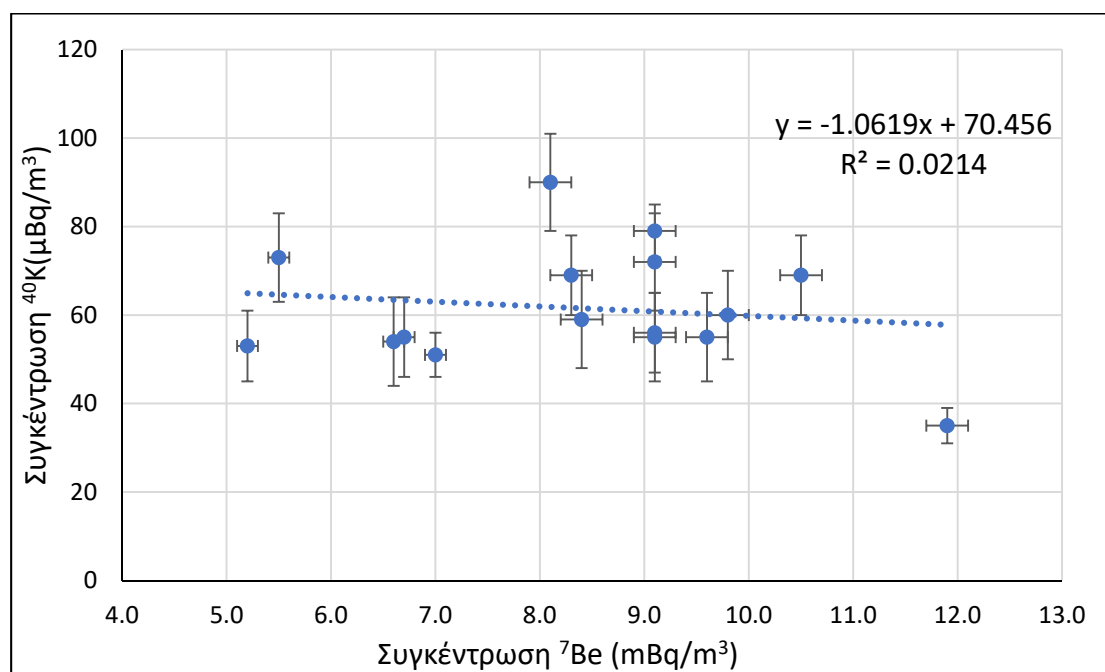
Πίνακας 6.10 : Συγκεντρώσεις ενεργότητας των ισοτόπων ^{40}K και ^{137}Cs στα φίλτρα αέρα που συλλέχθηκαν παράλληλα με δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Κωδικός Φίλτρου αέρα	^{40}K		^{137}Cs	
	μBq/m ³		nBq/m ³	MDA (nBq/m ³)
a0548	35	± 4	262 ± 174	260
a0554	79	± 6	<MDA	331
a0559	51	± 5	281 ± 183	274
a0560	73	± 10	<MDA	622
a0562	53	± 8	<MDA	515
a0563	54	± 10	<MDA	760
a0564	55	± 10	<MDA	708
a0567	69	± 9	<MDA	641
a0568	60	± 10	<MDA	644
a0569	72	± 11	1391 ± 508	584
a0570	69	± 9	<MDA	610
a0571	55	± 10	<MDA	715
a0572	59	± 11	<MDA	560
a0573	90	± 11	<MDA	626
a0574	56	± 9	<MDA	557
a0575	55	± 9	<MDA	470

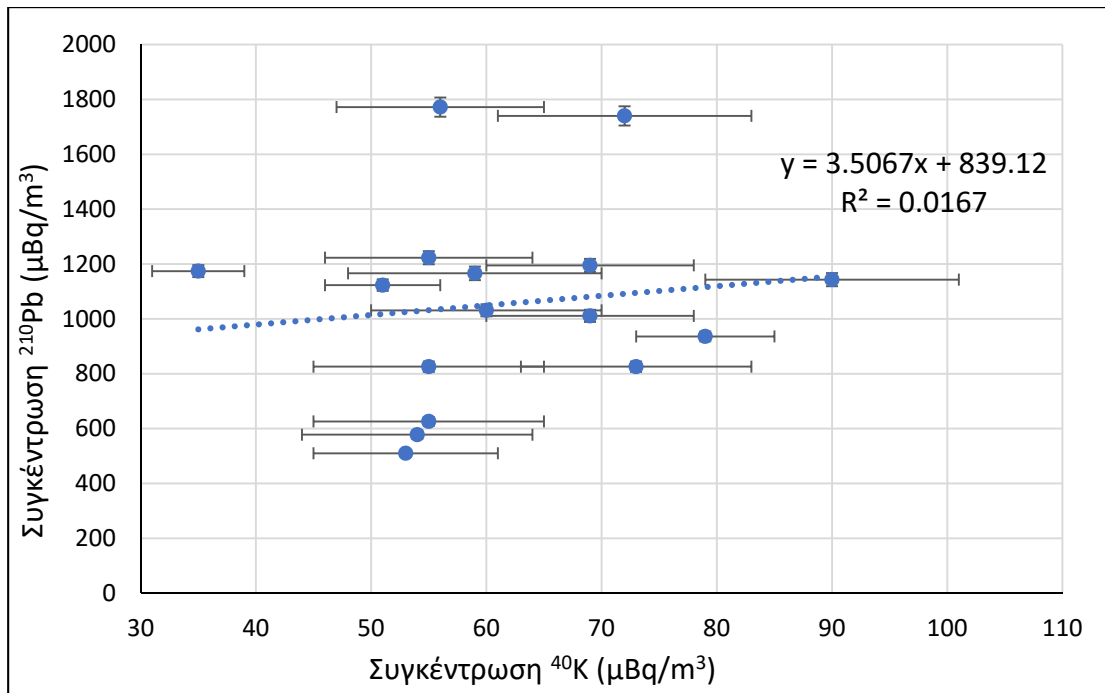
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι σε κάθε δείγμα αερολύματος που συλλέχθηκε ανιχνεύθηκαν ^7Be , ^{210}Pb και ^{40}K , ενώ σε λίγα δείγματα αερολύματος ανιχνεύθηκε και ^{137}Cs . Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 6.10, Σχήμα 6.11 και Σχήμα 6.12) παρατίθενται ανά δύο οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των τριών ισοτόπων ^7Be , ^{210}Pb και ^{40}K σε μία προσπάθεια αναζήτησης συσχετίσεων μεταξύ τους.



Σχήμα 6.10 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στα φίλτρα αέρα.



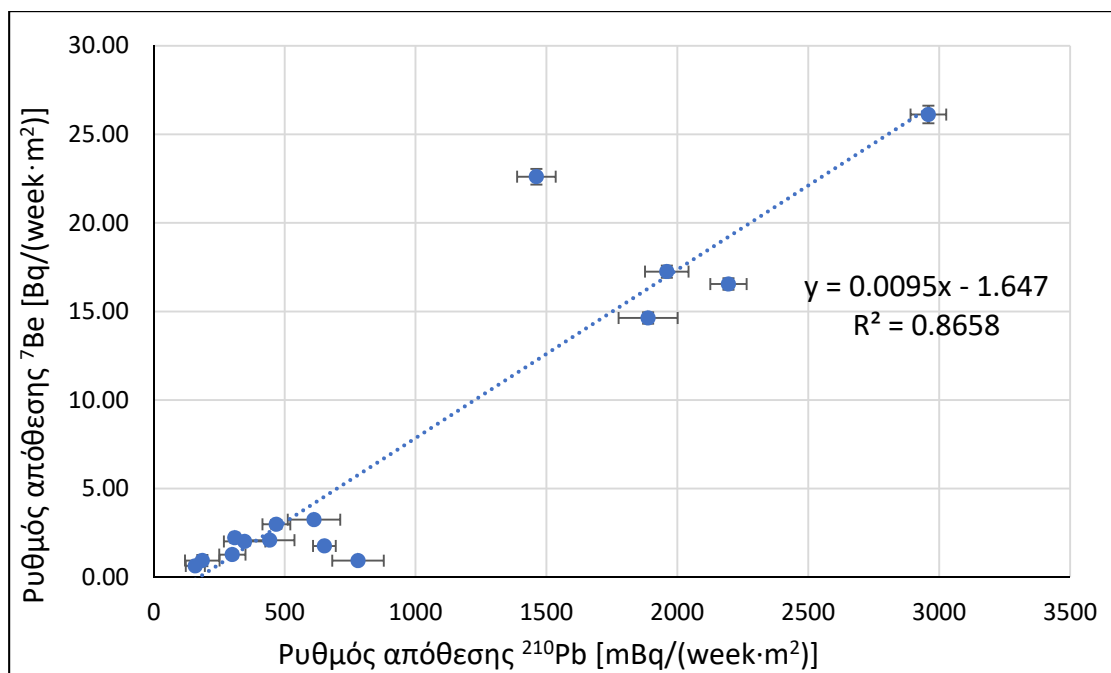
Σχήμα 6.11 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας ^7Be και ^{40}K στα φίλτρα αέρα.



Σχήμα 6.12 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας ²¹⁰Pb και ⁴⁰K στα φίλτρα αέρα.

Από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία που έγινε διαπιστώθηκε ότι δεν προκύπτει στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εν λόγω ραδιενεργών ισοτόπων στο αερόλυμα της ατμόσφαιρας, γεγονός που ενδεχομένως οφείλεται στις διαφορετικές πηγές προέλευσής τους ή σε ορισμένες περιπτώσεις στο μικρό πλήθος πειραματικών σημείων. Σύμφωνα με τις έρευνες των (Pham, et al., 2011), (Lee, et al., 2007), η παρατήρηση θετικής συσχέτισης στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις ⁷Be και ²¹⁰Pb αποτελεί ένδειξη παρόμοιας ατμοσφαιρικής συμπεριφοράς για τα ισότοπα αυτά. Εξάλλου, θετική συσχέτιση στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις ⁷Be και ²¹⁰Pb έχει διαπιστωθεί και στην εργασία (Δαλάκα, 2023).

Η απουσία στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ ⁷Be και ²¹⁰Pb στον αέρα, η οποία προέκυψε από τις δειγματοληψίες και μετρήσεις της παρούσας εργασίας, έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων που έγιναν παράλληλα, όπου διαπιστώνεται ικανοποιητική θετική συσχέτιση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.13**, με το R^2 να είναι στατιστικά σημαντικό με $p\text{-value} < 0.00001$.



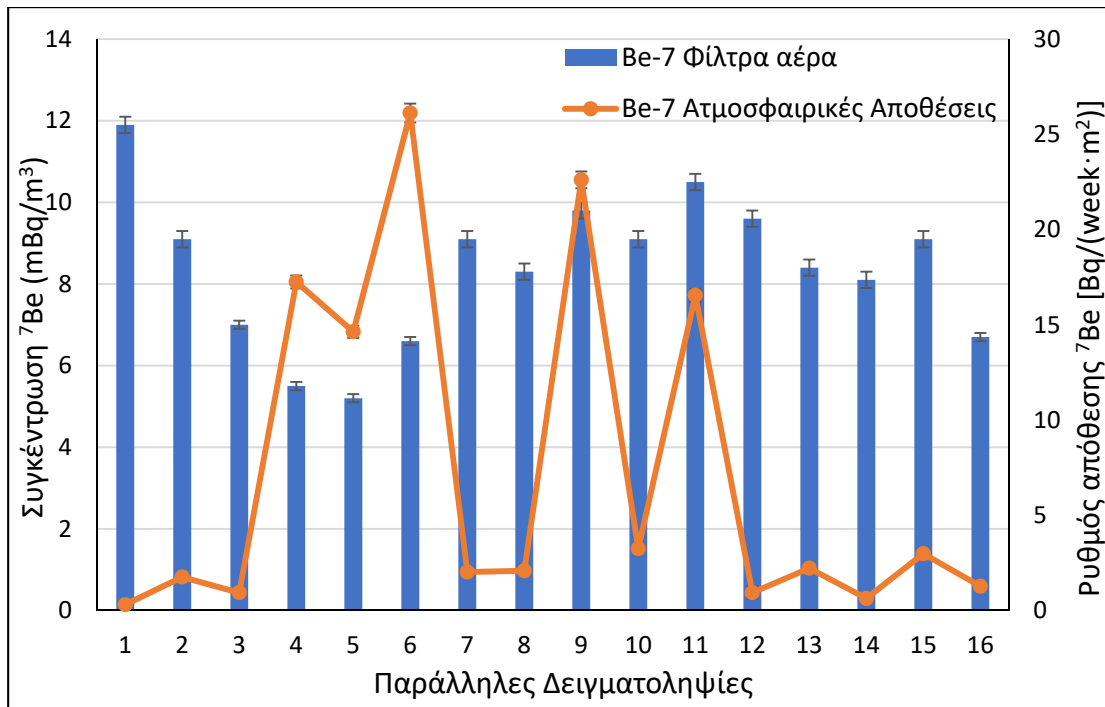
Σχήμα 6.13 : Συσχέτιση μεταξύ των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων που συλλέχθηκαν παράλληλα με φίλτρα αέρα.

Σε μία περαιτέρω διερεύνηση, εξετάστηκε η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων του ^7Be και του ^{210}Pb στον ατμοσφαιρικό αέρα και στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων που επιχειρήθηκαν δίνονται στον **Πίνακα 6.11**. Μάλιστα, σε μία προσπάθεια ανεύρεσης συσχέτισης έγινε και επιλογή μόνο των περιπτώσεων όπου η δειγματοληψία αέρα κάλυπτε πλήρως (100%) την περίοδο όπου γινόταν δειγματοληψία αποθέσεων. Οι συγκεντρώσεις του ^7Be και του ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις και στα φίλτρα αέρα που ελήφθησαν παράλληλα δίνονται στα **Σχήματα 6.14** και **6.15**.

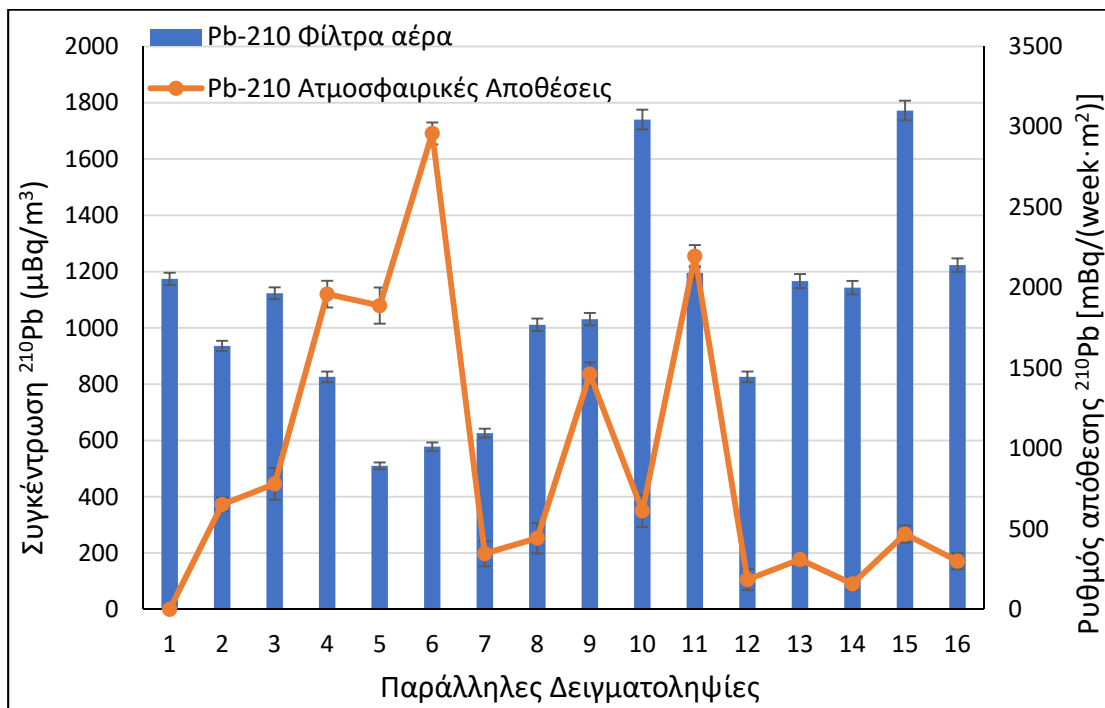
Πίνακας 6.11 : Συντελεστές Συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους στις δειγματοληψίες φίλτρων αέρα που γίνονταν παράλληλα.

		R	Στατιστικά σημαντικό	p-value
^7Be	Όλες οι παράλληλες δειγματοληψίες*	-0.2879	Όχι	0.2796
	Μόνο αλληλοεπικάλυψη 100%**	+0.4729	Όχι	0.2839
^{210}Pb	Όλες οι παράλληλες δειγματοληψίες***	-0.4159	Όχι	0.1008
	Μόνο αλληλοεπικάλυψη 100%****	+0.4399	Όχι	0.3233

* N=16, **N=7, ***N=15, ****N=7



Σχήμα 6.14 : Συγκέντρωση ενεργότητας του ⁷Be στα φίλτρα αέρα και ρυθμός απόθεσης.



Σχήμα 6.15 : Συγκέντρωση ενεργότητας του ²¹⁰Pb στα φίλτρα αέρα και ρυθμός απόθεσης.

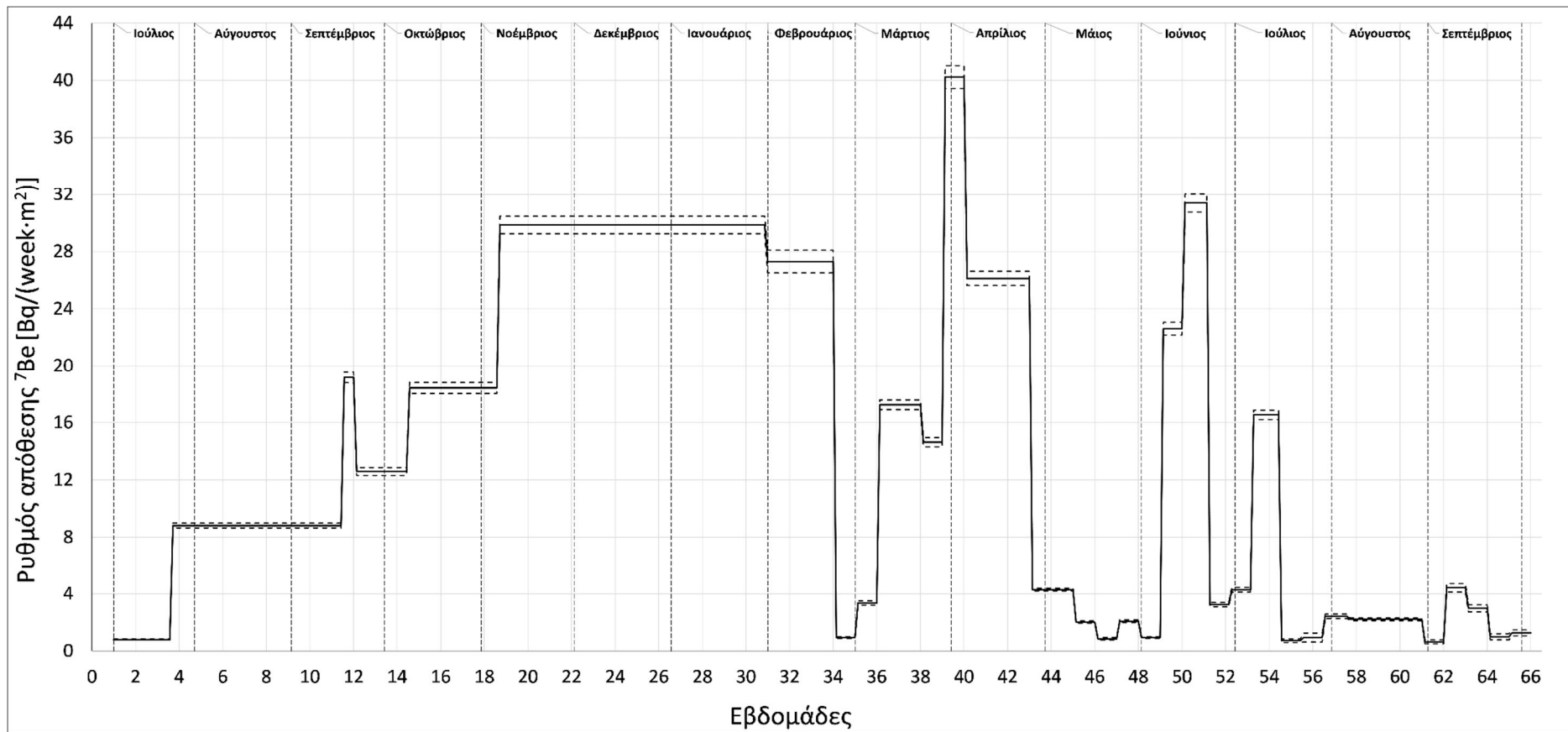
Από τα παραπάνω αποτελέσματα – ιδιαίτερα του Πίνακα 6.11 - είναι εμφανές ότι οι διαφορετικοί μηχανισμοί που ενδεχομένως διέπουν την απόθεση των ⁷Be και ²¹⁰Pb οδηγούν στην αποτυχία στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα και της απόθεσης στο έδαφος και για τα δύο ισότοπα. Παρ' όλα αυτά, στα Σχήματα 6.14 και 6.15 φαίνεται καθαρά μία τάση για

αρνητική συσχέτιση, με τις χαμηλότερες τιμές της συγκέντρωσης στον αέρα να συμπίπτουν με τις υψηλότερες αποθέσεις. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι για την εκτίμηση του ρυθμού απόθεσης και εν τέλει της ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, δεν επαρκεί η γνώση της συγκέντρωσής τους στον αέρα, αλλά πρέπει να γίνουν κατάλληλες δειγματοληψίες απόθεσης. Το παραπάνω συμπέρασμα ενισχύεται και από το γεγονός ότι, ενώ ανιχνεύεται ^{137}Cs σε τρία από τα δεκαέξι φίλτρα αέρα, κάτι το οποίο φαίνεται να οφείλεται σε φαινόμενα μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα [[NOAA](#), [ECMWF](#), [Copernicus](#), τελευταία πρόσβαση 2/6/2023], το ^{137}Cs δεν ανιχνεύεται στις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές αποθέσεις.

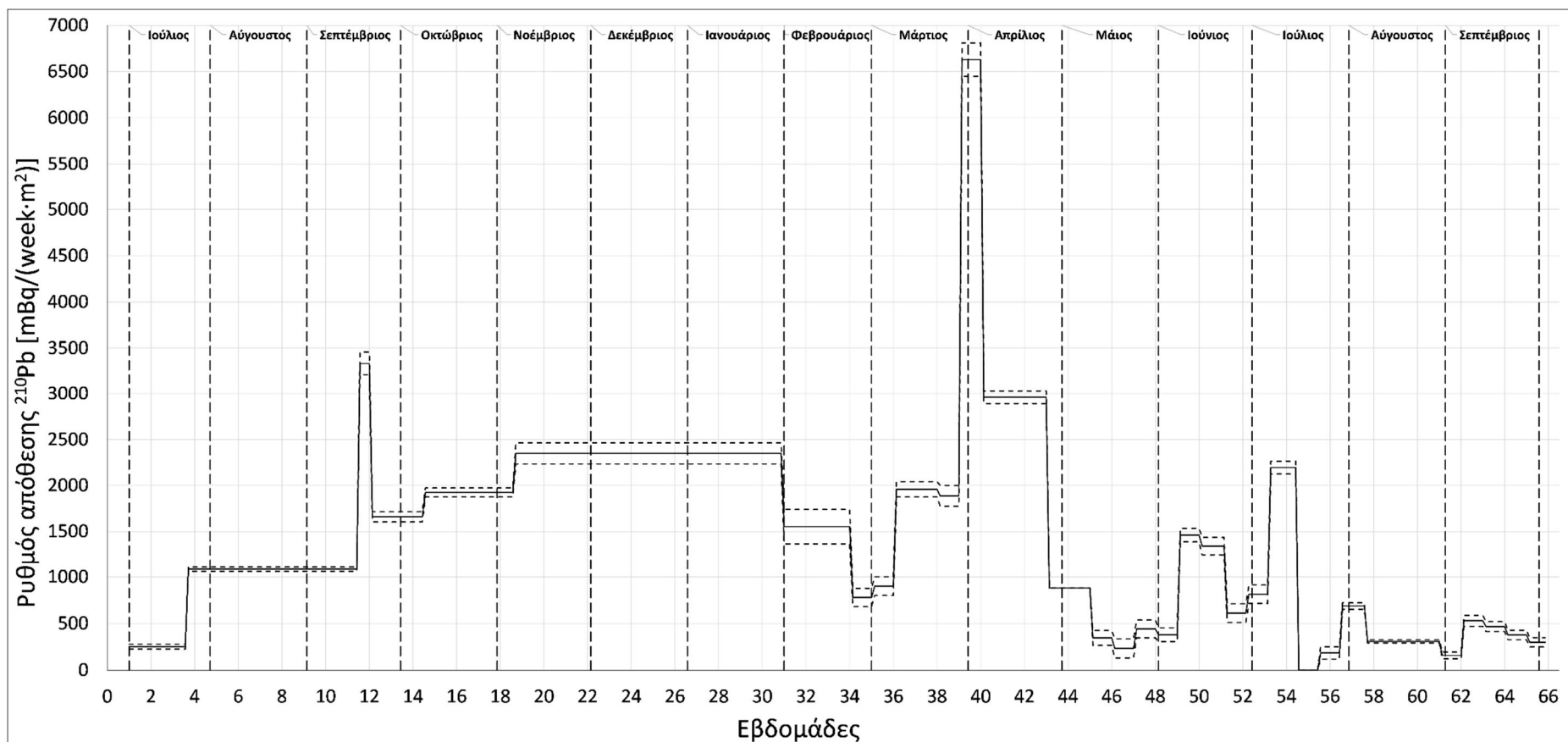
6.2.8 Συνεχείς μετρήσεις ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Όπως φαίνεται και από τον **Πίνακα 6.34**, από το σύνολο των δειγματοληψιών που πραγματοποιήθηκαν, οι 32 έγιναν χωρίς διακοπή, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών αποθέσεων για το χρονικό διάστημα από 6/7/2020 έως και 4/10/2021. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που καλύπτει συνολικά 15 μήνες, έγινε συλλογή δειγμάτων ξηρών και ολικών αποθέσεων και τα αποτελέσματα υπέστησαν επεξεργασία, ώστε να δώσουν εκτιμήσεις της απόθεσης και σε μηνιαία βάση. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν συνεχώς, χωρίς χρονική διακοπή, αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστή ομάδα δειγμάτων και θα αναφέρονται ως «συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων». Τα αποτελέσματα των συνεχών μετρήσεων ολικών αποθέσεων του ^7Be και του ^{210}Pb δίνονται στα **Σχήματα 6.16** και **6.17**.

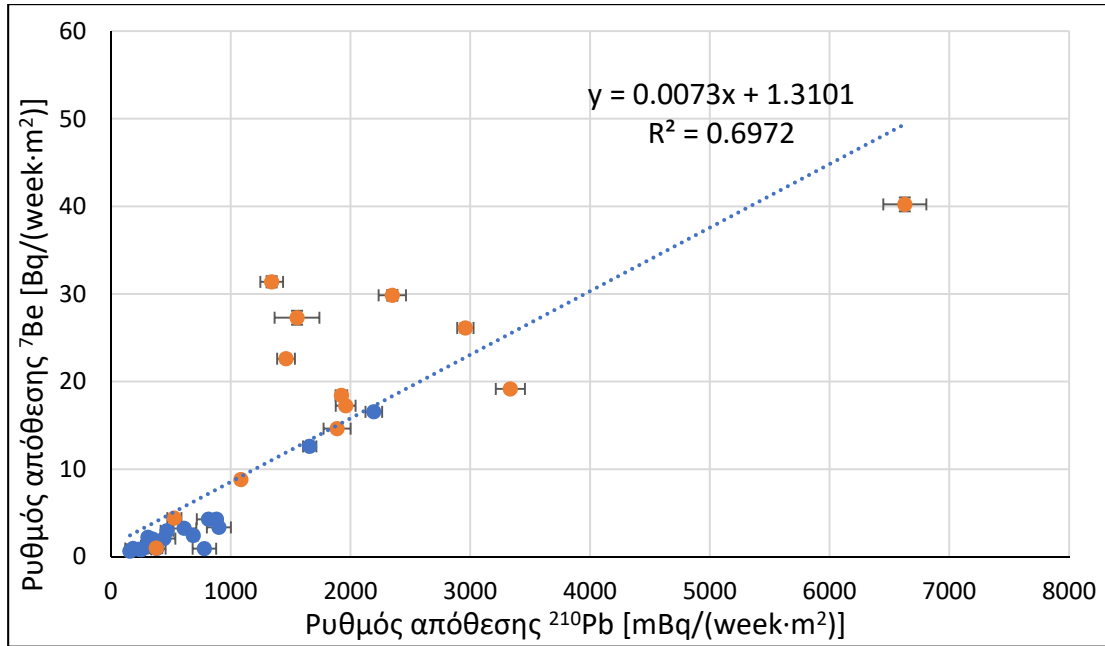
Από τα αποτελέσματα των **Σχημάτων 6.16** και **6.17** προκύπτει ότι η μεγαλύτερη ποσότητα των ραδιενεργών ισοτόπων εναποτέθηκε κυρίως τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, με τις κυμάνσεις να αποδίδονται κυρίως στην ποσότητα των υγρών κατακρημνίσεων, όπως θα εξετασθεί στην Παράγραφο 6.3.1. Επιπροσθέτως, παρατηρείται μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ ^7Be και ^{210}Pb , με τον συντελεστή συσχέτισης R^2 να είναι στατιστικά σημαντικός με $p\text{-value} < 0.00001$, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.18**.



Σχήμα 6.16 : Ρυθμός απόθεσης του ^7Be στις συνεχείς μετρήσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων.



Σχήμα 6.17 : Ρυθμός απόθεσης του ^{210}Pb στις συνεχείς μετρήσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων.



Σχήμα 6.18 : Συσχέτιση μεταξύ των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb για τα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων, όπου με «πορτοκαλί» χρώμα τονίζονται τα δείγματα ολικών (ξηρών + υγρών) αποθέσεων, ενώ με «μπλε» χρώμα οι αμιγώς ξηρές αποθέσεις.

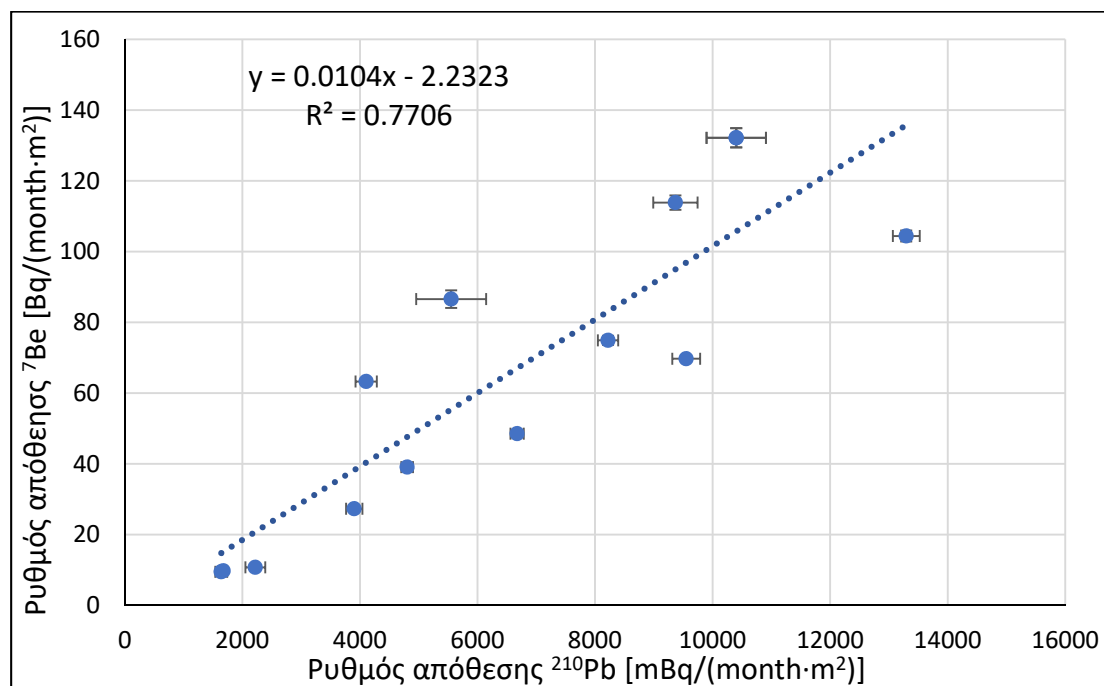
Από το σύνολο των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, πέρα από την κατανομή των ρυθμών απόθεσης που δίνεται στα **Σχήματα 6.16** και **6.17**, έγινε υπολογισμός και των αντίστοιχων μηνιαίων τιμών, όπως αυτές δίνονται στον **Πίνακα 6.12**.

Πίνακας 6.12 : Μηνιαίες τιμές του ρυθμού απόθεσης για τα ισότοπα ^7Be και ^{210}Pb βάσει των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Έτος	Μήνας	^7Be		^{210}Pb	
		Bq/		mBq/	
		(month·m ²)		(month·m ²)	
2020	Αύγουστος	39.1	± 0.7	4803	± 100
	Σεπτέμβριος	48.6	± 0.6	6674	± 114
	Οκτώβριος	74.9	± 1.3	8221	± 173
	Νοέμβριος	114	± 2.0	9368	± 377
	Δεκέμβριος	132	± 2.7	10403	± 506
2021	Ιανουάριος	132	± 2.7	10403	± 506
	Φεβρουάριος	86.6	± 2.5	5551	± 595
	Μάρτιος	69.7	± 0.8	9551	± 237
	Απρίλιος	104	± 1.6	13295	± 229
	Μάιος	10.8	± 0.2	2219	± 169
	Ιούνιος	63.3	± 0.9	4106	± 181
	Ιούλιος	27.3	± 0.6	3903	± 140
	Αύγουστος	9.8	± 0.3	1675	± 66
	Σεπτέμβριος	9.5	± 0.5	1640	± 101

Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 6.12** προκύπτει ένα μηνιαίο εύρος του ρυθμού απόθεσης, από 9.5 έως 132 Bq/(month·m²) για το ⁷Be και από 1640 έως 13295 mBq/(month·m²) για το ²¹⁰Pb.

Καθώς οι μηνιαίες τιμές του ρυθμού απόθεσης εξομαλύνουν τις εβδομαδιαίες μεταβολές των ατμοσφαιρικών αποθέσεων, έχει ενδιαφέρον η συσχέτισή τους, η οποία δίνεται στο **Σχήμα 6.19**. Η συσχέτιση που προκύπτει είναι υψηλότερη και πάλι στατιστικά σημαντική με p-value = 0.000037.



Σχήμα 6.19 : Συσχέτιση μεταξύ των μηνιαίων ρυθμών απόθεσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb.

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε και μία εκτίμηση της μέσης ετήσιας απόθεσης⁶⁴, η οποία για το ⁷Be είναι 790 ± 5 Bq/(year·m²) και για το ²¹⁰Pb είναι 78.7 ± 1.0 Bq/(year·m²), τα οποία είναι αναμενόμενα βάσει βιβλιογραφίας (Zhang, et al., 2021), όπως δίνεται στο Κεφάλαιο 2.

Επιλέγοντας μία σειρά από συνεχόμενες δειγματοληψίες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από τον Φεβρουάριο του 2021 έως και τον Σεπτέμβριο του 2021, (συνολικά 26 δειγματοληψίες) οι οποίες είναι μικρού χρονικού βήματος (7 έως 14 ημέρες η κάθε μία) και στις οποίες ήταν εμφανής η διάκριση μεταξύ ξηρών και ολικών αποθέσεων, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του λόγου μεταξύ της ξηρής και της ολικής απόθεσης για την περίοδο αυτή, ο οποίος δίνεται στον **Πίνακα 6.13**.

⁶⁴ Δεν πρόκειται για τη μέση τιμή από μετρήσεις σειράς ετών, αλλά ετήσια τιμή που έχει προκύψει από τις 12 μηνιαίες τιμές ενός έτους με το σφάλμα της σε επίπεδο 1σ.

Πίνακας 6.13 : Λόγος ξηρής/ολικής απόθεσης, για τα ^7Be και ^{210}Pb την περίοδο από 1/2/2021 έως 4/10/2021.

	^7Be Bq/m ²	^{210}Pb Bq/m ²
Ξηρή Απόθεση	64.5 ± 0.8	12.1 ± 0.3
Ολική Απόθεση	313.5 ± 3.2	29.9 ± 0.7
Συνολική* Απόθεση	378.0 ± 3.3	42.0 ± 0.8
Λόγος Ξηρής/Ολικής	0.206 ± 0.003	0.404 ± 0.014
Λόγος Ξηρής/Συνολικής	0.170 ± 0.003	0.290 ± 0.010

*Ως «Συνολική» απόθεση νοείται η απόθεση που έχει προκύψει κατά την παραπάνω χρονική περίοδο, τόσο από τις ξηρές όσο και από τις ολικές κατακρημνίσεις είναι δηλαδή το άθροισμα όλων των αποθέσεων στην παραπάνω περίοδο.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι ο κύριος μηχανισμός απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb είναι μέσω των υγρών κατακρημνίσεων. Ειδικότερα, οι υγρές αποθέσεις για το ^7Be συνεισφέρουν περί το 80%, ενώ για τον ^{210}Pb περί το 70% των συνολικών αποθέσεων.

6.3 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας των ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους και εφαρμογή σε ατμοσφαιρικά μοντέλα

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις των πάσης φύσεως ατμοσφαιρικών αποθέσεων, αν συνδυασθούν με μετεωρολογικά δεδομένα και άλλα περιβαλλοντικά μεγέθη, όπως συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών στον αέρα, αριθμό ηλιακών κηλίδων, ύψος της τροπόπαυσης κλπ., μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ ενδιαφέρουσες συσχετίσεις και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Επιπλέον, με χρήση απλών μαθηματικών μοντέλων μπορούν να οδηγήσουν και στον υπολογισμό μεγεθών όπως η μέση ταχύτητα απόθεσης των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος, καθώς και του κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστή εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε ραδιενεργά ισότοπα.

6.3.1 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής διετέθησαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ από το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, και αφορούν μετρήσεις που έγιναν στο μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής Παπάγου, όπως και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του κεφαλαίου 3. Τα δεδομένα διετέθησαν σε μορφή χρονοσειράς 10-λέπτου, από τα οποία εν συνεχεία υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες μέσες τιμές για όλη τη διάρκεια της εκάστοτε δειγματοληψίας. Το σύνολο των δεδομένων για κάθε δείγμα ατμοσφαιρικής απόθεσης που συλλέχθηκε στην παρούσα Δ.Δ. δίνεται στον **Πίνακα 6.35** που παρατίθεται στο τέλος του κεφαλαίου. Σε όλες τις συσχετίσεις που ακολουθούν η θερμοκρασία δίνεται σε $^{\circ}\text{C}$, η σχετική υγρασία σε %, η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar και η ταχύτητα του ανέμου σε km/h.

6.3.1.1 Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα υγρών αποθέσεων

Τα δείγματα αμιγώς υγρών αποθέσεων – βροχής στη συγκεκριμένη περίπτωση – που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της Δ.Δ. είναι συνολικά 6, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις έγινε συλλογή υγρής και ξηρής απόθεσης, δηλαδή ολικής απόθεσης. Για τον λόγο αυτό, το μικρό πλήθος δεδομένων υγρής απόθεσης δεν οδήγησε σε στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις. Ωστόσο, η τάση που εμφανίζουν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb εμφανίζει ενδιαφέρον και για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.14** οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης R.

Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 6.14** προκύπτει μια τάση αρνητικής συσχέτισης μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και του ύψους της βροχόπτωσης, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την αναμενόμενη θετική συσχέτιση μεταξύ τους (Caillet, et al., 2001) και μπορεί να δικαιολογηθεί:

- από το μικρό πλήθος δεδομένων,
- με την υπόθεση ότι στα δείγματα που συλλέχθηκαν, όσο αυξανόταν το ύψος βροχόπτωσης (όπου κυριαρχεί το rainout) η συγκέντρωση των ραδιενεργών

ισοτόπων στο συνολικό δείγμα μειωνόταν, λόγω της μικρής συνεισφοράς του rainout,

- ότι η ραγδιότητα της βροχόπτωσης οδηγούσε σε αύξηση του συνολικού ύψους βροχόπτωσης, χωρίς να κατακρημνίζει αποδοτικά τα περιεχόμενα στην ατμόσφαιρα ραδιενεργά ισότοπα (Taylor, et al., 2016).

Επίσης, παρατηρείται τάση αρνητικής συσχέτισης μεταξύ του ^{210}Pb και της σχετικής υγρασίας. Η αρνητική αυτή συσχέτιση θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου βροχόπτωσης η ατμόσφαιρα φθάνει σε κορεσμό υγρασίας, με αποτέλεσμα, προϊόντος του χρόνου, να μειώνεται η συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων σε αυτή.

Πίνακας 6.14 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be (Bq/L) και ^{210}Pb (mBq/L) στις υγρές κατακρημνίσεις (N=6 για το ^7Be , N=5 για τον ^{210}Pb).

	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	+0.3557	0.4890	+0.5735	0.3121
Σχετική υγρασία	-0.6943	0.1259	-0.9360	0.0192
Ατμοσφαιρική πίεση	+0.4957	0.3174	-0.3341	0.5827
Ύψος βροχόπτωσης	-0.7336	0.0970	-0.2452	0.6910
Μέση ταχύτητα ανέμου	+0.0917	0.8628	+0.2606	0.6720

Το γεγονός ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα που διατέθηκαν ήταν σε μορφή χρονοσειράς δεκαλέπτου, επέτρεψε και τον υπολογισμό της μέσης και μέγιστης έντασης βροχόπτωσης. Οι συσχετίσεις αυτές έχουν ενδιαφέρον, καθώς σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, οι χαμηλότερης έντασης βροχοπτώσεις οδηγούν σε αποδοτικότερη κατακρήμιση των ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα (Ioannidou & Papastefanou, 2006), (Taylor, et al., 2016). Οι σχετικοί υπολογισμοί μαζί με τους συντελεστές συσχέτισης για το ^7Be και τον ^{210}Pb δίνονται στους Πίνακες 6.15 και 6.16 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.15 : Μέση και Μέγιστη Ένταση Βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δειγμάτων υγρής απόθεσης.

Κωδικός δείγματος	Μέση ένταση Βροχόπτωσης	Μέγιστη ένταση Βροχόπτωσης
	mm/h	mm/h
QSA2	5.1 ± 2.1	17.4
WR001	2.5 ± 0.5	6.8
WR002	3.4 ± 1.9	12.6
WR007	1.2 ± 1.0	3.2
WR008	1.1 ± 0.5	3.4
WR021	4.4 ± 3.2	14.0

Πίνακας 6.16 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της μέσης και μέγιστης έντασης βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δειγμάτων υγρής απόθεσης.

		Μέση ένταση βροχόπτωσης	Μέγιστη ένταση βροχόπτωσης
⁷ Be	R	-0.1342	+0.4626
	p-value	0.7999	0.4327
²¹⁰ Pb	R	-0.1389	+0.5293
	p-value	0.7930	0.3590

Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν προκύπτει κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της έντασης της βροχόπτωσης και της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be και του ²¹⁰Pb στις υγρές κατακρημνίσεις, αλλά μόνον κάποιες τάσεις θετικής συσχέτισης του ρυθμού απόθεσης των δύο ισοτόπων με τη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης, πιθανόν επειδή τα δεδομένα είναι λίγα (N=6). Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά δεν έχουν προκύψει από συνεχόμενες δειγματοληψίες υγρών κατακρημνίσεων, που σημαίνει ότι δεν είναι γνωστός ο βαθμός κατά τον οποίο έχει ανανεωθεί ή όχι η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού αέρα σε ραδιενεργά ισότοπα μεταξύ των συμβάντων βροχόπτωσης.

Επισημαίνεται ότι τα δείγματα χιονιού, αν και αποτελούν δείγματα υγρής απόθεσης, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού απόθεσης συγκριτικά με τη βροχή, δεν συμπεριλαμβάνονται στις παραπάνω συσχετίσεις. Επιπλέον, επειδή κατά τη διάρκεια της Δ.Δ. συλλέχθηκαν δείγματα χιονιού από τρεις μόνον διαφορετικές χιονοπτώσεις, το πλήθος των πειραματικών δεδομένων δεν επαρκεί για την εξαγωγή συσχετίσεων με τις μετεωρολογικές συνθήκες στις περιπτώσεις αυτές.

6.3.1.2 Συσχετίσεις της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα υγρασίας

Τα δείγματα υγρασίας που συλλέχθηκαν ήταν εννέα, ενώ ανιχνεύσιμη ποσότητα ^7Be εντοπίστηκε μόνο σε επτά από αυτά. Αντίστοιχα με τις υγρές αποθέσεις, οι συσχετίσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων και των δειγμάτων υγρασίας δίνονται στον **Πίνακα 6.17**.

Πίνακας 6.17 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων και της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στα δείγματα υγρασίας. (N=7).

	^7Be	
	R	p-value
Θερμοκρασία	+0.1806	0.6984
Σχετική υγρασία	-0.0400	0.9321
Ατμοσφαιρική πίεση	-0.2914	0.5260
Μέση ταχύτητα ανέμου	+0.2905	0.5274

Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ^7Be στην υγρασία ως προς τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους.

6.3.1.3 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα ξηρών αποθέσεων

Αντίστοιχα με τα παραπάνω δείγματα, στον **Πίνακα 6.18** δίνονται οι συσχετίσεις των αποτελεσμάτων του ρυθμού απόθεσης των δειγματοληψιών ξηρής απόθεσης ως

προς τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Τα δείγματα ολικών αποθέσεων θα εξεταστούν ανεξάρτητα στην επόμενη παράγραφο, ώστε να διερευνηθούν οι συσχετίσεις στους διαφορετικούς μηχανισμούς απόθεσης.

Πίνακας 6.18 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στις ξηρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις (N=25 για το ^7Be , N=23 για τον ^{210}Pb).

	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	+0.1257	0.5494	-0.0026	0.9906
Σχετική υγρασία	+0.0173	0.9346	+0.0686	0.7558
Ατμοσφαιρική πίεση	-0.1367	0.5147	+0.0032	0.9884
Μέση ταχύτητα ανέμου	-0.1497	0.4751	-0.0872	0.6924

Όπως είναι εμφανές από τα αποτελέσματα του παραπάνω **Πίνακα 6.18**, δεν προκύπτει καμία συσχέτιση, ή εμφανής τάση, μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be , του ^{210}Pb και των μετεωρολογικών παραμέτρων που εξετάστηκαν στα δείγματα ξηρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η βαρύτητα και η διάχυση, που είναι οι βασικοί μηχανισμοί απόθεσης μεγάλων και μικρών σωματιδίων αντίστοιχα για την περίπτωση της ξηρής απόθεσης, δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις μετεωρολογικές παραμέτρους που εξετάστηκαν.

6.3.1.4 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους στα δείγματα ολικών αποθέσεων

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες παραγράφους, στον **Πίνακα 6.19** που ακολουθεί δίνονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb και των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων στα δείγματα ολικών αποθέσεων.

Πίνακας 6.19 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων ^7Be και ^{210}Pb στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις (N=12 για το ^7Be και τον ^{210}Pb).

	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	-0.1884	0.5576	-0.2232	0.4856
Σχετική υγρασία	+0.4080	0.1880	+0.2506	0.4321
Ατμοσφαιρική πίεση	+0.2093	0.5138	+0.2145	0.5032
Ύψος βροχόπτωσης	+0.0300	0.9263	-0.1500	0.6417
Μέση ταχύτητα ανέμου	-0.3173	0.3149	-0.0866	0.7890

Στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις, μέρος της απόθεσης οφείλεται και σε υγρές αποθέσεις. Για τον λόγο αυτό, όπως και με τις υγρές αποθέσεις, έγινε υπολογισμός της μέσης και της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια κάθε δειγματοληψίας και τα αποτελέσματα μαζί με τις συσχετίσεις τους ως προς τις ροές απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων δίνονται στους **Πίνακες 6.20** και **6.21**.

Από τα αποτελέσματα των **Πινάκων 6.20** και **6.21** και λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετίσεις που προέκυψαν από τις υγρές και ξηρές αποθέσεις, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συμβολή της ξηρής απόθεσης στη συγκέντρωση των αποτιθέμενων ραδιενεργών ισοτόπων δεν επιτρέπει τη συσχέτισή τους με τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Αυτό το συμπέρασμα τονίζει την ανεξαρτησία του μηχανισμού απόθεσης και την ανάγκη συνεχών δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων για την απόκτηση της πλήρους εικόνας της κίνησης των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 6.20 : Μέση και μέγιστη ένταση βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δειγμάτων ολικής ατμοσφαιρικής απόθεσης.

Κωδικός δείγματος	Μέση ένταση βροχόπτωσης	Μέγιστη ένταση βροχόπτωσης
	mm/h	mm/h
TR001	1.4 ± 0.2	8.2
TR003	1.9 ± 0.7	7.6
TR002	1.0 ± 0.4	3.0
TR004	1.4 ± 0.7	13.0
TR005	2.2 ± 0.3	13.8
TR006	0.7 ± 0.1	2.4
TR007	0.5 ± 0.1	0.8
TR008	0.4 ± 0.1	0.6
TR009	0.6 ± 0.1	1.6
TR010	1.0 ± 0.2	2.8
TR011	2.0 ± 0.7	6.2
TR012	0.9 ± 0.2	1.2

Πίνακας 6.21 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της μέσης και μέγιστης έντασης βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δειγμάτων ολικής ατμοσφαιρικής απόθεσης.

		Μέση ένταση βροχόπτωσης	Μέγιστη ένταση βροχόπτωσης
⁷ Be	R	0.1752	0.2093
	p-value	0.5860	0.5138
²¹⁰ Pb	R	0.3362	0.2713
	p-value	0.2853	0.3937

Η ομαδοποίηση των δειγμάτων που ελήφθησαν σε δείγματα υγρών, ξηρών και ολικών αποθέσεων έχει ως αποτέλεσμα τα δείγματα συχνά να μην προέρχονται από συνεχόμενες χρονικά δειγματοληψίες. Αυτό σημαίνει ότι δε λαμβάνεται υπόψη ο

χρόνος ανανέωσης της ατμόσφαιρας σε ραδιενεργά ισότοπα, ούτε η χρονική συνέχεια των ατμοσφαιρικών αποθέσεων και η χρονική ακολουθία των μετεωρολογικών μεταβολών. Για τον λόγο αυτό, επειδή ένα ποσοστό του συνόλου των δειγμάτων ελήφθη συνεχόμενα, χωρίς ενδιάμεσες χρονικές παύσεις, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση συσχετίσεων των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων για τα δείγματα αυτά στην παράγραφο που ακολουθεί.

6.3.1.5 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους σε συνεχόμενα δείγματα αποθέσεων

Για λόγους πληρότητας και με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των μετεωρολογικών συνθηκών στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, έγινε διερεύνηση της συσχέτισης των διάφορων μετεωρολογικών παραμέτρων στον ρυθμό απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb σε μία σειρά από δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων τα οποία συλλέχθηκαν συνεχόμενα. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών δίνονται στον **Πίνακα 6.22**.

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω **Πίνακα 6.22**, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των συσχετίσεων των ξηρών και των ολικών αποθέσεων με τις μετεωρολογικές παραμέτρους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως στις παραγράφους 6.3.1.3 και 6.3.1.4, στην περίπτωση των συνεχόμενων δειγματοληψιών παρατηρείται:

- στατιστικά σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ των ^7Be , ^{210}Pb και της θερμοκρασίας,
- στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ των ^7Be , ^{210}Pb και της σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 6.22 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων (N=32 για το ^7Be , N=31 για τον ^{210}Pb).

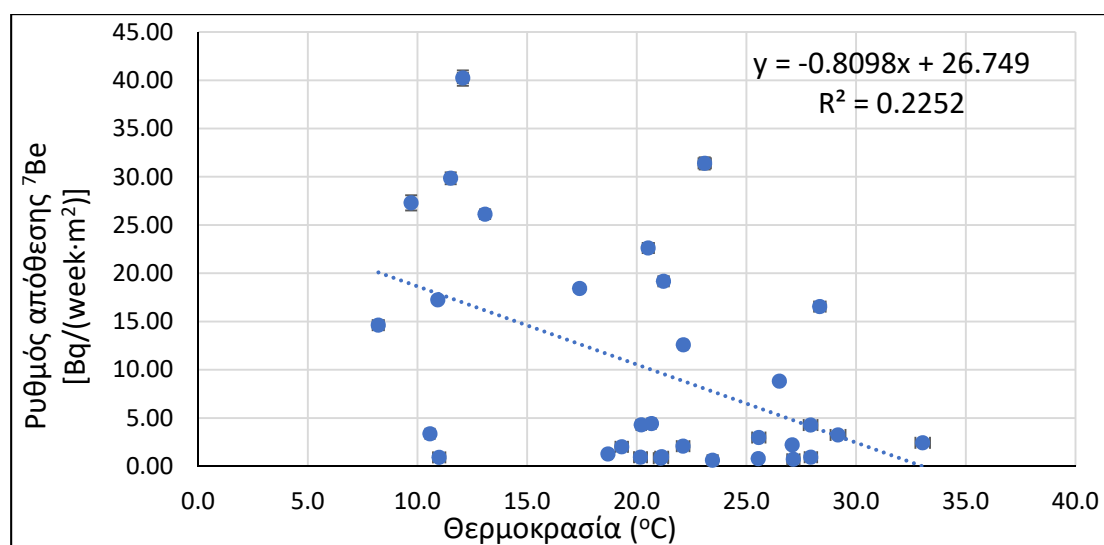
	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	-0.4746	0.0061	-0.4305	0.0156
Σχετική υγρασία	+0.6184	0.0002	+0.4987	0.0043
Ατμοσφαιρική πίεση	+0.1338	0.4654	+0.1360	0.4657
Μέση ταχύτητα ανέμου	+0.2138	0.2400	+0.2317	0.2098

Καταρχήν, το γεγονός ότι για αυτή την ομάδα των συνεχόμενων δειγμάτων διαπιστώνονται συσχετίσεις με μετεωρολογικές παραμέτρους είναι από μόνο του πολύ ενδιαφέρον και σημαντικό. Η αρνητική συσχέτιση των ρυθμών απόθεσης με τη θερμοκρασία μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα ανοδικά ρεύματα αέρα που δημιουργούνται αντιτίθενται στην κατακόρυφη απόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος. Από την άλλη πλευρά, η θετική συσχέτιση με την υγρασία αποδίδεται στο γεγονός ότι όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία:

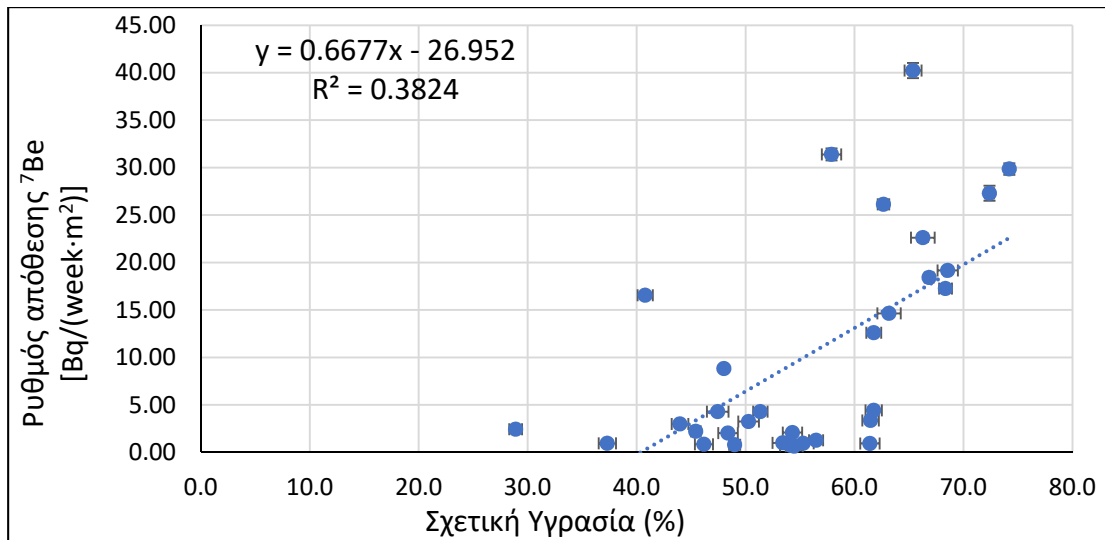
- τόσο περισσότερη είναι η συμπύκνωση υγρασίας στα σωματίδια του ατμοσφαιρικού αερολύματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της μάζας τους και άρα, υψηλότερη συμβολή της επίδρασης της βαρύτητας στην απόθεσή τους.
- τόσο αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων που οδηγεί σε μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια προσκόλλησης ραδιενεργών ισοτόπων και σωματιδίων που φέρουν ραδιενεργά ισότοπα.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλο ποσοστό των δειγματοληψιών στις οποίες παρατηρείται υψηλή σχετική υγρασία, μπορεί να σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας έλαβε χώρα φαινόμενο υγρής απόθεσης, το οποίο είναι αποδοτικότερο για την απόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, συγκριτικά με τους μηχανισμούς που διέπουν τις ξηρές αποθέσεις.

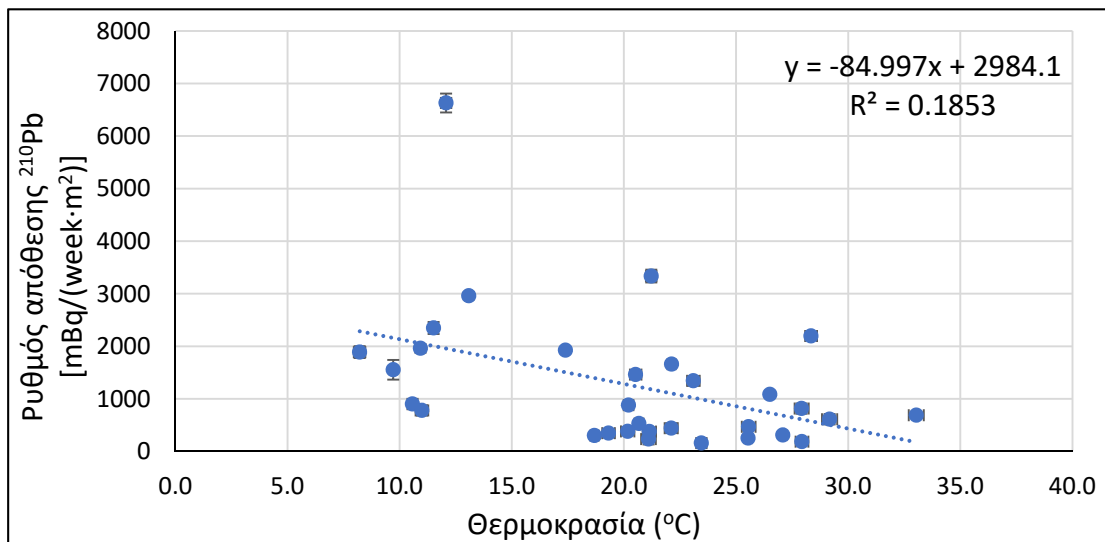
Λόγω της σημασίας των παραπάνω διαπιστώσεων, οι παραπάνω συσχετίσεις παρουσιάζονται και γραφικά στα **Σχήματα 6.20, 6.21, 6.22 και 6.23**.



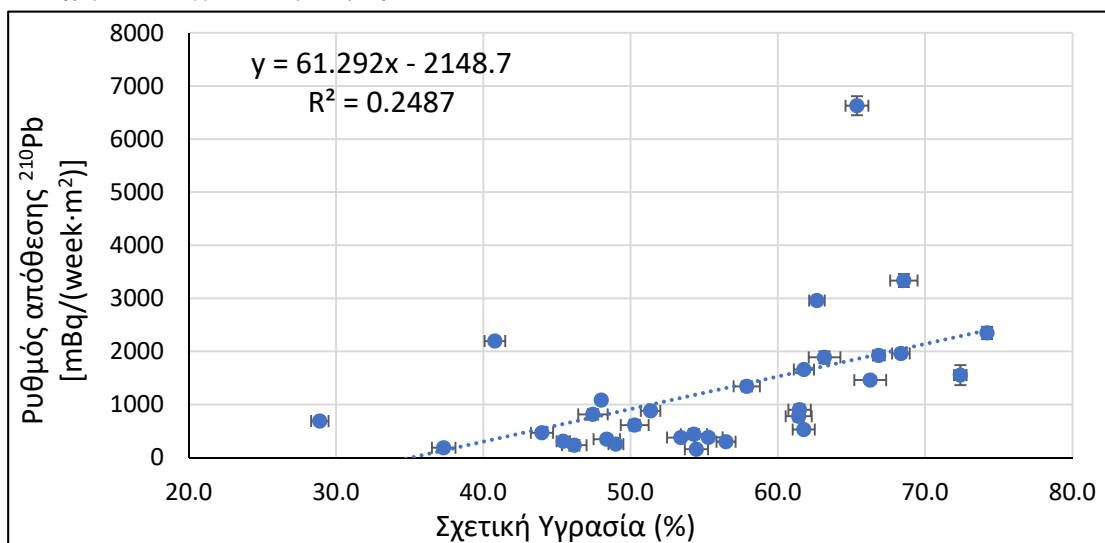
Σχήμα 6.20 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ⁷Be και της θερμοκρασίας στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.



Σχήμα 6.21 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και της σχετικής υγρασίας στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.



Σχήμα 6.22 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb και της θερμοκρασίας στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.



Σχήμα 6.23 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb και της σχετικής υγρασίας στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

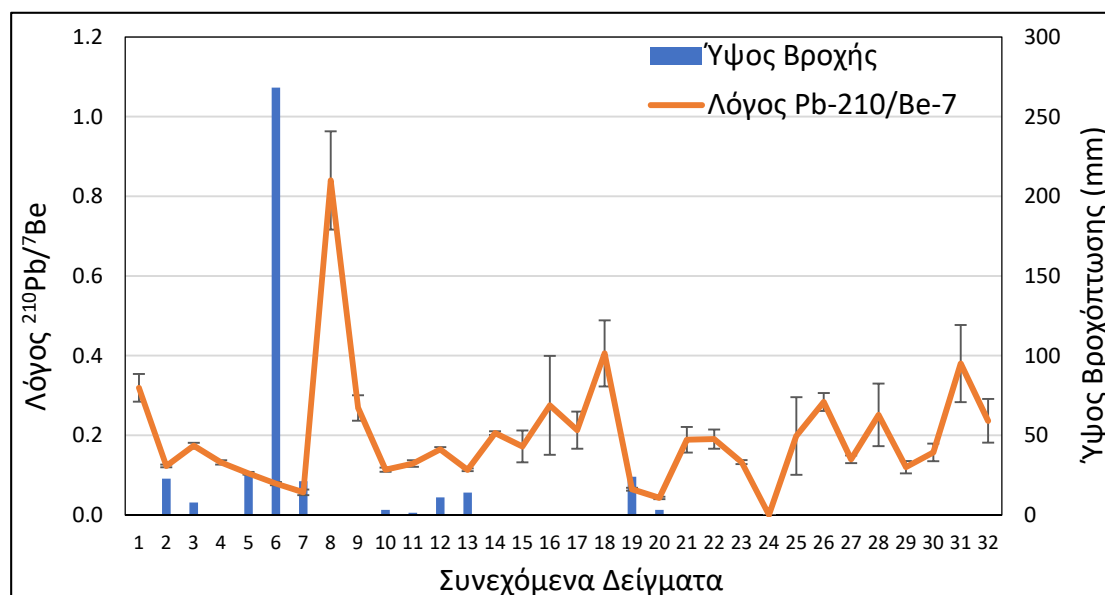
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο λόγος των ρυθμών απόθεσης $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$, ο οποίος δίνει πληροφορίες για τον διαφορετικό μηχανισμό απόθεσης των ^{210}Pb και ^7Be . Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τους μήνες που παρουσιάζονται οι περισσότερες υγρές κατακρημνίσεις αναμένεται μείωση του λόγου αυτού, ενώ αντίθετα τους ξηρότερους μήνες αναμένεται αύξηση (Koch, et al., 1996), (Lee, et al., 2007), (Tositti, et al., 2014), (Zhang, et al., 2021). Για τις συνεχόμενες μετρήσεις τις παρούσας Δ.Δ., υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του λόγου αυτού ανά δείγμα, αλλά και σε μηνιαίο επίπεδο όπως δίνεται στον **Πίνακα 6.23**. Η παραπάνω συσχέτιση φαίνεται παραστατικά στα **Σχήματα 6.24** και **6.25**, από όπου προκύπτει ότι υπάρχει ασθενής αρνητική επίδραση του ύψους βροχόπτωσης στον λόγο $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες έρευνες στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 6.23α : Λόγος των ρυθμών απόθεσης $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ ανά δείγμα στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

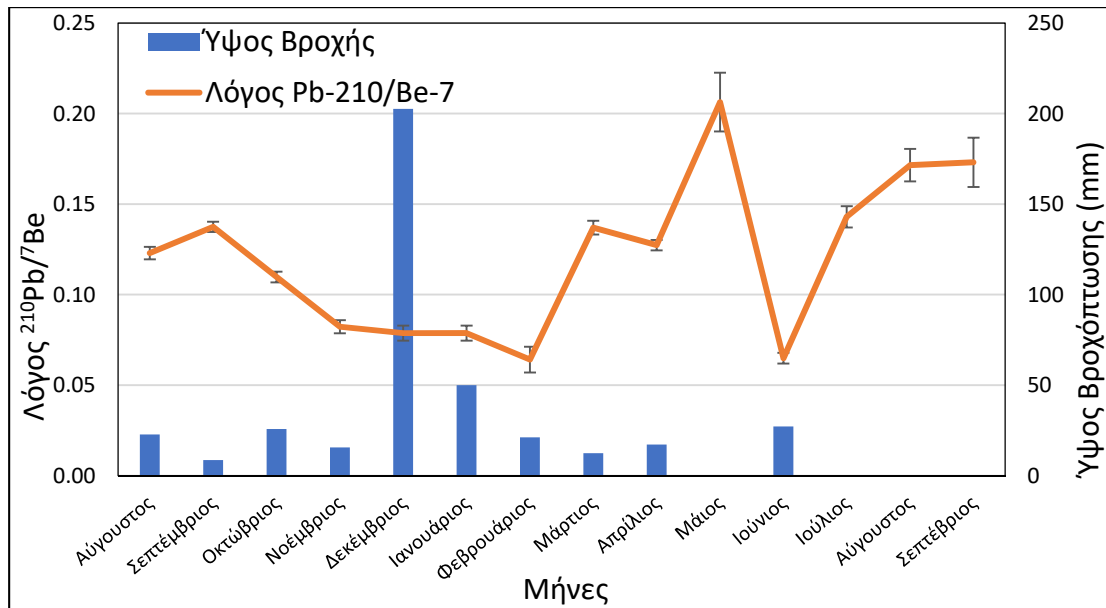
Κωδικός Δείγματος	Λόγος $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$	Κωδικός Δείγματος	Λόγος $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$
DR005	0.319 ± 0.035	DR012	0.213 ± 0.047
TR003	0.123 ± 0.003	DR013	0.406 ± 0.083
TR002	0.174 ± 0.007	TR011	0.065 ± 0.003
DR006	0.132 ± 0.005	TR012	0.043 ± 0.003
TR004	0.104 ± 0.003	DR014	0.189 ± 0.032
TR005	0.079 ± 0.004	DR015	0.190 ± 0.024
TR006	0.057 ± 0.007	DR016	0.133 ± 0.005
DR007	0.840 ± 0.123	DR017	<MDA
DR008	0.269 ± 0.032	DR018	0.198 ± 0.097
TR007	0.114 ± 0.005	DR019	0.284 ± 0.023
TR008	0.129 ± 0.008	DR020	0.140 ± 0.010
TR009	0.165 ± 0.006	DR021	0.251 ± 0.079
TR010	0.113 ± 0.003	TR013	0.120 ± 0.015
DR009	0.205 ± 0.005	DR022	0.157 ± 0.022
DR010	0.172 ± 0.040	TR014	0.380 ± 0.097
DR011	0.275 ± 0.124	DR023	0.236 ± 0.055

Πίνακας 23β : Λόγος των ρυθμών απόθεσης $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ ανά μήνα στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Μήνας	Λόγος $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$	Ύψος Βροχόπτωσης (mm)
Αύγουστος	0.123 ± 0.003	22.8
Σεπτέμβριος	0.137 ± 0.003	8.6
Οκτώβριος	0.110 ± 0.003	25.8
Νοέμβριος	0.082 ± 0.004	15.6
Δεκέμβριος	0.079 ± 0.004	202.6
Ιανουάριος	0.079 ± 0.004	50.0
Φεβρουάριος	0.064 ± 0.007	21.2
Μάρτιος	0.137 ± 0.004	12.4
Απρίλιος	0.127 ± 0.003	17.2
Μάιος	0.206 ± 0.016	0.0
Ιούνιος	0.065 ± 0.003	27.2
Ιούλιος	0.143 ± 0.006	0.0
Αύγουστος	0.171 ± 0.009	0.0
Σεπτέμβριος	0.173 ± 0.014	0.2



Σχήμα 6.24 : Λόγος ρυθμών απόθεσης $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ και ύψους βροχόπτωσης στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών δειγματοληψιών.



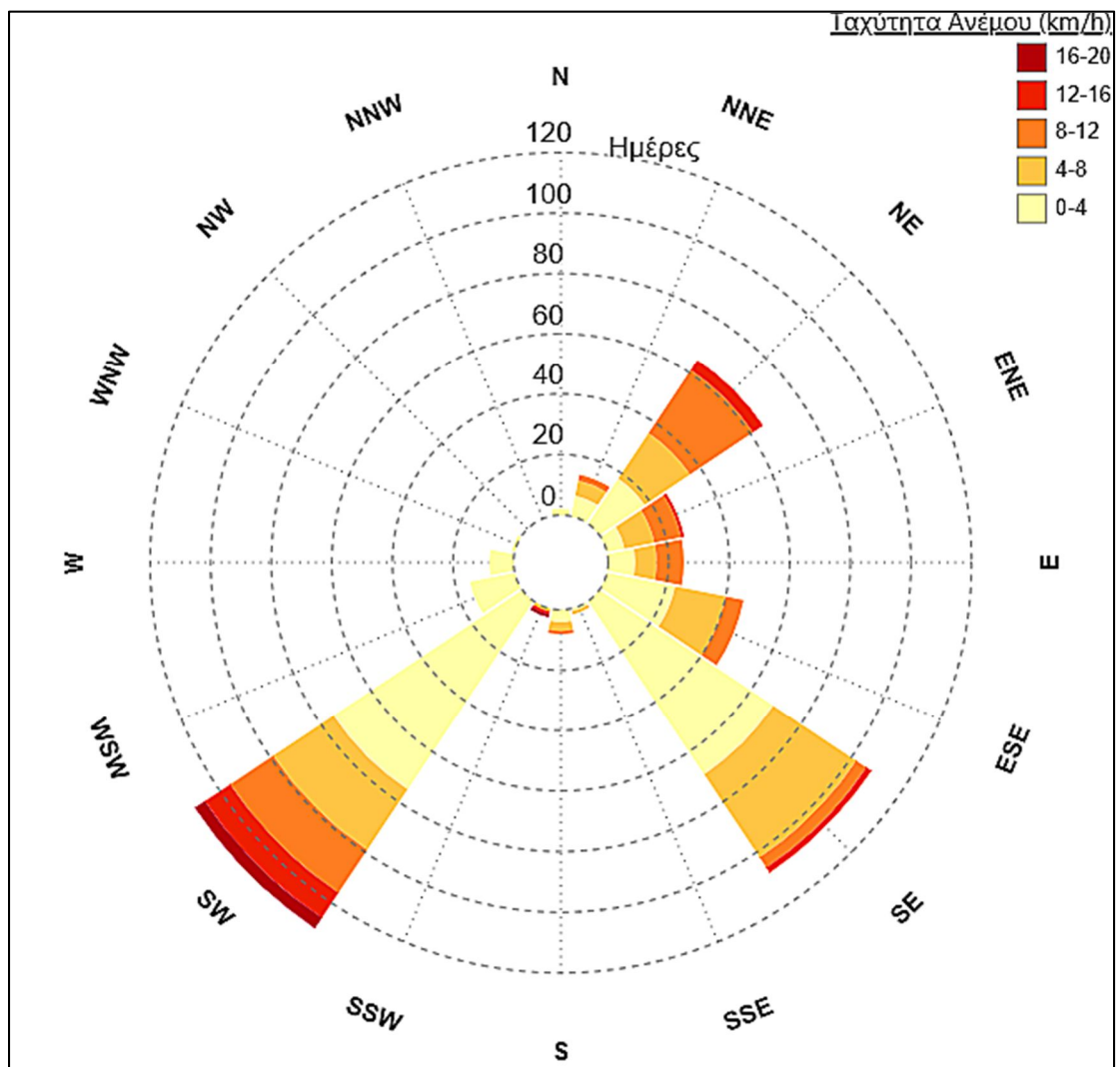
Σχήμα 6.25 : Λόγος ρυθμών απόθεσης $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ και ύψους βροχόπτωσης στους συνεχόμενους μήνες δειγματοληψίας.

Μία άλλη παράμετρος που έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί και να συσχετισθεί με τον ρυθμό απόθεσης είναι η κατεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια μίας δειγματοληψίας. Ιδιαίτερα για την περίπτωση συνεχόμενων δειγματοληψιών, αυτό κατέστη δυνατό, βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων που διετέθησαν. Στο **Σχήμα 6.26** απεικονίζεται το ρόδο ανέμου με την κατανομή των κυρίαρχων ημερήσιων κατευθύνσεων του ανέμου και της ταχύτητάς τους, για τη χρονική περίοδο 6/7/2020 έως και 4/10/2021.

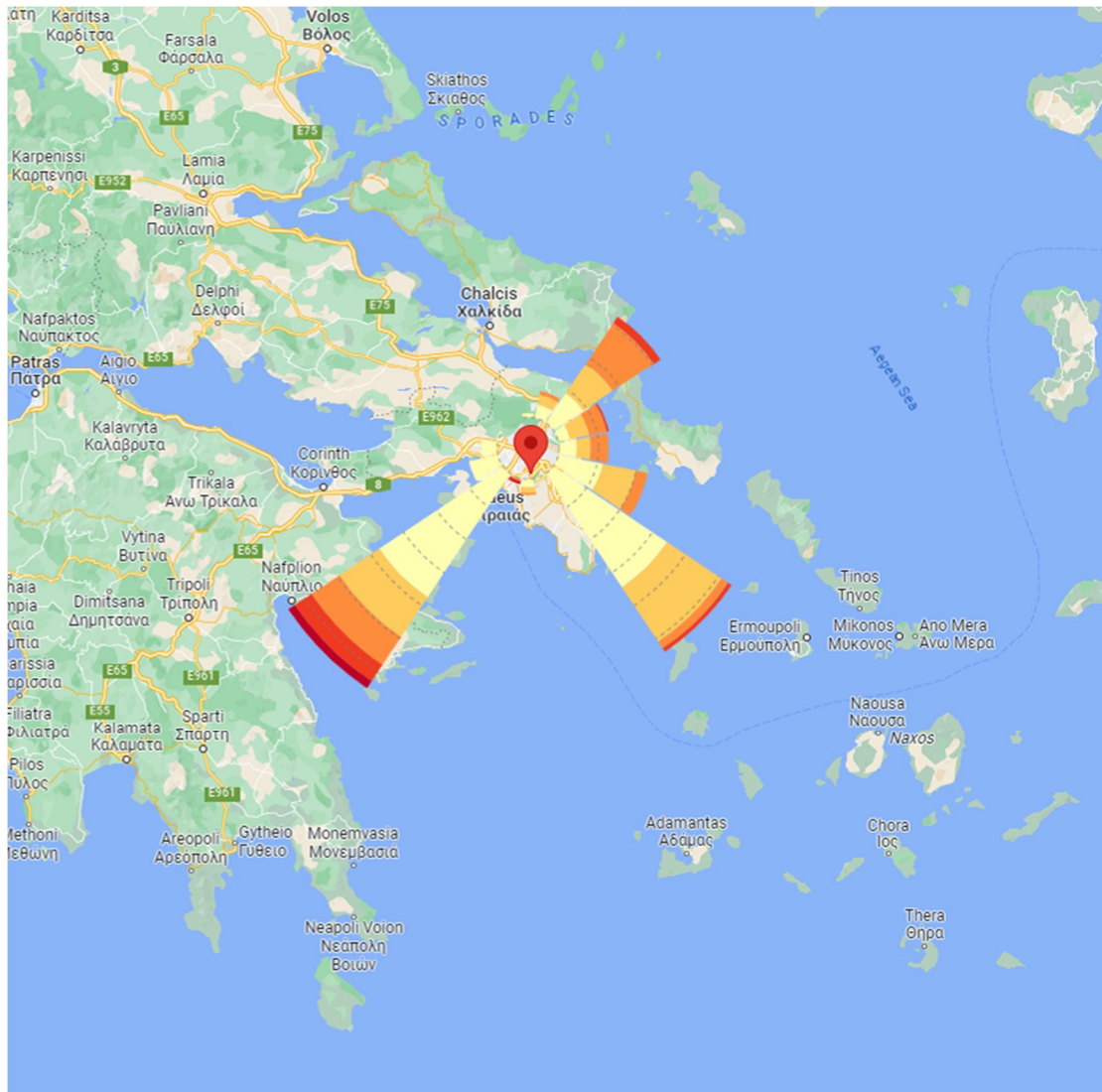
Από το παρακάτω ρόδο ανέμου προκύπτει ότι κατά την περίοδο των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων οι κυρίαρχες κατευθύνσεις του ανέμου ήταν νοτιοδυτικές (SW) πρωτίτως και δευτερευόντως νοτιοανατολικές (SE). Κρίνοντας από τη γεωγραφική θέση του μετεωρολογικού σταθμού όπου έγιναν οι μετρήσεις, οι νοτιοδυτικές κατευθύνσεις ανέμου μπορούν εύλογα να συσχετιστούν με μάζες αέρα που έχουν περάσει από μεγαλύτερη έκταση ηπειρωτικών περιοχών, συγκριτικά με τις άλλες διευθύνσεις ανέμου που καταγράφονται την περίοδο αυτή, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.27**. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από τα δεδομένα του **Πίνακα 6.35**, οι υψηλότεροι ρυθμοί απόθεσης⁶⁵ του ^{210}Pb αλλά και του ^7Be ανιχνεύθηκαν σε δείγματα που κατά τη δειγματοληψία τους η κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου ήταν η νοτιοδυτική. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί, και ενδεχομένως έχει τη σημασία του, ότι όταν πνέουν νοτιοδυτικοί άνεμοι οι αέριες

⁶⁵ Καθώς και η υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης ^{210}Pb στον αέρα.

μάζες έρχονται από την ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Πελοποννήσου, όπου, όπως είναι γνωστό, στην περιοχή της Μεγαλόπολης υπάρχουν μεγάλα κοιτάσματα λιγνίτη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, αποθέσεις ιπτάμενης τέφρας και λειτουργούν ορυχεία λιγνίτη και θερμοκοιτίτες. Μάλιστα σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Papadopoulos, et al., 2011), (Rouni, et al., 2001), (Simopoulos & Angelopoulos, 1987), στην περιοχή παρατηρείται αυξημένη εκροή ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 6.26 : Ρόδο ανέμου με την κατανομή των κυρίαρχων ημερήσιων κατευθύνσεων του ανέμου και της ταχύτητάς τους για τη χρονική περίοδο 6/7/2020 έως και 4/10/2021.



Σχήμα 6.27 : Κύριες κατευθύνσεις ανέμου και η γεωγραφική τοποθέτησή τους για τη χρονική περίοδο 6/7/2020 έως και 4/10/2021.

6.3.1.6 Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb σε φίλτρα αέρα με μετεωρολογικές παραμέτρους

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, παράλληλα με ορισμένες δειγματοληψίες αποθέσεων συλλέχθηκαν και φίλτρα αέρα, είτε με πλήρη είτε με μερική χρονική αλληλοεπικάλυψη. Για την πληρότητα των συγκρίσεων των συγκεντρώσεων ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb με τα μετεωρολογικά δεδομένα, στον **Πίνακα 6.24** δίνονται οι σχετικές συσχέτισεις των συγκεντρώσεων των ισοτόπων αυτών στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα, με τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Από τα παρακάτω αποτελέσματα προκύπτει θετική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του ^7Be και του ^{210}Pb και αρνητική συσχέτιση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και της συγκέντρωσης του ^7Be , κάτι το

οποίο είναι αναμενόμενο και από αντίστοιχες προηγούμενες μελέτες (Mohan, et al., 2018), (Ioannidou, et al., 2005), (Duenas, et al., 2009), (Pham, et al., 2011), (Huang, et al., 2022).

Πίνακας 6.24 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων ^7Be και ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	+0.7762	0.0004	+0.5903	0.0161
Σχετική Υγρασία	-0.7294	0.0013	-0.3797	0.1469
Ατμοσφαιρική Πίεση	-0.2982	0.2619	+0.1095	0.6864
Μέση Ταχύτητα Ανέμου	+0.2191	0.4149	+0.0768	0.7774

6.3.2 Συσχετίσεις ρυθμών απόθεσης και συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb με άλλους τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, έχουν γίνει κατά καιρούς μελέτες για τη διερεύνηση της ενδεχόμενης συσχέτισης μεταξύ ραδιενεργών ισοτόπων που ανιχνεύονται στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα με διάφορους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές. Για τη διερεύνηση αυτή στα πλαίσια της Δ.Δ., χρησιμοποιήθηκαν τα ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας [YΠΕΝ, τελευταία πρόσβαση 7/6/2023]. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα δεδομένα ατμοσφαιρικών ρυπαντών που καταγράφονται από τον σταθμό της Αγ. Παρασκευής, καθώς είναι ο πλησιέστερος σταθμός στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και ο μόνος με διαθέσιμη βάση δεδομένων έως και το έτος 2021. Οι συσχετίσεις που ακολουθούν αφορούν τις ξηρές αποθέσεις, τις ολικές αποθέσεις, καθώς και τις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Τα δεδομένα από τις δειγματοληψίες υγρών αποθέσεων και υγρασίας βρίσκονται εκτός του χρονικού εύρους των ελεύθερα διαθέσιμων δεδομένων ατμοσφαιρικών ρυπαντών και δε συμπεριλαμβάνονται στις συσχετίσεις που ακολουθούν.

Τα δεδομένα των ατμοσφαιρικών ρυπαντών δίνονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ng/m^3 και αφορούν τις μέσες εβδομαδιαίες συγκεντρώσεις τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Το σύνολο των δεδομένων των ατμοσφαιρικών ρυπαντών που αντιστοιχούν χρονικά με τα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων προς συσχέτιση δίνονται στον **Πίνακα 6.36** στην παράγραφο 6.5 στο τέλος του κεφαλαίου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα δεδομένα ατμοσφαιρικών ρυπαντών που διατίθενται αφορούν στη συγκέντρωσή τους στον αέρα, κάτι το οποίο αναμένεται να επηρεάσει την ισχύ των συσχετίσεων, καθώς δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα και τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα του **Πίνακα 6.11**.

6.3.2.1 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα

Βάσει των δεδομένων που δόθηκαν στον **Πίνακα 6.36**, οι συσχετίσεις μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb και των ατμοσφαιρικών ρυπαντών δίνονται στον **Πίνακα 6.25**.

Πίνακας 6.25 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις ξηρές ατμοσφαιρικές αποθέσεις με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
PM2.5*	-0.1044	0.6194	-0.0005	0.9982
PM10*	-0.0490	0.8161	+0.0346	0.8755
NO*	+0.2345	0.2592	+0.3621	0.0895
NO ₂ *	+0.0686	0.7446	+0.2102	0.3357
O ₃ *	-0.0023	0.9913	-0.1929	0.3779
As**	-0.0002	0.9993	-0.1095	0.6554
Cd**	+0.0510	0.8262	+0.0927	0.7058
Ni**	-0.0412	0.8593	-0.0361	0.8834
Pb**	-0.2095	0.3621	-0.2642	0.2744
BaP***	+0.0574	0.8522	+0.1459	0.6876

*N=25 για το ^7Be , N=23 για τον ^{210}Pb

** N=21 για το ^7Be , N=20 για τον ^{210}Pb

*** N=12 για το ^7Be , N=11 για τον ^{210}Pb

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση ή τάση μεταξύ των συγκεντρώσεων του ^7Be και του ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις και των συγκεντρώσεων των διάφορων ατμοσφαιρικών ρυπαντών στην ατμόσφαιρα.

6.3.2.2 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα

Αντίστοιχα με τις ξηρές αποθέσεις, στον **Πίνακα 6.26** που ακολουθεί δίνονται τα αποτελέσματα των συσχετίσεων μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις ολικές αποθέσεις με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

Πίνακας 6.26 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
PM2.5*	+0.4156	0.1579	+0.3874	0.2134
PM10*	+0.2811	0.3522	+0.3779	0.2258
NO*	+0.5253	0.0653	+0.3537	0.2594
NO ₂ *	+0.3791	0.2014	+0.0678	0.8342
O ₃ *	-0.2105	0.4900	-0.2750	0.3870
As**	-0.4869	0.1084	-0.3528	0.2872
Cd**	-0.1411	0.6618	+0.1679	0.6217
Ni**	-0.1265	0.6952	+0.2360	0.4848
Pb**	-0.2512	0.4310	-0.2895	0.3879
BaP***	+0.3878	0.2386	+0.2914	0.4140

*N=12 για το ^7Be , N=12 για τον ^{210}Pb

** N=11 για το ^7Be , N=11 για τον ^{210}Pb

*** N=10 για το ^7Be , N=10 για τον ^{210}Pb

Παρά το γεγονός ότι στο σύνολο των ανωτέρω συσχετίσεων οι συντελεστές συσχέτισης είναι υψηλότεροι από αυτούς των αντίστοιχων συσχετίσεων με τις ξηρές αποθέσεις, και στην περίπτωση αυτή δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση μεταξύ των

ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις ολικές ατμοσφαιρικές αποθέσεις και των συγκεντρώσεων των διάφορων ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

6.3.2.3 Συσχετίσεις των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα

Όπως με τις μετεωρολογικές παραμέτρους, έτσι και με τους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, για την πληρότητα της παρούσας μελέτης, στον **Πίνακα 6.27** που ακολουθεί δίνονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρυπαντών με τους ρυθμούς απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στα δείγματα των συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Πίνακας 6.27 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις συνεχόμενες ατμοσφαιρικές αποθέσεις με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
PM2.5*	-0.2478	0.1715	-0.1425	0.4444
PM10*	-0.3448	0.0533	-0.2105	0.2557
NO*	+0.3496	0.0498	+0.3394	0.0618
NO ₂ *	+0.1503	0.4116	+0.1221	0.5129
O ₃ *	-0.4595	0.0082	-0.4387	0.0136
As**	-0.0245	0.9015	-0.1034	0.6078
Cd**	+0.2827	0.1449	+0.2977	0.1315
Ni**	+0.1766	0.3687	+0.2921	0.1393
Pb**	-0.2066	0.2915	-0.2373	0.2333
BaP***	+0.6125	0.0053	+0.4944	0.0370

*N=32 για το ^7Be , N=31 για τον ^{210}Pb

*** N=28 για το ^7Be , N=27 για τον ^{210}Pb

*** N=19 για το ^7Be , N=18 για τον ^{210}Pb

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, για τους περισσότερες ατμοσφαιρικούς ρύπους δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτουν όχι μόνον υψηλότερες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, αλλά και στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις :

- μεταξύ του όζοντος (O_3) με το 7Be και τον ^{210}Pb (στατιστικά σημαντική αρνητική συσχέτιση),
- μεταξύ του βενζο[α]πυρένιου (BaP)⁶⁶ με το 7Be και τον ^{210}Pb (στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση),
- μεταξύ του μονοξειδίου του αζώτου (NO) και του 7Be (στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση).

Αντίστοιχα με τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.3.1.5, η χρήση των συνεχόμενων δειγματοληπιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων οδηγεί σε στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ ορισμένων ατμοσφαιρικών ρυπαντών και των ρυθμών απόθεσης του 7Be και του ^{210}Pb , ενώ δεν παρατηρούνται συσχετίσεις ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα ανάλογα με το είδος της απόθεσης (ξηρές ή ολικές).

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Huang, et al., 2022), (Stohl, et al., 2000), η συγκέντρωση του 7Be στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει θετική συσχέτιση με τη συγκέντρωση του O_3 και αποτελεί δείκτη εισβολών στρατοσφαιρικής προέλευσης αερίων μαζών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, γεγονός που τονίζει ότι οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του 7Be στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις δεν ακολουθούν την ίδια τάση με τους μηχανισμούς που εμπλουτίζουν την ατμόσφαιρα με το εν λόγω ισότοπο. Επιπροσθέτως, η αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του O_3 αποδίδεται στο γεγονός ότι η απόθεση του ^{210}Pb ακολουθεί την ίδια τάση με αυτή του 7Be , καθώς και ότι στην περίπτωση που υπάρχει σημαντική επίδραση στρατοσφαιρικών εισβολών αέρα παρατηρείται αντίστοιχη θετική συσχέτιση μεταξύ O_3 με ^{210}Pb στον ατμοσφαιρικό αέρα, λόγω των συγκεντρώσεων του στρατοσφαιρικού ^{210}Pb (^{210}Pb και ^{222}Rn που λόγω ανοδικών ρευμάτων και ανάμιξης στρατοσφαιρικού αέρα «παγιδεύτηκε» στην στρατόσφαιρα) (Liu, et al., 2004). Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να προστεθεί ότι η παρουσία του O_3 στον ατμοσφαιρικό αέρα οφείλεται σε σημαντικό βαθμό και σε ανθρωπογενείς

⁶⁶ Το βενζο[α]πυρένιου (BaP) είναι ένας πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας. Μπορεί να σχηματιστεί κατά τη διάρκεια ατελούς καύσης ή πυρόλυσης οργανικών ουσιών κατά τη διάρκεια βιομηχανικών διεργασιών και επεξεργασίας τροφίμων. Η κύρια πηγή ατμοσφαιρικού BaP είναι η καύση ξύλου σε κατοικίες, ενώ βρίσκεται επίσης στα καυσαέρια των αυτοκινήτων (ειδικά από κινητήρες ντίζελ), σε όλους τους καπνούς που προέρχονται από την καύση οργανικών υλικών (συμπεριλαμβανομένου του καπνού του τσιγάρου) και στα ψημένα τρόφιμα. Το BaP είναι τοξικό για τα ανθρώπινα γονίδια και έχει ταξινομηθεί ως παράγοντας της Ομάδας 1 (δηλαδή καρκινογόνος για τον άνθρωπο) από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.

παράγοντες (δηλαδή από ρυπαντές που εκλύονται από μηχανές εσωτερικής καύσης, εργοστάσια παραγωγή ενέργειας, διυλιστήρια κλπ.) που μπορεί να επηρεάσουν τις συσχετίσεις μεταξύ του O₃ και των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων (Μπασιάς, 2013). Η στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ των ρυθμών απόθεσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb με τη συγκέντρωση του BaP, καθώς και της απόθεσης του ⁷Be με τη συγκέντρωση του NO χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, καθώς οι κύριες πηγές προέλευσης των BaP και NO (ατελής καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσης) διαφέρουν σημαντικά από τις πηγές προέλευσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb. Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν παρατηρείται κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση των ρυθμών απόθεσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb με τα σωματίδια PM10, κάτι το οποίο αναμενόταν βάσει προηγούμενων μελετών (Mohan, et al., 2018), (Mohan, et al., 2019), (Zalewska, et al., 2021). Πάντως, απουσία συσχέτισης μεταξύ των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ⁷Be και PM10 παρατηρήθηκε και στην έρευνα των (Chao, et al., 2014).

6.3.2.4 Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων ενεργότητας ⁷Be και ²¹⁰Pb στο αερόλυμα με τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα

Η συγκεκριμένη σειρά συσχετίσεων ολοκληρώνεται με τις συσχετίσεις των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στην ατμόσφαιρα με τις συγκεντρώσεις ενεργότητας του ⁷Be και του ²¹⁰Pb στα φίλτρα αέρα που συλλέχθηκαν παράλληλα με ορισμένες ατμοσφαιρικές αποθέσεις, όπως αυτά δόθηκαν στον **Πίνακα 6.8**. Οι σχετικές συσχετίσεις δίνονται στον **Πίνακα 6.28**, όπου βάσει των αποτελεσμάτων του προκύπτουν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις:

- μεταξύ του όζοντος (O₃) με το ⁷Be (στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση),
- μεταξύ του PM2.5 με το ²¹⁰Pb (στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση),
- μεταξύ του PM10 με το ²¹⁰Pb (στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση).

Η ισχυρή θετική συσχέτιση του ⁷Be με το O₃ στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι αναμενόμενη και αποτελεί δείκτη εισβολών στρατοσφαιρικής προέλευσης αερίων μαζών (Huang, et al., 2022), (Stohl, et al., 2000). Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πως η αντίστοιχη συσχέτιση είναι αρνητική στην περίπτωση των ατμοσφαιρικών αποθέσεων, τονίζοντας τη διαφορά της τάσης που ακολουθούν οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα με τους αντίστοιχους ρυθμούς απόθεσής τους. Ακόμα, η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ του ²¹⁰Pb και των

σωματιδίων PM2.5 και PM10 είναι η αναμενόμενη, καθώς ο ^{210}Pb αποτελεί καλό ραδιοϊχνηθέτη των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος, γεγονός που έχει επιβεβαιωθεί και από προηγούμενες μελέτες στη βιβλιογραφία (Turekian, et al., 1983), (Mattsson, et al., 1993), (Martin & McBride, 2012), (Genthon & Armengaud, 1995), (Mohan, et al., 2019). Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στην περίπτωση του BaP παρατηρείται μια τάση πιθανής αρνητικής συσχέτισης, η οποία όμως δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων.

Πίνακας 6.28 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας του ^7Be και του ^{210}Pb στα φίλτρα αέρα με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών.

Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές	^7Be		^{210}Pb	
	R	p-value	R	p-value
PM2.5*	+0.3211	0.2253	+0.6937	0.0029
PM10*	+0.4301	0.0963	+0.7009	0.0025
NO*	-0.1884	0.4847	-0.1342	0.6202
NO ₂ *	-0.1273	0.6385	+0.3723	0.1556
O ₃ *	+0.8337	0.0001	+0.3348	0.2050
As**	+0.1987	0.5359	+0.3158	0.3173
Cd**	-0.4670	0.1259	-0.3066	0.3324
Ni**	+0.2229	0.4862	+0.3293	0.2959
Pb**	+0.2429	0.4468	+0.2088	0.5149
BaP***	-0.8331	0.0798	-0.7533	0.1415

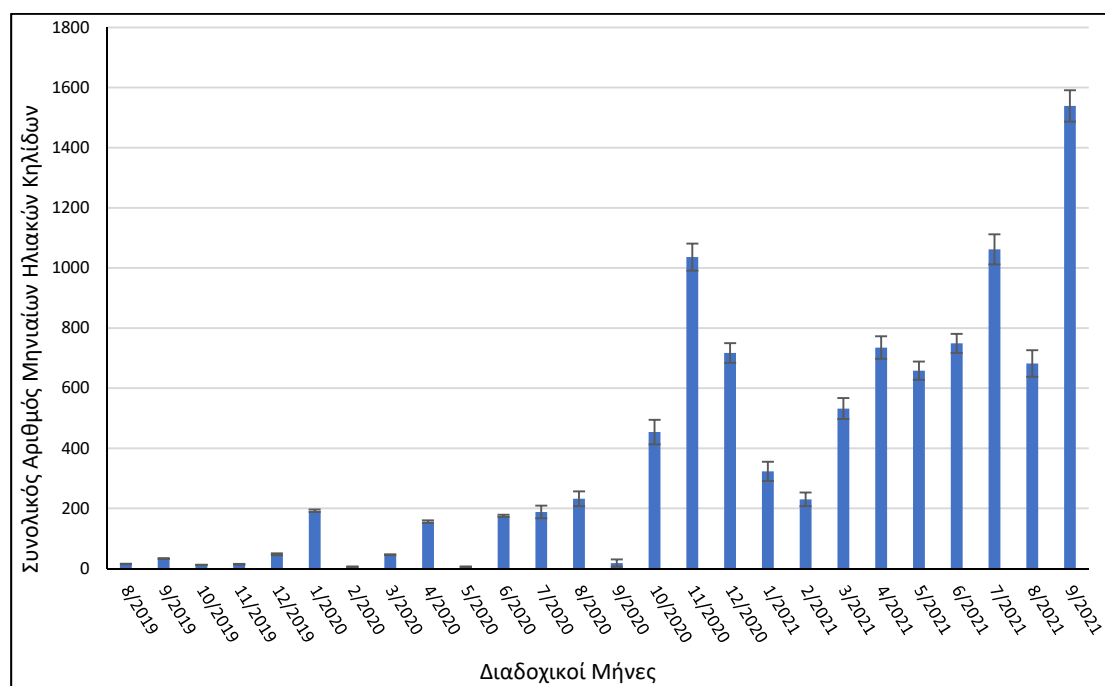
*N=16, **N=12, ***N=5

6.3.3 Συσχέτιση του ρυθμού απόθεσης του ^7Be με το πλήθος των ηλιακών κηλίδων

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Gerasopoulos, et al., 2003), (Chao, et al., 2012), (Mohan, et al., 2018), (Pham, et al., 2011), αναμένεται η ύπαρξη αρνητικής συσχέτισης μεταξύ του πλήθους των ηλιακών κηλίδων και τις συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα. Η συσχέτιση αυτή συνήθως μελετάται για μεγάλα χρονικά διαστήματα που είναι ίσα ή και ξεπερνούν σε διάρκεια τον 11ετή κύκλο της ηλιακής δραστηριότητας. Στην παρούσα Δ.Δ. μελετήθηκε η εν λόγω συσχέτιση συγκρίνοντας τους μηνιαίους ρυθμούς απόθεσης

του ^7Be στα δείγματα των συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων, με το συνολικό μηνιαίο πλήθος των ηλιακών κηλίδων, και επιπλέον έγινε διερεύνηση της καθυστερημένης επίδρασης που έχει το πλήθος των ηλιακών κηλίδων στο ρυθμό απόθεσης του ^7Be στην επιφάνεια του εδάφους όπου και μετριέται⁶⁷. Τα δεδομένα του πλήθους των ηλιακών κηλίδων αντλήθηκαν από το Βασιλικό Παρατηρητήριο του Βελγίου ([SILSO](#), Τελευταία Πρόσβαση 7/6/2023).

Στο **Σχήμα 6.28** παρουσιάζεται η μηνιαία κύμανση του συνολικού πλήθους ηλιακών κηλίδων από τον Αύγουστο του 2019 έως και τον Σεπτέμβριο του 2021, καθώς για αυτούς τους μήνες εξετάστηκε η καθυστέρηση της επίδρασης των ηλιακών κηλίδων στη συγκέντρωση του ^7Be στις συνεχόμενες ατμοσφαιρικές αποθέσεις. Η καθυστερημένη αυτή επίδραση αναφέρεται στη βιβλιογραφία και οφείλεται στον χρόνο που απαιτείται, ώστε το ^7Be να μεταφερθεί από το σημείο παραγωγής του στην ανώτερη ατμόσφαιρα, μέχρι την τροπόσφαιρα και κατ' επέκταση, να αποτεθεί στην επιφάνεια της Γης. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των (Gerasopoulos, et al., 2003), προκύπτει ότι η κύμανση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων επιδρά στη συγκέντρωση του ^7Be στην ατμόσφαιρα στο επίπεδο του εδάφους με χρονική καθυστέρηση 5 μηνών.



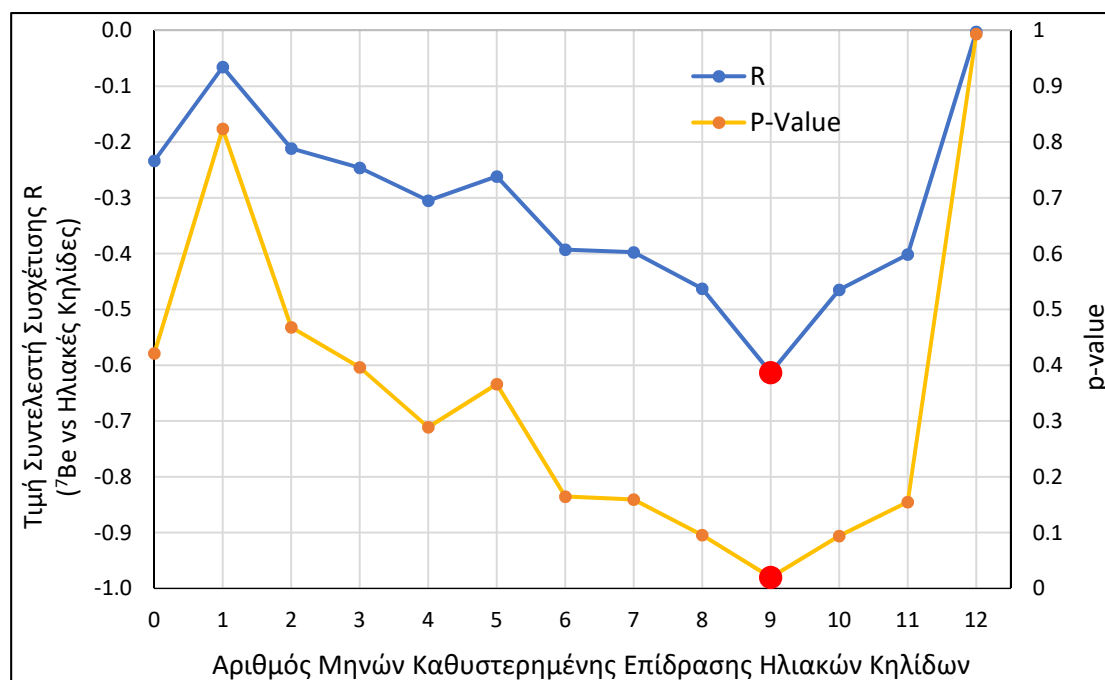
Σχήμα 6.28 : Πλήθος μηνιαίων ηλιακών κηλίδων από τον Αύγουστο του 2019 έως και τον Σεπτέμβριο του 2021.

⁶⁷ Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη της καθυστερημένης επίδρασης του πλήθους των ηλιακών κηλίδων στη συγκέντρωση του ^7Be στον αέρα. Αυτό δεν έγινε στα πλαίσια της Δ.Δ. επειδή οι μετρήσεις της συγκέντρωσης ^7Be στον αέρα που έγιναν στα πλαίσια της Διατριβής δεν ήταν συνεχείς.

Η διαδικασία διερεύνησης της καθυστερημένης επίδρασης του πλήθους των ηλιακών κηλίδων στον ρυθμό απόθεσης του ^7Be έγινε ως ακολούθως:

- i. Για μηδενική χρονική καθυστέρηση, σε κάθε μηνιαία τιμή του ρυθμού απόθεσης ^7Be αντιστοιχίζεται ο μηνιαίος αριθμός ηλιακών κηλίδων.
- ii. Για χρονική καθυστέρηση ενός μήνα, σε κάθε μηνιαία τιμή του ρυθμού απόθεσης ^7Be αντιστοιχίζεται το μηνιαίο πλήθος ηλιακών κηλίδων του προηγούμενου μήνα κ.ο.κ..
- iii. Τα δεδομένα για κάθε βήμα καθυστέρησης προσαρμόζονται σε γραμμικό μοντέλο, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης R και η τιμή p-value για τον έλεγχο της στατιστικής υπόθεσης σημαντικότητάς του.

Στο **Σχήμα 6.29**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης που έχει η καθυστερημένη επίδραση του πλήθους των ηλιακών κηλίδων στον ρυθμό απόθεσης του ^7Be . Όπως παρατηρείται, η μέγιστη συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be με το μηνιαίο πλήθος ηλιακών κηλίδων εντοπίζεται με χρονική καθυστέρηση 9 μηνών. Η διαφορά στην εκτίμηση της καθυστέρησης από 5 σε 9 μήνες δεν θεωρείται σημαντική. Ωστόσο, η μελέτη της καθυστερημένης αυτής επίδρασης χρήζει περισσότερης διερεύνησης με δειγματοληψίες σε μεγαλύτερη χρονική περίοδο.



Σχήμα 6.29 : Συντελεστής συσχέτισης R μεταξύ του μηνιαίου πλήθους ηλιακών κηλίδων και του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στις συνεχόμενες ατμοσφαιρικές αποθέσεις (6/7/2020 έως και 4/10/2021) συναρτήσεως της χρονικής καθυστέρησης της επίδρασης του πλήθους των ηλιακών κηλίδων.

6.3.4 Συσχέτιση του ρυθμού απόθεσης του ^7Be με το ύψος της τροπόπαυσης στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Η τροπόπαυση αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ της τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας. Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού αερολύματος στη στρατόσφαιρα είναι πολύ μεγαλύτερος (1-2 χρόνια) συγκριτικά με τον χρόνο παραμονής στην τροπόσφαιρα που είναι μερικές εβδομάδες. Για τον λόγο αυτό, η στρατόσφαιρα αποτελεί μια “δεξαμενή” ^7Be το οποίο είτε εισέρχεται σταδιακά στην τροπόσφαιρα μέσω της τροπόπαυσης είτε εισέρχεται σε μεγαλύτερες ποσότητες ως αποτέλεσμα της κατακόρυφης ανάμιξης αερίων μαζών μεταξύ στρατόσφαιρας και τροπόσφαιρας, ένα φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται ως αναδίπλωση της τροπόπαυσης.

Γενικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε άνοδο των αερίων μαζών, που με τη σειρά τους οδηγούν σε κάθοδο αέριες μάζες πλούσιες σε ^7Be οι οποίες βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας. Η κίνηση αυτή των αερίων μαζών είναι που οδηγεί και στη θετική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και του ύψους της τροπόπαυσης, με αποτέλεσμα τη θετική συσχέτιση μεταξύ του ύψους της τροπόπαυσης και της συγκέντρωσης του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα (Ioannidou, et al., 2014). Ωστόσο, η απόθεση τελικά των σωματιδίων του αερολύματος στην επιφάνεια της Γης επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, με κυρίαρχο τις υγρές κατακρημνίσεις. Για τον λόγο αυτό έχει ενδιαφέρον και η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις με το ύψος της τροπόπαυσης.

Το ύψος της τροπόπαυσης μεταβάλλεται χρονικά και εξαρτάται εκτός των άλλων από το γεωγραφικό πλάτος. Δεν υπάρχουν ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα για το ύψος της τροπόπαυσης, υπάρχουν όμως διαθέσιμα δεδομένα για τη θερμοκρασία και την πίεση της τροπόπαυσης, καθώς και για το γεωδυναμικό ύψος⁶⁸, την πίεση και τη θερμοκρασία κάθε ισοβαρούς επιπέδου της ατμόσφαιρας. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα είναι δυνατός ο υπολογισμός του ύψους της τροπόπαυσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναφέρεται στη μελέτη των (Ioannidou, et al.,

⁶⁸ Το γεωδυναμικό ύψος προσεγγίζει το πραγματικό ύψος μιας ισοβαρούς επιφάνειας πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (στην οποία αντιστοιχεί η τιμή «0»).

2014). Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό του ύψους της τροπόπαυσης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις⁶⁹:

$$Z_1 = \frac{287 \cdot T_{avg_i}}{9.81} \cdot \ln\left(\frac{P_{1i}}{P_{tri}}\right) + GH_{1i} \quad (6.1)$$

$$Z_2 = \frac{287 \cdot T_{avg_i}}{9.81} \cdot \ln\left(\frac{P_{2i}}{P_{tri}}\right) + GH_{2i} \quad (6.2)$$

$$T_{avg_i} = \frac{T_{tri} + T_{iso_i}}{2} \quad (6.3)$$

$$Z = \frac{Z_1 + Z_2}{2} \quad (6.4)$$

όπου:

το *i* αναφέρεται σε κάθε ημέρα χωριστά από 1/1/2018 έως και 31/12/2022,

T_{tri} : Η θερμοκρασία του αέρα στην τροπόπαυση.

T_{iso_i} : Η θερμοκρασία του αέρα στο πλησιέστερο στην τροπόπαυση ισοβαρές επίπεδο.

T_{avg_i} : Η μέση θερμοκρασία του αέρα μεταξύ της θερμοκρασίας της τροπόπαυσης και του πλησιέστερου ισοβαρούς επιπέδου.

P_{1i} : Η πίεση του ισοβαρούς επιπέδου κάτω από την τροπόπαυση.

P_{2i} : Η πίεση του ισοβαρούς επιπέδου πάνω από την τροπόπαυση.

P_{tri} : Η πίεση του αέρα στην τροπόπαυση.

GH_{1i} : Το γεωδυναμικό ύψος του ισοβαρούς επιπέδου κάτω από την τροπόπαυση.

GH_{2i} : Το γεωδυναμικό ύψος του ισοβαρούς επιπέδου πάνω από την τροπόπαυση.

Z_1 : Το ύψος της τροπόπαυσης όπως αυτό προσδιορίζεται από το πλησιέστερο ισοβαρές επίπεδο κάτω από την τροπόπαυση.

Z_2 : Το ύψος της τροπόπαυσης όπως αυτό προσδιορίζεται από το πλησιέστερο ισοβαρές επίπεδο πάνω από την τροπόπαυση.

Z : Ύψος της τροπόπαυσης όπως προσδιορίζεται από το μέσο όρο των Z_1 και Z_2 .

⁶⁹ Στις εξισώσεις 6.1 και 6.2 ο αριθμός «9.81» αντιστοιχεί στην επιτάχυνση της βαρύτητας και έχει μονάδες τα «m/s²», και ο αριθμός «287» αντιστοιχεί στη σταθερά του αέρα και έχει μονάδες «J/(Kg·K)».

Τα δεδομένα για τους παραπάνω υπολογισμούς διατίθενται ελεύθερα από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής ([NOAA PSL](#), τελευταία πρόσβαση 11/6/2023). Οι γεωγραφικές συντεταγμένες στα ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα δίνονται σε δεκαδική μορφή και με βήμα 2.5 μοιρών και για τον λόγο αυτό οι συντεταγμένες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς των δύο σημείων δειγματοληψίας ήταν οι (37.98N, 23.79E) και (38.3N, 23.86E) αντίστοιχα, εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ 37.5 με 40.0 N και μεταξύ 22.5 και 25 E.

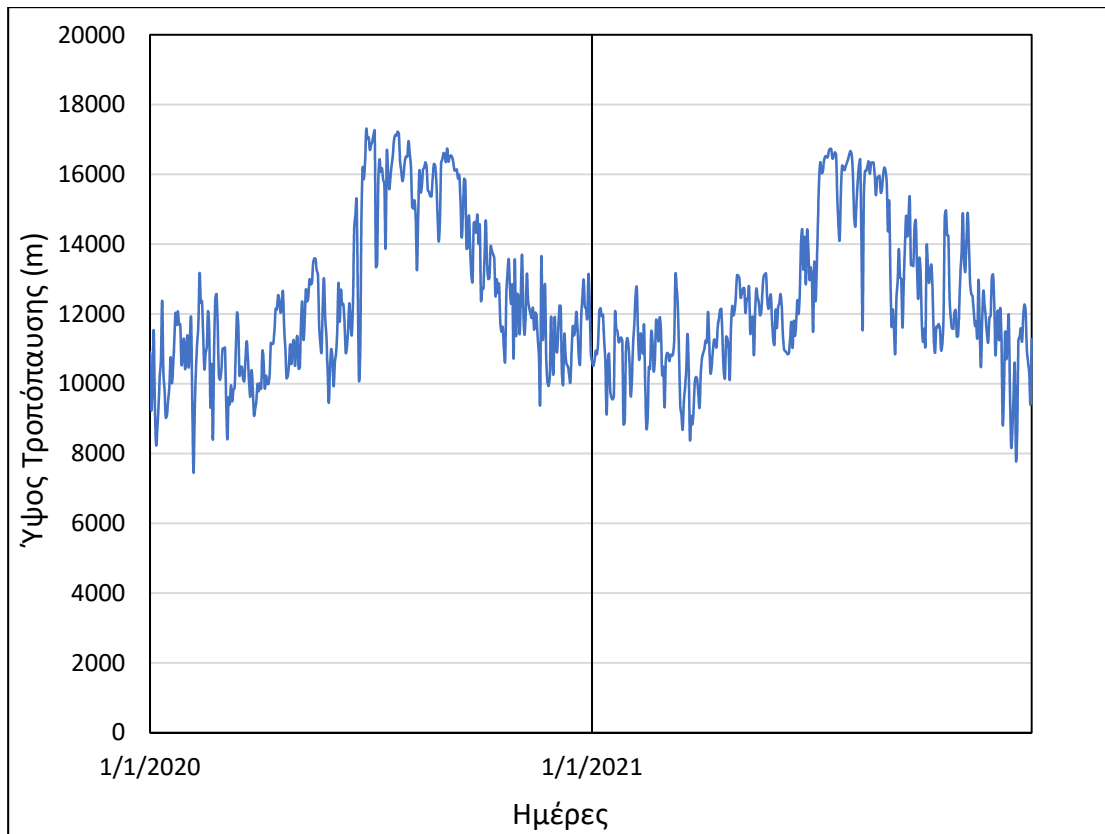
Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. δημιουργήθηκαν υπολογιστικά φύλλα excel τα οποία δίνουν τη δυνατότητα αυτόματης επιλογής των επιθυμητών γεωγραφικών συντεταγμένων του σημείου ενδιαφέροντος και υπολογισμού του ύψους της τροπόπαυσης. Τα δύο σημεία δειγματοληψίας για τα οποία υπολογίστηκε το ύψος της τροπόπαυσης είναι το ΕΠΤ-ΕΜΠ (37°58'41.7"N, 23°47'06.1"E) και ο Λόφος Ανθέων στην περιοχή της Άνοιξης Αττικής (38°07'34.4"N, 23°51'50.7"E). Το ύψος της τροπόπαυσης για την περιοχή που βρίσκεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ υπολογίστηκε για κάθε ημέρα για τα έτη 2018 έως και 2022, και για τον Λόφο Ανθέων για τα έτη 2021 και 2022.

Καθώς η χρονική διάρκεια κάθε δειγματοληψίας ποικίλει, έγινε κατάλληλος προσδιορισμός του μέσου ύψους τροπόπαυσης, ώστε να γίνεται αντιστοίχιση με τη μετρούμενη ενεργότητα του ^7Be στις αποθέσεις. Οι τιμές για το μέσο ύψος τροπόπαυσης που υπολογίστηκαν για την περίοδο που αντιστοιχεί σε κάθε δείγμα αποθέσεων δίνονται στον **Πίνακα 6.29**. Επίσης, για λόγους πληρότητας καθώς και για τη γενικότερη εποπτεία της κύμανσης του ύψους της τροπόπαυσης, στο **Σχήμα 6.30** που ακολουθεί δίνονται οι ημερήσιες τιμές του ύψους της τροπόπαυσης για τα έτη 2020 και 2021 (περίοδο που περιλαμβάνει τις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων που έλαβαν χώρα στην παρούσα Δ.Δ.) στις γεωγραφικές συντεταγμένες του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Πίνακας 6.29 : Μέσο ύψος της τροπόπαυσης για κάθε δείγμα ατμοσφαιρικής απόθεσης που συλλέχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ.

Κωδικός δείγματος	Μέσο ύψος τροπόπαυσης (m)
QSA1	11032
QSA2	11032
QSA3	11032
QSA4	11032
HR001	11364
WR001	11138
HR002	12675
WR002	9376
WR003	9376
WR004	9376
WR005	9420
DR001	14610
DR002	15486
DR003	14508
TR001	10786
DR004	12609
DR005	15909
TR003	15861
TR002	14601
DR006	13766
TR004	12470
TR005	11231
TR006	10829
WR006	8702
DR007	11281
DR008	10570
TR007	10711
TR008	9415
TR009	10452
TR010	11171
DR009	12528
DR010	11947
DR011	12518
DR012	12256
DR013	12023

Κωδικός Δείγματος	Μέσο ύψος τροπόπαυσης (m)
TR011	11034
WR007	10985
TR012	11849
DR014	13869
DR015	12857
DR016	16096
DR017	16615
DR018	15445
DR019	16191
DR020	15637
DR021	14628
TR013	12401
DR022	13586
TR014	14020
DR023	12127
HR003	13172
WR008	12975
HR004	11069
WR010	7685
WR011	7685
WR012	7685
WR013	7685
WR014	7685
WR015	7685
WR016	7685
WR017	7685
WR018	7685
WR019	7685
WR020	11676
WR021	11514
HR005	12519
HR006	12854
HR007	13376
HR008	12132



Σχήμα 6.30 : Κύμανση του ημερήσιου ύψους της τροπόπαυσης για τα έτη 2020 και 2021 στην περιοχή του ΕΠΤ-ΕΜΠ (γεωγραφικές συντεταγμένες 37.98N, 23.79E).

Από το παραπάνω σχήμα είναι εμφανής μια περιοδικότητα στο ύψος της τροπόπαυσης, με τα μέγιστα να παρατηρούνται τους θερινούς και τα ελάχιστα τους χειμερινούς μήνες.

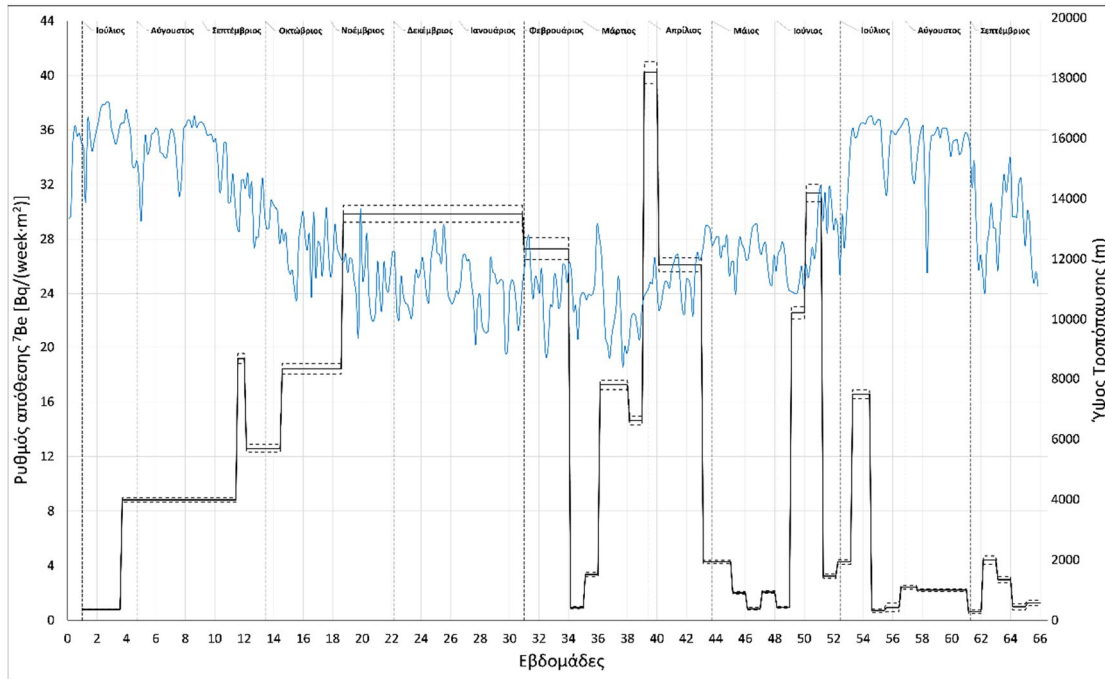
Στη μελέτη των (Ioannidou, et al., 2014) αναφέρεται ότι υπάρχει μια καθυστέρηση τριών ημερών στην επίδραση που έχει το ύψος της τροπόπαυσης στην ενεργότητα του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ωστόσο, επειδή τα περισσότερα δεδομένα ρυθμού απόθεσης του ^7Be της παρούσας Δ.Δ. αφορούν χρονικά διαστήματα 7 ημερών ή περισσότερο, δεν κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση τέτοιας καθυστέρησης. Στον **Πίνακα 6.30** που ακολουθεί δίνονται οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R, καθώς και οι τιμές p-value για τις συσχετίσεις μεταξύ των τιμών του μέσου ύψους της τροπόπαυσης με τον ρυθμό απόθεσης του ^7Be στις διάφορες ατμοσφαιρικές αποθέσεις, ομαδοποιώντας τις κατάλληλα, όπως και στις προηγούμενες παραγράφους.

Πίνακας 6.30 : Συντελεστές συσχέτισης και τιμές p-value μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και των ρυθμών απόθεσης του ⁷Be στα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων με το εκάστοτε αντίστοιχο μέσο ύψος της τροπόπαυσης.

Είδος απόθεσης	Συντελεστής συσχέτισης	
	R	p-value
Υγρή απόθεση (βροχή) *	0.4053	0.4253
Υγρασία **	-0.5261	0.2252
Ξηρή Απόθεση ***	0.1145	0.5858
Ολική Απόθεση ****	-0.3240	0.3042
Συνεχόμενες Δειγματοληψίες (6/7/20- 4/10/21) *****	-0.4544	0.0090
Μηνιαίες Αποθέσεις *****	-0.7038	0.0050

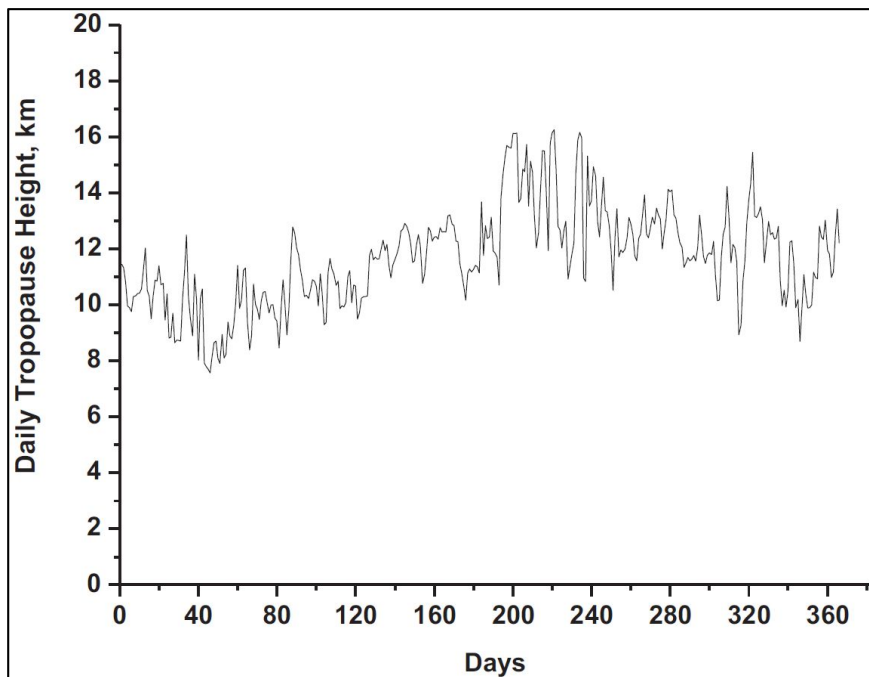
*N = 6, **N = 7, ***N = 25, **** N = 12, ***** N = 32, ***** N = 14

Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν προκύπτει συσχέτιση μεταξύ του μέσου ύψους της τροπόπαυσης με τις υγρές, τις ξηρές και τις ολικές αποθέσεις καθώς και με την υγρασία. Ωστόσο, προκύπτει αρνητική συσχέτιση στην περίπτωση των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και των μηνιαίων αποθέσεων, τονίζοντας για μία φορά ακόμα τη σημασία της χρονικής συνέχειας στη λήψη των δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι όλες οι συσχετίσεις είναι αρνητικές, ενώ οι συσχετίσεις του ύψους της τροπόπαυσης με τη συγκέντρωση του ⁷Be στον ατμοσφαιρικό αέρα στη μελέτη των (Ioannidou, et al., 2014) προσδιορίστηκαν θετικές. Αυτή η διαφορά είναι αναμενόμενη και δικαιολογείται από το γεγονός ότι χαμηλότερα ύψη τροπόπαυσης απαντώνται κυρίως τους μήνες με τα υψηλότερα ποσοστά υγρών κατακρημνίσεων, οι οποίες αποτελούν και τον κυρίαρχο μηχανισμό απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην επιφάνεια της Γης. Στο **Σχήμα 6.31** δίνεται σε αντιπαραβολή η εξέλιξη της συγκέντρωσης του ⁷Be στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων με το ημερήσιο ύψος της τροπόπαυσης.



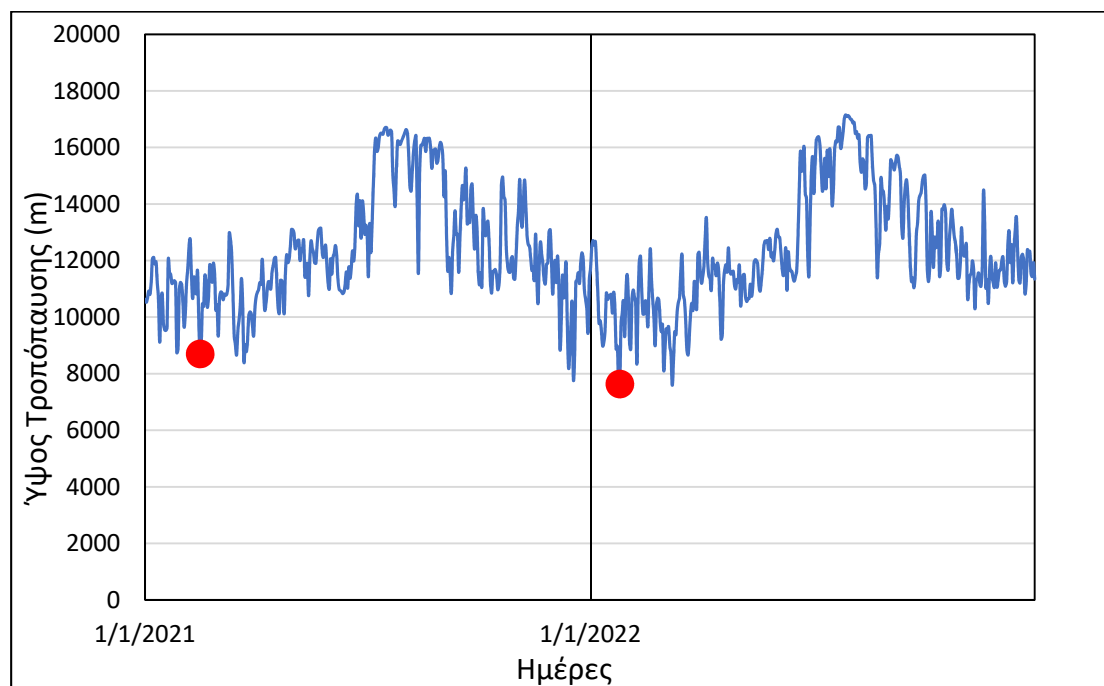
Σχήμα 6.31 : Ημερήσιο ύψος της τροπόπαυσης και ρυθμός απόθεσης του ^7Be στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων (6/7/2020 έως 4/10/2021).

Κατά τη διάρκεια των συνεχόμενων δειγματοληψιών το μέγιστο ύψος της τροπόπαυσης παρατηρήθηκε στα 17.2km στις 24/7/2020 και το ελάχιστο ύψος της τροπόπαυσης παρατηρήθηκε στα 8.4 km στις 23/3/2021, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με το εύρος του ύψους της τροπόπαυσης (από 7.6km έως 16.3 km) που υπολογίστηκε από τους (Ioannidou, et al., 2014) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης το έτος 2009, όπως δίνεται και στο **Σχήμα 6.32** που ακολουθεί.



Σχήμα 6.32 : Ημερήσια κύμανση του ύψους της τροπόπαυσης για την περιοχή της Θεσσαλονίκης (40.50°N, 22.90°E) κατά τη διάρκεια του έτους 2009 (Ioannidou, et al., 2014).

Ακόμα, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα δύο μεγάλα συμβάντα χιονόπτωσης “Μήδεια” και “Ελπίς”, για τα οποία συλλέχθηκε δείγμα χιονιού στην περιοχή του Λόφου Ανθέων, έλαβαν χώρα παράλληλα με πολύ χαμηλά ύψη της τροπόπαυσης. Οι ημερομηνίες έναρξης των συμβάντων αυτών (15/2/2021 και 24/1/2022 αντίστοιχα) σημειώνονται στο **Σχήμα 6.33**, όπου δίνεται το ύψος της τροπόπαυσης για τα έτη 2021 και 2022 στις γεωγραφικές συντεταγμένες του Λόφου Ανθέων.



Σχήμα 6.33 : Κύμανση του ύψους της τροπόπαυσης για τα έτη 2021 και 2022 στις γεωγραφικές συντεταγμένες 38.13N, 23.86E. Με κόκκινο σημειώνονται οι ημερομηνίες έναρξης των χιονοκαταιγίδων “Μήδεια” και “Ελπίς”.

6.3.5 Εκτίμηση της συνολικής επιφανειακής συγκέντρωσης ενεργότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, το ⁷Be και κυρίως ο ²¹⁰Pb έχουν εφαρμογή και ως ιχνηθέτες σε μοντέλα για τη μελέτη φαινομένων διάβρωσης και ιζηματογένεσης εδαφών και τον προσδιορισμό σχετικών συντελεστών. Κατά συνέπεια, η γνώση της επιφανειακής αλλά και της κατά βάθος κατανομής ενεργότητας των ισοτόπων αυτών είναι πολύ χρήσιμη πληροφορία για τέτοιου είδους μελέτες.

Οι συστηματικές και ειδικότερα οι συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικής απόθεσης δίνουν τη δυνατότητα της συνεχούς παρακολούθησης των αποτιθέμενων στο έδαφος ραδιενεργών ισοτόπων, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες στη μελέτη

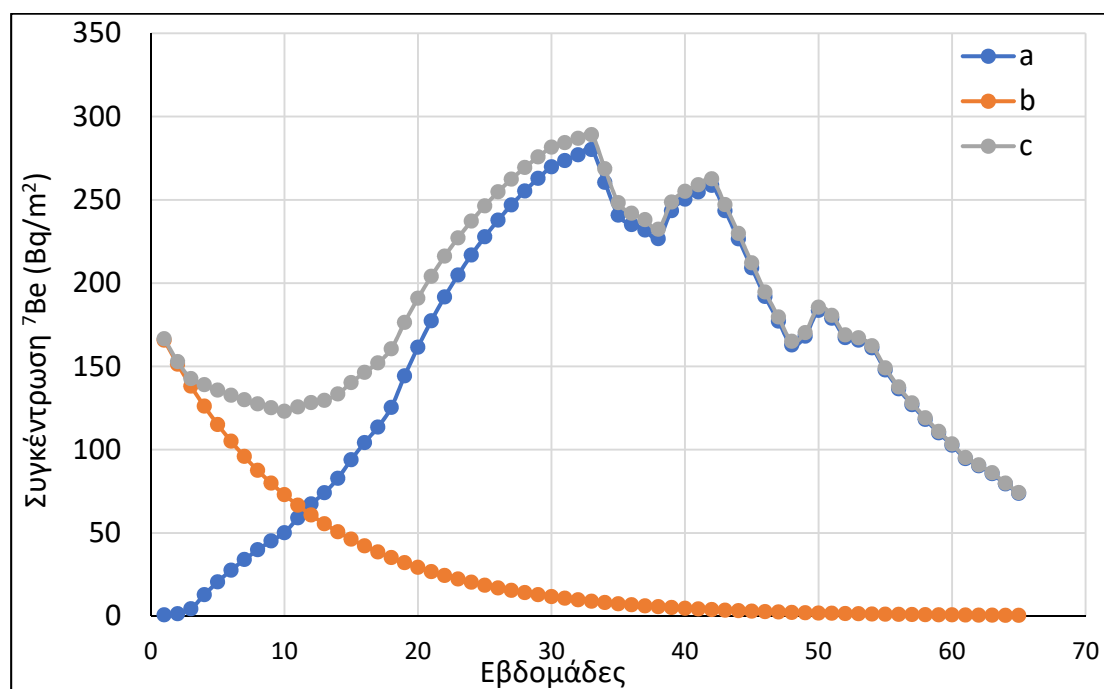
της κινητικής τους στο έδαφος (οριζόντια ή κατακόρυφη μετανάστευση, επαναιώρηση κλπ.). Στην παρούσα Δ.Δ., χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικής απόθεσης, μπορεί να υπολογιστεί η συσσωρευτική απόθεση στην επιφάνεια του εδάφους για τα ισότοπα ^7Be και ^{210}Pb , όπως δίνεται στα **Σχήματα 6.34** και **6.35** που ακολουθούν. Η συγκέντρωση (Bq/m^2) στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται για κάθε χρονική στιγμή λαμβάνοντας υπόψη την απόθεση (στην προκειμένη περίπτωση με βήμα μία εβδομάδα) και τη ραδιενεργό διάσπαση του ισοτόπου. Στην περίπτωση που είναι γνωστή η επιφανειακή συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου κατά την έναρξη των συνεχόμενων δειγματοληψιών, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η απομείωση (decay) της αρχικής αυτής ποσότητας. Στην παρούσα μελέτη δεν ήταν γνωστή η επιφανειακή συγκέντρωση στο έδαφος των υπό μελέτη ραδιενεργών ισοτόπων τη χρονική στιγμή έναρξης των συνεχόμενων δειγματοληψιών. Για τον λόγο αυτό, για το ^7Be έγινε η υπόθεση ότι η επιφανειακή συγκέντρωσή του στις 6/7/2020 είναι ίδια με τη συγκέντρωση που προέκυψε στις 6/7/2021 (έναν χρόνο αργότερα) χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό αυτό μόνο τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών. Για το ^7Be αυτό είναι μία καλή παραδοχή λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του.

Για τον ^{210}Pb , επειδή έχει σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής από το ^7Be , διαφορετική προέλευση και παρουσιάζει αξιόλογη κατακόρυφη μετανάστευση, δεν έγινε αντίστοιχη υπόθεση για την αρχική συγκέντρωση στην επιφάνεια του εδάφους. Έτσι, στο **Σχήμα 6.35** δίνεται η επιφανειακή συσσωρευτική συγκέντρωσή του, ξεκινώντας από μηδενική αρχική συγκέντρωση. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η επιφανειακή συσσωρευτική συγκέντρωση που δίνεται στα **Σχήματα 6.34** και **6.35** που ακολουθούν δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στη συγκέντρωση που θα μετρηθεί σε περίπτωση δειγματοληψίας επιφανειακού δείγματος χώματος, καθώς τα ραδιενεργά ισότοπα μετά την απόθεσή τους κινούνται με διάφορους μηχανισμούς, μπορεί όμως αυτή η επιφανειακή συσσωρευτική συγκέντρωση να βρει εφαρμογή στη μελέτη των μηχανισμών αυτών.

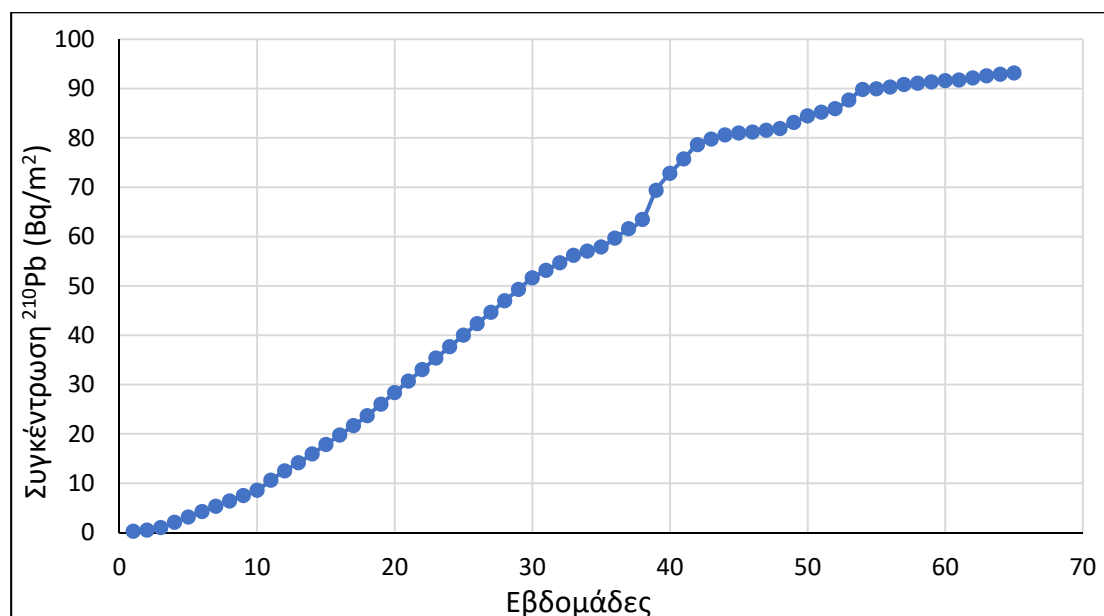
Όπως προκύπτει από το **Σχήμα 6.34**, για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 45 εβδομάδων⁷⁰, η συνεισφορά της υποθετικής αρχικής επιφανειακής συγκέντρωσης του ^7Be γίνεται αμελητέα. Αυτό σημαίνει ότι η συστηματική και συνεχόμενη δειγματοληψία ατμοσφαιρικών αποθέσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα

⁷⁰ Αντιστοιχεί σε έξι χρόνους υποδιπλασιασμού του ^7Be .

(>45 εβδομάδων) οδηγεί στη γνώση της “χωρίς επίδραση από την αρχική συγκέντρωση ${}^7\text{Be}$ ή από άλλους μηχανισμούς⁷¹” επιφανειακής ενεργότητας (Bq/m^2) του ${}^7\text{Be}$ στο έδαφος κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 6.34 : Χρονική Εξέλιξη : a) της συσσωρευτικής συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ στο έδαφος χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, b) της υποθετικής αρχικής επιφανειακής συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$, c) της συσσωρευτικής συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ αθροίζοντας τις μετρούμενες συγκεντρώσεις του ${}^7\text{Be}$ με την υποθετική αρχική συγκέντρωσή του.



Σχήμα 6.35 : Χρονική εξέλιξη της συσσωρευτικής επιφανειακής συγκέντρωσης του ${}^{210}\text{Pb}$ στο έδαφος από την ημερομηνίας έναρξης των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

⁷¹ Με εξαίρεση ενδεχόμενη κατακόρυφη μετανάστευση, επαναιώρηση, ή λόγω διάβρωσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη συγκέντρωση ενεργότητας του ^7Be στο έδαφος σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς εντοπίζεται περί τις 20/2/2021 με τιμή $289 \pm 1.7 \text{ Bq/m}^2$, η οποία έρχεται σε πολύ καλή συμφωνία με την τιμή $320 \pm 52 \text{ Bq/m}^2$ η οποία είχε εκτιμηθεί μέσω απευθείας μετρήσεων στο έδαφος στην περιοχή του ΕΠΤ-ΕΜΠ, σε προηγούμενη μελέτη (Καρφόπουλος, 2012) η οποία είχε γίνει στις 3/4/2011. Η συμφωνία των δύο αυτών τιμών επιφανειακής ενεργότητας του ^7Be , που σημειωτέον αντιστοιχούν σε παραπλήσιες χρονικές στιγμές μέσα στο έτος (τέλη Φεβρουαρίου - αρχές Απριλίου) με χρονική διαφορά ~ 10 έτη⁷² αποτελεί ισχυρή ένδειξη:

- της αξιοπιστίας και ακρίβειας των δειγματοληψιών, μετρήσεων και υπολογισμών που έγιναν στην εργασία αυτή,
- της επαναληψιμότητας του φαινομένου της απόθεσης του ^7Be διαχρονικά.

6.3.6 Εκτίμηση της μέσης ταχύτητας απόθεσης

Ένα μέγεθος το οποίο έχει πολύ ενδιαφέρον να υπολογίζεται είναι η μέση ταχύτητα απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων και κατ' επέκταση των σωματιδίων στα οποία αυτά είναι προσκολλημένα, από τον ατμοσφαιρικό αέρα στην επιφάνεια του εδάφους. Ο υπολογισμός της ταχύτητας απόθεσης για ένα ραδιενεργό ισότοπο μπορεί να γίνει από την εξίσωση (2.1) που δόθηκε στο κεφάλαιο 2 (Young & Silker, 1980).

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν 16 παράλληλες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων και ατμοσφαιρικού αερολύματος σε φίλτρα αέρα. Οι συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισοτόπων στα φίλτρα αέρα και οι ρυθμοί απόθεσης στα παράλληλα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων δίνονται στους **Πίνακες 6.5, 6.6** και **6.9**. Βάσει αυτών έγινε ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας απόθεσης, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 6.31** που ακολουθεί.

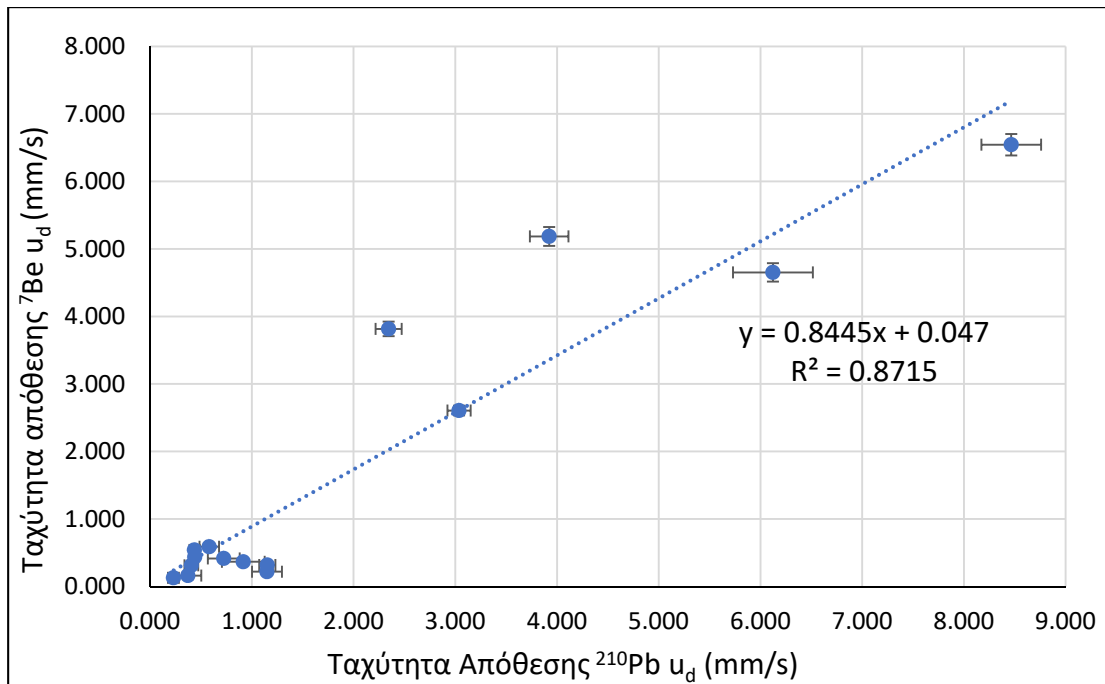
Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 6.31** προκύπτει ένα εύρος μέσης ταχύτητας απόθεσης για το ^7Be από 0.042mm/s έως 6.54 mm/s και για τον ^{210}Pb από 0.23 mm/s έως 8.47 mm/s. Μάλιστα, όπως διαπιστώνεται για το ^7Be η ταχύτητα υγρής απόθεσης είναι περί τις δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερη από την ταχύτητα της ξηρής. Επιπλέον,

⁷² Περίπου στην ίδια φάση του ενδεκαετούς κύκλου του ηλίου.

όπως διαπιστώνεται στο **Σχήμα 6.36**, υπάρχει ισχυρή και στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ των μέσων ταχυτήτων απόθεσης των ^7Be και ^{210}Pb ($R = +0.9335$, $p\text{-value} < 0.00001$).

Πίνακας 6.31 : Μέση ταχύτητα απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb για τα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων που συλλέχθηκαν παράλληλα με φίλτρα ατμοσφαιρικού αέρα.

Κωδικός φίλτρου αέρα	Κωδικός ατμοσφαιρικής απόθεσης	Μέση ταχύτητα απόθεσης μa	
		^7Be	^{210}Pb
		mm/s	mm/s
a0548	DR003	0.042 ± 0.003	<MDA
a0554	DR004	0.32 ± 0.01	1.15 ± 0.08
a0559	DR007	0.22 ± 0.01	1.15 ± 0.15
a0560	TR007	5.19 ± 0.14	3.92 ± 0.19
a0562	TR008	4.65 ± 0.14	6.12 ± 0.39
a0563	TR010	6.54 ± 0.16	8.7 ± 0.29
a0564	DR010	0.37 ± 0.02	0.92 ± 0.21
a0567	DR012	0.41 ± 0.02	0.72 ± 0.16
a0568	TR011	3.82 ± 0.11	2.34 ± 0.13
a0569	DR014	0.59 ± 0.03	0.58 ± 0.10
a0570	DR016	2.61 ± 0.07	3.04 ± 0.11
a0571	DR018	0.16 ± 0.06	0.37 ± 0.13
a0572	DR020	0.44 ± 0.02	0.44 ± 0.03
a0573	DR021	0.13 ± 0.03	0.23 ± 0.05
a0574	DR022	0.54 ± 0.05	0.44 ± 0.05
a0575	DR023	0.31 ± 0.05	0.41 ± 0.07



Σχήμα 6.36 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^7Be και της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^{210}Pb .

Συνδυάζοντας τις τιμές του **Πίνακα 6.31** με τα αντίστοιχα μετεωρολογικά δεδομένα του **Πίνακα 6.35**, μελετήθηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb με τις διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών δίνονται στον **Πίνακα 6.32** που ακολουθεί.

Πίνακας 6.32 : Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μέσων ταχυτήτων απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με τις διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες.

	$u_d - ^7\text{Be}$		$u_d - ^{210}\text{Pb}$	
	R	p-value	R	p-value
Θερμοκρασία	-0.5986	0.0143	-0.6292	0.0120
Σχετική υγρασία	+0.6468	0.0068	+0.5310	0.0417
Ατμοσφαιρική πίεση	+0.0374	0.8906	+0.2117	0.4488
Μέση ταχύτητα ανέμου	-0.3164	0.2325	-0.1493	0.5954

Από τα παραπάνω αποτελέσματα για την ταχύτητα απόθεσης και του ^7Be αλλά και του ^{210}Pb προκύπτει ότι έχουν αρνητική συσχέτιση με τη θερμοκρασία και θετική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία. Η αρνητική συσχέτιση της ταχύτητας απόθεσης με τη θερμοκρασία πιθανότατα θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι υψηλές

θερμοκρασίες δημιουργούν ανοδικά ρεύματα αέρα, κάτι το οποίο εμποδίζει την απόθεση, μειώνοντας την ταχύτητα. Η θετική συσχέτιση της σχετικής υγρασίας με την ταχύτητα απόθεσης αποδίδεται στο γεγονός ότι όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη η συμπύκνωση υγρασίας γύρω από τα σωματίδια του αέρα, γεγονός που μπορεί παράλληλα και να αυξάνει την ταχύτητα απόθεσής τους, αλλά και ενδεχομένως να αυξάνει την αποδοτικότητα της σάρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα. Οι παραπάνω συσχετίσεις οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα με τις συσχετίσεις των προηγούμενων παραγράφων.

6.3.7 Υπολογισμός του κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστή εμπλουτισμού ραδιενεργών ισοτόπων της ατμόσφαιρας

Στην μελέτη του (Baskaran, 1995) για τον προσδιορισμό της σημασίας των υγρών αποθέσεων στις ετήσιες ατμοσφαιρικές αποθέσεις, ορίζεται ο συντελεστής εμπλουτισμού ραδιενεργών ισοτόπων της ατμόσφαιρας **a** ο οποίος είναι κανονικοποιημένος ως προς την υγρή απόθεση και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$a = (F_s \cdot R_t) / (F_t \cdot R_s) \quad (6.5)$$

όπου

F_s : ο συνολικός εποχικός ρυθμός απόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου

F_t : ο ετήσιος ρυθμός απόθεσης του ραδιενεργού ισοτόπου

R_s : το συνολικό εποχικό ύψος υγρών αποθέσεων

R_t : το ετήσιο ύψος υγρών αποθέσεων

Για τιμές του συντελεστή **a** μεγαλύτερες του 1.0 υποδεικνύεται ότι οι ρυθμοί απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων είναι υψηλότεροι των αναμενόμενων, βάσει της ποσότητας των υγρών κατακρημνίσεων, ενώ τιμές μικρότερες του 1.0 υποδεικνύουν εξάντληση των ρυθμών απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων, δηλαδή σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στον ατμοσφαιρικό αέρα, λόγω υψηλής συχνότητας και ποσότητας υγρών αποθέσεων.

Οι συνεχόμενες δειγματοληψίες που έγιναν στην παρούσα Δ.Δ., περιλαμβάνουν ένα ολόκληρο έτος (Σεπτέμβριος 2020 - Αύγουστος του 2021). Χρησιμοποιώντας τις

μετρούμενες ροές απόθεσης για το ^7Be και τον ^{210}Pb καθώς και τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, στον **Πίνακα 6.33** που ακολουθεί δίνονται οι συγκεντρώσεις των εν λόγω ραδιενεργών ισοτόπων ανά εποχή, συνοδευόμενες από το συνολικό ύψος βροχόπτωσης ανά εποχή και την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή εμπλουτισμού **a**.

Πίνακας 6.33 : Κανονικοποιημένος ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστής **a** για το ^7Be και το ^{210}Pb ανά εποχή για τις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

Εποχές	Συνολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	^7Be		^{210}Pb	
		Bq/(season·m ²)	a factor	Bq/(season·m ²)	a factor
Φθινόπωρο	50	237.3 ± 2.5	2.1	24.3 ± 0.4	2.2
Χειμώνας	273.8	350.9 ± 4.6	0.6	26.4 ± 0.9	0.4
Άνοιξη	29.6	184.9 ± 1.8	2.7	25.1 ± 0.4	3.8
Καλοκαίρι	27.2	100.3 ± 1.1	1.6	9.7 ± 0.2	1.6
Σύνολο	380.6	873.5 ± 5.6		85.4 ± 1.1	

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, οι τιμές του συντελεστή **a** για το ^7Be και τον ^{210}Pb είναι παραπλήσιες και σίγουρα ακολουθούν την ίδια τάση, υποδεικνύοντας:

- εξάντληση της ροής των ραδιενεργών ισοτόπων κατά την περίοδο του χειμώνα, το οποίο δικαιολογείται από τα μεγάλα ύψη βροχόπτωσης καθώς και τη συχνότητά τους, που δεν επέτρεπαν την ανανέωση των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα,
- υψηλές τιμές του συντελεστή **a** τις υπόλοιπες εποχές με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται την άνοιξη.

6.3.8 Λοιπά ατμοσφαιρικά μοντέλα με προοπτική αξιοποίησης των μετρήσεων ατμοσφαιρικών αποθέσεων

Οι μετρήσεις ατμοσφαιρικών αποθέσεων, είτε αυτές είναι αποκλειστικά από συλλογή υγρών ή ξηρών αποθέσεων είτε είναι από συλλογή ολικών αποθέσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κατάλληλες συνδυαστικές μετρήσεις, για:

- τον υπολογισμό συντελεστών από διάφορα μαθηματικά μοντέλα,

- επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων ατμοσφαιρικών μοντέλων τα οποία προσομοιώνουν και προβλέπουν την κίνηση των αερίων μαζών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Τα μοντέλα αυτά ανήκουν σε μία κατηγορία μοντέλων γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (General Circulation Models, GCMs) και συνεχώς αναπτύσσονται και βελτιώνονται, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική λίστα από ατμοσφαιρικά μοντέλα, η χρήση των οποίων είναι δυνητικά εφικτή συνδυάζοντας κατάλληλα τα δεδομένα ατμοσφαιρικών αποθέσεων με ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, μετρήσεις συγκεντρώσεων ενεργότητας στα επιμέρους κλάσματα υγρών αποθέσεων, καθώς και μετρήσεις επιφανειακών συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος:

- Υπολογισμός του συντελεστή απόδοσης κατακρήμνισης/σάρωσης ραδιενεργών ισοτόπων*

Αν υποθεθεί στην περίπτωση υγρής κατακρήμνισης ότι πάνω από τους δειγματολήπτες γνωστού εμβαδού αντιστοιχεί μία ατμοσφαιρική στήλη η οποία πριν από το συμβάν υγρής κατακρήμνισης είχε συγκέντρωση M^- από ένα συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο (ραδιοϊχνηθέτης), τότε σύμφωνα με τη μελέτη του (Genthon, 1992a), (Genthon, 1992b) μπορεί να εφαρμοστεί η παρακάτω εξίσωση:

$$M^+ = M^- \cdot \exp(-a \cdot P) \quad (6.6)$$

Όπου

- M^+ : η μάζα του ραδιοϊχνηθέτη στην ατμοσφαιρική στήλη μετά τη λήξη του συμβάντος υγρής κατακρήμνισης
- M^- : η μάζα του ραδιοϊχνηθέτη στην ατμοσφαιρική στήλη πριν την έναρξη του συμβάντος υγρής κατακρήμνισης
- a : ο συντελεστής απόδοσης της κατακρήμνισης/σάρωσης του ραδιοϊχνηθέτη από την ατμοσφαιρική στήλη από το συμβάν υγρής απόθεσης ο οποίος ορίζεται εμπειρικά, ανάλογα με το είδος της υγρής απόθεσης (χιόνι/βροχή), καθώς και τον τρόπο σάρωσης του ραδιοϊχνηθέτη (σύγκρουση/ πυρηνοποίηση) (Genthon, 1992a), (Genthon, 1992b)
- P : η ποσότητα της υγρής κατακρήμνισης σε kg/m^2

Στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα δειγματοληψίας της υγρής απόθεσης σε επιμέρους κλάσματα για γνωστή επιφάνεια απόθεσης, τότε μπορεί να εφαρμοστεί τμηματικά η εξίσωση (6.6) και να γίνει υπολογισμός και επιβεβαίωση του συντελεστή απόδοσης κατακρήμνισης/σάρωσης **a**.

ii. Υπολογισμός συνεισφοράς “washout” και “rainout” σε συμβάν βροχόπτωσης

Στη μελέτη των (Ishikawa, et al., 1995) έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της απόθεσης του ⁷Be με τον χρόνο, για συμβάντα υγρών αποθέσεων, διαχωρίζοντας τους παράγοντες “washout” (κατακρήμνιση/σάρωση των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμοσφαιρική στήλη από τις σταγόνες της βροχής ή το χιόνι) και “rainout” (σάρωση των ραδιενεργών που βρίσκονται μέσα στο σύννεφο από τις σταγόνες/χιονονιφάδες κατά τη συμπύκνωση, καθώς και κατά την πορεία εξόδου τους από το σύννεφο). Συγκεκριμένα, υποθέτοντας σταθερό ρυθμό υγρής κατακρήμνισης και κάνοντας διαδοχικές δειγματοληψίες των κλασμάτων της, γνωρίζοντας τη χρονική διάρκεια συλλογής για κάθε επιμέρους κλάσμα, τότε η συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου ως προς τον χρόνο δίνεται από την εξίσωση:

$$A(t) = r \cdot \frac{a}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) + b \cdot r \cdot t \quad (6.7)$$

όπου

A(t): η επιφανειακή συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου σε Bq/m²

r: ο ρυθμός της υγρής κατακρήμνισης σε mm/h

t: η χρονική διάρκεια συλλογής κάθε επιμέρους κλάσματος υγρής κατακρήμνισης

a: σταθερά που εκτιμάται σε 4 Bq/L

k: σταθερά που εκτιμάται σε 1 h⁻¹

b: σταθερά που εκτιμάται σε 1 Bq/L

Στην παραπάνω σχέση ο σταθερός όρος εκφράζει το “washout” και ο μεταβαλλόμενος όρος το “rainout”. Επομένως, συλλέγοντας πολλαπλά κλάσματα της υγρής απόθεσης, είναι δυνατόν να γίνει προσδιορισμός των σταθερών όρων a, k και b και να υπολογισθεί με υψηλότερη ακρίβεια η συνεισφορά του “washout” και του “rainout” σε κάθε συμβάν βροχόπτωσης.

iii. Υπολογισμός *washout ratio*

Στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονη δειγματοληψία υγρής απόθεσης και ατμοσφαιρικού αέρα, τότε υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί το “washout ratio” σύμφωνα με την εξίσωση (McNeary & Baskaran, 2003):

$$W = 1.2 \cdot 10^3 \cdot \frac{C_{\text{rain}}}{C_{\text{air}}} \quad (6.8)$$

όπου:

W: το “washout ratio”

C_{rain} : η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιενεργού ισότοπου στο δείγμα υγρής απόθεσης σε Bq/kg

C_{air} : η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιενεργού ισότοπου στον ατμοσφαιρικό αέρα σε mBq/m³ για πυκνότητα του αέρα 1.2 kg/m³ σε θερμοκρασία 20°C και πίεση 760 mmHg.

iv. Διερεύνηση φαινομένων διάβρωσης εδαφών

Οι συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων βρίσκουν εφαρμογή και στη μελέτη της διάβρωσης των εδαφών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως⁷³ ο ²¹⁰Pb⁷⁴. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν εξωτερικές απώλειες του ²¹⁰Pb, η μεταβολή του αποθεματικού της συγκέντρωσής του στο χώμα δίνεται από την εξίσωση (Turekian, et al., 1983):

$$\frac{dI}{dt} = F - \lambda \cdot I \quad (6.9)$$

όπου :

F: ο ρυθμός απόθεσης του ²¹⁰Pb_{xs} (unsupported) σε Bq/(m²·y)

I: το αποθεματικό της συγκέντρωσης του ²¹⁰Pb_{xs} στο χώμα σε Bq/m²

λ: η σταθερά διάσπασης του ²¹⁰Pb σε y⁻¹

Υποθέτοντας μια σταθερή κατάσταση (steady state) σε ετήσιο επίπεδο, από την εξίσωση (6.9) προκύπτει ότι $dI/dt = 0$ και συνεπώς $F = \lambda \cdot I$. Αυτό σημαίνει ότι γνωρίζοντας το αποθεματικό του ²¹⁰Pb_{xs} μπορεί να υπολογιστεί ο ετήσιος ρυθμός απόθεσης και το αντίστροφο. Συνεπώς, συνδυάζοντας δειγματοληψίες χώματος με

⁷³ Για τη μελέτη φαινομένων διάβρωσης χρησιμοποιείται επίσης και το ¹³⁷Cs, αλλά με διαφορετικό τρόπο, καθώς δεν παρουσιάζει συνεχή απόθεση στο έδαφος.

⁷⁴ Για τη μελέτη των φαινομένων αυτών όπου δηλώνεται ²¹⁰Pb εννοείται ο «unsupported» ²¹⁰Pb.

δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο και να διερευνηθούν φαινόμενα διάβρωσης εδαφών.

6.4 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση των δειγματοληψιών και των αναλύσεων των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και μετά από ενδελεχή διερεύνηση για την ύπαρξη συσχετίσεων με πλήθος διαφορετικών παραμέτρων, προέκυψαν μία σειρά από συμπεράσματα, τα κυριότερα των οποίων δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- i. Η αναπτυχθείσα μέθοδος για τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων επέτρεψε την αξιόπιστη και με καλή ακρίβεια μέτρηση των:
 - Συγκέντρωσης ενεργότητας ^7Be σε δείγματα βροχής, χιονιού και υγρασίας,
 - Ρυθμού απόθεσης ^7Be σε δείγματα ξηρής και ολικής απόθεσης,
 - Συγκέντρωσης ενεργότητας ^{210}Pb σε δείγματα βροχής και χιονιού,
 - Ρυθμού απόθεσης ^{210}Pb σε δείγματα ξηρής και ολικής απόθεσης,
 - Ρυθμού απόθεσης ^{137}Cs σε μικρό πλήθος δείγματα ξηρής και ολικής απόθεσης.
- ii. Το εύρος των συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων που ανιχνεύθηκαν είναι:
 - a. για το ^7Be :
 - από 0.77 έως 4.11 Bq/L στη βροχή
 - από 0.14 έως 1.40 Bq/L στο χιόνι
 - από 0.04 έως 0.15 Bq/L στην υγρασία
 - από 0.30 έως 16.55 Bq/(week·m²) στις ξηρές αποθέσεις
 - από 6.98 έως 40.23 Bq/(week·m²) στις ολικές αποθέσεις
 - b. για τον ^{210}Pb :
 - από 50 έως 709 mBq/L στη βροχή
 - από 40 έως 123 mBq/L στο χιόνι
 - από 135 έως 2195 mBq/(week·m²) στις ξηρές αποθέσεις
 - από 430 έως 6629 mBq/(week·m²) στις ολικές αποθέσεις
 - c. για το ^{137}Cs :

- ανιχνεύθηκε οριακά σε ένα δείγμα ξηρής απόθεσης με συγκέντρωση $65 \pm 58 \text{ mBq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$,
 - ανιχνεύθηκε σε 3 δείγματα ολικών αποθέσεων με εύρος από 10 έως $51 \text{ mBq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$ τα οποία συμπίπτουν με φαινόμενα μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα, καθώς και με τις δασικές πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στην περιοχή του Chernobyl.
- iii. Από την ομαδοποίηση των μετρήσεων σε υγρές, ξηρές, ολικές (ξηρές + υγρές) και συνεχόμενες αποθέσεις, η οποία επιλέχθηκε για την ανεξάρτητη διερεύνηση ύπαρξης συσχετίσεων, ανάλογα με το είδος της απόθεσης, αλλά και τη διερεύνηση συσχετίσεων σε συνεχόμενες χρονικά δειγματοληψίες, προέκυψε ότι η χρονική σύνδεση μεταξύ των δειγμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συμπεριλαμβάνει τις μειώσεις και αυξήσεις των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα, όπως αυτές διαδέχονται η μία την άλλη. Ειδικότερα, στις περισσότερες περιπτώσεις οι συσχετίσεις μεταξύ ρυθμών απόθεσης και διαφόρων μετεωρολογικών και άλλων παραμέτρων μπορεί να απουσιάζουν όταν λαμβάνονται υπόψη μεμονωμένα δείγματα, βάσει του είδους απόθεσης (υγρές, ξηρές, ολικές), αλλά αντίθετα να διαπιστώνονται συσχετίσεις όταν χρησιμοποιούνται δείγματα πάσης φύσεως αποθέσεων, τα οποία όμως έχουν ληφθεί συνεχόμενα.
- iv. Η εξέλιξη της συγκέντρωσης ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων κατά τη διάρκεια συμβάντος χιονόπτωσης έδειξε υψηλότερες συγκεντρώσεις στα τελευταία εκατοστά χιονόπτωσης που εναποτέθηκαν, οδηγώντας σε αντίθετα από τα αναμενόμενα από τη βιβλιογραφία συμπεράσματα, υποδεικνύοντας την πιθανή εισροή εξωτερικών αερίων μαζών πλούσιων σε ραδιενεργά ισότοπα, καθώς και τη σημασία της περιεχόμενης στο σύννεφο συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην τελική εναποτιθέμενη ενεργότητα (snowout).
- v. Προέκυψε ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ^7Be και του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρής απόθεσης και ασθενής θετική συσχέτιση στα δείγματα ολικής απόθεσης.
- vi. Δεν προέκυψε συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, με τις συγκεντρώσεις τους στον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως αυτές προέκυψαν από τις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στη συνεισφορά

των μηχανισμών που διέπουν τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις, καθώς και τη σημασία των υγρών αποθέσεων, οι οποίες οδηγούν από τη μία σε μείωση της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα και από την άλλη σε αύξηση στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις.

- vii. Από τις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων προέκυψε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του ^7Be και του ^{210}Pb εναποτίθεται κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, με τα δύο ισότοπα να εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση για τις δειγματοληψίες αυτές, τόσο για εβδομαδιαία, όσο και για μηνιαία χρονικά βήματα.
- viii. Η ετήσια απόθεση εκτιμήθηκε στα $790 \pm 5 \text{ Bq}/(\text{year}\cdot\text{m}^2)$ για το ^7Be και στα $78.7 \pm 1.0 \text{ Bq}/(\text{year}\cdot\text{m}^2)$ για το ^{210}Pb .
- ix. Ο λόγος του ρυθμού απόθεσης μεταξύ του συνόλου των ετήσιων ξηρών αποθέσεων προς την ετήσια απόθεση υπολογίστηκε στα 0.17 ± 0.003 για το ^7Be και στα 0.29 ± 0.010 για το ^{210}Pb .
- x. Η προσπάθεια συσχέτισης των μετρήσεων που έγιναν στα πλαίσια της Διατριβής με τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους έδειξε:
- Ασθενή αρνητική συσχέτιση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και της συγκέντρωσης του ^{210}Pb σε δείγματα βροχής.
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ του ύψους βροχόπτωσης και της συγκέντρωσης του ^7Be σε δείγματα υγρασίας.
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
 - Ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
 - Δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ του λόγου $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις με το ύψος βροχόπτωσης, ωστόσο οι μέγιστες τιμές απαντώνται μόνο για μηδενικά ύψη βροχόπτωσης (απουσία υγρών αποθέσεων). Το εύρος του λόγου $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ ανά δείγμα ήταν από 0.043 έως 0.840.

- Η κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια των συνεχόμενων δειγματοληψιών ήταν η Νοτιοδυτική (SW) και ταυτίστηκε με το μεγαλύτερο πλήθος των μέγιστων ρυθμών απόθεσης του ^{210}Pb .
 - Οι συγκεντρώσεις του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα παρουσίασαν ισχυρή θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία και ισχυρή αρνητική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία. Οι συγκεντρώσεις του ^{210}Pb στον ατμοσφαιρικό αέρα παρουσίασαν ασθενή θετική συσχέτιση με την υγρασία. Οι συσχετίσεις αυτές είναι ακριβώς αντίθετες με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
- xι. Η συσχέτιση των μετρήσεων των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικής απόθεσης με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών έδειξε:
- a. για το ^7Be :
 - Ισχυρή αρνητική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3),
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του βενζο[α]πυρένιου (BaP),
 - Ασθενή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO).
 - b. για τον ^{210}Pb :
 - Ασθενή αρνητική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3),
 - Ασθενή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του βενζο[α]πυρένιου (BaP).
- xii. Η συσχέτιση των μετρήσεων στον ατμοσφαιρικό αέρα με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών έδειξε:
- a. για το ^7Be :
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3),
 - b. για τον ^{210}Pb :
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση των σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$,

- Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση σωματιδίων PM10.
- xiii. Οι ρυθμοί απόθεσης του ^7Be στα δείγματα των συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων παρουσιάζουν ασθενή αρνητική συσχέτιση με το πλήθος των ηλιακών κηλίδων, αν ληφθεί μία καθυστερημένη επίδραση των κηλίδων 9 μηνών.
- xiv. Αναφορικά με το ύψος της τροπόπαυσης διαπιστώνεται:
- Αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων και στις μηνιαίες αποθέσεις με το ύψος της τροπόπαυσης.
 - Οι ελάχιστες τιμές του ύψους της τροπόπαυσης συμπίπτουν με τα δύο ισχυρά συμβάντα χιονόπτωσης που συλλέχθηκαν στην παρούσα Δ.Δ..
- xv. Οι συνεχόμενες δειγματοληψίες δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της συσσωρευτικής συγκέντρωσης ενεργότητας (Bq/m^2) του ^7Be στο έδαφος κάθε χρονική στιγμή, κάτι που αποτελεί σημαντικό δεδομένο για τη μελέτη φαινομένων διάβρωσης εδαφών.
- xvi. Η ταχύτητα απόθεσης του ^7Be είχε εύρος από 0.042mm/s έως 6.544 mm/s και του ^{210}Pb από 0.230 mm/s έως 8.465 mm/s, ενώ υπάρχει ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων απόθεσης των δύο ισοτόπων. Επιπλέον, παρατηρείται ασθενής αρνητική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας απόθεσης και της θερμοκρασίας και ασθενής θετική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία, γεγονός που τονίζει την επίδραση της αυξημένης ανοδικής μεταφοράς αερίων μαζών με την αύξηση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα απόθεσης, καθώς και την αυξημένη σάρωση των αιωρούμενων ραδιενεργών ισοτόπων σε συνθήκες αυξημένης σχετικής υγρασίας.
- xvii. Ο υπολογισμός του συντελεστή α εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε ραδιενεργά ισότοπα κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, κατά τη διάρκεια των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων στην παρούσα Δ.Δ., έλαβε χώρα εξάντληση της ροής των ραδιενεργών ισοτόπων κατά την περίοδο του χειμώνα, κάτι το οποίο δικαιολογείται από τα μεγάλα ύψη βροχόπτωσης, καθώς και τη συχνότητά τους, που δεν επέτρεπαν την ανανέωση των ραδιενεργών ισοτόπων στην

ατμόσφαιρα. Ακόμα, υψηλές τιμές του συντελεστή **α** παρατηρήθηκαν τις υπόλοιπες εποχές με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται την άνοιξη.

6.5 Συμπληρωματικοί πίνακες κεφαλαίου 6

Στην παρούσα παράγραφο παρατίθεται ο συγκεντρωτικός **Πίνακας 6.34** του συνόλου των δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ., ο **Πίνακας 6.35** στον οποίο δίνεται το σύνολο των μετεωρολογικών δεδομένων όπως αυτά αντιστοιχούν σε κάθε δείγμα ατμοσφαιρικής απόθεσης που συλλέχθηκε στην παρούσα Δ.Δ., καθώς και ο **Πίνακας 6.36** στον οποίο δίνονται οι μέσες εβδομαδιαίες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα, όπως αυτές αντιστοιχούν στην εκάστοτε δειγματοληψία ατμοσφαιρικής απόθεσης.

Πίνακας 6.34 : Το σύνολο των ατμοσφαιρικών δειγμάτων που συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν με την αναπτυχθείσα μέθοδο στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ. σε χρονολογική σειρά.

Κωδικός δείγματος	Περίοδος δειγματοληψίας			Επιφάνεια συλλογής (m ²)	Μάζα δείγματος (gr)	Σχόλια	
	Έναρξη	Λήξη	Σύνολο ημερών				
QSA1	16/6/2018	17/6/2018	1	0.56	3666	ρητίνη + μαγνητικός αναδευτήρας	4 από τα 6 υπο-δείγματα για την ανάπτυξη τη μεθόδου επεξεργασίας ατμοσφαιρικών αποθέσεων
QSA2					3666		
QSA3					3696	ρητίνη + χειροκίνητη ανάδευση	
QSA4					3676		
HR001	15/11/2018	16/11/2018	1	-	2750	υγρασία προ-βροχής	
WR001	17/11/2018	18/11/2018	1	-	3506	βροχή	
HR002	19/11/2018	20/11/2018	1	-	2818	υγρασία μετά-βροχής	
WR002	18/12/2018	18/12/2018	-	-	2738	βροχή	
WR003					2732	βροχή που αναλύθηκε με καθυστέρηση 2 εβδομάδων για διερεύνηση προσρόφησης των ραδιενεργών ισοτόπων στα τοιχώματα του δοχείου	
WR004					2724	βροχή που οξινίστηκε με HNO ₃ σε pH=3 και αναλύθηκε με 2 εβδομάδες καθυστέρηση για διερεύνηση προσρόφησης των ραδιενεργών ισοτόπων στα τοιχώματα του δοχείου	

WR005	8/1/2019	8/1/2019	0	4.5	3521	χιόνι από την κακοκαιρία "Τηλέμαχος"- μέσο ύψος απόθεσης 9cm
DR001	24/6/2019	8/7/2019	14	0.56	-	αρχικές δειγματοληψίες ξηρής απόθεσης για επέκταση της μεθόδου (Δ.Ε. Καρύδης)
DR002	19/7/2019	23/8/2019	35	0.56	-	
DR003	28/8/2019	19/9/2019	22	0.56	-	
TR001	11/3/2020	6/5/2020	56	0.75	-	ολική απόθεση παράλληλα με πυρκαγιά στη ζώνη αποκλεισμού του Τσερνόμπιλ
DR004	6/5/2020	21/5/2020	15	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλα με Sahara dust event* - ταυτόχρονη συλλογή φίλτρου αέρα a0554
DR005	6/7/2020	24/7/2020	18	0.75	-	ξηρή απόθεση
TR003	24/7/2020	17/9/2020	55	0.75	-	ολική απόθεση
TR002	17/9/2020	21/9/2020	4	0.75	-	ολική απόθεση παράλληλα με το μεσογειακό κυκλώνα "Ιανό"
DR006	25/9/2020	8/10/2020	13	0.75	-	ξηρή απόθεση
TR004	8/10/2020	6/11/2020	29	0.75	-	ολική απόθεση
TR005	6/11/2020	31/1/2021	86	0.56	3492	ολική απόθεση - λόγω μεγάλης ποσότητας αναλύθηκε το 7.44% του ολικού δείγματος
TR006	1/2/2021	22/2/2021	21	0.56	3936	ολική απόθεση - λόγω μεγάλης ποσότητας αναλύθηκε το 17.68% του ολικού δείγματος
WR006	15/2/2021	15/2/2021	0	0.18	4074	χιόνι από την κακοκαιρία "Μήδεια"- συλλογή στον Λόφο Ανθέων, Άνοιξη, Αττικής περιλαμβάνει τα πρώτα 20cm της ολικής απόθεσης
DR007	22/2/2021	1/3/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0559
DR008	1/3/2021	8/3/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση
TR007	8/3/2021	22/3/2021	14	0.75	-	ολική απόθεση παράλληλα με την έκρηξη του ηφαιστείου της Αίτνα-παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0560
TR008	22/3/2021	29/3/2021	7	0.75	-	ολική απόθεση παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0562
TR009	29/3/2021	5/4/2021	7	0.75	-	ολική απόθεση
TR010	5/4/2021	26/4/2021	21	0.75	-	ολική απόθεση-παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0563
DR009	26/4/2021	10/5/2021	14	0.75	-	ξηρή απόθεση

DR010	10/5/2021	17/5/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0564
DR011	17/5/2021	24/5/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλα με της δασικές πυρκαγιές της Κορίνθου
DR012	24/5/2021	31/5/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0567
DR013	31/5/2021	7/6/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση
TR011	7/6/2021	14/6/2021	7	0.75	-	ολική απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0568
WR007	9/6/2021	9/6/2021	0	0.1875	2746	βροχή
TR012	14/6/2021	22/6/2021	8	0.75	-	ολική απόθεση
DR014	22/6/2021	29/6/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0569
DR015	29/6/2021	6/7/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση
DR016	6/7/2021	15/7/2021	9	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0570
DR017	15/7/2021	22/7/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση
DR018	22/7/2021	29/7/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλα με δασική πυρκαγιά στο Βύρωνα- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0571
DR019	29/7/2021	6/8/2021	8	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλα με δασικές πυρκαγιές σε Β. Αττική και Β. Εύβοια
DR020	6/8/2021	30/8/2021	24	0.75	-	ξηρή απόθεση παράλληλα με δασικές πυρκαγιές σε Β. Αττική, Β. Εύβοια, Μεσσηνία, Ηλεία- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0572
DR021	30/8/2021	6/9/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0573
TR013	6/9/2021	13/9/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση (εκ παραδρομής δόθηκε κωδικός "ολικής απόθεσης")
DR022	13/9/2021	20/9/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0574
TR014	20/9/2021	27/9/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- (εκ παραδρομής δόθηκε κωδικός "ολικής απόθεσης")

DR023	27/9/2021	4/10/2021	7	0.75	-	ξηρή απόθεση- παράλληλη συλλογή φίλτρου αέρα a0575	
HR003	6/10/2021	8/10/2021	2		3094	υγρασία προ-βροχής	
WR008	8/10/2021	10/10/2021	2	0.375	3544	βροχή	
HR004	11/10/2021	12/10/2021	1	-	3082	υγρασία μετά-βροχής	
WR010	24/1/2022	25/1/2022	1	-	3334	χιόνι από την κακοκαιρία "Ελπίς", συλλογή στο Λόφο Ανθέων, Άνοιξη, Αττική διαχωρισμός κλασμάτων δείγματος βάσει του ύψους χιονόπτωσης	30-45cm
WR011			1	-	3398		20-30cm
WR012			1	-	3488		15-20cm
WR013			1	-	3546		10-15cm
WR014			1	-	3578		5-10cm
WR015			1	-	3230		4-5cm
WR016			1	-	2440		3-4cm
WR017			1	-	2592		2-3cm
WR018			1	-	1818		1-2cm
WR019			1	-	2608		0-1cm
WR020	17/5/2022	19/5/2022	2	-	2222	υγρασία προ-βροχής**	
WR021	18/5/2022	19/5/2022	1	0.1875	2804	βροχή	
HR005	3/10/2022	11/10/2022	8	-	2828	υγρασία	
HR006	18/10/2022	21/10/2022	3	-	2798	υγρασία	
HR007	24/10/2022	26/10/2022	2	-	2792	υγρασία	
HR008	27/10/2022	2/11/2022	6	-	2422	υγρασία	

*Sahara dust event: έντονα συμβάντα μεταφοράς αφρικανικής σκόνης

** Εκ παραδρομής δόθηκε κωδικός υγρής απόθεσης

Πίνακας 6.35 : Μετεωρολογικά δεδομένα (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων της παρούσας Δ.Δ.

Κωδικός δείγματος	Κυρίαρχη κατεύθυνση ανέμου	Θερμοκρασία	Σχετική υγρασία	Ατμοσφαιρική πίεση	Ύψος βροχής	Μέση ταχύτητα ανέμου
		°C	%	mbar	mm	km/h
QSA1	SE	19.5 ± 0.3	80.5 ± 1.2	1006.6 ± 0.2	50.8	2.7 ± 0.5
QSA2						
QSA3						
QSA4						
HR001	E	10.8 ± 0.2	70.2 ± 0.8	1021.0 ± 0.1	0.2	9.5 ± 0.4
WR001	E	10.7 ± 0.2	85.0 ± 0.6	1017.1 ± 0.4	42.0	11.6 ± 0.4
HR002	SW	15.5 ± 0.2	81.7 ± 1.0	1014.0 ± 0.3	3.6	4.7 ± 0.7
WR002	SE	8.3 ± 0.4	86.2 ± 1.0	1013.1 ± 0.8	20.6	9.5 ± 0.6
WR003						
WR004						
WR005	NE	-0.4 ± 0.4	82.8 ± 2.1	1020.3 ± 0.2	7.6	3.6 ± 0.6
DR001	NE	26.7 ± 0.2	48.4 ± 0.5	1011.3 ± 0.1	0.2	8.6 ± 0.6
DR002	NE	27.2 ± 0.1	44.9 ± 0.4	1010.5 ± 0.0	0.0	9.2 ± 0.5
DR003	NE	24.3 ± 0.1	46.3 ± 0.4	1013.9 ± 0.0	0.0	8.9 ± 0.2
TR001	SW	13.2 ± 0.1	61.5 ± 0.3	1014.4 ± 0.0	125.6	7.2 ± 0.1
DR004	ESE	23.1 ± 0.3	46.0 ± 0.7	1013.7 ± 0.1	0.4	5.3 ± 0.2
DR005	NE	25.5 ± 0.2	49.0 ± 0.5	1009.8 ± 0.0	0.0	8.6 ± 0.1
TR003	ESE	26.5 ± 0.1	48.0 ± 0.3	1010.7 ± 0.0	22.8	7.4 ± 0.2
TR002	NE	21.2 ± 0.2	68.6 ± 0.9	1013.2 ± 0.1	7.8	9.8 ± 0.2
DR006	SW	22.1 ± 0.2	61.8 ± 0.7	1012.1 ± 0.1	0.4	4.4 ± 0.1
TR004	SW	17.4 ± 0.1	66.9 ± 0.4	1016.7 ± 1.5	25.4	5.4 ± 0.3
TR005	SW	11.5 ± 0.0	74.2 ± 0.2	1016.9 ± 0.0	268.2	8.1 ± 0.2
TR006	SW	9.7 ± 0.1	72.4 ± 0.4	1018.3 ± 0.1	21.2	6.0 ± 0.1
WR006	NE	0.2 ± 0.1	90.2 ± 0.6	1023.1 ± 0.3	3.2	7.7 ± 0.2

DR007	ESE	11.0 ± 0.3	61.4 ± 0.9	1026.6 ± 0.1	0.0	7.4 ± 0.9
DR008	NE	10.6 ± 0.2	61.5 ± 0.8	1022.9 ± 0.1	0.0	3.4 ± 0.2
TR007	SW	10.9 ± 0.1	68.4 ± 0.6	1010.7 ± 0.1	3.2	3.2 ± 0.2
TR008	SE	8.2 ± 0.3	63.2 ± 1.1	1021.2 ± 0.1	1.4	1.9 ± 0.2
TR009	SW	12.1 ± 0.2	65.4 ± 0.8	1016.3 ± 0.1	11.0	3.1 ± 0.1
TR010	SW	13.1 ± 0.1	62.7 ± 0.5	1016.3 ± 0.1	14.0	2.4 ± 0.2
DR009	SW	20.2 ± 0.2	51.4 ± 0.7	1013.2 ± 0.1	0.0	1.3 ± 0.1
DR010	SW	19.3 ± 0.3	48.4 ± 0.9	1010.2 ± 0.1	0.0	1.6 ± 0.1
DR011	SW	21.1 ± 0.3	46.2 ± 0.8	1013.5 ± 0.1	0.0	1.6 ± 0.1
DR012	SE	22.1 ± 0.3	54.3 ± 0.9	1011.8 ± 0.1	0.0	1.5 ± 0.1
DR013	SE	20.2 ± 0.3	55.3 ± 1.0	1017.0 ± 0.1	0.0	1.6 ± 0.2
TR011	SE	20.5 ± 0.3	66.3 ± 1.1	1011.8 ± 0.1	24.0	1.5 ± 0.1
WR007	NNE	20.9 ± 0.7	70.3 ± 3.2	1010.9 ± 0.1	3.6	1.4 ± 0.1
TR012	SW	23.1 ± 0.3	57.9 ± 0.9	1012.3 ± 0.1	3.2	1.5 ± 0.1
DR014	SE	29.2 ± 0.3	50.3 ± 0.9	1012.3 ± 0.1	0.0	2.3 ± 0.3
DR015	SE	28.0 ± 0.3	47.2 ± 1.0	1008.9 ± 0.1	0.0	2.3 ± 0.2
DR016	E	28.3 ± 0.3	40.8 ± 0.7	1011.1 ± 0.0	0.0	3.1 ± 0.2
DR017	SE	27.1 ± 0.3	54.1 ± 1.0	1006.1 ± 0.1	0.0	2.0 ± 0.2
DR018	NE	27.9 ± 0.3	37.3 ± 0.8	1012.7 ± 0.1	0.0	3.0 ± 0.2
DR019	SE	33.0 ± 0.3	28.9 ± 0.6	1008.0 ± 0.1	0.0	1.4 ± 0.1
DR020	SE	27.1 ± 0.2	45.4 ± 0.5	1011.1 ± 0.0	0.0	2.3 ± 0.1
DR021	SE	23.5 ± 0.2	54.5 ± 0.8	1013.9 ± 0.1	0.0	2.7 ± 0.2
TR013	NE	20.7 ± 0.2	61.8 ± 0.8	1014.4 ± 0.1	0.2	2.8 ± 0.2
DR022	SW	25.6 ± 0.3	44.0 ± 0.8	1013.6 ± 0.1	0.0	1.9 ± 0.2
TR014	SE	21.1 ± 0.3	53.4 ± 0.9	1016.5 ± 0.1	0.0	2.4 ± 0.2
DR023	NE	18.7 ± 0.2	56.5 ± 0.6	1018.8 ± 0.0	0.0	4.0 ± 0.2
HR003	SE	16.9 ± 0.3	69.9 ± 1.0	1016.9 ± 0.1	0.8	3.6 ± 0.4
WR008	SE	18.2 ± 0.3	83.4 ± 1.1	1015.9 ± 0.1	5.8	1.5 ± 0.3
HR004	SW	18.4 ± 0.2	73.5 ± 1.2	1010.4 ± 0.2	0.2	1.6 ± 0.3

WR010	NE	0.2 ± 0.1	80.3 ± 1.1	1023.9 ± 0.1	6.6	10.6 ± 0.6
WR011						
WR012						
WR013						
WR014						
WR015						
WR016						
WR017						
WR018						
WR019						
WR020	E	19.7 ± 0.5	58.0 ± 1.7	1016.4 ± 0.2	17.4	9.5 ± 0.4
WR021	E	18.6 ± 0.5	57.2 ± 2.1	1017.0 ± 0.3	17.4	12.0 ± 0.5
HR005	NE	18.4 ± 0.2	55.2 ± 0.7	1019.1 ± 0.1	0.0	8.5 ± 0.2
HR006	NE	16.2 ± 0.3	62.6 ± 1.1	1020.3 ± 0.1	0.0	9.2 ± 0.3
HR007	E	19.0 ± 0.5	65.3 ± 1.5	1019.0 ± 0.1	0.0	3.2 ± 0.1
HR008	NE	18.0 ± 0.2	52.4 ± 0.8	1020.7 ± 0.1	0.0	8.6 ± 0.3

Πίνακας 6.36 : Μέσες εβδομαδιαίες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα όπως αυτές αντιστοιχούν στην εκάστοτε δειγματοληψία ατμοσφαιρικής απόθεσης.

Κωδικός δείγματος	μg/m ³					ng/ m ³				
	PM2.5	PM10	NO	NO ₂	O ₃	As	Cd	Ni	Pb	BaP
DR001	2364	3999	197	2164	18080	0.500	0.045	17.950	2.100	0.003
DR002	2086	3324	179	1084	17279	0.050	0.003	0.050	0.210	-
DR003	1716	2535	184	1256	17312	-	-	-	-	-
TR001	1752	2274	201	1410	13529	0.219	0.168	2.131	0.550	0.017
DR004	2349	5084	158	1445	14969	0.117	0.084	6.067	0.257	0.006
DR005	1877	2640	176	1053	15705	0.486	0.311	0.292	42.039	0.002
TR003	1909	3151	183	1234	16603	0.382	0.188	2.717	14.064	0.005
TR002	1775	3423	182	625	13146	-	-	-	-	-
DR006	1246	2283	315	2292	11579	0.269	0.016	2.235	0.592	0.002
TR004	1352	1883	246	1632	11079	0.302	0.075	7.314	0.664	0.006
TR005	1614	1983	274	1212	8656	0.263	0.171	1.359	2.177	0.057
TR006	1858	3212	336	1754	9351	0.133	0.243	0.800	8.933	0.036
DR007	2774	4259	325	2052	10337	0.100	0.190	2.500	0.100	0.000
DR008	1773	2606	237	1674	10900	0.100	0.170	1.100	0.100	0.001
TR007	1692	2730	230	1556	10713	0.100	0.165	0.200	7.100	0.010
TR008	1853	2619	201	1574	11333	0.100	0.230	2.500	0.100	-
TR009	2224	3355	279	1765	11856	0.100	0.170	3.900	0.100	0.029
TR010	1937	3139	339	1959	11615	0.133	0.233	0.267	6.600	0.007
DR009	2540	5409	419	1442	8537	0.150	0.090	0.300	4.200	0.014
DR010	1392	2731	171	601	16168	0.100	0.020	0.200	9.500	0.001
DR011	1828	3358	170	1149	17662	0.100	0.020	0.200	0.100	-
DR012	2131	4007	203	2114	18216	0.100	0.020	0.200	11.000	0.001
DR013	1874	2941	177	1308	17921	0.100	0.020	0.200	0.100	-
TR011	2127	3123	178	1604	16735	0.200	0.040	0.400	13.100	0.001
TR012	1983	2990	194	1741	17231	0.088	0.018	0.175	0.088	0.001
DR014	3753	7711	234	2479	18444	0.100	0.020	0.200	11.000	-

DR015	2539	4821	174	1760	19548	0.100	0.020	0.200	0.100	0.001
DR016	2056	3488	175	785	19976	0.078	0.124	1.244	0.078	-
DR017	2119	4367	186	1417	17448	0.100	0.020	0.200	12.400	0.001
DR018	1810	3368	168	479	19891	-	-	-	-	-
DR019	3823	8063	187	2027	20804	0.088	0.018	1.925	0.088	0.001
DR020	2455	4042	188	1089	18767	0.117	0.023	0.875	5.950	0.001
DR021	1899	3120	185	1130	17463	0.100	0.020	0.200	0.100	-
TR013	1884	3471	178	828	16220	0.300	0.220	0.200	0.100	-
DR022	2750	5269	201	1887	17542	0.300	0.170	7.100	24.200	-
TR014	1964	3428	206	1733	14418	-	-	-	-	-
DR023	1828	2947	173	849	14975	-	-	-	-	-

*Το σύμβολο “-” αφορά ελλείπουσες τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Επίλογος

Το Κεφάλαιο αυτό αποτελεί τον επίλογο και τη σύνοψη της Διατριβής. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά η έρευνα που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της, οι προκλήσεις που έπρεπε να αντιμετωπισθούν, τα αποτελέσματά της, καθώς και τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακόμα, παρατίθενται τα επιτεύγματα και τα σημεία πρωτοτυπίας της διατριβής και γίνονται οι προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας. Τέλος παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις και οι ανακοινώσεις σε συνέδρια που έλαβαν χώρα μέχρι την ολοκλήρωση της Διατριβής.

7.1 Συνοπτική Παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής

Ο βασικός στόχος της Διατριβής ήταν η διεύρυνση των δυνατοτήτων παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ – με έμφαση στην ατμόσφαιρα – προκειμένου να καταστεί δυνατή η ολοκληρωμένη μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης ενεργότητας και της απόθεσης μίας σειράς ραδιενεργών ισοτόπων. Προς την κατεύθυνση επίτευξης του στόχου αυτού, η έρευνα που πραγματοποιήθηκε κινήθηκε σε δύο άξονες:

- i. Ανάπτυξη, βελτίωση και τυποποίηση τεχνικών δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης υγρών ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
- ii. Συστηματικές δειγματοληψίες υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας της ατμόσφαιρας, σε συνδυασμό με δειγματοληψίες αερολύματος στην ατμόσφαιρα, αλλά και μετεωρολογικών και άλλων παραμέτρων.

Αναφορικά με την ανάπτυξη και βελτίωση των μεθόδων δειγματοληψίας και ανάλυσης δειγμάτων υγρών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας, ως βάση χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία που είχε αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στο παρελθόν, η

οποία όμως επεκτάθηκε σημαντικά, ελέγχθηκε ως προς την επαναληψιμότητα και τυποποιήθηκε ως διαδικασία.

Αναφορικά με τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων, με στόχο την επίτευξη της υψηλότερης ακρίβειας ανάλυσης και χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης, έγινε συστηματική και ενδεδεγμένη διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην ανάλυση το υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της μέτρησης και δόθηκε μεγάλη έμφαση στη μείωση του, καθώς και στη ρεαλιστική εκτίμησή του κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Κατά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις έμφαση δόθηκε στην ανίχνευση και στον ποσοτικό προσδιορισμό των ισοτόπων ^7Be και ^{210}Pb . Ειδικά για το ^{210}Pb , έγινε ενδεδεγμένη διερεύνηση, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι το ποσοστό του ^{210}Pb που παράγεται πάνω σε φίλτρο αέρα, το οποίο συλλέγεται κατά τη δειγματοληψία αερολύματος, από τη διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που συλλέγονται σε αυτό είναι αμελητέο.

Η συνολική μεθοδολογία δειγματοληψίας και ανάλυσης που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε εν συνεχεία για μετρήσεις υγρών, ξηρών, ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και ατμοσφαιρικής υγρασίας. Οι δειγματοληψίες και μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής και αφορούσαν (i) αμιγώς υγρές κατά τη διάρκεια επεισοδίων βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, (ii) αμιγώς ξηρές και (iii) ολικές αποθέσεις, ενώ για μία μεγάλη χρονική περίοδο κατέστη δυνατή η πραγματοποίηση συνεχόμενων δειγματοληψιών και μετρήσεων. Σε αρκετές περιπτώσεις οι μετρήσεις αποθέσεων συνδυάστηκαν με μετρήσεις της συγκέντρωσης ενεργότητας στον αέρα, ενώ συλλέχθηκαν δεδομένα από πλήθος μετεωρολογικών και άλλων παραμέτρων από διάφορες πηγές.

Μετά τη συλλογή μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις αποθέσεων και συγκεντρώσεων στον αέρα, ακολούθησε η επεξεργασία τους, με στόχο την εξεύρεση συσχετίσεων μεταξύ διαφόρων μεγεθών και προφανώς την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων. Στη φάση αυτή της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ακολουθήθηκαν διάφορες προσεγγίσεις και δοκιμάστηκε η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων μετά από κατάλληλες ομαδοποιήσεις. Έτσι, έγινε προσπάθεια εξεύρεσης συσχετίσεων με διάφορα μεγέθη (i) μόνο για τις ξηρές αποθέσεις, (ii) για τις ολικές αποθέσεις και (iii) για τις συνεχόμενες μετρήσεις αποθέσεων. Από τη διαδικασία αυτή επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι οι καλύτερες συσχετίσεις

προκύπτουν από τις συνεχόμενες μετρήσεις αποθέσεων, κάτι που είναι σημαντικό για το μελλοντικό σχεδιασμό μίας δειγματοληψίας.

Οι επιμέρους στόχοι που ετέθησαν κατά την εκπόνηση της Διατριβής ήταν:

- i. η βελτίωση των τεχνικών γ-φασματοσκοπίας που εφαρμόζονται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ για την ανάλυση δειγμάτων πολύ χαμηλής ραδιενέργειας,
- ii. η διερεύνηση της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας και η συσχέτισή τους με το υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων,
- iii. η διερεύνηση της κύμανσης του υποστρώματος φωτοκορυφών των ανιχνευτικών διατάξεων λόγω της κύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου και η επιλογή του κατάλληλου φάσματος υποστρώματος ανά περίπτωση,
- iv. η διερεύνηση της επίδρασης που έχουν στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης τα θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου που συλλέγονται στα φίλτρα αέρα κατά τη δειγματοληψία αερολύματος,
- v. η επιλογή κατάλληλων σεναρίων χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας, αναμονής πριν την ανάλυση και διάρκειας γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ανά περίπτωση,
- vi. η διερεύνηση της επίδρασης των συλλεχθέντων βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο συνολικό μετρούμενο ^{210}Pb στα φίλτρα ατμοσφαιρικού αέρα,
- vii. η ανάπτυξη μεθοδολογίας για συστηματική δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας,
- viii. η συστηματική δειγματοληψία δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους, καθώς και η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε ατμοσφαιρικά μοντέλα.

Μετά το 2^ο Κεφάλαιο που αποτελεί την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και τη συνοπτική παρουσίαση εξοπλισμού και διαδικασιών στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη της επίδρασης των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις. Για τον λόγο αυτό, αρχικά μελετήθηκε η κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας. Συνολικά έλαβαν χώρα 4 δειγματοληψίες χρονικής διάρκειας 12 ημερών η καθεμία και εκτιμήθηκαν οι ωριαίες συγκεντρώσεις του

ραδονίου και των θυγατρικών του. Παράλληλα με ορισμένες δειγματοληψίες έγινε και συλλογή διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος σε επιλεγμένους ανιχνευτές, ώστε να μελετηθεί η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με το υπόστρωμα των ανιχνευτικών διατάξεων. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε ότι:

- δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία ή την πίεση στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας,
- παρατηρείται ημερήσια κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές να απέχουν περίπου 12 ώρες μεταξύ τους, όπου οι μέγιστες συγκεντρώσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του παρατηρούνται κυρίως τις απογευματινές ώρες και οι ελάχιστες από τα μεσάνυχτα έως τις πρώτες πρωινές ώρες,
- η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου παρουσιάζει πολύ καλή συσχέτιση με την κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του.

Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις του ραδονίου μέσα στο εργαστήριο συσχετίστηκαν με τις εξωτερικές μετεωρολογικές συνθήκες. Από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων προέκυψε ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζει:

- στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση με την εξωτερική θερμοκρασία, καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία,
- ασθενή αρνητική συσχέτιση, στις περισσότερες περιπτώσεις, με την εξωτερική βαρομετρική πίεση, καθώς και με τη διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση,
- ασθενή αρνητική συσχέτιση με την ταχύτητα του ανέμου.

Η σύγκριση της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του με την κύμανση των υποστρωμάτων των ανιχνευτών του ΕΠΤ-ΕΜΠ έγινε μέσω της φωτοκορυφής του ^{214}Bi (609.32keV) των φασμάτων υποστρώματος. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι η κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας επηρεάζει στατιστικά σημαντικά τα υποστρώματα των ανιχνευτών γερμανίου. Ωστόσο, η επίδραση αυτή τείνει να εξαφανίζεται σε μεγάλης διάρκειας φάσματα. Οι ισχυρότερες

συσχετίσεις μεταξύ της κύμανσης του ραδονίου και του ρυθμού καταμέτρησης της φωτοκορυφής του υποστρώματος εμφανίζονται για τον ανιχνευτή Ge2 για τον οποίο δεν λαμβάνεται κανένα μέτρο μείωσης του υποστρώματος.

Έχοντας επιβεβαιώσει την κύμανση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας και την επίδρασή του στην κύμανση του υποστρώματος των ανιχνευτών, κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της επιλογής του καταλληλότερου φάσματος υποστρώματος κατά την ανάλυση ενός δείγματος, ανάλογα με το ισότοπο και τη διάρκεια δειγματοληψίας. Για τον σκοπό αυτό, έγινε συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση πλήθους φασμάτων υποστρώματος διαφορετικής διάρκειας και από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσής τους τελικά προτείνεται κατάλληλη μεθοδολογία επιλογής του φάσματος υποστρώματος. Όπως διαπιστώθηκε, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην περίπτωση φωτοκορυφών υποστρώματος κοντά στα όρια ανίχνευσης.

Η μελέτη του Κεφαλαίου 3 επεκτάθηκε και στο υπόστρωμα το οποίο δημιουργείται στο γ-φάσμα εξαιτίας της δειγματοληψίας φίλτρων αέρα, και ειδικότερα στην επίδραση που έχουν στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης επιλεγμένων ραδιενεργών ισωτόπων τα θυγατρικά του ραδονίου και του θορονίου που συλλέγονται πάνω στα φίλτρα. Για τον σκοπό αυτό, προγραμματίστηκαν και πραγματοποιήθηκαν πλήθος δειγματοληψιών φίλτρων αέρα για διάφορα σενάρια δειγματοληψίας τα οποία υπέστησαν επεξεργασία με διάφορους τρόπους και μελετήθηκε η χρονική εξέλιξη των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου πάνω σε αυτά, καθώς και τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης των ραδιενεργών ισωτόπων ^7Be , ^{106}Ru , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{134}Cs και ^{131}I . Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- i. μία χρονική καθυστέρηση 2h μεταξύ της συλλογής του φίλτρου αέρα και της δειγματοληψίας, οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης,
- ii. για μεγάλης διάρκειας δειγματοληψίες (μερικών ημερών) απαιτείται μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση, της τάξης των 24 ωρών.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, στόχος ήταν να μελετηθεί η επίδραση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στη συγκέντρωση του ^{210}Pb που μετράται πάνω σε ένα φίλτρο αέρα. Για τον σκοπό αυτό, αφού διαπιστώθηκε το επίπεδο της κύμανσης της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εξωτερικό περιβάλλον,

αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μεθοδολογία για την εκτίμηση της κύμανσης αυτής στην ατμόσφαιρα με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται σε σειρά δειγματοληψιών και πειραματικών μετρήσεων καθώς και στην ανάπτυξη και επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την εξέλιξη όλων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου από τη φάση της δειγματοληψίας έως και την ολοκλήρωση της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Καθώς η επίλυση των διαφορικών αυτών εξισώσεων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη και εξαρτάται από τα πειραματικά δεδομένα τα οποία τροφοδοτούνται στις εξισώσεις, αναπτύχθηκε ιδιαίτερη τεχνική ώστε οι εξισώσεις να αποδίδουν λύσεις σχεδόν σε κάθε περίπτωση. Η μεθοδολογία αυτή κατέστησε δυνατή την εκτίμηση άνω και κάτω ορίου του συνολικού πλήθους των πυρήνων όλων των θυγατρικών του ραδονίου που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο και τα οποία τελικά μεταπίπτουν σε ^{210}Pb . Εκτός από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, για λόγους σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκε και άλλη – απλούστερη – μεθοδολογία η οποία εμφανίζεται στη βιβλιογραφία. Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης προέκυψε ότι:

- Η πολύ υψηλή ευαισθησία επίλυσης του συστήματος εξισώσεων για τον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά συνδυάζοντας μετρήσεις από διαφορετικά σενάρια χρονικής διάρκειας λήψης φασμάτων, καθώς και αναζητώντας θετική λύση του συστήματος σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης συγκέντρωσης του ^{214}Pb και του ^{214}Bi .
- Παρά τη λεπτομερή προσέγγιση υπολογισμού των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, προκύπτει ότι το ποσοστό συνεισφοράς τους στον συνολικό συλλεχθέντα ^{210}Pb κυμαίνεται από 0.26% έως 0.38% και είναι τόσο μικρό που δεν είναι στατιστικά σημαντικό συγκρινόμενο με τις αβεβαιότητες των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων οι οποίες κυμαίνονται από 5% έως 7%.
- Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσής τους με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας.

Η μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε και επιλύθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ^{210}Pb που συλλέγεται στο

φίλτρο αέρα, μπορεί πολύ εύκολα να προσαρμοστεί και να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση άλλων ισοτόπων τα οποία συλλέγονται σε δειγματοληψίες αέρα μεγάλης διάρκειας τις οποίες ακολουθεί μεγάλη διάρκειας γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη, βελτίωση και τυποποίηση της μεθοδολογίας δειγματοληψίας και επεξεργασίας των υγρών δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει τη δυνατότητα μικρότερου χρονικού βήματος συλλογής, καθώς και μικρότερου όγκου δείγματος, κάτι που επιτρέπει την πιο λεπτομερή χρονικά παρακολούθηση της εξέλιξης της συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων στις αποθέσεις. Τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων των δειγμάτων που επεξεργάστηκαν με την αναπτυχθείσα μέθοδο, οδήγησαν στην ανίχνευση και στον προσδιορισμό με υψηλή ακρίβεια της συγκέντρωσης ενεργότητας και του ρυθμού απόθεσης για τα ραδιενεργά ισότοπα ^7Be και ^{210}Pb , και διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης που επιτεύχθηκαν στις υγρές αποθέσεις ήταν αρκετά χαμηλά, της τάξης του $\sim 0.02 \text{ Bq/L}$ τόσο για το ^7Be όσο και για τον ^{210}Pb . Όσον αφορά τον ρυθμό απόθεσης στις ξηρές και ολικές αποθέσεις, τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης που επιτεύχθηκαν ήταν $0.01 \text{ Bq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$ για το ^7Be και $0.04 \text{ Bq}/(\text{week} \cdot \text{m}^2)$ για τον ^{210}Pb .

Στο 6^ο Κεφάλαιο, εφαρμόζοντας την ολοκληρωμένη πλέον μεθοδολογία δειγματοληψίας, προετοιμασίας δείγματος και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας, έλαβαν χώρα συστηματικές δειγματοληψίες υγρών, ξηρών και ολικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας. Συλλέχθηκαν συνολικά 25 δείγματα ξηρής απόθεσης, 23 δείγματα υγρής απόθεσης, 12 δείγματα ολικής απόθεσης και 9 δείγματα υγρασίας. Παράλληλα με μερικά από τα παραπάνω δείγματα συλλέχθηκαν και 16 δείγματα ατμοσφαιρικού αερολύματος σε φίλτρα. Τα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων ομαδοποιήθηκαν με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το είδος της εναπόθεσης, καθώς και βάσει της χρονικής τους συνέχειας. Για κάθε ομάδα δειγμάτων διερευνήθηκε η συσχέτιση των συγκεντρώσεων ενεργότητας (για δείγματα υγρής απόθεσης και υγρασίας) ή των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb με:

- την εξωτερική θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα του ανέμου, καθώς και το ύψος της βροχόπτωσης (για τα δείγματα υγρών αποθέσεων και υγρασίας),

- με τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρυπαντών PM2.5, PM10, NO, NO₂, O₃, As, Cd, Ni, Pb και BaP,
- το πλήθος των ηλιακών κηλίδων (μόνο για το ⁷Be),
- το ύψος της τροπόπαυσης (μόνο για το ⁷Be).

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιώντας τις συνεχόμενες χρονικά δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων έγινε εκτίμηση:

- του ετήσιου ρυθμού απόθεσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb,
- της συσσωρευτικής συγκέντρωσης του ⁷Be και του ²¹⁰Pb στο έδαφος,
- της μέσης ταχύτητας εναπόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων,
- του κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστή εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε ⁷Be και ²¹⁰Pb.

Από το σύνολο των δειγματοληψιών και των μετρήσεων που έγιναν στα πλαίσια της Διατριβής, καθώς και τη διερεύνηση διαφόρων συσχετίσεων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα και συμπεράσματα:

- i. Το εύρος των συγκεντρώσεων ενεργότητας και των ρυθμών απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων που ανιχνεύθηκαν είναι:
 - a. για το ⁷Be:
 - από 0.77 έως 4.11 Bq/L στη βροχή
 - από 0.14 έως 1.40 Bq/L στο χιόνι
 - από 0.04 έως 0.15 Bq/L στην υγρασία
 - από 0.30 έως 16.55 Bq/(week·m²) στις ξηρές αποθέσεις
 - από 6.98 έως 40.23 Bq/(week·m²) στις ολικές αποθέσεις
 - b. για τον ²¹⁰Pb :
 - από 50 έως 709 mBq/L στη βροχή
 - από 40 έως 123 mBq/L στο χιόνι
 - από 135 έως 2195 mBq/(week·m²) στις ξηρές αποθέσεις
 - από 430 έως 6629 mBq/(week·m²) στις ολικές αποθέσεις
- ii. Η χρονική αλληλουχία μεταξύ των δειγμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη συσχετίσεων μεταξύ των διαφόρων μεγεθών, καθώς συμπεριλαμβάνει τις μειώσεις και αυξήσεις των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα, όπως αυτές διαδέχονται η μία την άλλη, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται συσχετίσεις μεταξύ των ρυθμών

- απόθεσης με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους, που απουσιάζουν στις περιπτώσεις ομαδοποίησης των δειγμάτων βάσει του μηχανισμού εναπόθεσης.
- iii. Παρατηρήθηκε ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του ^7Be και του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρής απόθεσης και ασθενής θετική συσχέτιση στα δείγματα ολικής απόθεσης.
 - iv. Το μεγαλύτερο ποσοστό του ^7Be και του ^{210}Pb εναποτίθεται κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, με τα δύο ισότοπα να εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση για τις δειγματοληψίες αυτές, τόσο για εβδομαδιαία, όσο και για μηνιαία χρονικά βήματα.
 - v. Η μέση ετήσια απόθεση υπολογίστηκε στα $790 \pm 5 \text{ Bq}/(\text{year}\cdot\text{m}^2)$ για το ^7Be και στα $78.7 \pm 1.0 \text{ Bq}/(\text{year}\cdot\text{m}^2)$ για τον ^{210}Pb .
 - vi. Ο λόγος του ρυθμού απόθεσης μεταξύ του συνόλου των ετήσιων ξηρών αποθέσεων προς την ετήσια απόθεση υπολογίστηκε στα 0.17 ± 0.003 για το ^7Be και στα 0.29 ± 0.010 για τον ^{210}Pb .
 - vii. Η διερεύνηση συσχέτισης των αποτελεσμάτων των ατμοσφαιρικών αποθέσεων με τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους έδειξε:
 - Ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
 - Ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και του ρυθμού απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb στις συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων.
 - Δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ του λόγου $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις με το ύψος βροχόπτωσης, ωστόσο οι μέγιστες τιμές απαντώνται μόνο για μηδενικά ύψη βροχόπτωσης (απουσία υγρών αποθέσεων). Το εύρος του λόγου $^{210}\text{Pb}/^7\text{Be}$ ανά δείγμα ήταν από 0.043 έως 0.840.
 - Η κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια των συνεχόμενων δειγματοληψιών ήταν η Νοτιοδυτική (SW) και ταυτίστηκε με το μεγαλύτερο πλήθος των μέγιστων ρυθμών απόθεσης του ^{210}Pb .
 - Οι συγκεντρώσεις του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα παρουσίασαν ισχυρή θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία και ισχυρή αρνητική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία. Οι συγκεντρώσεις του ^{210}Pb στον ατμοσφαιρικό αέρα

παρουσίασαν ασθενή θετική συσχέτιση με την υγρασία. Οι συσχετίσεις αυτές είναι ακριβώς αντίθετες με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των ατμοσφαιρικών αποθέσεων.

viii. Η σύγκριση των μετρήσεων των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικής απόθεσης με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών έδειξε:

a. για το ^7Be :

- Ισχυρή αρνητική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3).
- Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του βενζο[α]πυρένιου (BaP).
- Ασθενή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO).

b. για τον ^{210}Pb :

- Ασθενή αρνητική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3).
- Ασθενή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του βενζο[α]πυρένιου (BaP).

Πάντως, πρέπει να επισημανθεί ότι η διαπίστωση συσχέτισης δεν πρέπει να συγχέεται με τη ύπαρξη εξάρτησης του ενός μεγέθους από το άλλο.

ix. Η συσχέτιση των μετρήσεων στον ατμοσφαιρικό αέρα με τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών έδειξε:

a. για το ^7Be :

- Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του όζοντος (O_3),

b. για τον ^{210}Pb :

- Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση των σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$,
- Ισχυρή θετική συσχέτιση με την ατμοσφαιρική συγκέντρωση σωματιδίων PM_{10} .

x. Οι ρυθμοί απόθεσης του ^7Be στα δείγματα των συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων παρουσιάζουν ασθενή αρνητική συσχέτιση με το πλήθος των ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 9 μηνών.

- xi. Το ύψος της τροπόπαυσης παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με το ρυθμό απόθεσης του ^7Be στα δείγματα των συνεχόμενων δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και κατ' επέκταση, στις επιμέρους μηνιαίες συνολικές αποθέσεις.
- xii. Η ταχύτητα απόθεσης του ^7Be εκτιμήθηκε στην περιοχή από 0.042mm/s έως 6.544 mm/s και του ^{210}Pb από 0.230 mm/s έως 8.465 mm/s, ενώ διαπιστώνεται ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ τους. Ακόμα, παρατηρείται ασθενής αρνητική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας απόθεσης και της θερμοκρασίας και ασθενής θετική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία, γεγονός που τονίζει την επίδραση της αυξημένης ανοδικής μεταφοράς αερίων μαζών με την αύξηση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα απόθεσης, καθώς και την αυξημένη σάρωση των αιωρούμενων ραδιενεργών ισοτόπων σε συνθήκες αυξημένης σχετικής υγρασίας.
- xiii. Ο υπολογισμός του συντελεστή εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε ραδιενεργά ισότοπα κανονικοποιημένου ως προς τις υγρές αποθέσεις, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τους χειμερινούς μήνες μεταξύ των ετών 2020 και 2021 το υψηλό ύψος βροχοπτώσεων οδήγησε σε εξάντληση της ροής των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα.

7.2 Επιτεύγματα και σημεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ.

Τα επιτεύγματα και τα στοιχεία πρωτοτυπίας της παρούσας Δ.Δ. μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- i. Ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για δειγματοληψία, επεξεργασία και ανάλυση με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας δειγμάτων υγρών, ξηρών και ολικών ατμοσφαιρικών αποθέσεων, καθώς και υγρασίας.
- ii. Διεξαγωγή συστηματικών δειγματοληψιών ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας και προσδιορισμός των συγκεντρώσεων/ρυθμών απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων ^7Be και ^{210}Pb .
- iii. Συσχέτιση των ρυθμών απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb με μετεωρολογικές παραμέτρους, συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών, πλήθος ηλιακών κηλίδων και με το ύψος της τροπόπαυσης (μόνο για το ^7Be).
- iv. Υπολογισμός μίας σειράς παραμέτρων για το ^7Be και τον ^{210}Pb , όπως: ο ετήσιος ρυθμός απόθεσης, η συσσωρευτική επιφανειακή τους συγκέντρωση

- ενεργότητας, η ταχύτητα εναπόθεσης, ο κανονικοποιημένος ως προς τις υγρές αποθέσεις συντελεστής εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας.
- v. Αναλυτική επίλυση των εξισώσεων που διέπουν την παραγωγή-κατανάλωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου από τη δειγματοληψία φίλτρων αέρα έως την ολοκλήρωση της γ φασματοσκοπικής ανάλυσης τους. Συναφώς, ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ευαισθησίας, κατά την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων αυτών.
 - vi. Προσδιορισμός του ποσοστού της συνεισφοράς των συλλεχθέντων βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα φίλτρα αέρα στον συνολικά μετρούμενο ^{210}Pb πάνω σε αυτά.
 - vii. Ενδεδειγμένη διερεύνηση θεμάτων που αφορούν τα υποστρώματα των ανιχνευτικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ και σύσταση κατευθυντήριων οδηγιών για την επιλογή του κατάλληλου φάσματος υποστρώματος, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες των φωτοκορυφών υποστρώματος του εκάστοτε ανιχνευτή, καθώς και τη χρονική διάρκεια λήψης φάσματος του εκάστοτε δείγματος προς ανάλυση.
 - viii. Σύσταση κατευθυντήριων οδηγιών για την επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης μίας σειράς ισοτόπων σε φίλτρα αέρα, ανάλογα με τη διάρκεια δειγματοληψίας.
 - ix. Δημιουργία του υπολογιστικού εργαλείου Excel «Radical» για τον υπολογισμό συγκεντρώσεων ενεργότητας και κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης για ραδιενεργά ισότοπα για όλες τις βασικές γεωμετρίες και υλικά δειγμάτων για τους ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με δυνατότητες επέκτασης ή διαμόρφωσης του εργαλείου για την εισαγωγή νέων συνδυασμών «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος-ανιχνευτή».

7.3 Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα βάσει των αποτελεσμάτων καθώς και των τεχνικών που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στην παρούσα Δ.Δ. συνοψίζονται στις εξής:

- i. Συστηματικές και συνεχόμενες χρονικά δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα με ταυτόχρονη δειγματοληψία φίλτρων αέρα, με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση της ραδιενέργειας

περιβάλλοντος. Οι συνεχόμενες δειγματοληψίες ατμοσφαιρικών αποθέσεων για μεγάλη χρονική διάρκεια θα επιτρέψουν:

- Την επίτευξη ισχυρότερων συσχετίσεων μεταξύ των ρυθμών απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων με τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρυπαντών και το πλήθος των ηλιακών κηλίδων.
 - Τη συνεχή καταγραφή του ρυθμού απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων, καθώς και της συσσωρευτικής τους συγκέντρωσης, κάτι που θα επιτρέψει τη μελέτη της κατακόρυφης μετανάστευσης των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, καθώς και σε άλλα περιβαλλοντικά συστήματα, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για μελέτες διάβρωσης και ιζηματογένεσης εδαφών.
 - Τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης στον αέρα και του ρυθμού απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος – ενδεχομένως με χρονική καθυστέρηση – κάτι το οποίο δεν επετεύχθη στα πλαίσια της Διατριβής από τις μετρήσεις που έγιναν.
- ii. Βελτίωση της μεθοδολογίας προετοιμασίας δειγμάτων αποθέσεων με χρήση συνδυασμένη χρήση ρητίνης κατιόντων και ρητίνης ανιόντων.
- iii. Προσδιορισμός μη ραδιενεργών ιχνοστοιχείων στο αερόλυμα που συλλέγεται με τεχνικές INAA και XRF.
- iv. Δειγματοληψία των επιμέρους κλασμάτων υγρών αποθέσεων με στόχο:
- τη διερεύνηση της μεταβολής της συγκέντρωσης ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων κατά την εξέλιξη του εκάστοτε φαινομένου,
 - τον υπολογισμό της συνεισφοράς του rainout/snowout και του washout στη συνολική εναπόθεση των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος στο πέρας του εκάστοτε φαινομένου,
 - τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης κατακρήμνισης/σάρωσης των ραδιενεργών ισοτόπων από την ατμόσφαιρα.
- v. Δειγματοληψία υγρών αποθέσεων με ταυτόχρονη δειγματοληψία φίλτρων αέρα για τον υπολογισμό του συντελεστή W (washout ratio).
- vi. Αξιοποίηση των πάσης φύσεως μετρήσεων και υπολογισμών σε μοντέλα προσομοίωσης μεταφοράς αερίων μαζών, καθώς και διασποράς και απόθεσης

ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος, με στόχο την αξιολόγησή τους ή την επέκτασή τους.

7.4 Δημοσιεύσεις – Ανακοινώσεις σε Συνέδρια

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ. έλαβαν χώρα οι παρακάτω δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων, καθώς και ανακοινώσεις σε συνέδρια:

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Περιοδικά

- Braysher, E., Russell, B., Collins, S.M., van Es, E.M., Shearman, R., Dal Molin, F., Read, D., Anagnostakis, M., Arndt, R., Bednár, A., Bituh, T., Bolivar, J.P., Cobb, J., Dehbi, N., Di Pasquale, S., Gascó, C., Gilligan, C., Jovanovič, P., Lawton, A., Lees, A.M.J., Lencsés, A., Mitchell, L., **Mitsios, I.**, Petrinc, B., Rawcliffe, J., Shyti, M., Suárez-Navarro, J.A., Suursoo, S., Tóth-Bodrogi, E., Vaasma, T., Verheyen, L., Westmoreland, J., de With, G., “*Development of a reference material for analysing naturally occurring radioactive material from the steel industry*”, *Analytica Chimica Acta*, 2021, vol. 1141, 221-229
- Ali Sartoro, M.C., Anagnostakis, M.J., Boshkova, T., Camacho, A., Fornaciari Ijadica, M.C., Collins, S.M., Diaz Perez, R., Delgado, J.U., Đurašavić, M., Dutch, M.A., Gomes, R.S., Gudelis, A., Hurtado Bermudez, S., Hernandorena, R., Jevremovic, A., Kandic, A., Korun, M., Karfopoulos, K., Laubenstein, M., Long, S., Margineanu, R.M., **Mitsios, I.**, Mulas, D., Nikolić, J.K., Pantelica, A., Peyres Medina, V., Pibida, L., Potiriadis, C., Silva, R.L., Siri, S., Šešlak, B., Verheyen, L., Vodenik, B., Vukanac, I., Weidner, H., Zorko, B., “*Determination of the probability for locating peaks by computerized peak location methods in gamma-ray spectrometry as a function of the relative peak area uncertainty*”, *Applied Radiation and Isotopes*, 2020, vol.155
- Lépy, M.C., Thiam, C., Anagnostakis, M., Galea, R., Gurau, D., Hurtado, S., Karfopoulos, K., Liang, J., Liu, H., Luca, A., **Mitsios, I.**, Potiriadis, C., Savva, M.I., Thanh, T.T., Thomas, V., Townson, R., Vasilopoulou, D., Zang, M., “*A benchmark for Monte Carlo simulation in gamma-ray spectrometry*”, *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, vol.154

- Padovani, S., **Mitsios, I.**, Anagnostakis, M., Mostacci, D., “*Analysis of the Vertical Distribution and the Size Fractionation of Natural and Artificial Radionuclides in the Soil in the Vicinity of Hot Springs*”, Radiation Effects & Defects in Solids, 2018, vol. 173, nos. 9–10, 794–806

Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων

- **Mitsios, I.K.**, Pappa, F.K., Patiris, D.L., Rouni, P.K., Anagnostakis, M.J., Tsabaris, C., “*In depth analysis of a sediment core from north Aegean sea*”, HNPS Advances in Nuclear Physics, 2022, vol. 28, 215-218, doi: 10.12681/hnps.3608
- Alafogiannis I., Tugnoli F., **Mitsios, I.K.**, Anagnostakis, M.J., “*Development of a computer code for the calculation of self-absorption correction factors in γ -spectrometry applications*”, HNPS Advances in Nuclear Physics, 2022, vol. 28, 98-103, doi: 10.12681/hnps.3607
- **Mitsios, I. K.**, Anagnostakis, M. J., “*A fast method for the determination of ^7Be in rainwater and atmospheric humidity samples*”, Proceedings of the 22nd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM2019), 27-31 May 2019, Salamanca, Spain, ISSN 2522-4328, https://physics.nist.gov/ICRM/ICRM_technicalseries_2.pdf

Ανακοινώσεις σε Συνέδρια

- M.-C. Lépy, C. Thiam, M. Anagnostakis, C. Cosar, A. De Blas del Oyo 4, H. Dikmen, M.A. Duch, R. Galea, M.L. Ganea, M. Hult, S. Hurtado, K. Karfopoulos, A. Luca, G. Lutter, **I. Mitsios**, H. Persson, C. Potiriadis, S. Röttger, N. Salpadimos, M.I. Savva, O. Sima, T.T. Thanh, R. Townson, A. Vargas, T. Vasilopoulou, L. Verheyen, T. Vidmar, “*A benchmark for Monte Carlo simulations in Gamma-ray spectrometry – Part II: True coincidence summing correction factors*”, 23rd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM2023), Oral Presentation, Bucharest, Romania, March 2023
- M.-C. Lépy, L. Chambon, V. Lourenco, B. Sabot, A. De Vismes, R. Galea, R. Idoeta, P. Jodlowski, K. Kanoutos, K. Karfopoulos, A. Meyer, **I. Mitsios**, V. Peyres, P. Saganowski, N. Salpadimos, M.I. Savva, O. Sima, T.T. Thanh, R. Townson, Z. Tymiński, T. Vasilopoulou, L. Verheyen, T. Vidmar, “*Self-*

attenuation in the low-energy range: an experimental study on Pb-210”, 23rd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM2023), Poster Presentation, Bucharest, Romania, March 2023

- D.L. Patiris, C. Tsabaris, S. Alexakis, G. Eleftheriou, F. Androulakaki, F.K. Pappa, K. Sarantakos, S.K., Roumelioti, **I.K. Mitsios**, E. Ioannidou, “*Rapid radiometric mapping of coastal areas by means of mobile in situ gamma-ray spectrometry*”, Poster Presentation, The 6th International Conference on Environmental Radioactivity ENVIRA 2021
- **Mitsios, I. K.**, Anagnostakis, M. J., “*The effect of time in the background of typical low-level gamma spectrometry measurements*”, 22nd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM2019), Poster Presentation, Salamanca, Spain, May 2019

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Aittola, J.-P., Chyssler, J., & Ringberg, H. (1982). *Thermal Stability of Ion-Exchange Resins*. Studsvik Energiteknik AB.
- [2] Ali Santoro, M. C., Anagnostakis, M. J., Boshkova, T., Camacho, A., Fornaciari Iljadica, M. C., Collins, S. M., Diaz Perez, R., Delgado, J. U., Đurašavić, M., Dutch, M. A., Gomes, R. S., Gudelis, A., Hurtado Bermudez, S., Hernandorena, R., Jevremovic, A., Kandic, A., Korun, M., Karfopoulos, K., Laubenstein, M., Long, S., Margineanu, R.M., Mitsios, I., Mulas, D., Nikolić, J.K., Pantelica, A., Peyres Medina, V., Pibida, L., Potiriadis, C., Silva, R. L., Siri, S., Šešlak, B., Verheyen, L., Vodenik, B., Vukanac, I., Weidner, H., Zorko, B. (2020). Determining the probability of locating peaks using computerized peak-location methods in gamma-ray spectra as a function of the relative peak-area uncertainty. *Applied Radiation and Isotopes*, 155.
- [3] Allen, D. J., Dibb, J. E., Ridley, B., Pickering, K. E., & Talbot, R. W. (2003). An estimate of the stratospheric contribution to springtime tropospheric ozone maxima using TOPSE measurements and beryllium-7 simulations. *Journal of Geophysical Research*, 108.
- [4] Alonso Hernandez, C., Cartas Aguila, H., Diaz Asencio, M., & Munoz Caravaca, A. (2004). Reconstruction of ^{137}Cs signal in Cuba using ^7Be as tracer of vertical transport processes in the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 75, 133-142.
- [5] Alonso-Hernandez, C. M., Morera-Gomez, Y., Cartas-Aguila, H., & Guillen-Arruebarrena, A. (2014). Atmospheric deposition patterns of ^{210}Pb and ^7Be in Cienfuegos, Cuba. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, 149-155.
- [6] Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., Simopoulos, S. E., & Angelopoulos, M. G. (1996). Natural Radioactivity Mapping of Greek Surface Soils. *Environmental International*, 22, 3-8.
- [7] Aquilina, N. J., & Fenech, S. (2019). The Influence of Meteorological Parameters on Indoor and Outdoor Radon Concentrations: A preliminary Case Study. *Journal of Environmental Pollution and Control*, 2.

- [8] Baklanov, A., & Sorensen, J. H. (2001). Parameterisation of Radionuclide Deposition in Atmospheric Long-Range Transport Modelling. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, 787-799.
- [9] Balkanski, Y. J., Jacob, D. J., Gardner, G. M., Graustein, W. C., & Turekian, K. K. (1993). Transport and Residence Times of Tropospheric Aerosols Inferred from a Global Three-Dimensional Simulation of ^{210}Pb . *Journal of Geophysical Research*, 20, 573-586.
- [10] Baltrenas, P., Grubliauskas, R., & Danila, V. (2020). Seasonal Variation of Indoor Radon Concentration Levels in Different Premises of a University Building. *Sustainability Science*, 12.
- [11] Banjanac, R., Udovicic, V., Dragic, A., Jokovic, D., Maletic, D., Veselinovic, N., & Grabez, B. (2013). Daily Variations of Gamma-Ray Background and Radon Concentration. *Romanian Journal of Physics*, 58, 14-21.
- [12] Baskaran, M. (1995). A search for the seasonal variability on the depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb . *Journal of Geophysical Research*, 100, 2833-2840.
- [13] Baskaran, M. (2011). Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 500-513.
- [14] Baskaran, M., & Swarzenski, P. W. (2007). Seasonal variations on the residence times and partitioning of short-lived radionuclides (^{234}Th , ^7Be and ^{210}Pb) and depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb in Tampa Bay, Florida. *Marine Chemistry*, 104, 27-42.
- [15] Baskaran, M., Coleman, C. H., & Santschi, P. H. (1993). Atmospheric Depositional Fluxes of ^7Be and ^{210}Pb at Galveston and College Station, Texas. *Journal of Geophysical Research*, 20, 555-571.
- [16] Be, M. -M., Chiste, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmenko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schonfeld, E., Dersch, R. (2004). *Monographie BIPM-5, Table of Radionuclides (Vol.2 - A = 151 to 242)*. Sevres, France: BIPM.

- [17] Be, M. -M., Chiste, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmenko, N., Kondev, F., Luca, A., Galan, M., Pearce, A., Huang, X. (2008). *Monographie BIPM-5, Table of Radionuclides (Vol. 4 - A = 133 to 252)*. Sevres: BIPM.
- [18] Beks, J. P., Eisma, D., & van der Plicht, J. (1998). A record of atmospheric ^{210}Pb deposition in The Netherlands. *The Science of the Total Environment*, 222, 35-44.
- [19] Belmaker, R., Lazar, B., Stein, M., & Beer, J. (2011). Short residence time and fast transport of fine detritus in the Judean Desert: Clues from ^7Be in settled dust. *Geophysical Research Letters*, 38.
- [20] Bem, H., Bem, E. M., Krzeminska, M., & Ostrowska, M. (2002). Determination of radioactivity in air filters by alpha and gamma spectrometry. *Nukleonika*, 47(2), 87-91.
- [21] Benitez-Nelson, C. R., & Buesseler, K. O. (1998). Measurement of Cosmogenic ^{32}P and ^{33}P Activities in Rainwater and Seawater. *Analytical Chemistry*, 70, 64-72.
- [22] Benitez-Nelson, C. R., & Buesseler, K. O. (1999). Phosphorus 32, phosphorus 37, beryllium 7, and lead 210: Atmospheric fluxes and utility in tracing stratosphere/troposphere exchange. *Journal of Geophysical Research*, 11, 745-754.
- [23] Benninger, L. K. (1978). ^{210}Pb balance in Long Island Sound. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 1165-1174.
- [24] Bleichrodt, J. F. (1978). Mean tropospheric residence time of cosmic-ray-produced beryllium-7 at north temperate latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 83, 3058-3062.
- [25] Bossew, P. (2005). A very long-term HPGe-background gamma spectrum. *Applied Radiation and Isotopes*, 62, 635-644.
- [26] Brattich, E., Hernandez-Ceballos, M. A., Orza, J. G., Bolivar, J. P., & Tositti, L. (2016). The western Mediterranean basin as an aged aerosols reservoir. Insights from an old-fashioned but efficient radiotracer. *Atmospheric Environment*, 141, 481-493.

- [27] Brown, J., & Simmonds, J. R. (1995). *FARMLAND: A Dynamic Model for the Transfer of Radionuclides Through Terrestrial Foodchains NRPB-R73*. Chilton: NRPN.
- [28] Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., & Dominik, J. (2001). Factors controlling ^7Be and ^{210}Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *Journal Of Environmental Radioactivity*, *53*, 241-256.
- [29] Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M. C., & Tomarchio, E. (1999). Determination of ^{210}Pb concentration in the air at ground-level by gamma-spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, *51*, 239-249.
- [30] Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M. C., & Tomarchio, E. (2004). Concentration measurements of ^7Be at ground level air at Palermo, Italy-comparison with solar activity over a period of 21 years. *Journal of Environmental Radioactivity*, *72*, 259-271.
- [31] Chao, J. H., Chiu, Y. J., Lee, H. P., & Lee, M. C. (2012). Deposition of beryllium-7 in Hsinchu, Taiwan. *Applied Radiation and Isotopes*, *70*, 415-422.
- [32] Chao, J. H., Liu, C. C., Cho, I. C., & Niu, H. (2014). Monitoring of ^7Be in surface air of varying PM10 concentrations. *Applied Radiation and Isotopes*, *89*, 95-101.
- [33] Chen, J., Luo, S., & Huang, Y. (2016). Scavenging and fractionation of particle-reactive radioisotopes ^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in the atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *188*, 208-223.
- [34] Chen, L., Peng, S., Liu, J., & Hou, Q. (2012). Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, *24*, 632-639.
- [35] Ciffroy, P., Reyss, J.-L., & Siclet, F. (2003). Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ^7Be analysis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, *57*, 553-568.
- [36] Clouvas, A., Xanthos, S., & Takoudis, G. (2011). Indoor radon levels in Greek Schools. *Journal of Environmental Radioactivity*, *102*, 881-885.

- [37] Crawford, J., Domel, R. U., Harris, F. F., & Twinning, J. T. (2000). *RadCon: A Radiological Consequences Model, Technical Guide, Version 2.0. ANSTO E-744, ISBN 0-642-59982-3.*
- [38] Cristofanelli, P., Bonasoni, P., Collins, W., Feichter, J., Forster, C., James, P., Kentarchos, A., Kubik, P. W., Land, C., Meloan, J., Roelofs, G. J., Siegmund, P., Sprenger, M., Schnabel, C., Stohl, A., Tobler, L., Tositti, L., Trickl, T., Zanis, P. (2003). Stratosphere-to-troposphere transport: A model and method evaluation. *Journal of Geophysical Research*, 108.
- [39] Cristofanelli, P., Bonasoni, P., Tositti, L., Bonafe, U., Calzolari, F., Evangelisti, F., Sandrini, S., Stohl, A. (2006). A 6-year analysis of stratospheric intrusions and their influence on ozone at Mt. Cimone (2165m above sea level). *Journal of Geophysical Research*, 111.
- [40] Daish, S. R., Dale, A. A., Dale, C. J., May, R., & Rowe, J. E. (2005). The temporal variations of ^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in air in England. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84, 457--467.
- [41] De Francesco, S., Pascale Tommasone, F., Cuoco, E., & Tedesco, D. (2010). Indoor radon seasonal variability at different floors of buildings. *Radiation Measurements*, 45, 928-934.
- [42] Dibb, J. E., Meeker, D. L., Finkel, R. C., Southon, J. R., Caffee, M. W., & Barrie, L. A. (1994). Estimation of stratospheric input to the Arctic troposphere: ^7Be and ^{10}Be in aerosols at Alert, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 99, 12855-12864.
- [43] Dlugosz-Lisiecka, M. (2021). Aerosol removal coefficients based on ^7Be , ^{210}Pb , and ^{210}Po radionuclides in the urban atmosphere. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 78, 209-218.
- [44] Doering, C., & Akber, R. (2008). Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 461-467.
- [45] Dragounova, L., & Rulik, P. (2013). Low level activity determination by means of gamma spectrometry with respect to the natural background fluctuation. *Applied Radiation and Isotopes*, 81, 123-127.

- [46] Du, J., Du, J., Baskaran, M., Bi, Q., Huang, D., & Jiang, Y. (2015). Temporal variations of atmospheric depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb over 8 years (2006-2013) at Shanghai, China, and synthesis of global fallout data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*, 4323-4339.
- [47] Du, J., Zhang, J., Zhang, J., & Wu, Y. (2008). Deposition patterns of atmospheric ^7Be and ^{210}Pb in coast of East China Sea, Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, *42*, 5101-5109.
- [48] Duenas, C., Fernandez, M. C., Canete, S., & Perez, M. (2009). ^7Be to ^{210}Pb concentration ratio in ground level air in Malaga (36.7°N, 4.5°W). *Atmospheric Research*, *92*, 49-57.
- [49] Duenas, C., Gordo, E., Liger, E., Cabello, M., Canete, S., Perez, M., & de la Torre-Luque, P. (2017). ^7Be , ^{210}Pb and ^{40}K depositions over 11 years in Malaga. *Journal of Environmental Radioactivity*, *178-179*, 325-334.
- [50] Duenas, C., Orza, J., Cabello, M., M.C., F., Canete, S., Perez, M., & Gordo, E. (2011). Air mass origin and its influence on radionuclide activities (^7Be and ^{210}Pb) in aerosol particles at a coastal site in the western Mediterranean. *Atmospheric Research*, *101*, 205-214.
- [51] Durana, L., Chudy, M., & Masarik, J. (1996). Investigation of Be-7 in the Bratislava atmosphere. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, *207*, 345-356.
- [52] Eleftheriadis, K., & Ioannidou, A. (2020). Chapter 4 - Radioactive aerosol analysis. Στο M. F. L'Annunziata (Επιμ.), *Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 2* (4th ed., pp. 263-313). Academic Press.
- [53] El-Hussein, A. (1996). Unattached Fractions, Attachment and Deposition Rates of Radon Progeny in Indoor Air. *Applied Radiation and Isotopes*, *47(5/6)*, 515-523.
- [54] El-Hussein, A., Mohamemed, A., Abd El-Hady, M., Ahmed, A. A., Ali, A. E., & Barakat, A. (2001). Diurnal and seasonal variation of short-lived radon progeny concentration and atmospheric temporal variations of ^{210}Pb and ^7Be in Egypt. *Atmospheric Environment*, *35*, 4305-4313.

- [55] Engelbrecht, R. (2012). Chapter 10 - Environmental Radioactivity Monitoring. Στο Μ. F. L'Annunziata (Επιμ.), *Handbook of Radioactivity Analysis* (pp. 695-726). Elsevier.
- [56] EPA. (2009). *Radiological Laboratory Sample Analysis Guide for Incidents of National Significance - Radionuclides in Air*.
- [57] Erickson, M. D. (1997). *The Procedures Manual of the Environmental Measurements Laboratory* (28th ed., Vol. I). (N. A. Chieco, Editor) New York: U.S. Department of Energy.
- [58] Feely, H. W., Larsen, R. J., & Sanderson, C. G. (1989). Factors That Cause Seasonal Variations in Beryllium-7 Concentrations in Surface Air. *Journal Of Environmental Radioactivity*, 9, 223-249.
- [59] Feichter, J., Brost, R. A., & Heimann, M. (1991). Three-Dimensional Modeling of the Concentration and Deposition of ^{210}Pb Aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 96, 22447-22460.
- [60] Forkapic, S., Mrda, D., Veskovic, M., Todorovic, N., Bikit, K., Nikolov, J., & Hansman, J. (2012). Radon Equilibrium Measurement in the Air. *Paper presented at the First East European Radon Symposium-FERAS*, (pp. 140-147).
- [61] Gaggeler, H. W., Jost, D. T., Baltensperger, U., Schwikowski, M., & Seibert, P. (1995). Radon and Thoron Decay Product and ^{210}Pb Measurements at Jungfraujoch, Switzerland. *Atmospheric Environment*, 29(5), 607-616.
- [62] Gautam, Y. P., Sharma, A. K., Kumar, D., Kumar, V., Tripathi, A. R., Kumar, J., Saradhi, I. V., Kumar, V. A. (2022). Site-specific dry and wet deposition velocities using ^7Be and mass interception factor for various types of plant leaves at narora site, INDIA. *Radiation Protection Dosimetry*, 198, 1258-1264.
- [63] Genthon, C. (1992a). Simulations of the long-range transport of desert dust and sea-salt in a general circulation model. *Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange, Hemisphere*, 1783-1794.

- [64] Genthon, C. (1992b). Simulations of desert dust and sea-salt aerosols in Antarctica with a general circulation model of the atmosphere. *Tellus*, 44B, 371-389.
- [65] Genthon, C., & Armengaud, A. (1995). GCM simulations of atmospheric tracers in the polar latitudes: South Pole (Antarctica) and Summit (Greenland) cases. *The Science of the Total Environment*, 160/161, 101-116.
- [66] Gerasopoulos, E., Zerefos, C. S., Papastefanou, C., Zanis, P., & O' Brien, K. (2003). Low-frequency variability of beryllium-7 surface concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 37, 1745-1756.
- [67] Gilmore, G. R. (2008). *Practical Gamma-Ray Spectrometry* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- [68] Goel, P. S., Jha, S., Lal, D., Radhakrishna, P., & Rama. (1956). Cosmic Ray Produce Beryllium Isotopes in Rain Water. *Nuclear Physics*, 1(3), 196-201.
- [69] Goel, P. S., Narasappaya, N., Prabhakara, C., Rama , T., & Zutshi, P. K. (1959). Study of Cosmic Ray Produced Short-Live P32, P33, B7, and S32 in Tropical Latitudes. *Tellus XI*, 1, 91-100.
- [70] Gonzalez-Gomez, C., Azahra, M., Lopez-Penalver, J. J., Camacho-Garcia, A., Bardouni, T. E., & Boukhal, H. (2006). Seasonal variability in ⁷Be depositional fluxes at Granada, Spain. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 228-234.
- [71] Gras, J. L. (2003). Climatology of Tropospheric Aerosols. At *Aerosols* (pp. 13-20). Victoria, Australia: Elsevier Science Ltd.
- [72] Graustein, W. C., & Turekian, K. K. (1986). ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in Air and Soils Measure the Rate and Vertical Profile of Aerosol Scavenging. *Journal of Geophysical Research*, 91, 14355-14366.
- [73] Hansen, J., Russell, G., Stone, P., Lacis, A., Lebedeff, S., Ruedy, R., & Travis, L. (1983). Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II. *Monthly Weather Review*, 111, 609-662.
- [74] Harms, A. V., & Jerome, S. M. (2004). On the integrated decay and ingrowth equations used in the measurement of radioactive decay families: the general solution. *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 367-372.

- [75] Harvey, M. J., & Matthews, K. M. (1989). ^7Be Deposition in a High-Rainfall Area of New Zealand. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 8, 299-306.
- [76] Heinrich, P., & Jamelot, A. (2011). Atmospheric transport simulation of ^{210}Pb and ^7Be by the LMDz general circulation model and sensitivity to convection and scavenging parameterization. *Atmospheric Research*, 2011, 54-66.
- [77] Helfferich, F. G. (1995). *Ion exchange*. New York: Dover Publications, Inc.
- [78] Hernandez, F., Karlsson, L., & Hernandez-Armas, J. (2007). Impact of the tropical storm Delta on the gross alpha, gross beta, ^{90}Sr , ^{210}Pb , ^7Be , ^{40}K and ^{137}Cs activities measured in atmospheric aerosol and water samples collected in Tenerife (Canary Islands). *Atmospheric Environment*, 41, 4940-4948.
- [79] Hernandez-Ceballos, M., Brattich, E., Lozano, R., & Cinelli, G. (2017). ^7Be behaviour and meteorological conditions associated with ^7Be peak events in Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 17-26.
- [80] Hirose, K., Honda, T., Yagishita, S., Igarashi, Y., & Aoyama, M. (2004). Deposition behaviors of ^{210}Pb , ^7Be and thorium isotopes observed in Tsukuba and Nagasaki, Japan. *Atmospheric Environment*, 38, 6601-6608.
- [81] Hirose, K., Kikawada, H., Doi, T., Su, C.-C., & Yamamoto, M. (2011). ^{210}Pb deposition in the far East Asia: controlling factors of its spatial and temporal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 514-519.
- [82] Hongyu, L., Considine, D. B., Horowitz, L. W., Crawford, J. H., Rodriguez, J. M., Strahan, S. E., Damon, M. R., Steenrod, S. D., Xu, X., Kouatchou, J., Carouge, C., Yantosca, R. M. (2016). Using beryllium-7 to assess cross-tropopause transport in global models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4641-4659.
- [83] Huang, S., Huang, P.-R., Newman, S., Li, K.-F., Lin, Y.-C., Huh, C.-A., Lin, N.-H., Hsu, S.-C., Liang, M.-C. (2022). Enhanced stratospheric intrusion at Lulin Mountain, Taiwan inferred from beryllium-7 activity. *Atmospheric Environment*, 268.
- [84] Huet, C., Tymen, G., & Boulaud, D. (2010). Long-Term Measurements of Equilibrium Factor and Unattached Fraction of Short-Lived Radon Decay

- Products in a Dwelling - Comparison with Praddo Model. *Aerosol Science & Technology*, 35(1), 553-563.
- [85] Huh, C. A., & Su, C. C. (2004). Distribution of fallout radionuclides (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb and $^{239,240}\text{Pu}$) in soils of Taiwan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77, 87-100.
- [86] Hyza, M., Rulik, P., & Bednar, V. (2019). Optimization of the radioactive aerosol sampling and measuring procedure with respect to radon concentration in the air. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2-3), 280-283.
- [87] IAEA. (1992). *Modelling of resuspension, seasonality and losses during food processing: First report of the Vamp Terrestrial Working Group*. IAEA-TECDOC-647, Vienna.
- [88] IAEA. (1995). *Validation of models using Chernobyl fallout data from the Central Bohemia region of the Czech Republic: Scenario CB*. IAEA-TECDOC-795, Vienna.
- [89] IAEA. (2002). *Specialized software utilities for gamma ray spectrometry*. Vienna: International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1275, Vienna.
- [90] ICRP. (2020). *Dose coefficients for external exposures to environmental sources*. SAGE.
- [91] Ioannidou, A., & Paatero, J. (2014). Activity size distribution and residence time of ^7Be aerosols in the Arctic atmosphere. *Atmospheric Environment*, 88, 99-106.
- [92] Ioannidou, A., & Papastefanou, C. (2006). Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 85, 121-136.
- [93] Ioannidou, A., Manolopoulou, M., & Papastefanou, C. (2005). Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in surface air at temperate latitudes. *Applied Radiation and Isotopes*, 63, 277-284.
- [94] Ioannidou, A., Vasileiadis, A., & Melas, D. (2014). Time lag between the tropopause height and ^7Be activity concentrations on surface air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 129, 80-85.

- [95] Irfan, M., & Fagan, A. J. (1979). Measurement of radon daughters in air using gamma spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods*, 166, 567-570.
- [96] Ishikawa, Y., Murakami, H., Sekine, T., & Yoshihara, K. (1995). Precipitation Scavenging Studies of Radionuclides in Air Using Cosmogenic ^7Be . *Journal of Environmental Radioactivity*, 26, 19-36.
- [97] Jacobi, W., & Andre, K. (1963). The Vertical Distribution of Radon 222, Radon 220 and Their Decay Products in the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 68, 3799-3814.
- [98] James, J. P., Ravi, P. M., Joshi, R. M., Hegde, A. G., & Sarkar, P. K. (2010). Estimation of site-specific deposition velocities and mass interception factor using ^7Be and the prediction of deposition pattern of radionuclides at Kaiga site, India. *Radiation Protection Dosimetry*, 141, 248-254.
- [99] Jasiulionis, R., & Wershofen, H. (2005). A study of the vertical diffusion of the cosmogenic radionuclides, ^7Be and ^{22}Na in the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79, 157-169.
- [100] JCGM/WG 1, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, OIML. (2008). *JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement* (1st ed.).
- [101] Jeřkovský, M., Kaizer, J., Kontůl, I., Lujanienė, G., Müllerová, M., & Povinec, P. P. (2019). Chapter 3 - Analysis of environmental radionuclides. Στο F. M. L'Annunziata (Editor), *Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 2* (4th ed., pp. 137-261). Academic Press.
- [102] Jha, A., Schkade, U., & Kirchner, G. (2015). Estimating short-term soil erosion rates after single and multiple rainfall events by modelling the vertical distribution of cosmogenic ^7Be in soils. *Geoderma*, 243-244, 149-156.
- [103] Jimenez-Ramos, M. C., Manjon, G., & Abril, J. M. (2006). Influence of sampling air flow rate in the decay correction applied to the determination of ^7Be and short-lived radionuclides in aerosol samples. *Atmospheric Environment*, 40, 7215-7221.

- [104] Jungck, M. H., Andrey, J.-L., & Foidevaux, P. (2009). Determination of radionuclide levels in rainwater using ion exchange resin and γ -spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, *100*, 361-365.
- [105] Juri Ayub, J., Di Gregorio, D. E., Velasco, H., Huck, H., Rizzotto, M., & Lohaiza, F. (2009). Short-term seasonal variability in ^7Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity*, *100*, 977-981.
- [106] Kaste, J. M., Norton, S. A., & Hess, C. T. (2002). Environmental Chemistry of Beryllium-7. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, *50*(1), 271-289.
- [107] Kim, G., Hussain, N., Scudlark, J. R., & Church, T. M. (2000). Factors Influencing the Atmospheric Depositional Fluxes of Stable Pb, ^{210}Pb , and ^7Be into Chesapeake Bay. *Journal of Atmospheric Chemistry*, *36*, 65-79.
- [108] Kitto, M. E. (2005). Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *264*, 381-385.
- [109] Koch, D. M., Jacob, D. J., & Graustein, W. C. (1996). Vertical Transport of tropospheric aerosols as indicated by ^7Be and ^{210}Pb in a chemical tracer model. *Journal of Geophysical Research*, *101*, 651-666.
- [110] Komura, K., Kuwahara, Y., Abe, T., Tanaka, K., Murata, Y., & Inoue, M. (2007). Measurements of short-lived cosmic-ray-produced radionuclides in rainwater. *Journal of Environmental Radioactivity*, *96*, 103-109.
- [111] Korun, M. (2006). Optimization of counting times for short-lived gamma-ray emitters in air filter samples. *Applied Radiation and Isotopes*, *64*, 1329-1332.
- [112] Kreidenweis, S. M. (2002). AEROSOLS | Role in Cloud Physics. Στο J. R. Holton, & J. A. Curry (Επιμ.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (1st ed. , pp. 40-47). Academic Press.
- [113] Krishnaswami, S., Benninger, L. K., Aller, R. C., & Von Damm, K. L. (1980). Atmospherically-derived radionuclides as tracers of sediment mixing and accumulation in near-shore marine and lake sediments: Evidence from ^7Be , ^{210}Pb , and $^{239,240}\text{Pu}$. *Earth and Planetary Science Letters*, *47*, 307-318.

- [114] Lal, D., & Peters, B. (1962). Cosmic ray produced isotopes and their applications to problems in geophysics. *Progress in Cosmic Ray and Elementary Particles*, 6, 3-74.
- [115] Lal, D., & Peters, B. (1967). Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth. At Sitte, K. (eds) *Kosmische Strahlung II / Cosmic Rays II. Handbuch der Physik / Encyclopedia of Physics* (Vol. 9 / 46 / 2). Berlin: Springer. doi:doi.org/10.1007/978-3-642-46079-1_7
- [116] Lal, D., Malhotra, P. K., & Peters, B. (1958). On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 12, 306-328.
- [117] Lal, D., Nijampurkar, V. N., Rajagopalan, G., & Somayajulu, B. L. (1979). Annual Fallout of ^{32}Si , ^{210}Pb , ^{22}Na , ^{35}S and ^7Be in rains in India. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 88, 29-40.
- [118] Laubenstein, M., & Lawson, I. (2020). Low Background Radiation Detection Techniques and Mitigation of Radioactive Backgrounds. *Frontiers in Physics*, 8.
- [119] Lee, H. N., & Feichter, J. (1995). An intercomparison of wet precipitation scavenging schemes and the emission rates of ^{222}Rn for the simulation of global transport and deposition of ^{210}Pb . *Journal of Geophysical Research*, 100, 253-270.
- [120] Lee, H. N., Tositti, L., Zheng, X., & Bonasoni, P. (2007). Analyses and comparisons of variations of ^7Be , ^{210}Pb , and $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$ with ozone observations at two Global Atmosphere Watch Stations from high mountains. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- [121] Lee, H. N., Wan, G., Zheng, X., Sanderson, C. G., Josse, B., Wang, S., Yang, W., Tang, J., Wang, C. (2004). Measurements of ^{210}Pb and ^7Be in China and their analysis accompanied with global model calculations of ^{210}Pb . *Journal of Geophysical Research*, 109.
- [122] Li, Y., Fan, C., Xiang, M., Liu, P., Mu, F., Meng, Q., & Wang, W. (2018). Short-term variations of indoor and outdoor radon concentrations in a typical

semi-arid city of Northwest China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317, 297-306.

- [123] Liu, G., Yang, M., Warrington, D. N., Liu, P., & Tian, J. (2011). Using beryllium-7 to monitor the relative proportions of interrill and rill erosion from loessal soil slopes in a single rainfall event. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 439-448.
- [124] Liu, H., Jacob, D. J., Bey, I., & Yantosca, R. M. (2001). Constraints from ^{210}Pb and ^7Be on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields. *Journal of Geophysical Research*, 106, 109-128.
- [125] Liu, H., Jacob, D. J., Dibb, J. E., Fiore, A. M., & Yantosca, R. M. (2004). Constraints on the sources of tropospheric ozone from ^{210}Pb - ^7Be - O_3 correlations. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- [126] Lozano, R. L., San Miguel, E. G., Bolivar, J. P., & Baskaran, M. (2011). Depositional fluxes and concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain. *Journal of Geophysical Research*, 116.
- [127] Martin, P., & McBride, J. L. (2012). *Radioactivity in the Environment - Chapter 2 - Radionuclide Behaviour and Transport in the Tropical Atmospheric Environment* (Vol. 18). (J. R. Twining, Editor) Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-045016-2.00002-3
- [128] Martinez, J. E., Juste, B., Ortiz, J., Martorell, S., & Verdu, G. (2017). Air radon equilibrium factor measurement in a Waste Water Pre-Treatment Plant. *Radiation Physics and Chemistry*, 140, 20-24.
- [129] Masson, O., Steinhauser, G., Zok, D., Saunier, O., Angelov, H., Babic, D., Beckova, V., Bieringer, J., Bruggeman, M., Burbidge, C. I., Conil, S., Dalheimer, A., De Geer, L.-E., De Vismes Ott, A., Eleftheriadis, K., Estier, S., Fischer, H., Garavaglia, M. G., Gasco Leonarte, C., Gorzkiewicz, K., Hainz, D., Hoffman, I., Hyza, M., Isajenko, K., Karhunen, T., Kastlander, J., Katzlberger, C., Kierepko, R., Knetsch, G.-J., Kovendine Konyi, J., Lecomte, M., Mietelski, J. W., Min, P., Moller, B., Nielsen, S. P., Nikolic, J., Nikolovska, L., Penev, I., Petrinc, B., Povinec, P. P., Querfeld, R., Raimondi,

- O., Ransby, D., Ringer, W., Romanenko, O., Rusconi, R., Saey, P.R.J., Samsonov, V., Silobritiene, B., Simion, E., Soderstrom, C., Sostaric, M., Steinkopff, T., Steinmann, P., Sykora, I., Tabachnyi, L., Todorovic, D., Tomankiewicz, E., Tschiersch, J., Tsibranski, R., Tzortzis, M., Ungar, K., Vidic, A., Weller, A., Wershofen, H., Zagyvai, P., Zalewska, T., Zapata Garcia, D., Zorko, B. (2019). Airborne concentrations and chemical considerations of radioactive ruthenium from an undeclared major nuclear release in 2017. *PNAS*, *116*(34), 16750-16759.
- [130] Matisoff, G. (2014). ^{210}Pb as a tracer of soil erosion, sediment source area identification and particle transport in the terrestrial environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, *138*, 343-354.
- [131] Mattsson, R., Hatakka, J., Paatero, J., & Reissell, A. (1993). The variations and trends of the particle-bound sulphur in the ground level air in Finland during the last 30 years. Helsinki: Finnish Association for Aerosol Research. *Report Series in Aerosol Science*, *23*, 159-165.
- [132] Mairing, A., Gafvert, T., & Aleksandersen, T. B. (2014). Implications for analysis of ^{226}Ra in a low-level gamma spectrometry laboratory due to variations in radon background levels. *Applied Radiation and Isotopes*, *94*, 54-59.
- [133] McNeary, D., & Baskaran, M. (2003). Depositional characteristics of ^7Be and ^{210}Pb in southeastern Michigan. *Journal of Geophysical Research*, *108*.
- [134] Melieres, M.-A., Pourchet, M., & Richard, S. (2003). Surface air concentration and deposition of lead-210 in French Guiana: two years of continuous monitoring. *Journal of Environmental Radioactivity*, *66*, 261-269.
- [135] Mitsios, I. K., & Anagnostakis, M. J. (2020). A fast method for the determination of ^7Be in rainwater and atmospheric humidity samples. *22nd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications*, (pp. 29-32). Salamanca. Recovery from https://physics.nist.gov/ICRM/ICRM_technicalseries_2.pdf
- [136] Mitsios, I. K., Karangelos, D. J., & Anagnostakis, M. J. (2016). Investigation of the Dependence of the Activity Concentration of Natural and Artificial

- Radionuclides on Particle Size in Surface Soil. *25th Hellenic Conference on Nuclear Physics (HNPS2016)*, (pp. 217-221). Athens, Greece.
- [137] Miyake, Y., & Ohtsuka, Y. (1964). Beryllium-7 in Rain Water. *Papers in Meteorology and Geophysics*, *15*(1), 89-92.
- [138] Mohamed, A., Ahmed, A. A., Ali, A. E., & Yuness, M. (2008). Attached and Unattached activity size distribution of short-lived radon progeny (^{214}Pb) and evaluation of deposition fraction. *Proceedings of the 3rd Environmental Physics Conference*, (pp. 89-97). Aswan, Egypt.
- [139] Mohan, M. P., D'Souza, R. S., Rashmi Nayak, S., Kamath, S. S., Shetty, T., Sudeep Kumara, K., Yashodhara, I., Mayya, Y. S., Karunakara, N. (2018). A study of temporal variations of ^7Be and ^{210}Pb concentrations and their correlations with rainfall and other parameters in the South West Coast of India. *Journal of Environmental Radioactivity*, *192*, 194-207.
- [140] Mohan, M. P., Shiny D'Souza, R., Rashmi Nayak, S., Kamath, S. S., Shetty, T., Sudeep Kimara, K., Mayya, Y. S.; Karunakara, N. (2019). Influence of rainfall on atmospheric deposition fluxes of ^7Be and ^{210}Pb in Mangaluru (Mangalore) at the Southwest Coast of India. *Atmospheric Environment*, *202*, 281-295.
- [141] Momoshima, N., Nishio, S., Kusano, Y., Fukuda, A., & Ishimoto, A. (2006). Seasonal variations of atmospheric ^{210}Pb and ^7Be concentrations at Kumamoto, Japan and their removal from the atmosphere as wet and dry depositions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *268*(2), 297-304.
- [142] Mostafa, M. Y., Khalaf, H. N., & Zhukovsky, M. (2020). Radon decay products equilibrium at different aerosol concentrations. *Applied Radiation and Isotopes*, *156*.
- [143] Müller, H., & Prohl, G. (1993). ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Physics*, *64*, 232-252.
- [144] Nazaroff, W. W. (1992). Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, *30*, 137-160.

- [145] Nishikawa, T., Masayoshi, A., & Okabe, S. (1984). Time Variation of Radon Daughters Concentration in Snowfall. *Radioisotopes*, 33, 257-261.
- [146] Othman, I., Al-Masri, M. S., & Hassan, M. (1998). Fallout of ^7Be in Damascus City. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 238, 187-191.
- [147] Paatero, J., & Hatakka, J. (2000). Source areas of airborne ^7Be and ^{210}Pb Measured in Northern Finland. *Health Physics*, 79, 691-696.
- [148] Pacini, A. A., Usoskin, I. G., Mursula, K., Echer, E., & Evangelista, H. (2015). Signature of a sudden stratospheric warming in the near-ground ^7Be flux. *Atmospheric Environment*, 113, 27-31.
- [149] Padovani, S., Mitsios, I., Anagnostakis, M., & Mostacci, D. (2018). Analysis of the vertical distribution and size fractionation of natural and artificial radionuclides in soils in the vicinity of hot springs. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 173, 794-806.
- [150] Papadakos, G. N., Karangelos, D. J., Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., & Simopoulos, S. E. (2017). Uncertainty assessment method for the Cs-137 fallout inventory and penetration depth. *Journal of Environmental Radioactivity*, 171, 234-245.
- [151] Papadopoulos, N. K., Efstathopoulos, A. V., Karangelos, D. J., & Petropoulos, N. P. (2011). Determination of Uranium Isotope Concentrations in Precipitation in the Vicinity of Lignite-Fired Power Plants. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 26, 1-10.
- [152] Papandreou, S. M., Savva, M. I., Karfopoulos, K. L., Karangelos, D. J., Anagnostakis, M. J., & Simopoulos, S. E. (2011). Monitoring of ^7Be atmospheric activity concentration using short term measurements. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 26(2), 101-109.
- [153] Papastefanou, C. (2006). Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 93-100.

- [154] Papastefanou, C. (2008). Radioactive nuclides as tracers of environmental processes. At *Radioactive Aerosols* (Radioactivity in the Environment ed., Vol. 12, pp. 59-70).
- [155] Papastefanou, C., & Ioannidou, A. (1991). Depositional Fluxes and Other Physical characteristics of Atmospheric Beryllium-7 in the Temperate Zones (40°N) with a dry (Precipitation-free) Climate. *Atmospheric Environment*, 25A, 2335-2343.
- [156] Papastefanou, C., & Ioannidou, A. (1996). Influence of Air Pollutants in the ⁷Be Size Distribution of Atmospheric Aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 24, 102-106.
- [157] Papastefanou, C., & Ioannidou, A. (2004). Beryllium-7 and solar activity. *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 1493-1495.
- [158] Papastefanou, C., Ioannidou, A., Stoulos, S., & Manolopoulou, M. (1995). Atmospheric deposition of cosmogenic ⁷Be and ¹³⁷Cs from fallout of the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*, 170, 151-156.
- [159] Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., & Simopoulos, S. E. (2001). Geographical mapping and associated fractal analysis of the long-lived Chernobyl fallout radionuclides in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53, 59-66.
- [160] Petropoulos, N. P., Hinis, E. P., & Simopoulos, S. E. (1995). Cs-137 Chernobyl fallout in Greece and its associated radiological impact. *NRE VI, International Symposium*, (pp. 369-373). Montreal.
- [161] Pham, M. K., Betti, M., Nies, H., & Povinec, P. P. (2011). Temporal changes of ⁷Be, ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameteres. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 1045-1054.
- [162] Pham, M. K., Povinec, P. P., Nies, H., & Betti, M. (2013). Dry and wet deposition of ⁷Be, ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in Monaco air during 1998-2010: Seasonal variations of deposition fluxes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 120, 45-57.

- [163] Piliposian, G. T., & Appleby, P. G. (2003). A simple model of the origin and transport of ^{222}Rn and ^{210}Pb in the atmosphere. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 15, 503-518.
- [164] Potiriadis, C., Anagnostakis, M. J., Clouvas, A., Eleftheriadis, K., Florou, E., Housiadas, C., Ioannides, K., Ioannidou, A., Karangelos, D. I., Karfopoulos, K. L., Kehagia, K., Kolovou, M., Kritidis, P., Manolopoulou, M., Papastefanou, K., Savva, M. I., Simopoulos, S. E., Stamoulis, K., Stoulos, S., Xanthos, S., Xarchoulakos, D. (2013). Environmental Measurements and Inspections on Imported Foods and Feedstuffs in Greece After the Fukushima Accident. *Radiation Protection Dosimetry*, 156(4), 465-474.
- [165] Preiss, N., & Genthon, C. (1997). Use of a new database of lead 210 for global aerosol model validation. *Journal of Geophysical Research*, 102, 347-357.
- [166] Preiss, N., Melieres, M.-A., & Pourchet, M. (1996). A compilation of data on lead 210 concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 101, 847-862.
- [167] Pressyanov, D. S. (1997). Integrated measurements of ^{218}Po , ^{214}Pb and $^{214}\text{Bi} + ^{214}\text{Po}$ in air under environmental concentrations. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 397, 448-454.
- [168] Pröhl, G., Twining, J. R., & Crawford, J. (2012). *Radioactivity in the Environment - Chapter 7 - Radiological Consequences Modelling* (Vol. 18). (J. R. Twining, Editor) Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-045016-2.00007-2
- [169] Radulescu, I., Blebea-Apostu, A. M., Margineanu, R. M., & Mocanu, N. (2013). Background radiation reduction for a high-resolution gamma-ray spectrometer used for environmental radioactivity measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 715, 112-118.
- [170] Rama, Kolde, M., & Goldberg, E. D. (1961). Lead-210 in natural waters. *Science*, 134, 98-99.
- [171] Rangarajan, C., Gopalakrishnan, S., Chandrasekaran, V. R., & Eapen, C. D. (1975). The Relative Concentrations of Radon Daughter Products in Surface Air and the Significance of their Ratios. *Journal of Geophysical Research*, 80, 845-848.

- [172] Rangarajan, C., Madhavan, R., & Gopalakrishnan, S. S. (1986). Spatial and Temporal Distribution of Lead-210 in the Surface Layers of the Atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 3, 23-33.
- [173] Rastogi, N., & Sarin, M. M. (2008). Atmospheric ^{210}Pb and ^7Be in ambient aerosols over low- and high- altitude sites in semiarid region: temporal variability and transport processes. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- [174] Rehfeld, S., & Heimann, M. (1995). Three dimensional atmospheric transport simulation of the radioactive tracers ^{210}Pb , ^7Be , ^{10}Be , and ^{90}Sr . *Journal of Geophysical Research*, 26, 141-161.
- [175] Rengarajan, R., & Sarin, M. M. (2004). Atmospheric deposition fluxes of ^7Be , ^{210}Pb and chemical species to the Arabian Sea and Bay of Bengal. *Indian Journal of Marine Sciences*, 33(1), 56-64.
- [176] Robinson, A. L. (1996, May). Radon Entry into Buildings: Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations and Building Structural Factors.
- [177] Rodenas, C., Gomez, J., Quindos, L. S., Fernandez, P. L., & Soto, J. (1997). ^7Be Concentrations in Air, Rain Water and Soil in Cantabria (Spain). *Applied Radiation and Isotopes*, 48(4), 545-548.
- [178] Rogers, V. C., & Nielson, K. K. (1991). Correlations for predicting air permeabilities and ^{222}Rn diffusion coefficient of soils. *Health Physics*, 61, 225-230.
- [179] Rouni, P. K., Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., & Simopoulos, S. E. (2001). Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin. *The Science of the Total Environment*, 272, 261-272.
- [180] Roupsard, P. (2013). *Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques*. PhD Thesis, University of Rouen.
- [181] Rozas, S., Idoeta, R., Alegria, N., & Herranz, M. (2016). Radiological characterisation and radon equilibrium factor in the outdoor air of a post-industrial urban area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 126-135.
- [182] Saari, H.-K., Schmidt, S., Castaing, P., Blanc, G., Sautour, B., Masson, O., & Kirk Cochran, J. (2010). The particulate $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$ xs and $^{234}\text{Th}/^{210}\text{Pb}$ xs activity

- ratios as tracers for tida-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): Implications for the budget of particle-associated contaminants. *Science of the Total Environment*, 408, 4784-4794.
- [183] Sadourny, R., & Laval, K. (1984). January and July performance of the LMD-GCM. *New Perspectives in Climate Modelling*, 173-197.
- [184] Salvat, F., Fernandez-Varea, J. M., & Sempau, J. (2011). *PENELOPE-2011, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. Barcelona, Spain: OECD Nuclear Energy Agency.
- [185] Samuelsson, C., Hallstadius, L., Persson, B., Hedvall, R., Holm, E., & Forkman, B. (1986). ^{222}Rn and ^{210}Pb in the Arctic summer air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 3, 35-54.
- [186] Savva, M. I., Karangelos, D. J., & Anagnostakis, M. J. (2018). Determination of ^7Be and ^{22}Na activity in air and rainwater samples by gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 134, 466-469.
- [187] Savva, M. I., Karangelos, D. J., Anagnostakis, M. J., & Simopoulos, S. E. (2016). Analysis of size-fractionated soil samples by gamma spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 109, 563-565.
- [188] Savva, M. I., Karfopoulos, K. L., Karangelos, D. J., Anagnostakis, M. J., & Simopoulos, S. E. (2014). Installation and performance testing of an XtRa - NaI(Tl) Compton Suppression System at the NED-NTUA. *Applied Radiation and Isotopes*, 87, 361-364.
- [189] Scheel, H. E., Sladkovic, R., & Kanter, H.-J. (1999). Ozone Variations at the Zugspitze (2962m a.s.l.) during 1996-1997. *Transactions on Ecology and the Environment*, 28, 264-268.
- [190] Schubert, M., Musolff, A., & Weiss, H. (2018). Influences of meteorological parameters on indoor radon concentrations (^{222}Rn) excluding the effects of forces ventilation and radon exhalation from soil and building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 81-85.
- [191] Semertzidou, P., Piliposian, G. T., & Appleby, P. G. (2016). Atmospheric residence time of ^{210}Pb determined from the activity ratios with its daughter

- radionuclides ^{210}Bi and ^{210}Po . *Journal of Environmental Radioactivity*, 160, 42-53.
- [192] Sepulveda, A., Schuller, P., Walling, D. E., & Casillo, A. (2008). Use of ^7Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 35-49.
- [193] SIGMA-ALDRICH. (2011). Recovery at 07/06/2018, from http://sigma-aldrich.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/3082/p/19,1001/session/L3RpbWUvMTUxOTk5ODMyMy9zaWQvTHFQdG1DR24%3D
- [194] Simon, J., Meresova, J., Sykora, I., Jeskovsky, M., & Holy, K. (2009). Modeling of temporal variations of vertical concentration profile of ^7Be in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 43, 2000-2004.
- [195] Simopoulos, S. E. (1989). Soil sampling and Cs-137 analysis of the Chernobyl fallout in Greece. *Applied Radiation and Isotopes*, 40(7), 607-613.
- [196] Simopoulos, S. E., & Angelopoulos, M. G. (1987). Natural Radioactivity Releases from Lignite Power Plants in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 5, 379-389.
- [197] Singh, K., Singh, M., Singh, S., Sahota, H. S., & Papp, Z. (2005). Variation of radon (^{222}Rn) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. *Radiation Measurements*, 39, 213-217.
- [198] Sportisse, B. (2007). A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides. *Atmospheric Environment*, 41, 2683-2698.
- [199] Stajic, J. M., & Nikezic, D. (2015). Analysis of Radon and Thoron Progeny Measurements Based on Air Filtration. *Radiation Protection Dosimetry*, 163, 333-340.
- [200] Steck, D. J. (2009). Annual Average Indoor Radon Variations Over Two Decades. *Health Physics*, 96(1), 37-47.
- [201] Stochioiu, A., Sahagia, M., Bercea, S., Ivan, C., & Tudor, I. (2008). Monitoring of the Radioactivity Concentration of Air in the Area of the IFIN-

- HH, Romania. *International Congress of the International Radiation Protection Association*. Argentina.
- [202] Stohl, A., Spichtinger-Rakowsky, N., Bonasoni, P., Feldmann, H., Memmesheimer, M., Scheel, H. E., Trickl, T., Hubener, S., Ringer, W., Mandl, M. (2000). The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 34, 1323-1354.
- [203] Stoulos, S., & Ioannidou, A. (2020). Radon and its progenies variation in the urban polluted atmosphere of the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1160-1166.
- [204] Tateda, Y., & Iwao, K. (2008). High ^{210}Po atmospheric deposition flux in the subtropical coastal area of Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 98-108.
- [205] Taylor, A., Keith-Roach, M. J., Iurian, A. R., Mabit, L., & Blake, W. H. (2016). Temporal variability of beryllium-7 fallout in southwest UK. *Journal of Environmental Radioactivity*, 160, 80-86.
- [206] Tchorz-Trzeciakiewicz, D. E., & Klos, M. (2017). Factors affecting atmospheric radon concentration, human health. *Science of the Total Environment*, 584-585, 911-920.
- [207] Terzi, L., & Kalinowski, M. (2017). World-wide seasonal variation of ^7Be related to large-scale atmospheric circulation dynamics. *Journal of Environmental Radioactivity*, 178-179, 1-15.
- [208] Thomas, J. W. (1971). *Determination of the Working Level of Radon Daughters by the Modified Tsivoglou Method*. doi:doi:10.2172/4649649
- [209] Thor, R., & Zutshi, P. K. (1958). Annual Deposition of Cosmic Ray Produced Be^7 at Equatorial. *Tellus X*, 1, 99-103.
- [210] Till, J. E., & Meyer, H. R. (1983). *Radiological Assessment: A textbook on Environmental Dose Analysis*. NUREG/CR-3332US Nuclear Regulatory Commission. Washington, D.C.
- [211] Tokuyama, H., Oonishi, M., & Matsuura, H. (1993). Environmental Background Level of Cosmic Ray Produces ^{22}Na . *Journal of Environmental Radioactivity*, 21, 213-218.

- [212] Tositti, L., Brattich, E., Cinelli, G., & Baldacci, D. (2014). 12 years of ^7Be and ^{210}Pb in Mt. Cimone, and their correlation with meteorological parameters. *Atmospheric Environment*, 87, 108-122.
- [213] Trnkova, L., & Rulik, P. (2009). Low background shielding of HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 723-725.
- [214] Turekian, K. K., Benninger, L. K., & Dion, E. P. (1983). ^7Be and ^{210}Pb Total Deposition Fluxes at New Haven, Connecticut and at Bermuda. *Journal of Geophysical Research*, 88, 5411-5415.
- [215] UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation - UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes* (Vol. I: SOURCES). New York: United Nations.
- [216] Vecchi, R., Marcazzan, G., & Valli, G. (2005). Seasonal variation of ^{210}Pb activity concentration in outdoor air of Milan (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity*, 82, 251-266.
- [217] Wallbrink, P. J., & Murray, A. S. (1994). Fallout of ^7Be in South Eastern Australia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 25, 213-228.
- [218] Whicker, R., & Kirchner, T. B. (1987). Pathway: A Dynamic food-chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition. *Health Physics*, 52, 717-737.
- [219] Xie, D., Liao, M., & Kearfott, J. (2015). Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building - A case study. *Radiation Measurements*, 82, 52-58.
- [220] Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Sasaki, K., Hirose, K., Igarashi, Y., & Kim, C. (2006). Seasonal and spatial variation of atmospheric ^{210}Pb and ^7Be deposition: features of the Japan Sea side of Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 86, 110-131.
- [221] Young, J. A., & Silker, W. A. (1974). The determination of air-sea exchange and oceanic mixing rates using ^7Be during the Bomex Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 79(30), 4481-4489.

- [222] Young, J. A., & Silker, W. B. (1980). Aerosol Deposition Velocities on the Pacific and Atlantic Oceans Calculated from ^7Be Measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 92-104.
- [223] Zalewska, T., Biernacik, D., & Marosz, M. (2021). Correlations between ^7Be , ^{210}Pb , dust and PM10 concentrations in relation to meteorological conditions in northern Poland in 1998-2018. *Journal of Environmental Radioactivity*, 228.
- [224] Zanis, P., Trickl, T., Stohl, A., Wernli, H., Cooper, O., Zerefos, C., Gaeggeler, H., Schnabel, C., Tobler, L., Kubik, P. W., Priller, A., Scheel, H. E., Kanter, H. J., Cristofanelli, P., Forster, C., James, P., Gerasopoulos, E., Delcloo, A., Papayannis, A., Claude, H. (2003). Forecast, observation and modelling of a deep stratospheric intrusion event over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 763-777.
- [225] Zeng, Z., Mi, Y., Ma, H., Cheng, J., Su, J., & Yue, Q. (2014). The characteristics of a low background germanium gamma ray spectrometer at China JinPing underground laboratory. *Applied Radiation and Isotopes*, 91, 165-170.
- [226] Zhang, F., Wang, J., Baskaran, M., Zhong, Q., Wang, Y., Paatero, J., & Du, J. (2021). A global dataset of atmospheric ^7Be and ^{210}Pb measurements: annual air concentration and depositional flux. *Earth System Science Data*, 13, 2963-2994.
- [227] Zhang, L., Yang, W., Chen, M., Wang, Z., Lin, P., Fang, Z., Qiu, Y., Zheng, M. (2016). Atmospheric Deposition of ^7Be in the Southeast of China: A Case Study in Xiamen. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 105-113.
- [228] Ακριτίδης, Δ. (2008). *Συνοπτικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής της ανώτερης τροπόσφαιρας κατά τη μεταφορά στρατοσφαιρικού όζοντος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
- [229] Αναγνωστάκης, Μ. Ι. (1998). *γ-Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών*. Διδακτορική

Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.

- [230] Δαλάκα, Α. (2023). *Διερεύνηση της Διακύμανσης της Ενεργότητας και Κατανομής Μεγέθους Ραδιενεργών Ιχνηθετών στο Ατμοσφαιρικό Αερόλυμα*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [231] IAEA, & ALMERA. (2021, June). EVT1904351 "Virtual Training Workshop of IAEA's ALMERA Network on Advanced Topics in Gamma-ray Spectrometry".
- [232] Καρύδης, Ε. (2021). *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Ανίχνευση Ραδιενεργών Ισοτόπων σε Δείγματα Ξηρής Ατμοσφαιρικής Απόθεσης*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [233] Καρφόπουλος, Κ. Α. (2012). *Ανάπτυξη και Εφαρμογή Μετρητικών Τεχνικών για την Ανάλυση της Φυσικής και της Τεχνολογικά Επαγόμενης Ραδιενέργειας σε Οικοσυστήματα*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [234] Μήτσιοι, Ι. Κ. (2016). *Μελέτη της Συγκέντρωσης Φυσικών και Τεχνητών Ραδιενεργών Ισοτόπων στα Διάφορα Κοκκομετρικά Κλάσματα του Επιφανειακού Χώματος*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [235] Μπασιάς, Κ. Ε. (2013). *Μετρήσεις της Συγκέντρωσης του Ισοτόπου Κοσμικής Προέλευσης ^7Be στο Αεροζόλ της Ατμόσφαιρας και στο Νερό της Βροχής*. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, Ελλάδα.
- [236] Νικολάου, Α. (2006). *Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης Φωτονιακών Ακτινοβολιών και Ύλης με Χρήση του Κώδικα PENELOPE - Εφαρμογή σε Προβλήματα Υπολογισμού Θωρακίσεων και Βαθμονόμησης Ανιχνευτικών Διατάξεων*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.

- [237] Παπαδόπουλος, Ν. Κ. (2010). *Μοντέλα διακίνησης και εναπόθεσης στερεών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας στο περιβάλλον και συνακόλουθες ραδιολογικές επιπτώσεις στη λεκάνη της Μεγαλόπολης*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [238] Σάββα, Μ. Ι. (2017). *Ανάπτυξη και Εφαρμογή Τεχνικών Προσδιορισμού Πολύ Χαμηλών Συγκεντρώσεων Ραδιενεργών Ιχνοστοιχείων σε Δείγματα Περιβαλλοντικής Σημασίας*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [239] Σπανίδης, Α. Θ. (2021). *Σχεδίαση και Κατασκευή Θωράκισης Φορητού Ανιχνευτή BEGe με την Μέθοδο Προσομοίωσης Monte-Carlo*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [240] Τσιαντή, Μ. (2018). *Μετρήσεις Χαμηλών Επιπέδων Φυσικής και Τεχνητά Επαγόμενης Ραδιενέργειας σε Περιβαλλοντικά Δείγματα*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [241] Χαβιάρας, Δ. Ε. (2015). *Παραμετρική Μελέτη της Γεωμετρίας Δείγματος για την Ανίχνευση ^{210}Pb σε Δείγματα Χώματος Μικρού Όγκου*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πιστοποιητικά ανιχνευτών γερμανίου

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται τα πιστοποιητικά των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Detector Model GX10021 Serial number b 00078
Cryostat Model 7500SL
Preamplifier Model 2002CSL

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :

Nominal volume cc Relative efficiency 100 %

Resolution 2.10 keV (FWHM) at 1.33 MeV

 keV (FWTM) at 1.33 MeV

1.20 keV (FWHM) at 122 keV

 keV (FWTM) at

Peak/Compton 78:1 Cryostat well diameter Well depth mm

Cryostat description or Drawing Number if special Vertical Dipstick, type 7500SL (Carbon Epoxy window) + 4"

CFE

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window

Diameter 80 mm Active volume cc

Length 78 mm Crystal well depth mm

Distance from window (outside) 5 mm Crystal well diameter mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+)4000 Vdc

Recommended bias voltage Vdc (+)4500 Vdc

Leakage current at recommended bias 0.01 nA

Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.1 Vdc

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 6 μ s


Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	1.03	2.04			
FWTM (keV)		3.99			
Peak/Compton		82.2:1			
Rel. Efficiency		104.5%			

- Test are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996

- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by : 

Date : September 7, 1999

Approved by : 

Date : September 7, 1999

Docum : GDAME001	Date : 02/02/99
Issue : Spec. Sheet GC	Name : PVE
Revise : D	Page : 1/1
Basis : 0.W001PVE.15	Appr :

Σχήμα Α.1 : Πιστοποιητικό Ανιχνευτή ΧtRa

6.1 SPECIFICATIONS

Serial Number 9831018

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows:

Rel. Efficiency - 30 %
 Resolution - 2.0 keV (FWHM) @ 1.33 MeV
 - _____ keV (FWTM)
 - _____ keV (FWHM) @ _____
 - _____ keV (FWTM) @ _____
 Peak/Compton - _____:1

Cryostat Description or Drw. No. if special 7500

6.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA

Actual performance of this detector when tested is given below. Digital printouts are also enclosed in the rear envelope of the instruction manual.

Geometry Closed End Coaxial
 Diameter 55.3 mm
 Length 65 mm
 Active area facing window 24.15 cm²
 Distance from window 5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage +1.3000 Vdc.
 Recommended Bias Voltage +1.3000 Vdc.
 Leakage Current at Recommended Bias NA Na.
 Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias 1.48 Vdc.
 Capacitance at Recommended Bias NA pf.

RESOLUTION AND EFFICIENCY

Isotope	Co ⁵⁷	Co ⁶⁰			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	0.85	1.78			
FWTM (keV)	1.61	3.26			
Peak/Compton		66.5:1			
Efficiency (%)		33.8%			

Σχήμα Α.2 : Πιστοποιητικό Ανιχνευτή Ge (33.8%) (Ge1 όπως αναφέρεται στο κυρίως κείμενο της παρούσας Δ.Δ.)

DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA

7.1 SPECIFICATIONS Model GL2020-7500 Serial Number b 87547

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follow:

Energy	5.9 keV	122 keV	
Resolution [eV (FWHM)]	400	680	

Cryostat Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4" CFE + PHW

7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1988

Actual performance of this detector when tested is given below.

Active Diameter 50.5 mm
 Active Area 2000 mm²
 Thickness 20 mm
 Distance from Window 5 mm
 Window Thickness .5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage (-)1500 Vdc.
 Recommended Bias Voltage (-)2000 Vdc.
 Reset Rate at Recommended Bias / sec. (PO Preamp only)
 Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias + .4 Vdc. (RC Preamp only)

RESOLUTION AND EFFICIENCY - With Amp. Time Constant of 4 microseconds.

Isotope	Fe ⁵⁵	Co ⁵⁷	Co ⁵⁷		
Energy (keV)	5.9	6.4 *	122		
FWHM (eV)	341		530		
FWTM (eV)			996		

* Substitutes for Fe-55 in some cases where Fe-55 peaks are not well separated.

Σχήμα Α.3 : Πιστοποιητικό Ανιχνευτή LEGe

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Detector Model GC4018 Serial number b 12099
 Cryostat Model 7500SL
 Preamplifier Model 2002CSL

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :

Nominal volume cc Relative efficiency 40 %
 Resolution 1.8 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWTM) at 1.33 MeV
 .875 keV (FWHM) at 122 keV
 keV (FWTM) at
 Peak/Compton 63:1 Cryostat well diameter mm Well depth mm
 Cryostat description or Drawing Number if special 7500SL

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window
 Diameter 59.5 mm Active volume cc
 Length 61 mm Crystal well depth mm
 Distance from window (outside) 6 mm Crystal well diameter mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+3000) Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+3500) Vdc
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.1 Vdc

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 μ s

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	.821	1.77			
FWTM (keV)		3.28			
Peak/Compton		69.3:1			
Rel. Efficiency		40.9%			

- Tests are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996

- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by:  Date: January 12, 2012

Approved by:  Date: January 12, 2012

Σχήμα Α.4 : Πιστοποιητικό Ανιχνευτή HPGe (40.9%) (Ge2 όπως αναφέρεται στο κυρίως κείμενο της παρούσας Δ.Δ.)

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA AFTER REPAIR

Specifications

Detector Model BE3825 Serial number b 04070
 Cryostat Model 7935SL-7
 Preamplifier Model 2002CSL

Cryostat description or Drawing Number if special Multi Attitude cryostat, type 7935SL-7

Physical Characteristics

Active Diameter 70 mm Distance from window (outside) 5 mm
 Active Area 3800 mm² Window thickness 0.5 mm
 Thickness 25 mm Window material Carbon Epoxy

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+3000) Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+3500) Vdc
 Reset rate at recommended bias 1 sec (PO preamp only)
 Preamplifier test point voltage at recommended bias -0.6 Vdc (RC preamp only)

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 μ s

Isotope	⁵⁵ Fe	⁵⁷ Co	60Co		
Energy (keV)	5.9	122	1332.5		
FWHM (eV)	440	658	1780		
FWTM (eV)		1204	3295		

- Tests are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996
- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by :

Date : January 25, 2007

Approved by :

Date : January 25, 2007

Σχήμα Α.5 : Πιστοποιητικό Ανιχνευτή BEGe

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Προσδιορισμός συντελεστή ισορροπίας F

Ο συνδυασμός χρήσης των οργάνων ALPHAGUARD-ALPHAPM επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών στον αέρα του χώρου στον οποίο τοποθετούνται. Το ALPHAGUARD δίνει τη συγκέντρωση του ραδονίου σε Bq/m³ και το ALPHAPM τη συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου σε mWL.

Ειδικότερα, το ALPHAPM μετρά το “Potential Alpha Energy” σε MeV/L, δηλαδή την ενέργεια που απελευθερώνουν τα θυγατρικά του ραδονίου από τη διάσπασή τους ανά λίτρο αέρα που περνά μέσα από το όργανο. Θυγατρικά του ραδονίου συγκέντρωσης 1WL (Working Level) ελευθερώνουν ενέργεια 1.3·10⁵ MeV/L ως αποτέλεσμα της «α-διάσπασής» τους. Συνεπώς, διαιρώντας τα μετρούμενα MeV/L με την ενέργεια «1.3·10⁵ MeV/L» προκύπτουν τα WL των θυγατρικών του ραδονίου.

Από τα WL που προκύπτουν, θεωρώντας ισορροπία του ραδονίου με τα θυγατρικά του, το ALPHAGUARD υπολογίζει την υποθετική συγκέντρωση του ραδονίου σε Bq/m³ βάσει της εξίσωσης:

$$\frac{A'/37}{100} \cdot ER = WL$$

Όπου:

A' : η υποθετική συγκέντρωση του ραδονίου σε Bq/m³ αν βρισκόταν σε ισορροπία

με τα θυγατρικά του.

ER : το «Equilibrium Ratio» (ο λόγος ισορροπίας) μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του.

WL : το Working Level των θυγατρικών του ραδονίου όπως αυτά προέκυψαν από τη μέτρηση του ALPHAPM

Συνεπώς, για ER = 1, η υποθετική συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου είναι A' = 3700 · WL. Με τον τρόπο αυτό, συγκρίνοντας την υποθετική (A') με τη μετρούμενη (A) συγκέντρωση του ραδονίου προκύπτει ο συντελεστής ισορροπίας F (equilibrium factor) από την εξίσωση:

$$F = \frac{A'}{A}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Συμπληρωματικά μετεωρολογικά δεδομένα

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζεται το σύνολο των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διερεύνησης της κύμανσης του ραδονίου στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Γ.1 2^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στον **Πίνακα Γ.1** που ακολουθεί δίνονται τα εξωτερικά μετεωρολογικά δεδομένα του εργαστηρίου ΕΠΤ-ΕΜΠ από το μετεωρολογικό σταθμό Παπάγου όπως αυτά έγιναν διαθέσιμα από το *Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών*, και αφορούν τις πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας της 2^{ης} περιόδου δειγματοληψίας της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ (14/10/2020-24/10/2020). Η αβεβαιότητες δίνονται σε επίπεδο 1σ.

Πίνακας Γ.1: Μέσες Ημερήσιες Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων μετεωρολογικού σταθμού Παπάγου από 14/10/2020 έως και 24/10/2020.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Ύψος Βροχής (mm)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/hr)	Κύρια Κατεύθυνση Ανέμου
14/10/20	19.1 ± 0.5	0.0	1015.0 ± 0.3	3.6 ± 0.5	SW
15/10/20	17.7 ± 0.8	0.0	1017.5 ± 0.2	2.2 ± 0.5	SW
16/10/20	19.7 ± 0.8	0.0	1014.1 ± 0.3	2.4 ± 0.7	SW
17/10/20	20.6 ± 0.5	0.2	1011.6 ± 0.2	3.7 ± 0.6	SW
18/10/20	18.0 ± 0.7	0.0	1014.0 ± 0.2	2.9 ± 0.5	SE
19/10/20	16.2 ± 0.4	0.0	1019.5 ± 0.3	6.3 ± 0.6	ESE
20/10/20	16.2 ± 0.4	0.0	1021.6 ± 0.1	7.8 ± 0.6	ENE
21/10/20	15.1 ± 0.2	0.0	1021.5 ± 0.1	9.0 ± 0.4	NE
22/10/20	17.6 ± 0.5	0.0	1021.2 ± 0.1	7.5 ± 0.6	ENE
23/10/20	17.6 ± 1.0	0.0	1020.1 ± 0.2	1.4 ± 0.3	SE
24/10/20	18.7 ± 0.9	0.0	1016.5 ± 0.2	1.9 ± 0.4	ESE

Στον **Πίνακα Γ.2** που ακολουθεί δίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από το ALPHAGUARD. Ακόμα δίνονται οι διαφορές μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας ($\Delta T_{\text{out-in}}$) καθώς και μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης ($\Delta P_{\text{out-in}}$).

Πίνακας Γ.2: Μέσες Ημερήσιες Τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ καθώς και οι διαφορές τους με τις αντίστοιχες εξωτερικές τιμές για τη χρονική περίοδο από 14/10/2020 έως και 24/10/2020.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	$\Delta T_{\text{out-in}}$ (°C)	$\Delta P_{\text{out-in}}$
14/10/20	23.0 ± 0.04	993.6 ± 0.3	-3.9 ± 0.5	21.4 ± 0.04
15/10/20	22.7 ± 0.03	995.7 ± 0.2	-5.0 ± 0.8	21.7 ± 0.04
16/10/20	22.7 ± 0.05	992.4 ± 0.3	-3.0 ± 0.8	21.7 ± 0.05
17/10/20	22.9 ± 0.01	990.4 ± 0.2	-2.4 ± 0.5	21.2 ± 0.07
18/10/20	22.7 ± 0.02	992.6 ± 0.2	-4.7 ± 0.7	21.4 ± 0.05
19/10/20	22.6 ± 0.05	997.9 ± 0.3	-6.4 ± 0.4	21.6 ± 0.04
20/10/20	22.4 ± 0.03	999.7 ± 0.1	-6.2 ± 0.4	21.9 ± 0.03
21/10/20	22.4 ± 0.02	999.5 ± 0.1	-7.3 ± 0.2	22.0 ± 0.03
22/10/20	22.4 ± 0.03	999.3 ± 0.1	-4.8 ± 0.5	21.9 ± 0.04
23/10/20	22.4 ± 0.03	998.2 ± 0.2	-4.8 ± 0.9	21.9 ± 0.04
24/10/20	22.4 ± 0.02	994.7 ± 0.2	-3.7 ± 0.9	21.8 ± 0.05

Γ.2 3^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στον **Πίνακα Γ.3** που ακολουθεί δίνονται τα εξωτερικά μετεωρολογικά δεδομένα του εργαστηρίου ΕΠΤ-ΕΜΠ από το μετεωρολογικό σταθμό Παπάγου όπως αυτά έγιναν διαθέσιμα από το *Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών*, και αφορούν τις πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας της 3^{ης} περιόδου δειγματοληψίας της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ (2/3/2021-12/3/2021). Η αβεβαιότητες δίνονται σε επίπεδο 1σ.

Πίνακας Γ.3: Μέσες Ημερήσιες Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων μετεωρολογικού σταθμού Παπάγου από 2/3/2021 έως και 12/3/2021.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Ύψος Βροχής (mm)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/hr)	Κύρια Κατεύθυνση Ανέμου
2/3/2021	7.5 ± 0.3	0.0	1029.4 ± 0.2	8.2 ± 0.9	E
3/3/2021	9.3 ± 0.8	0.0	1028.5 ± 0.1	5.4 ± 1.0	NE
4/3/2021	11.2 ± 0.8	0.0	1023.8 ± 0.5	1.2 ± 0.2	WSW
5/3/2021	12.8 ± 0.5	0.0	1018.7 ± 0.1	2.5 ± 0.4	SW
6/3/2021	13.5 ± 0.4	0.0	1019.6 ± 0.2	3.4 ± 0.3	SW
7/3/2021	9.8 ± 0.3	0.0	1022.6 ± 0.2	2.1 ± 0.2	NE
8/3/2021	10.0 ± 0.4	0.0	1017.7 ± 0.4	0.9 ± 0.2	WSW
9/3/2021	11.7 ± 0.4	0.0	1014.3 ± 0.2	4.4 ± 0.8	SE
10/3/2021	12.6 ± 0.7	0.0	1011.1 ± 0.3	2.1 ± 0.4	SW
11/3/2021	9.3 ± 0.5	0.0	1014.0 ± 1.1	3.7 ± 0.6	NNE
12/3/2021	7.9 ± 0.7	0.0	1021.0 ± 0.3	2.6 ± 0.7	SW

Στον **Πίνακα Γ.4** που ακολουθεί δίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από το ALPHAGUARD. Ακόμα δίνονται οι διαφορές μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας ($\Delta T_{\text{out-in}}$) καθώς και μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης ($\Delta P_{\text{out-in}}$).

Πίνακας Γ.4: Μέσες Ημερήσιες Τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ καθώς και οι διαφορές τους με τις αντίστοιχες εξωτερικές τιμές για τη χρονική περίοδο από 14/10/20 έως και 24/10/20.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	$\Delta T_{\text{out-in}}$ (°C)	$\Delta P_{\text{out-in}}$
2/3/2021	21.3 ± 0.01	1006.4 ± 0.2	-13.8 ± 0.3	23.0 ± 0.04
3/3/2021	21.1 ± 0.02	1005.4 ± 0.1	-11.8 ± 0.8	23.1 ± 0.06
4/3/2021	21.1 ± 0.01	1001.2 ± 0.5	-9.9 ± 0.8	22.6 ± 0.04
5/3/2021	21.0 ± 0.01	996.3 ± 0.1	-8.3 ± 0.5	22.4 ± 0.04
6/3/2021	21.1 ± 0.00	997.2 ± 0.2	-7.6 ± 0.4	22.4 ± 0.09
7/3/2021	21.1 ± 0.00	1000.3 ± 0.2	-11.3 ± 0.3	22.3 ± 0.04
8/3/2021	21.0 ± 0.01	995.3 ± 0.4	-11.0 ± 0.4	22.4 ± 0.06
9/3/2021	20.8 ± 0.01	992.0 ± 0.2	-9.1 ± 0.4	22.3 ± 0.06
10/3/2021	20.6 ± 0.01	989.0 ± 0.3	-8.1 ± 0.7	22.1 ± 0.06
11/3/2021	20.8 ± 0.05	991.5 ± 1.0	-11.6 ± 0.6	22.5 ± 0.10
12/3/2021	20.8 ± 0.01	998.3 ± 0.4	-13.0 ± 0.7	22.7 ± 0.06

Γ.3 4^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στον **Πίνακα Γ.5** που ακολουθεί δίνονται τα εξωτερικά μετεωρολογικά δεδομένα του εργαστηρίου ΕΠΤ-ΕΜΠ από το μετεωρολογικό σταθμό Παπάγου όπως αυτά έγιναν διαθέσιμα από το *Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών*, και αφορούν τις πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας της 4^{ης} περιόδου δειγματοληψίας της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ (16/4/2022-26/4/2022). Η αβεβαιότητες δίνονται σε επίπεδο 1σ.

Πίνακας Γ.5: Μέσες Ημερήσιες Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων μετεωρολογικού σταθμού Παπάγου από 16/4/2022 έως και 26/4/2022.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Ύψος Βροχής (mm)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/hr)	Κύρια Κατεύθυνση Ανέμου
16/4/2022	15.9 ± 0.8	5.8	1012.7 ± 0.4	7.2 ± 0.7	ESE
17/4/2022	13.2 ± 0.4	1.2	1004.2 ± 0.5	8.6 ± 0.6	ENE
18/4/2022	9.3 ± 0.2	0.2	1006.4 ± 0.4	7.0 ± 0.5	NE
19/4/2022	9.1 ± 0.3	0.0	1012.2 ± 0.5	6.5 ± 0.9	ESE
20/4/2022	12.5 ± 0.7	0.0	1015.7 ± 0.2	8.1 ± 0.5	SW
21/4/2022	14.5 ± 0.8	0.0	1015.7 ± 0.1	5.4 ± 0.5	ESE
22/4/2022	15.3 ± 0.9	0.0	1012.5 ± 0.4	5.4 ± 0.4	E
23/4/2022	16.1 ± 1.0	0.0	1008.5 ± 0.1	4.4 ± 0.4	SW
24/4/2022	17.3 ± 1.1	0.0	1009.9 ± 0.1	4.3 ± 0.6	E
25/4/2022	20.1 ± 0.7	0.0	1009.4 ± 0.1	6.5 ± 0.6	SW
26/4/2022	19.2 ± 0.9	0.0	1010.4 ± 0.2	4.4 ± 0.5	E

Στον **Πίνακα Γ.6** που ακολουθεί δίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από το ALPHAGUARD. Ακόμα δίνονται οι διαφορές μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας ($\Delta T_{\text{out-in}}$) καθώς και μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης ($\Delta P_{\text{out-in}}$).

Πίνακας Γ.6: Μέσες Ημερήσιες Τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ καθώς και οι διαφορές τους με τις αντίστοιχες εξωτερικές τιμές για τη χρονική περίοδο από 16/4/2022 έως και 26/4/2022.

Ημερομηνία	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία (°C)	Μέση Ημερήσια Βαρομετρική Πίεση (mbar)	$\Delta T_{\text{out-in}}$ (°C)	$\Delta P_{\text{out-in}}$
16/4/2022	22.7 ± 0.02	991.1 ± 0.4	-6.8 ± 0.8	21.7 ± 0.04
17/4/2022	22.6 ± 0.00	982.8 ± 0.5	-9.4 ± 0.4	21.4 ± 0.07
18/4/2022	22.5 ± 0.02	984.4 ± 0.4	-13.1 ± 0.2	22.0 ± 0.04
19/4/2022	22.3 ± 0.05	989.7 ± 0.4	-13.3 ± 0.3	22.5 ± 0.04
20/4/2022	22.0 ± 0.01	993.2 ± 0.1	-9.5 ± 0.7	22.4 ± 0.03
21/4/2022	21.9 ± 0.01	993.7 ± 0.1	-7.4 ± 0.8	22.0 ± 0.02
22/4/2022	21.9 ± 0.00	990.8 ± 0.4	-6.6 ± 0.9	21.7 ± 0.04
23/4/2022	21.9 ± 0.01	986.9 ± 0.1	-5.9 ± 1.0	21.6 ± 0.03
24/4/2022	22.0 ± 0.01	988.4 ± 0.1	-4.7 ± 1.1	21.5 ± 0.02
25/4/2022	22.2 ± 0.02	988.1 ± 0.1	-2.1 ± 0.7	21.3 ± 0.03
26/4/2022	22.4 ± 0.02	989.1 ± 0.1	-3.1 ± 0.9	21.2 ± 0.02

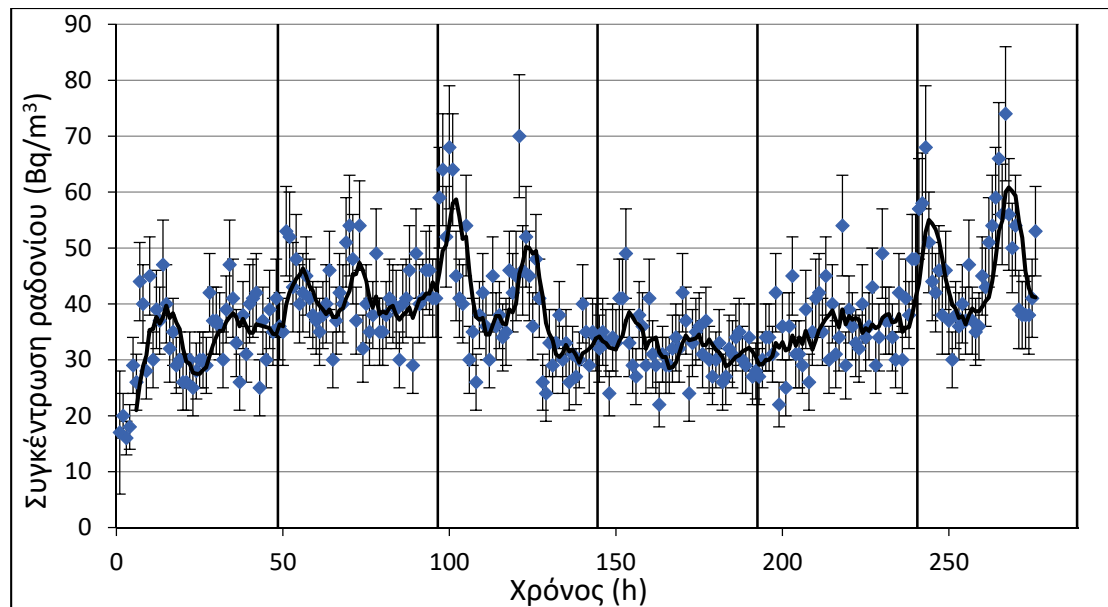
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Συμπληρωματικοί πίνακες και διαγράμματα κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του

Στο Παράρτημα Δ παρατίθενται τα διαγράμματα και οι πίνακες κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στα πλαίσια της 2^{ης}, της 3^{ης} και της 4^{ης} δειγματοληψίας, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας Δ.Δ. για τη μελέτη της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Δ.1 2^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Τα διαγράμματα και οι πίνακες που ακολουθούν αφορούν τη 2η δειγματοληψία μελέτης της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία έλαβε χώρα από τις 13/10/2020 έως και τις 25/10/2020 (με πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας να είναι από 14/10/2020 έως και 24/10/2020).



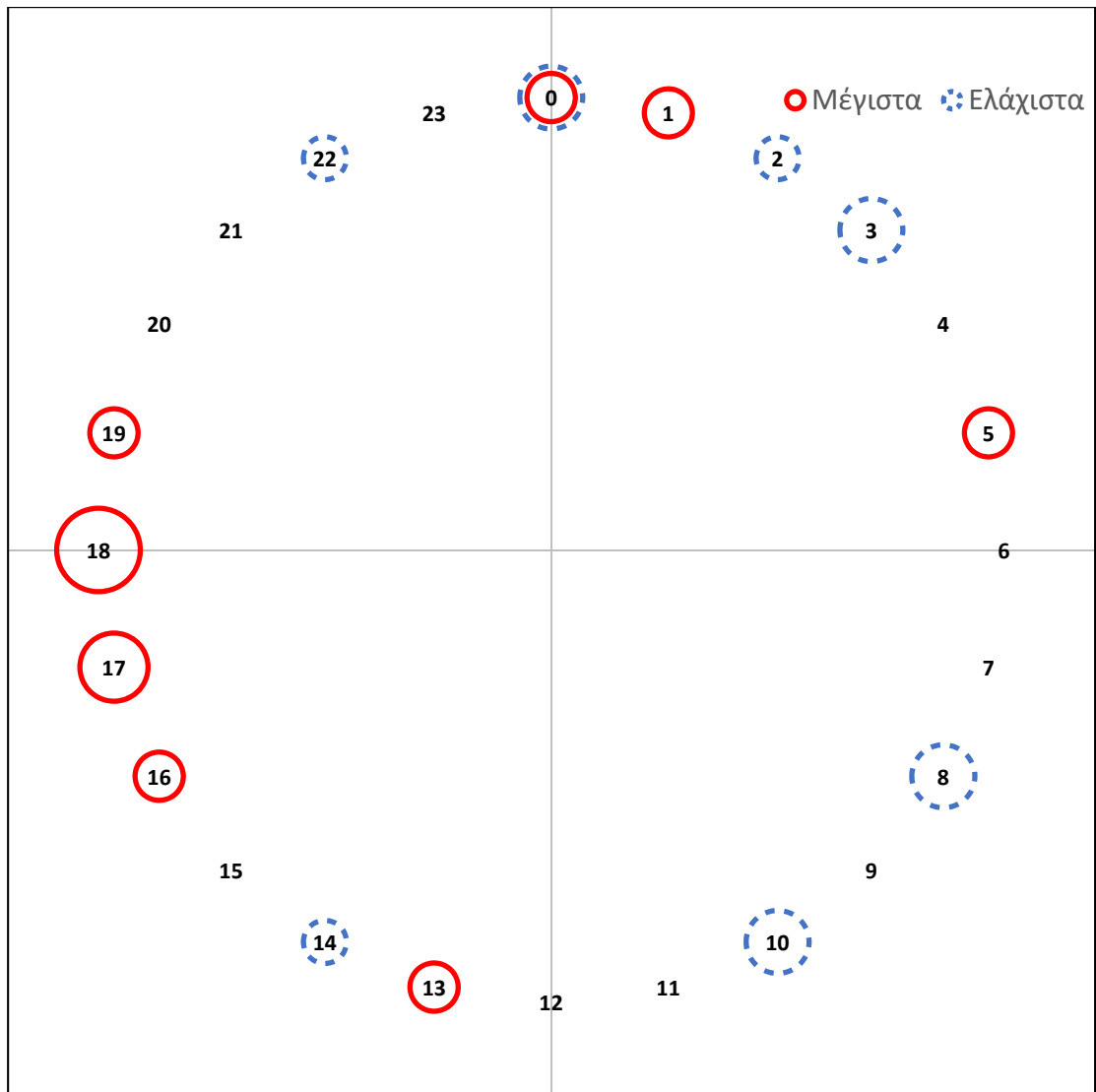
Σχήμα Δ.1 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας 13/10/2020-25/10/2020. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Α.1: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών μεγίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για τη 2^η δειγματοληψία 13/10/2020-25/10/2020.

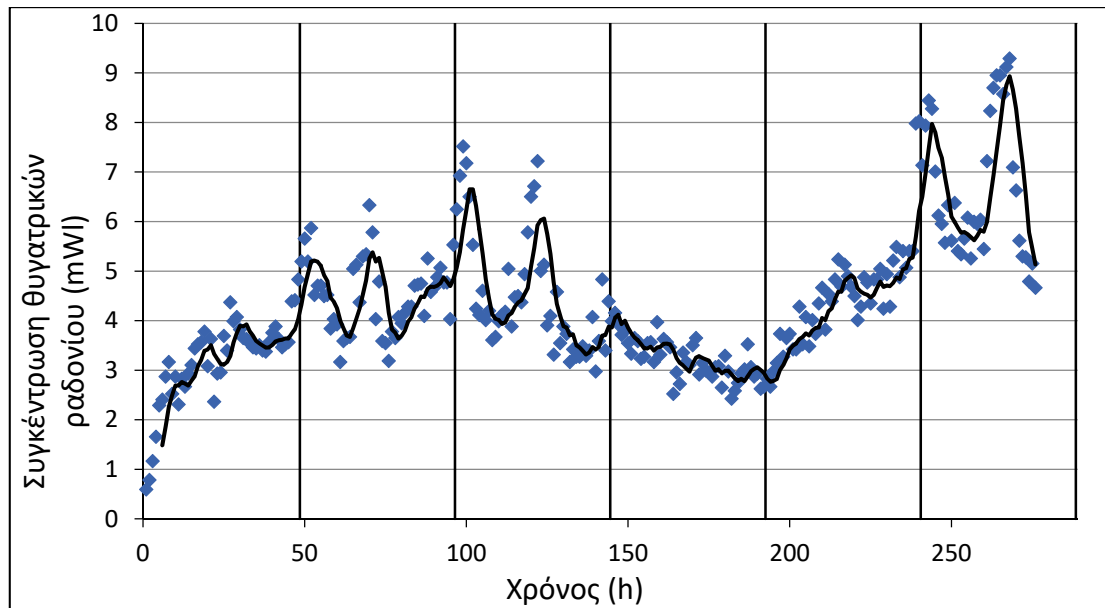
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
14/10/2020	05:00	47 ± 8	991.9	51.5
15/10/2020	01:00	47 ± 8	996.0	49.3
15/10/2020	18:00	53 ± 8	994.5	53.0
16/10/2020	13:00	54 ± 9	992.2	56.8
17/10/2020	19:00	68 ± 11	991.4	56.8
18/10/2020	16:00	70 ± 11	991.9	53.0
20/10/2020	00:00	49 ± 8	999.9	54.3
20/10/2020	17:00	42 ± 7	999.1	49.8
22/10/2020	17:00	54 ± 9	998.9	53.0
23/10/2020	18:00	68 ± 11	996.9	51.0
24/10/2020	18:00	74 ± 12	993.5	49.3

Πίνακας Α.2: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για τη 2^η δειγματοληψία 13/10/2020-25/10/2020.

Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
14/10/2020	14:00	25 ± 5	994.0	52.5
15/10/2020	10:00	25 ± 5	997.2	53.0
16/10/2020	8:00	30 ± 5	994.1	52.5
17/10/2020	8:00	29 ± 5	990.4	60.5
18/10/2020	3:00	26 ± 5	991.6	50.8
19/10/2020	0:00	24 ± 5	994.9	50.3
20/10/2020	10:00	22 ± 4	1000.0	49.3
21/10/2020	22:00	22 ± 4	999.9	53.0
23/10/2020	3:00	29 ± 5	999.0	52.5
24/10/2020	2:00	30 ± 5	996.0	51.3
25/10/2020	0:00	38 ± 6	993.2	49.3



Σχήμα Δ.2 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.



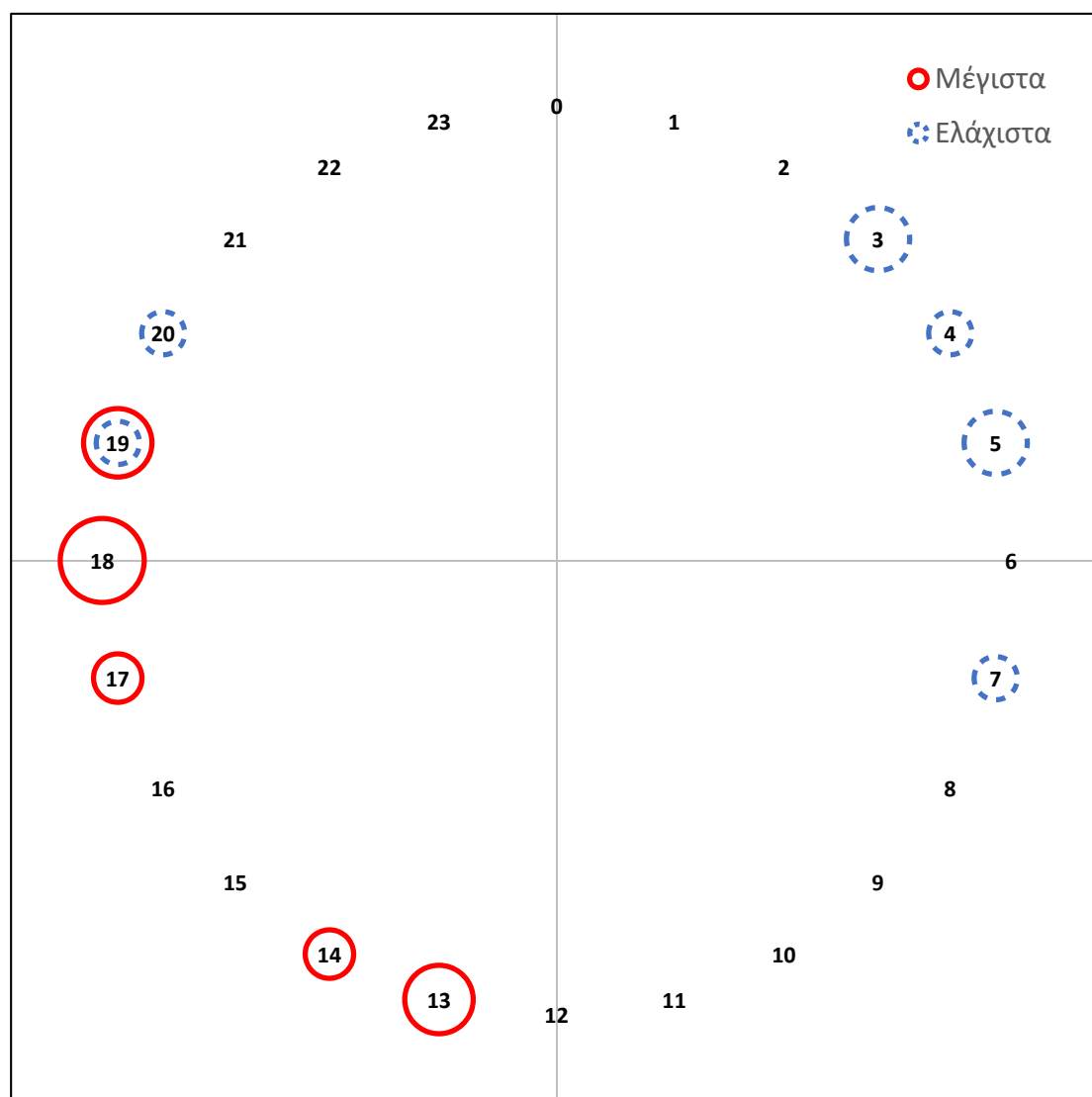
Σχήμα Δ.3 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας 13/10/2020-25/10/2020. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Δ.3: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιδικών μεγίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για τη 2^η δειγματοληψία 13/10/2020-25/10/2020.

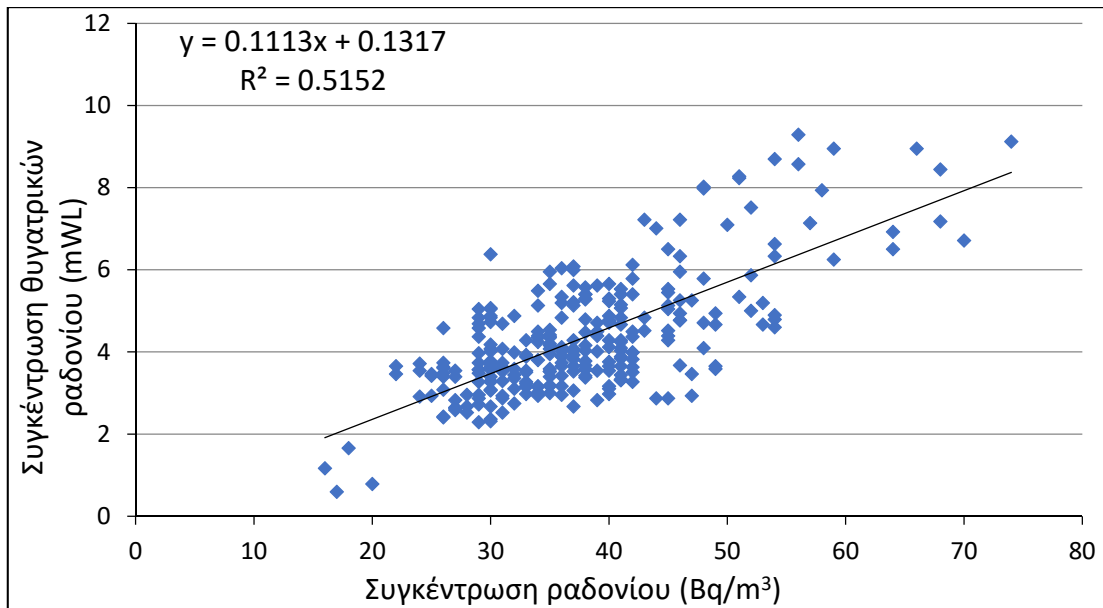
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
14/10/2020	18:00	4.371	994.6	48.8
15/10/2020	19:00	5.870	995.0	52.0
16/10/2020	13:00	6.334	992.2	56.8
17/10/2020	18:00	7.517	990.7	56.8
18/10/2020	17:00	7.221	992.2	51.8
19/10/2020	13:00	4.835	998.2	50.8
22/10/2020	14:00	5.236	999.0	53.0
23/10/2020	18:00	8.446	996.9	51.0
24/10/2020	19:00	9.291	994.1	53.0

Πίνακας Δ.4: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για τη 2^η δειγματοληψία 13/10/2020-25/10/2020.

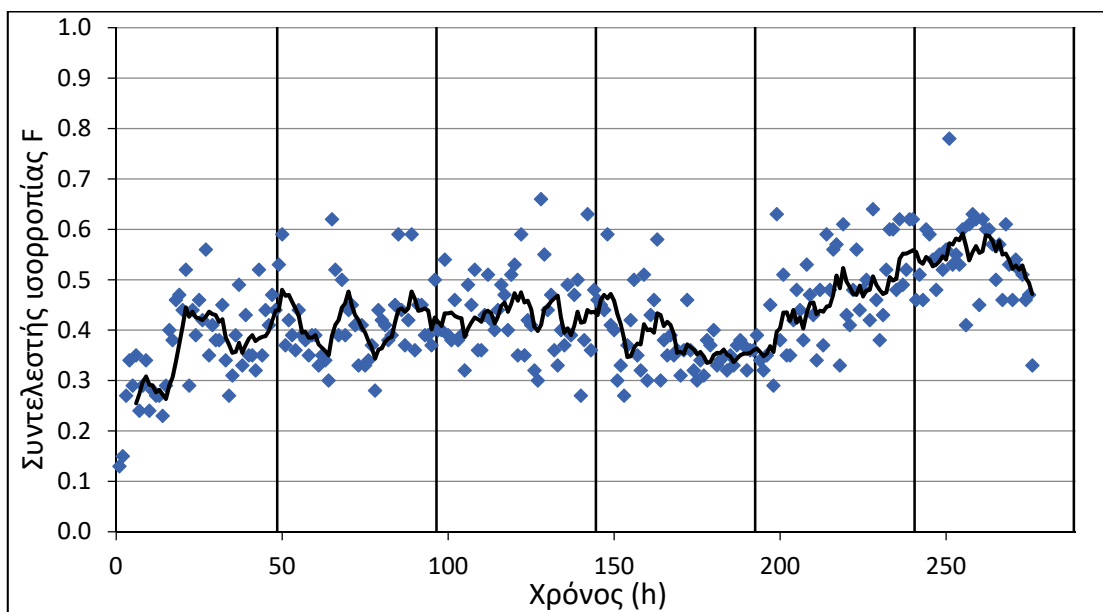
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
15/10/2020	5:00	3.378	995.7	48.3
16/10/2020	4:00	3.167	993.6	52.5
16/10/2020	19:00	3.188	990.8	56.0
18/10/2020	3:00	3.611	991.6	50.8
19/10/2020	3:00	3.167	996.1	50.3
21/10/2020	5:00	2.428	999.2	50.8
22/10/2020	20:00	4.012	999.1	55.0
24/10/2020	7:00	5.258	995.2	48.3



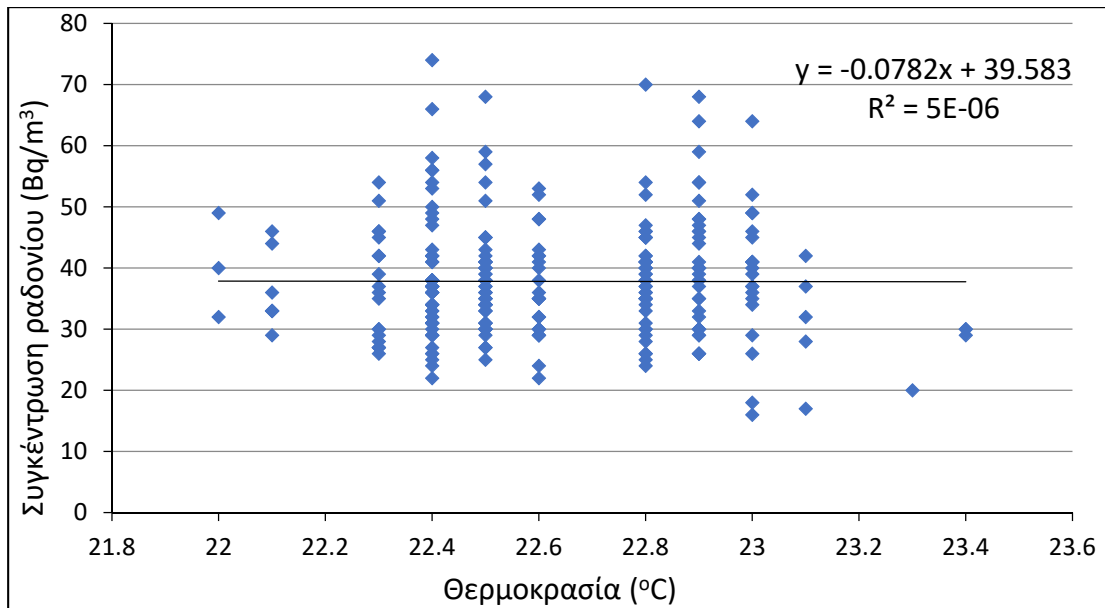
Σχήμα Δ.4 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.



Σχήμα Δ.5 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη συγκέντρωση του ραδονίου (Bq/m^3) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.

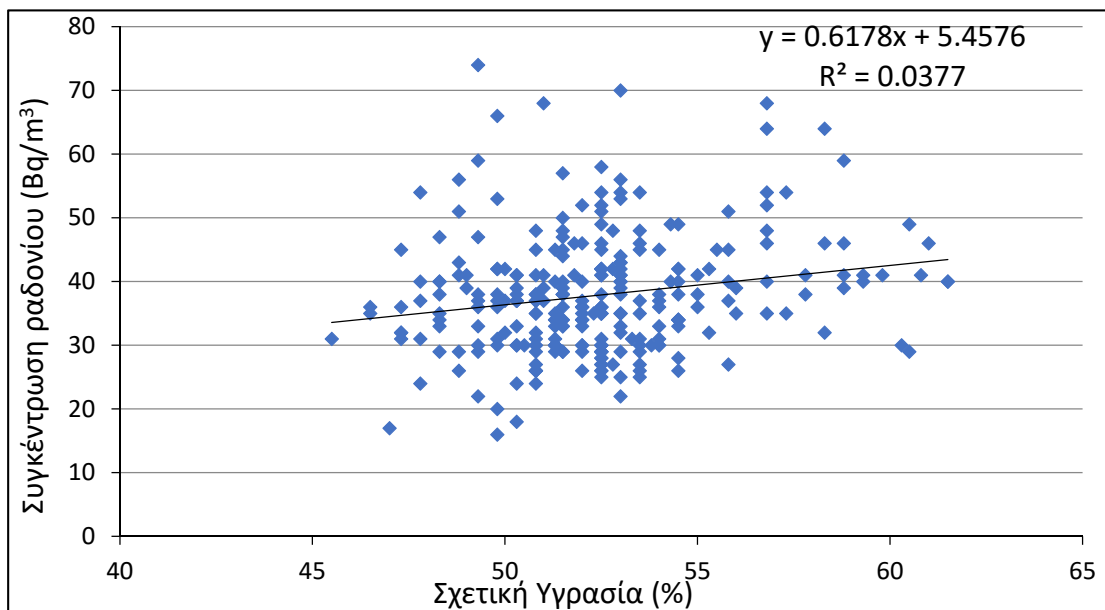


Σχήμα Δ.6 : Κύμανση του συντελεστή ισορροπίας F μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.



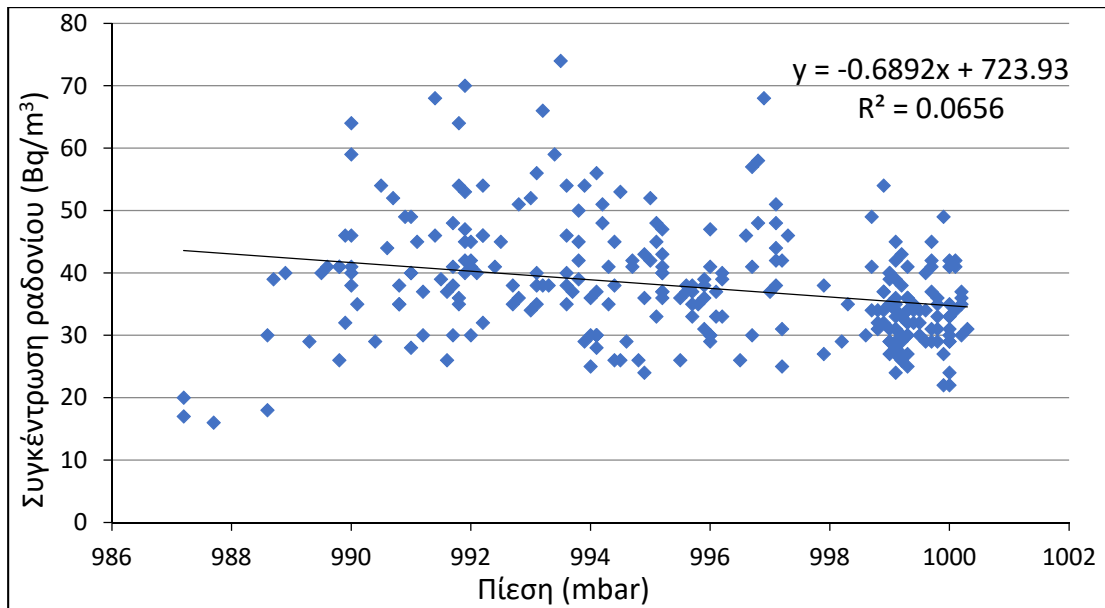
Σχήμα Δ.7 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.1.)



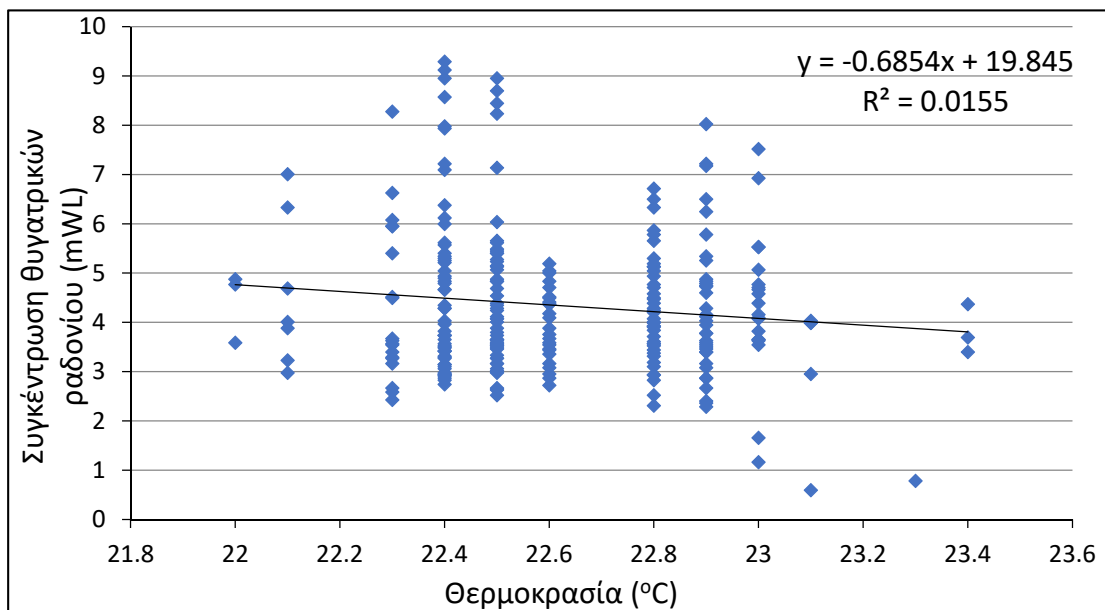
Σχήμα Δ.8 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.1.)

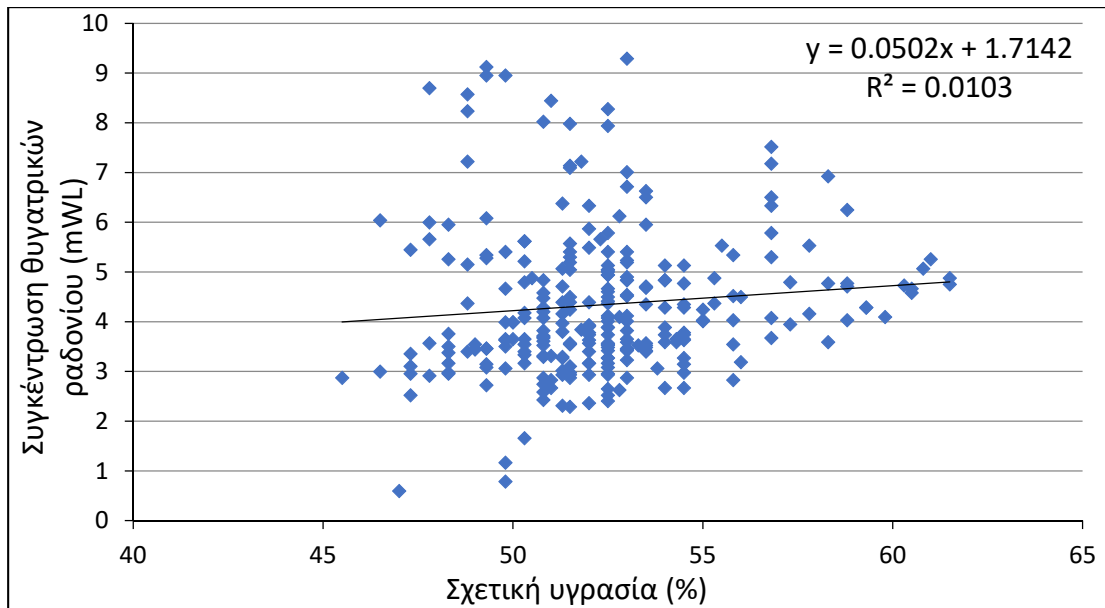


Σχήμα Δ.9 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.

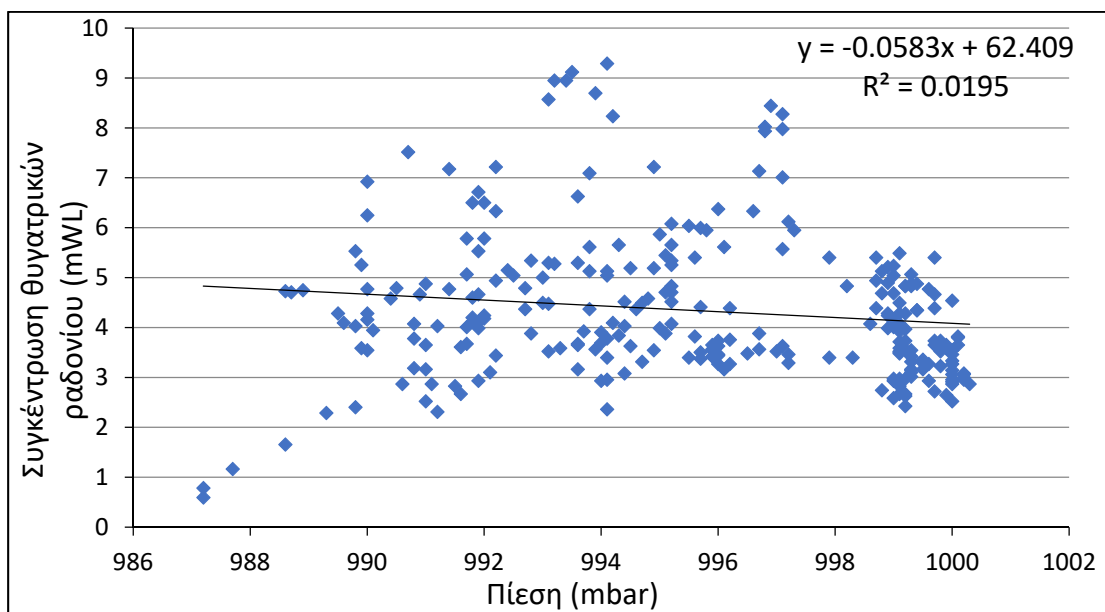
*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.1.)



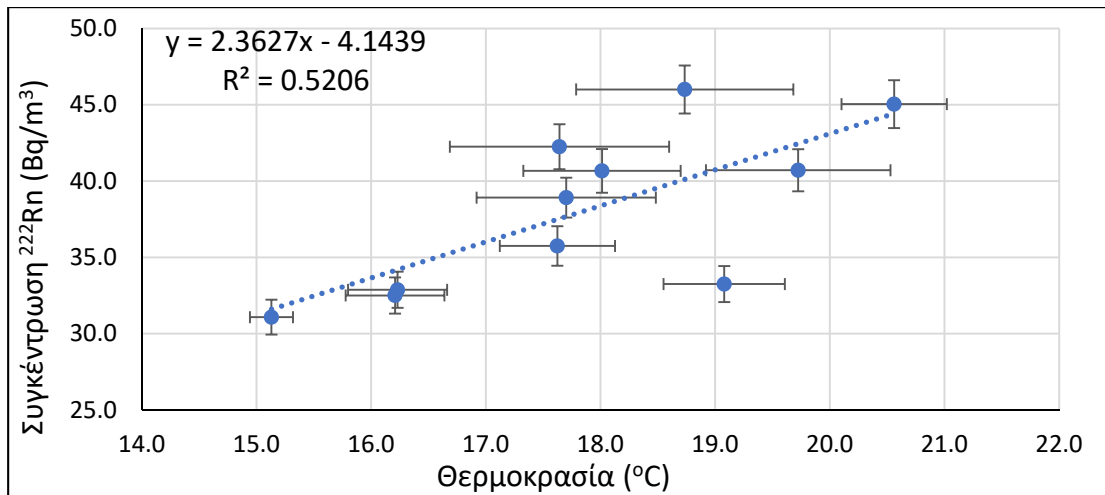
Σχήμα Δ.10 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη θερμοκρασία ($^{\circ}C$) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.



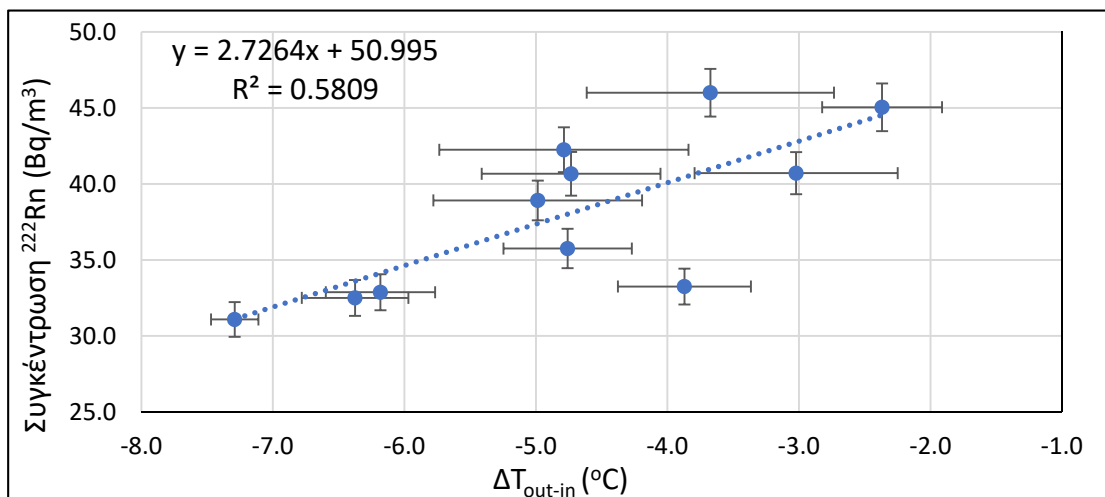
Σχήμα Δ.11 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.



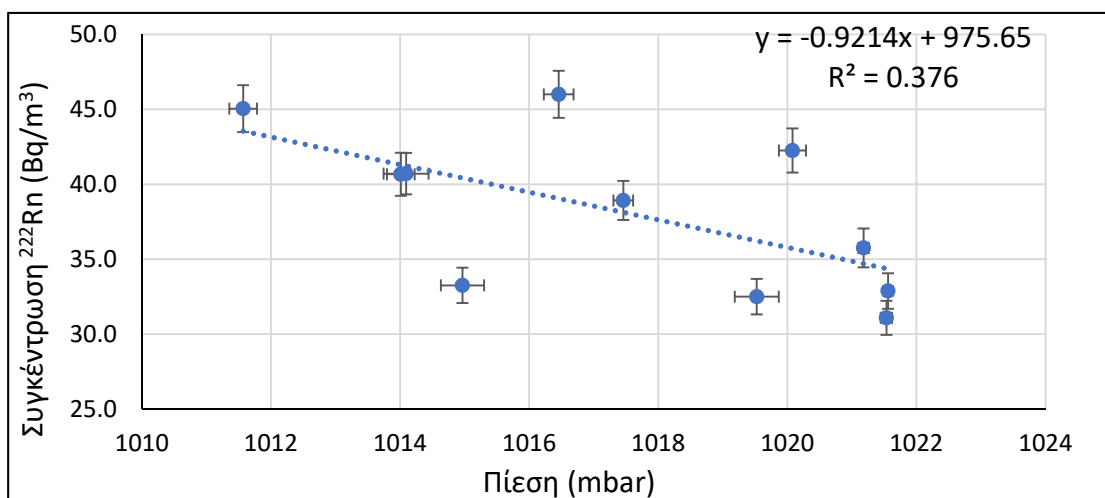
Σχήμα Δ.12 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 13/10/2020-25/10/2020.



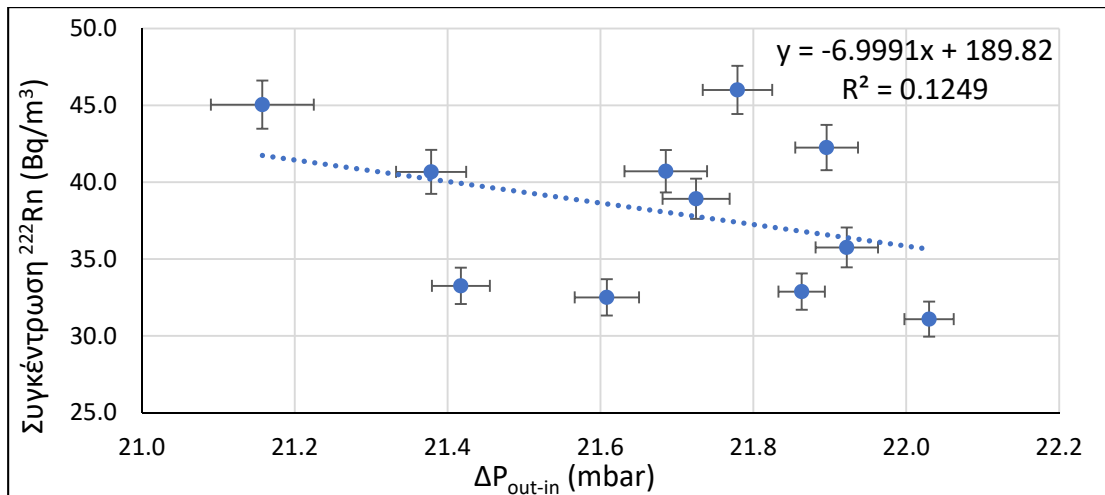
Σχήμα Δ.13: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας.



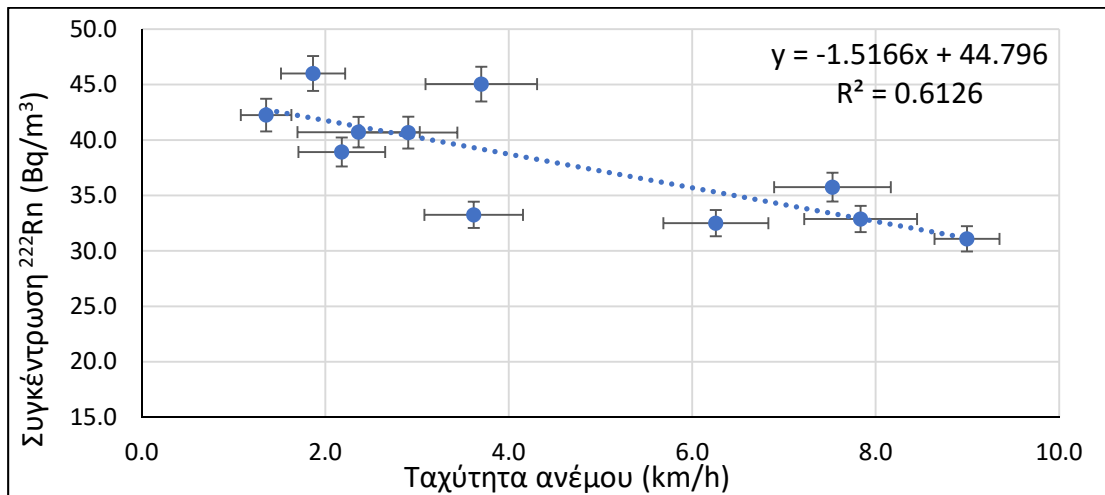
Σχήμα Δ.14: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία (ΔT_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα Δ.15: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής βαρομετρικής πίεσης για τη χρονική περίοδο της 2^{ης} δειγματοληψίας.



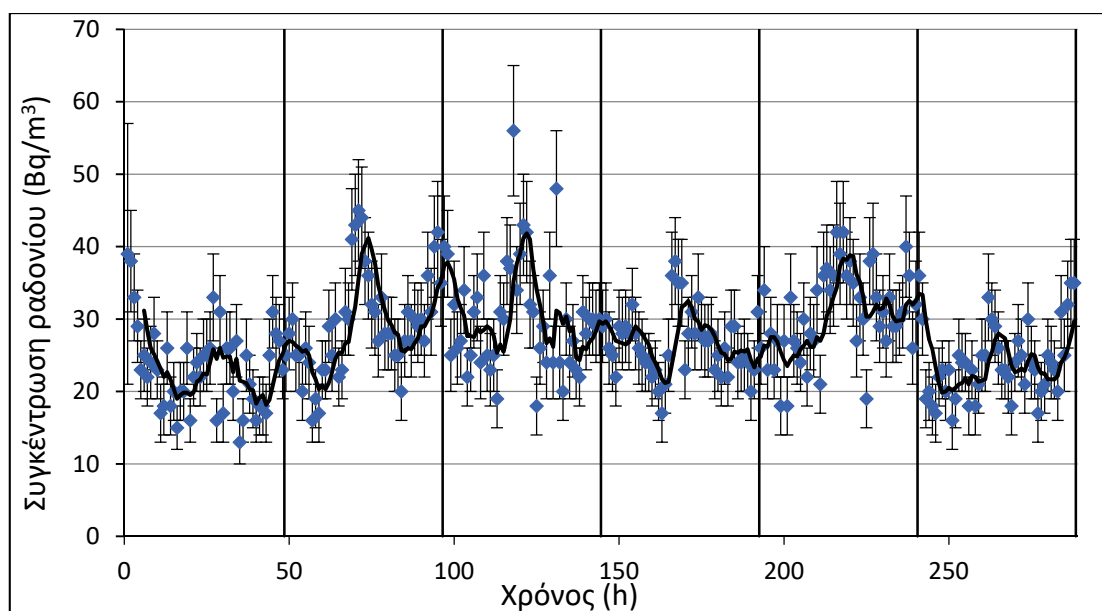
Σχήμα Δ.16: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση (ΔP_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 2^{15} δειγματοληψίας.



Σχήμα Δ.17: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου για τη χρονική περίοδο της 2^{15} δειγματοληψίας.

Δ.2 3^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Τα διαγράμματα και οι πίνακες που ακολουθούν αφορούν την 3^η δειγματοληψία μελέτης της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία έλαβε χώρα από τις 1/3/2021 έως και τις 13/3/2021 (με πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας να είναι από 2/3/2021 έως και 12/3/2021).



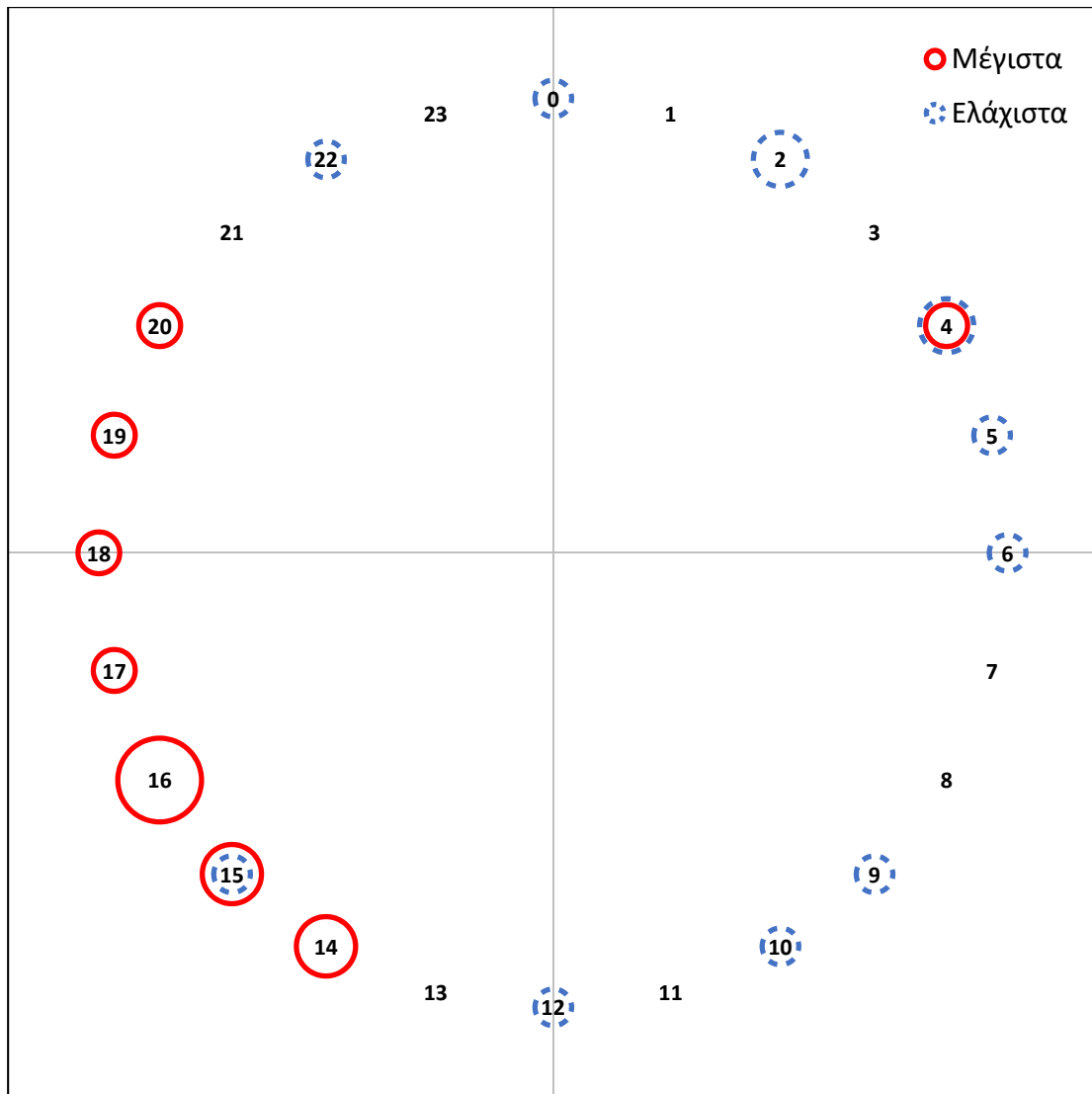
Σχήμα Δ.18 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας 1/3/2021-13/3/2021. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Δ.5: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών μεγίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για την 3^η δειγματοληψία 1/3/2021-13/3/2021.

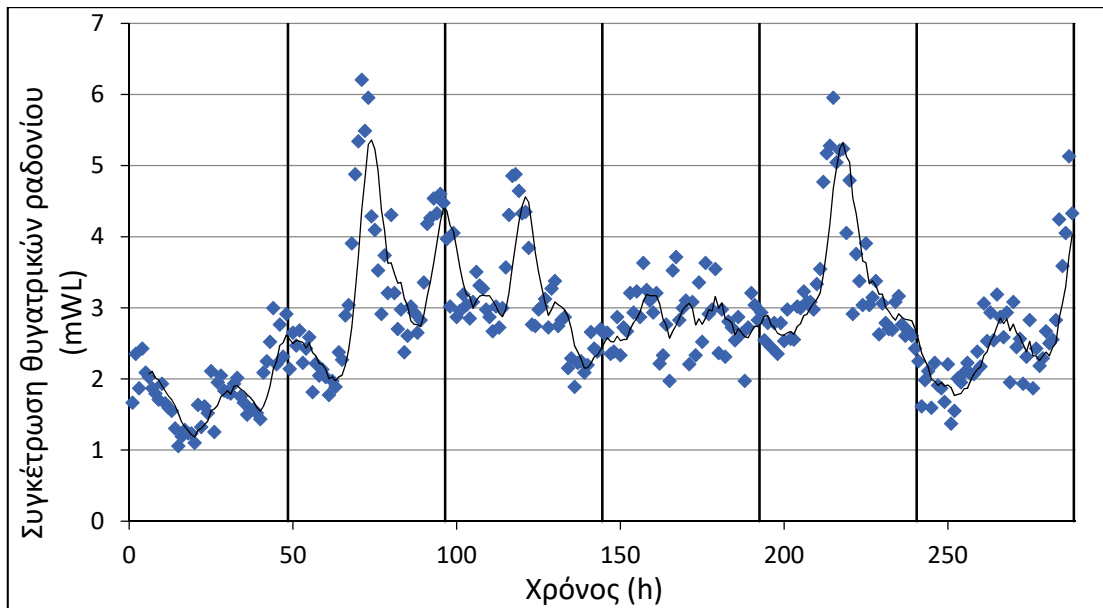
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
1/3/2021	18:00	39 ± 18	1001.2	37.0
2/3/2021	20:00	33 ± 6	1006.6	31.8
3/3/2021	14:00	31 ± 5	1005.3	31.3
4/3/2021	16:00	45 ± 7	998.8	30.8
5/3/2021	16:00	42 ± 7	995.1	32.8
6/3/2021	15:00	56 ± 9	996.7	37.5
7/3/2021	04:00	48 ± 8	1000.2	37.5
8/3/2021	16:00	38 ± 6	992.7	39.8
9/3/2021	19:00	34 ± 6	991.1	41.3
10/3/2021	17:00	42 ± 7	987.0	36.5
11/3/2021	14:00	40 ± 7	992.4	38.0
12/3/2021	15:00	33 ± 6	996.9	33.3
13/3/2021	16:00	35 ± 6	993.7	38.8

Πίνακας Δ.6: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για την 3^η δειγματοληψία 1/3/2021-13/3/2021.

Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
2/3/2021	9:00	15 ± 3	1007.4	32.3
3/3/2021	4:00	13 ± 3	1005.0	31.3
4/3/2021	2:00	16 ± 3	1004.4	29.6
5/3/2021	5:00	20 ± 4	996.4	32.3
6/3/2021	10:00	19 ± 4	997.9	37.5
6/3/2021	22:00	18 ± 4	999.1	39.3
8/3/2021	12:00	17 ± 4	995.9	38.8
9/3/2021	15:00	20 ± 4	991.3	41.3
10/3/2021	0:00	18 ± 4	991.3	37.0
11/3/2021	2:00	19 ± 4	987.0	41.8
12/3/2021	4:00	16 ± 4	999.7	34.5
13/3/2021	6:00	17 ± 4	994.4	37.5



Σχήμα Δ.19 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.



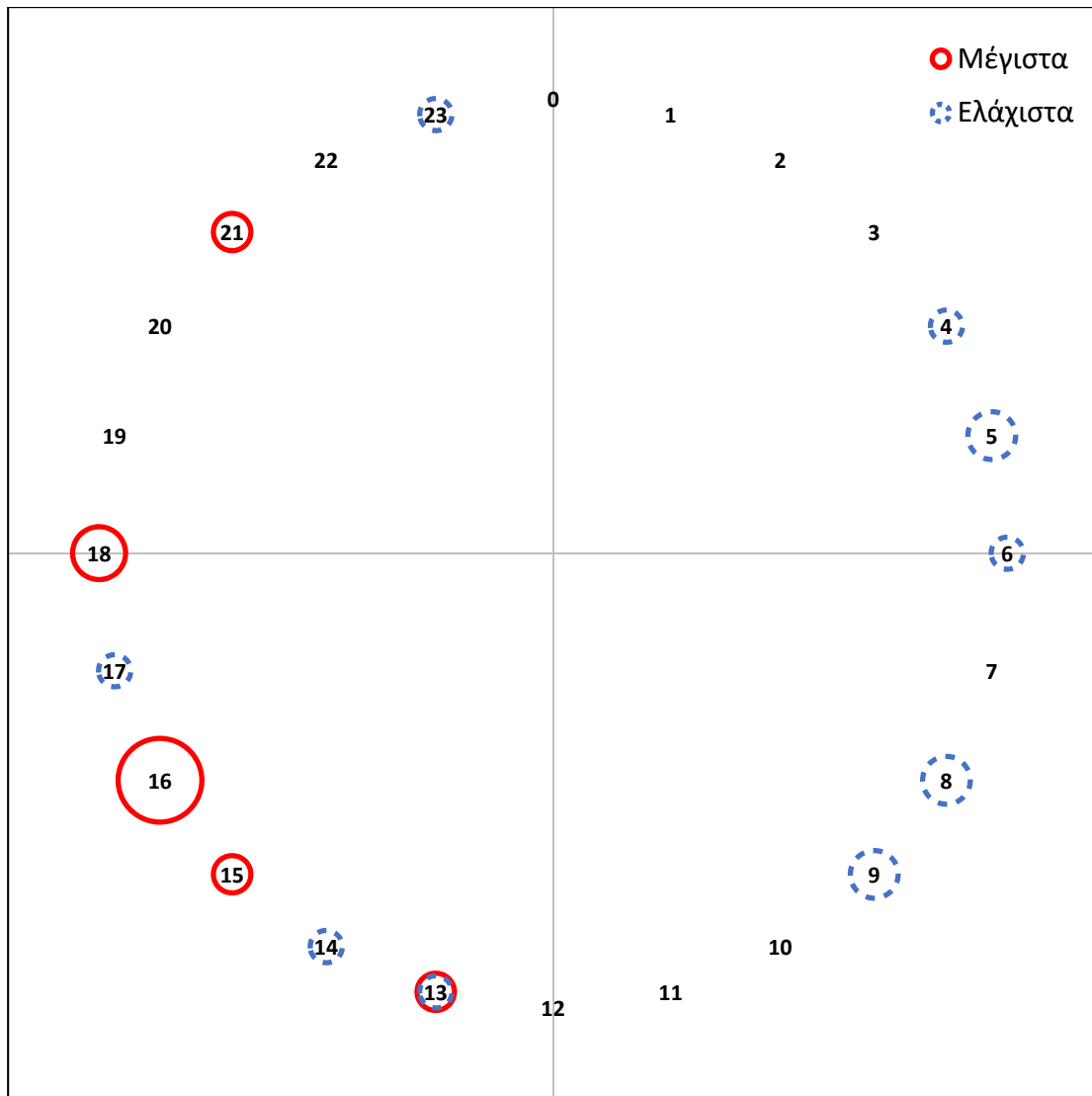
Σχήμα Δ.20 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας 1/3/2021-13/3/2021. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Δ.7: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών μεγίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για την 3^η δειγματοληψία 1/3/2021-13/3/2021.

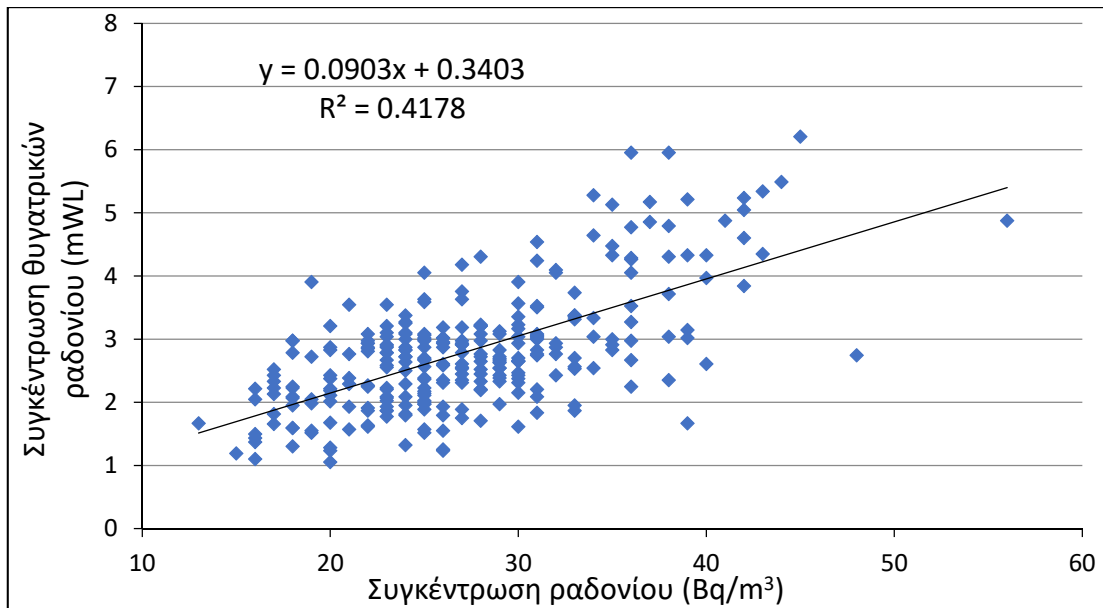
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
1/3/2021	21:00	2.428	1002.9	36.0
2/3/2021	18:00	2.111	1006.4	31.9
3/3/2021	13:00	2.998	1006.2	32.3
4/3/2021	16:00	6.208	998.8	30.8
5/3/2021	16:00	4.603	995.1	32.8
6/3/2021	15:00	4.878	996.7	37.5
8/3/2021	16:00	3.716	992.7	39.8
10/3/2021	16:00	5.954	987.2	36.5
12/3/2021	18:00	3.188	996.1	35.0
13/3/2021	16:00	5.131	993.7	38.8

Πίνακας Α.8: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για την 3^η δειγματοληψία 1/3/2021-13/3/2021.

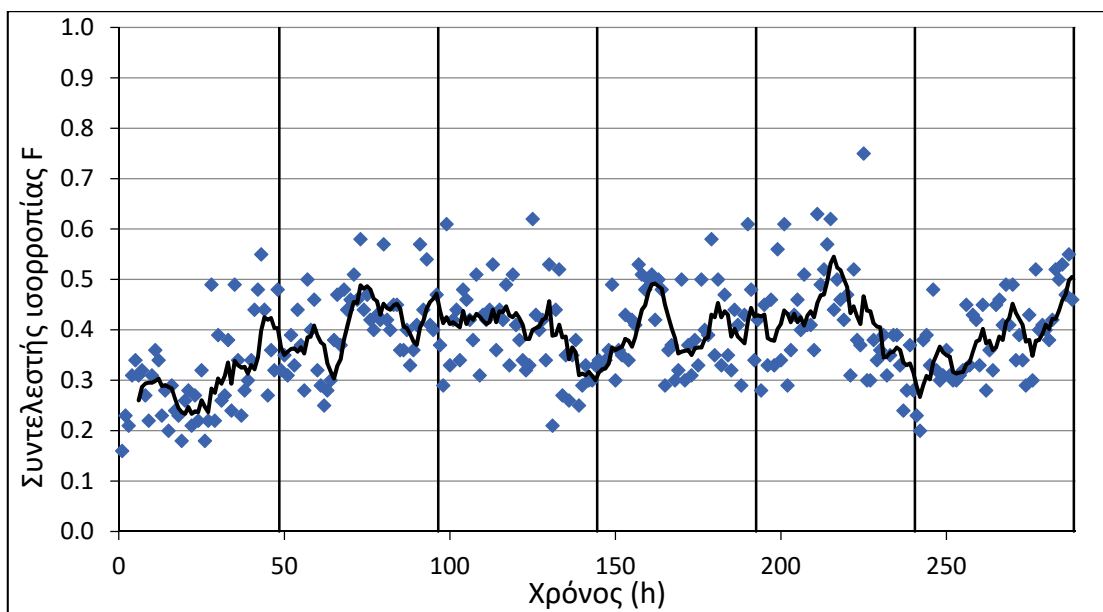
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
2/3/2021	8:00	1.056	1007.0	33.3
3/3/2021	9:00	1.436	1005.8	31.8
4/3/2021	6:00	1.774	1003.1	28.8
5/3/2021	5:00	2.375	996.4	32.3
6/3/2021	8:00	2.671	996.6	37.0
7/3/2021	9:00	1.890	1002.0	37.5
8/3/2021	14:00	1.974	994.0	39.3
9/3/2021	13:00	1.974	992.4	41.8
9/3/2021	23:00	2.354	991.5	37.0
11/3/2021	17:00	2.428	995.2	36.5
12/3/2021	4:00	1.372	999.7	34.5
13/3/2021	5:00	1.869	994.3	37.8



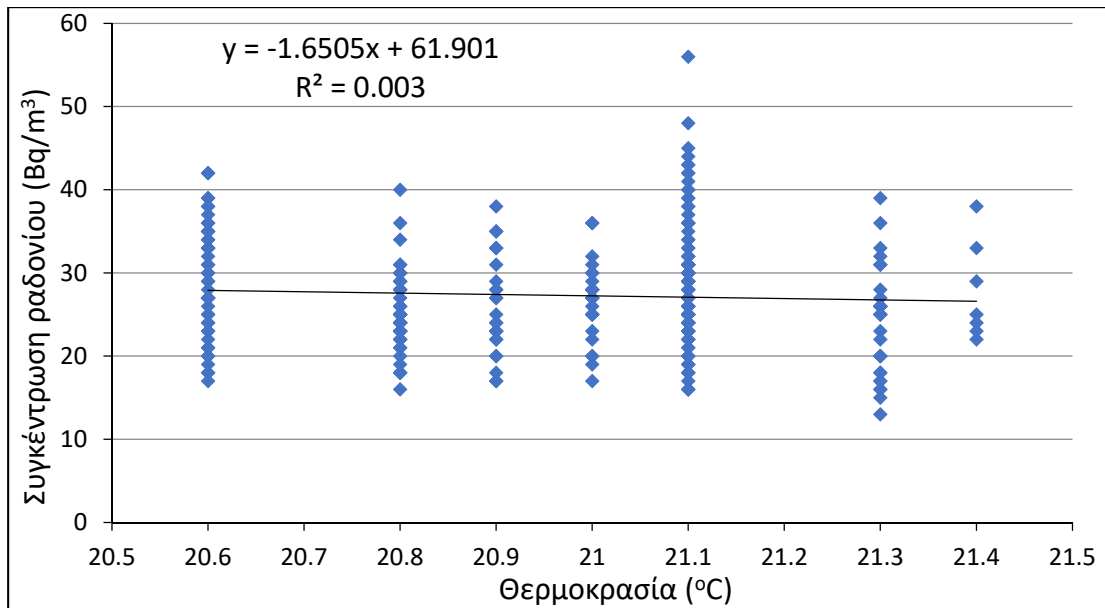
Σχήμα Δ.21 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.



Σχήμα Δ.22 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη συγκέντρωση του ραδονίου (Bq/m^3) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.

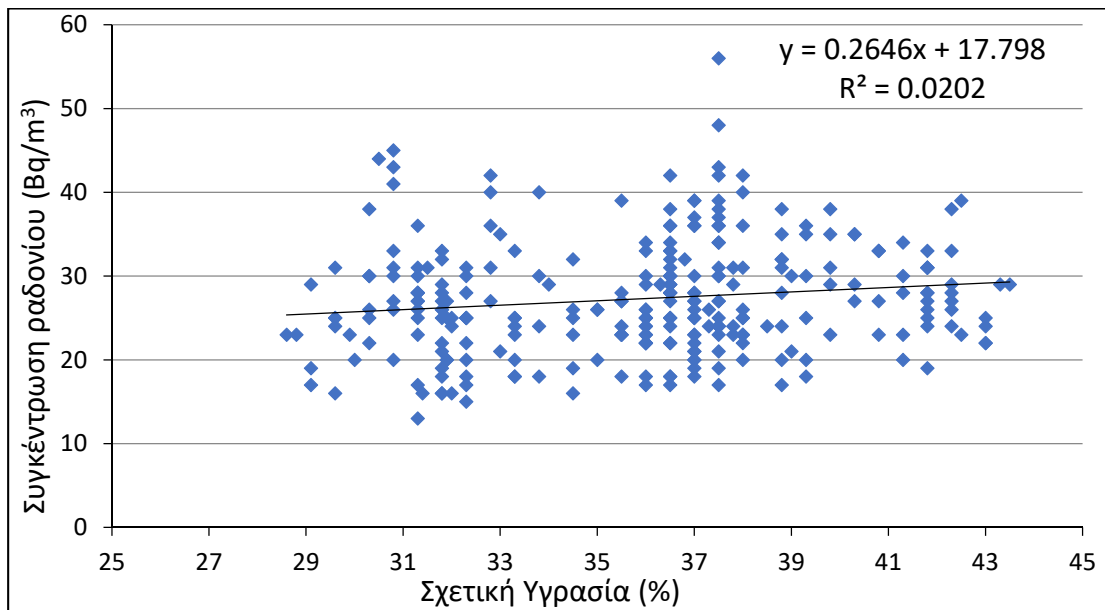


Σχήμα Δ.23 : Κύμανση του συντελεστή ισορροπίας F μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.



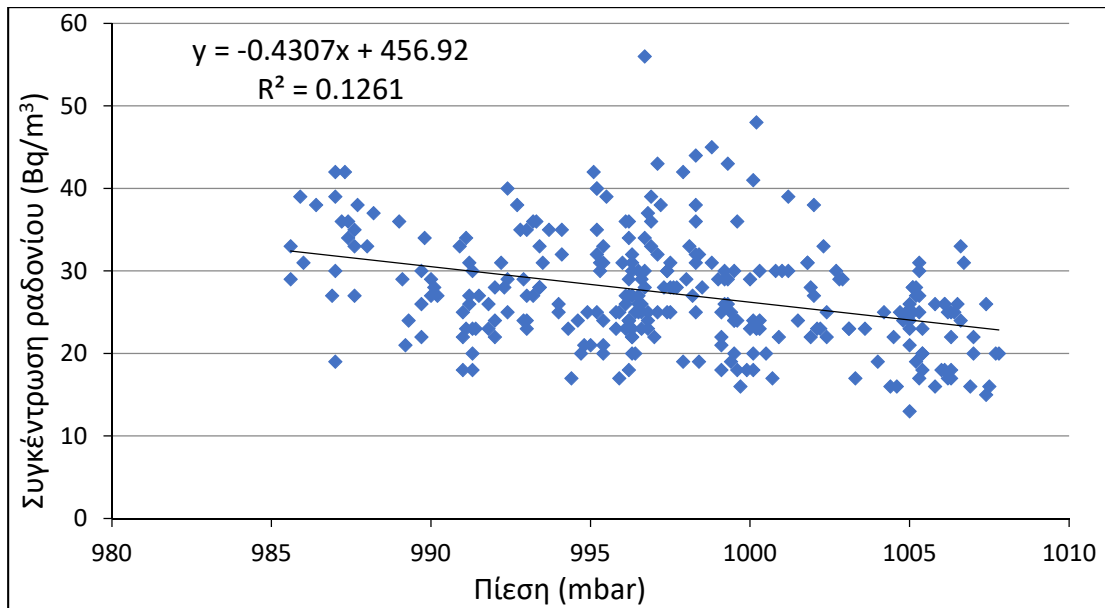
Σχήμα Δ.24 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ -φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.18.)



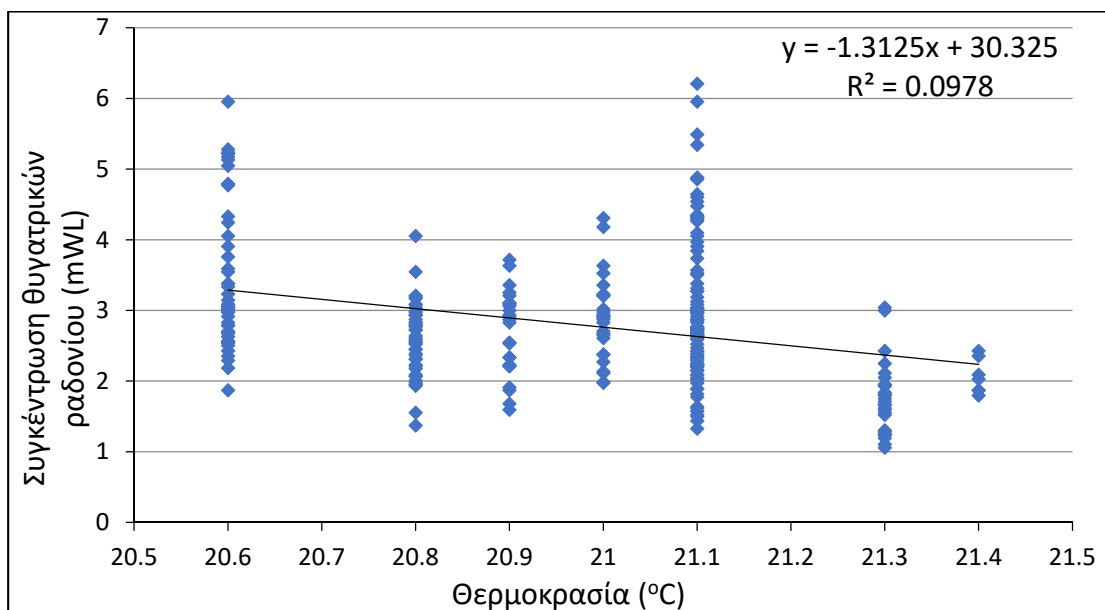
Σχήμα Δ.25 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ -φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.18.)

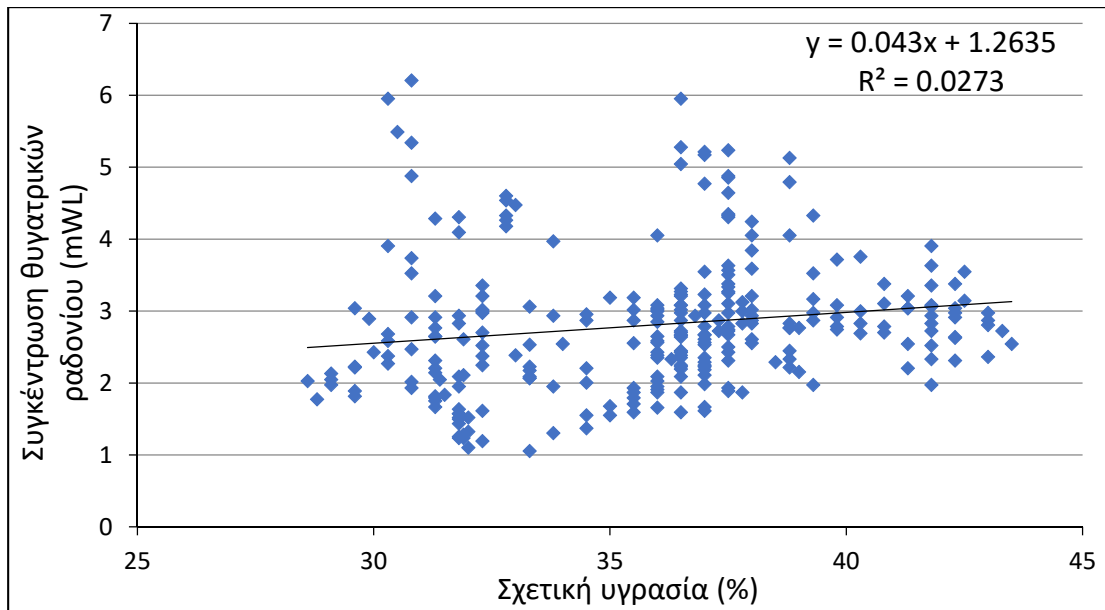


Σχήμα Δ.26 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m³) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.

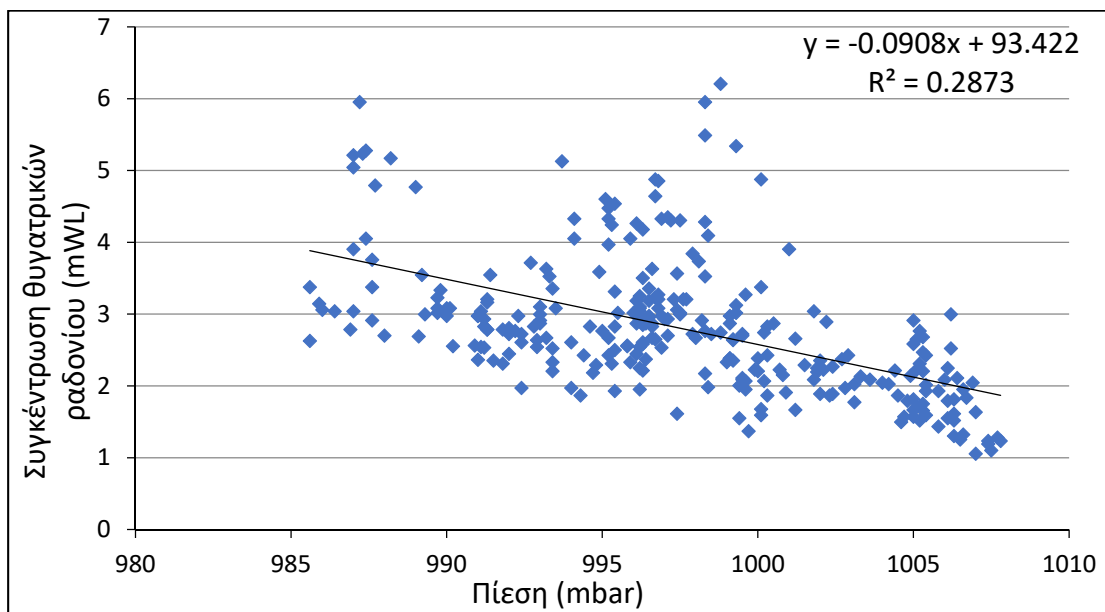
*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.18.)



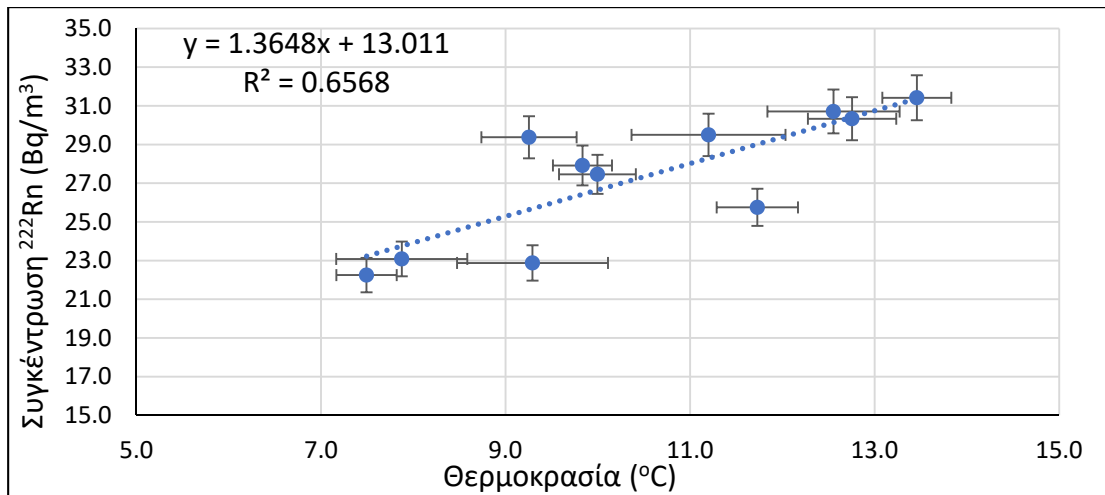
Σχήμα Δ.27 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη θερμοκρασία (°C) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.



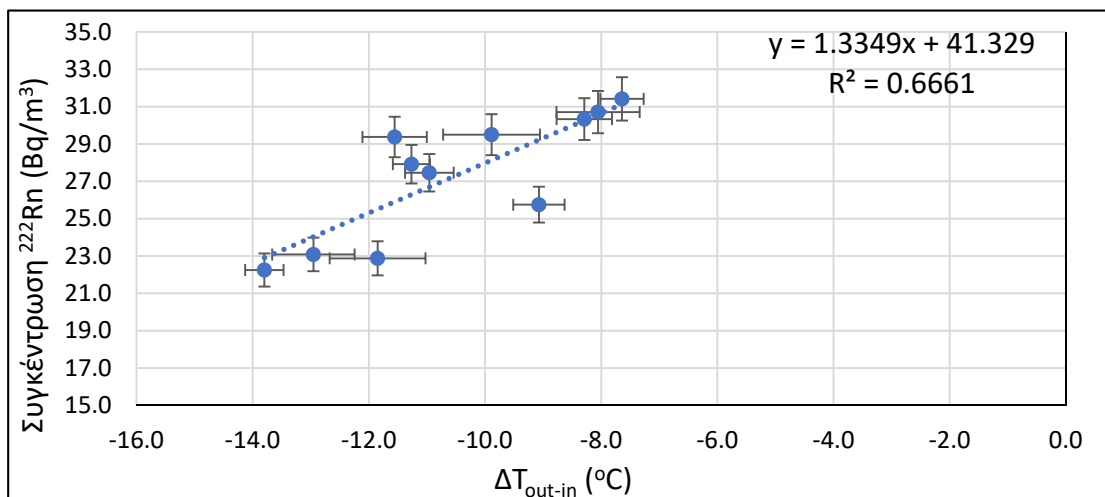
Σχήμα Δ.28 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.



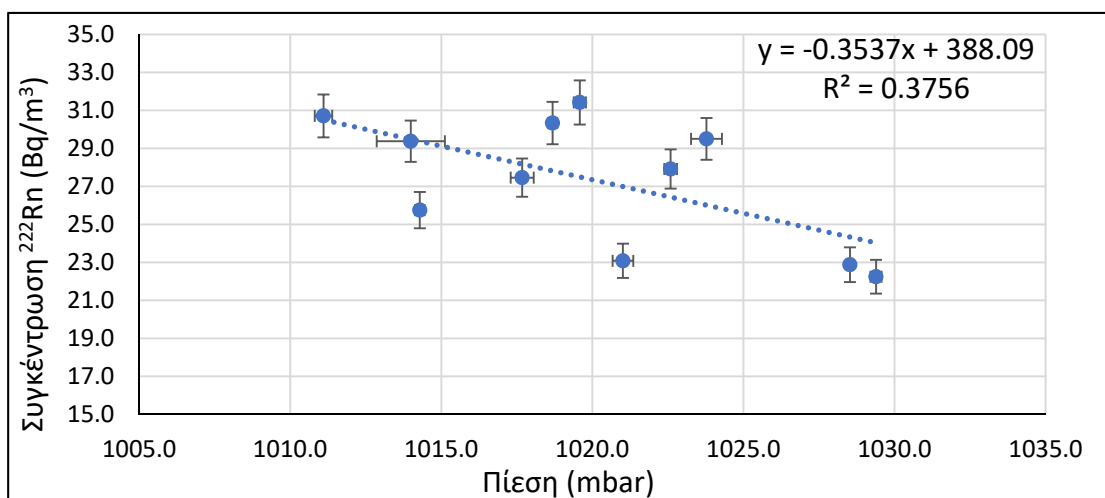
Σχήμα Δ.29 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 1/3/2021-13/3/2021.



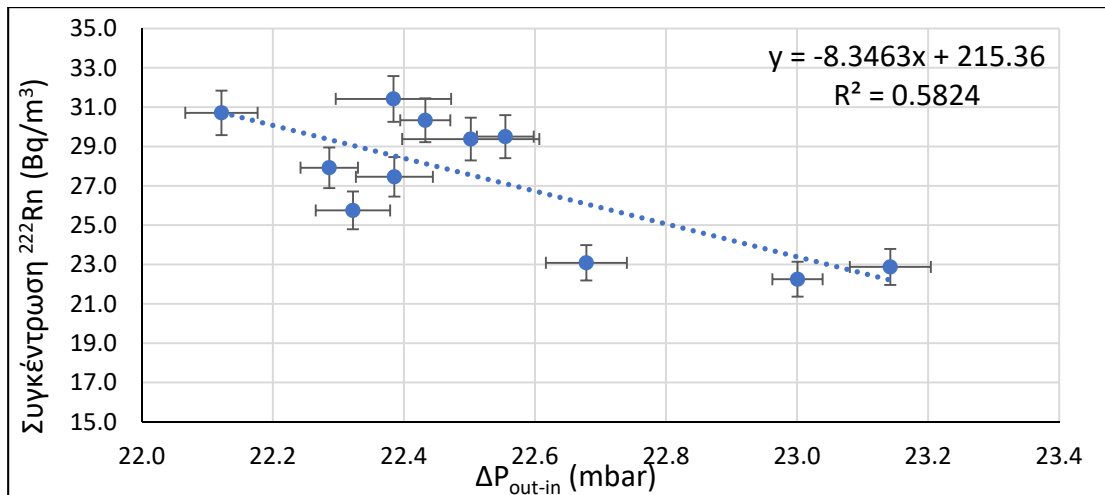
Σχήμα Δ.30: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



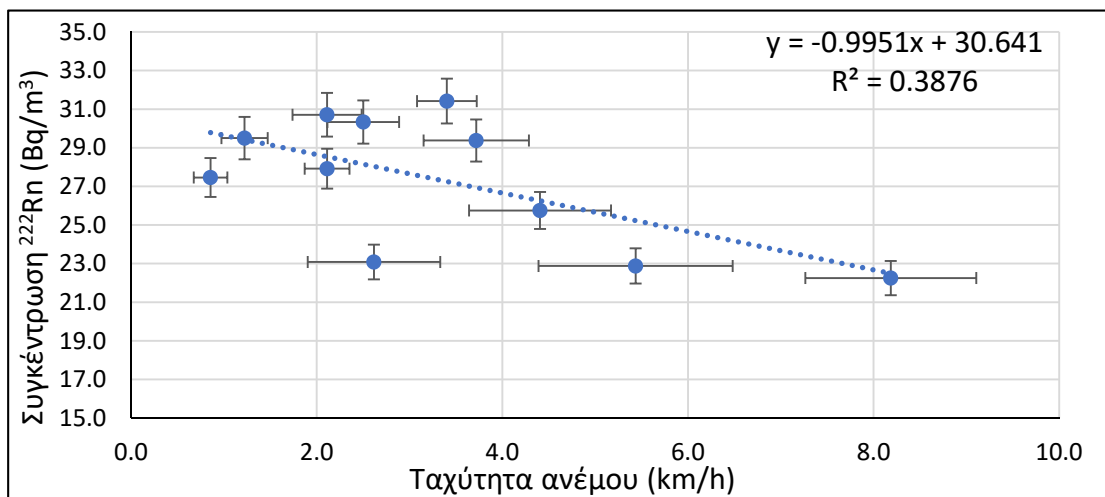
Σχήμα Δ.31: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία (ΔT_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα Δ.32: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής βαρομετρικής πίεσης για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



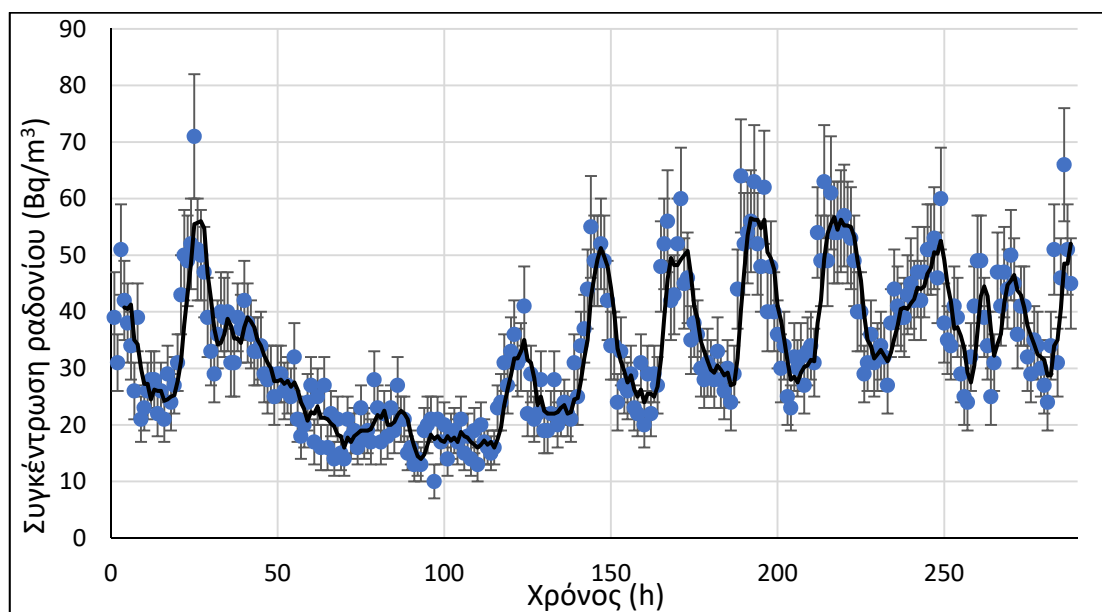
Σχήμα Δ.33: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση ($\Delta P_{\text{out-in}}$) για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα Δ.34: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου για τη χρονική περίοδο της 3^{ης} δειγματοληψίας.

Δ.3 4^η Δειγματοληψία διερεύνησης κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Τα διαγράμματα και οι πίνακες που ακολουθούν αφορούν την 4^η δειγματοληψία μελέτης της κύμανσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία έλαβε χώρα από τις 15/4/2022 έως και τις 27/4/2022 (με πλήρεις ημέρες δειγματοληψίας να είναι από 16/4/2022 έως και 26/4/2022).



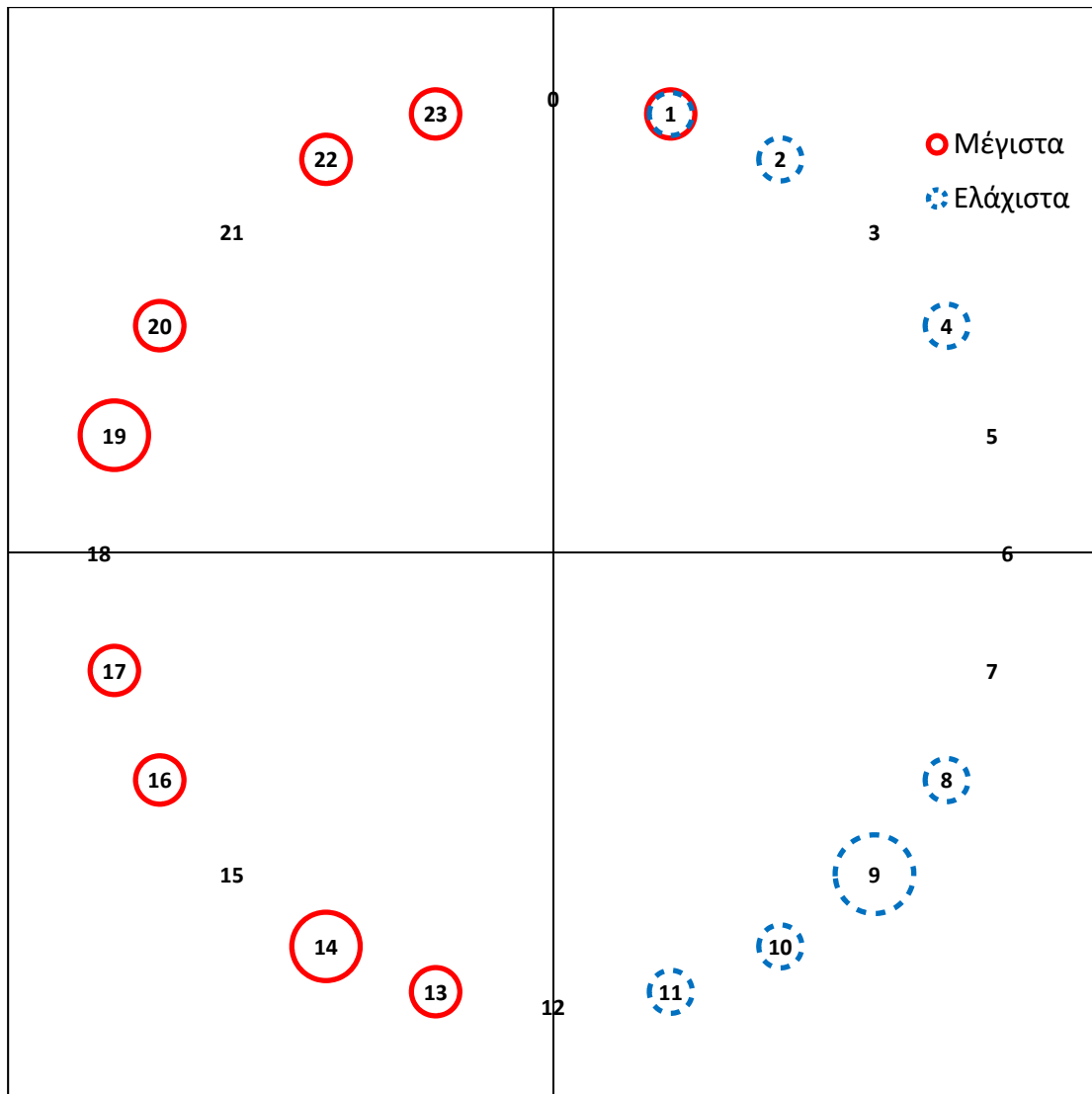
Σχήμα Δ.35 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m³) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας 15/4/2022-27/4/2022. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Δ.9: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών μεγίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για την 4^η δειγματοληψία 15/4/2022-27/4/2022.

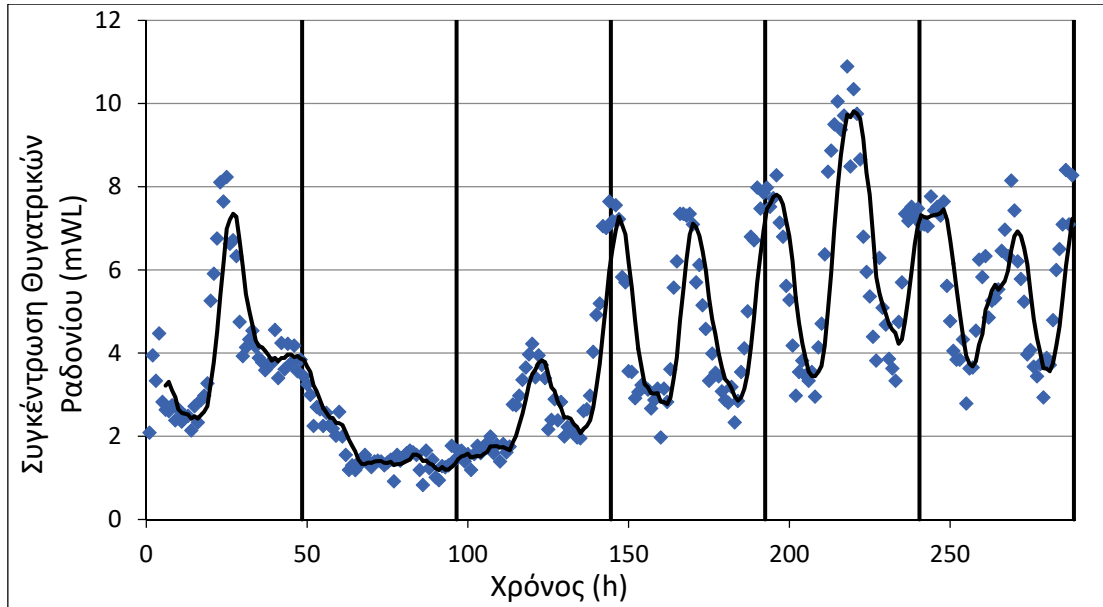
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
15/4/2022	19:00	51 ± 8	993.8	34.5
16/4/2022	17:00	71 ± 11	989	34.3
18/4/2022	23:00	28 ± 5	986.9	38
20/4/2022	20:00	41 ± 7	992.1	37.5
21/4/2022	16:00	55 ± 9	993.5	39.3
22/4/2022	19:00	60 ± 9	988.9	40.8
23/4/2022	13:00	64 ± 10	987.1	43
24/4/2022	14:00	63 ± 10	988.5	44
26/4/2022	01:00	60 ± 9	989.1	43.5
26/4/2022	22:00	50 ± 8	990.4	42.3
27/4/2022	14:00	66 ± 10	991.3	41.3

Πίνακας Δ.10: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης του ραδονίου για την 4^η δειγματοληψία 15/4/2022-27/4/2022.

Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn (Bq/m ³)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
16/4/2022	1:00	21 ± 4	993.7	35.5
18/4/2022	11:00	14 ± 3	985	39.8
21/4/2022	2:00	19 ± 4	993.5	38.8
22/4/2022	8:00	20 ± 4	992.6	42.3
23/4/2022	10:00	24 ± 5	987.1	43.5
24/4/2022	4:00	23 ± 4	988.1	45
25/4/2022	9:00	27 ± 5	988.1	45
26/4/2022	9:00	24 ± 5	989.1	39.8
27/4/2022	9:00	24 ± 5	991.4	40.3



Σχήμα Δ.36 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.



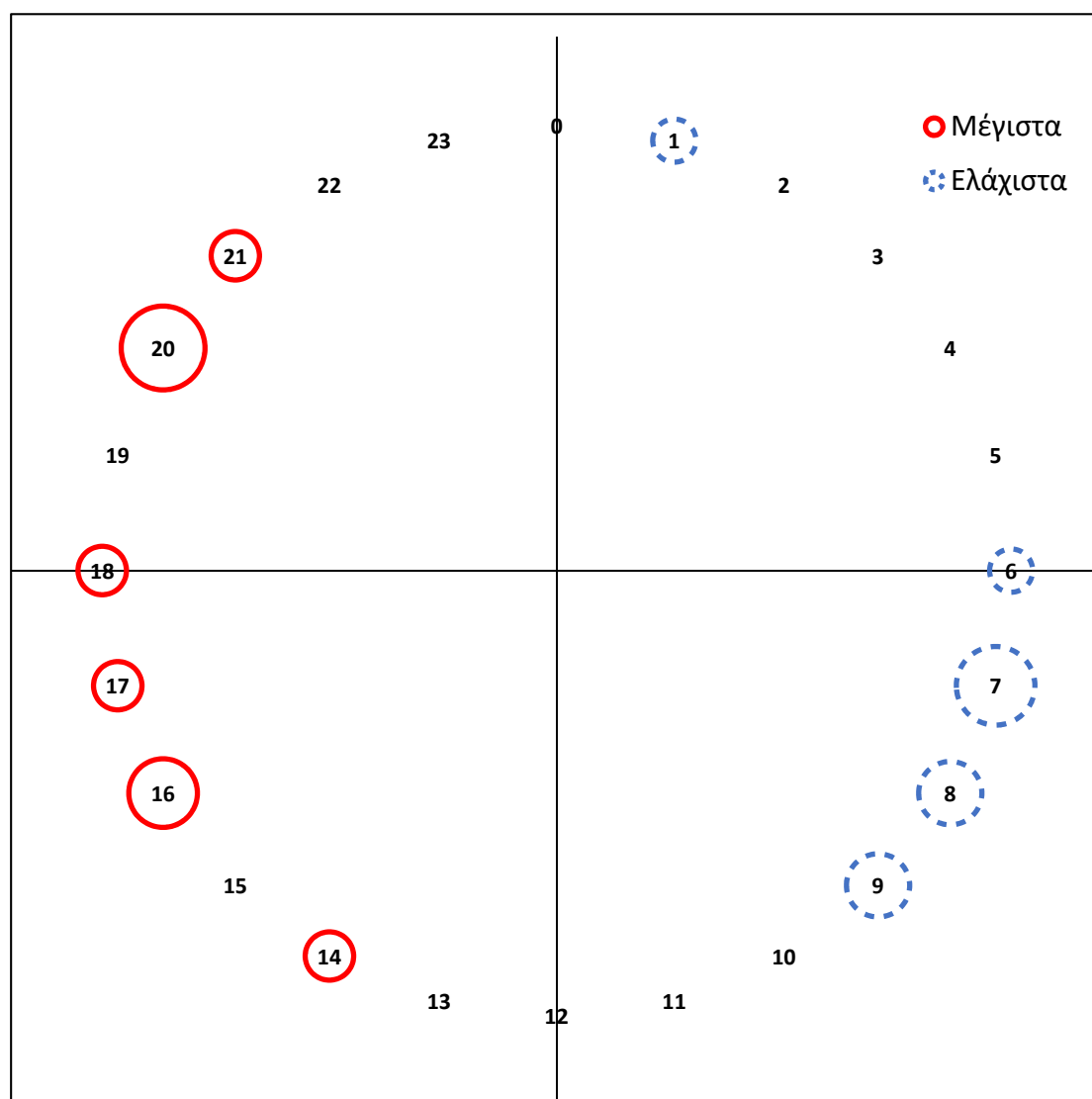
Σχήμα Δ.37 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας 15/4/2022-27/4/2022. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.

Πίνακας Δ.11: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών μεγίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για την 4^η δειγματοληψία 15/4/2022-27/4/2022.

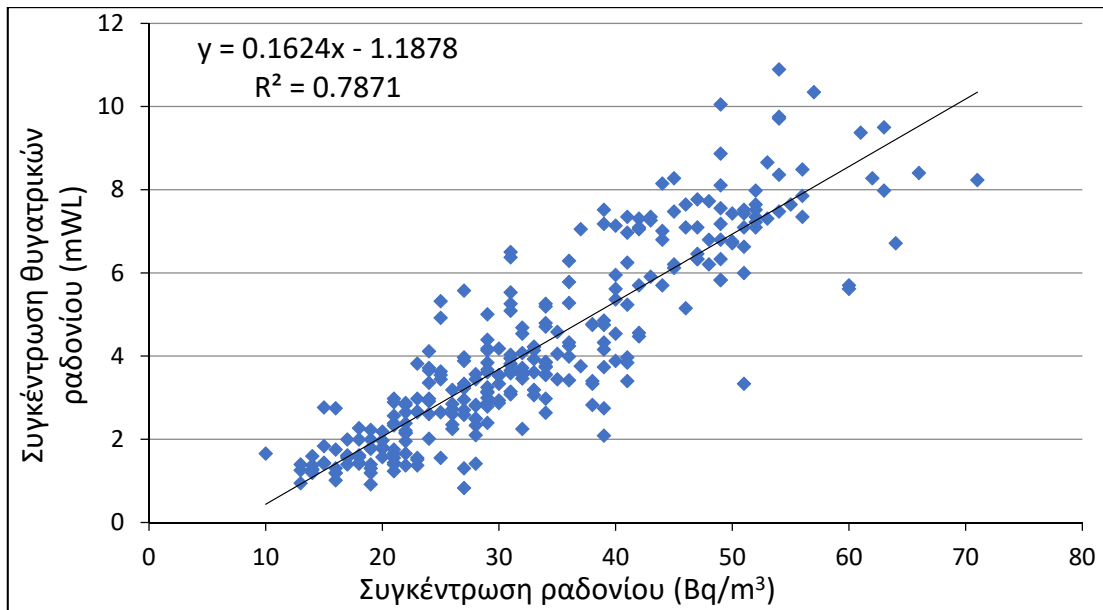
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
15/4/2022	20:00	4.476	994.8	33.8
16/4/2022	17:00	8.235	989	34.3
20/4/2022	16:00	4.223	992.6	37.5
22/4/2022	16:00	7.306	988.9	41.8
23/4/2022	20:00	8.277	986.9	42.3
24/4/2022	18:00	10.895	988	44.5
25/4/2022	20:00	7.770	988	44
26/4/2022	21:00	8.150	990	41.8
27/4/2022	14:00	8.404	991.3	41.3

Πίνακας Δ.12: Χρονικά σημεία εμφάνισης περιοδικών ελαχίστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου για την 4^η δειγματοληψία 15/4/2022-27/4/2022.

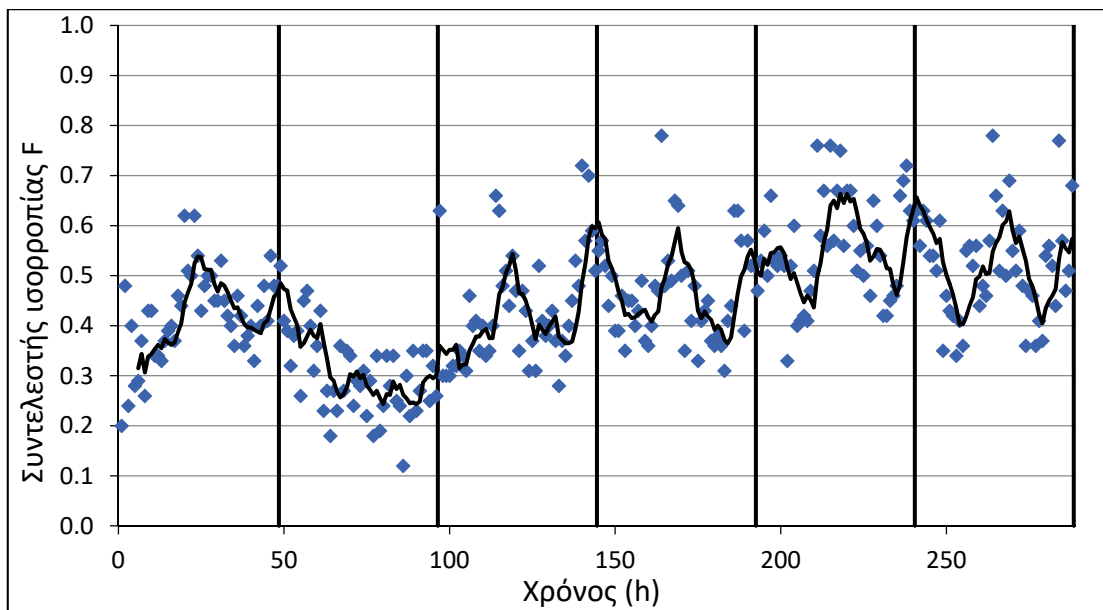
Ημερομηνία Μέτρησης	Ωρα Μέτρησης (24h)	Rn progenies (mWL)	Ατμοσφαιρική Πίεση (mbar)	Σχετική Υγρασία (%)
16/4/2022	6:00	2.143	991.9	32.8
17/4/2022	9:00	3.399	983.3	33.8
21/4/2022	7:00	1.953	993.2	38.3
22/4/2022	8:00	1.974	992.6	42.3
23/4/2022	7:00	2.333	986.9	43
24/4/2022	8:00	2.956	988.8	45
25/4/2022	9:00	3.336	988.1	45
26/4/2022	7:00	2.787	988.5	39.8
26/4/2022	1:00	5.617	989.1	43.5



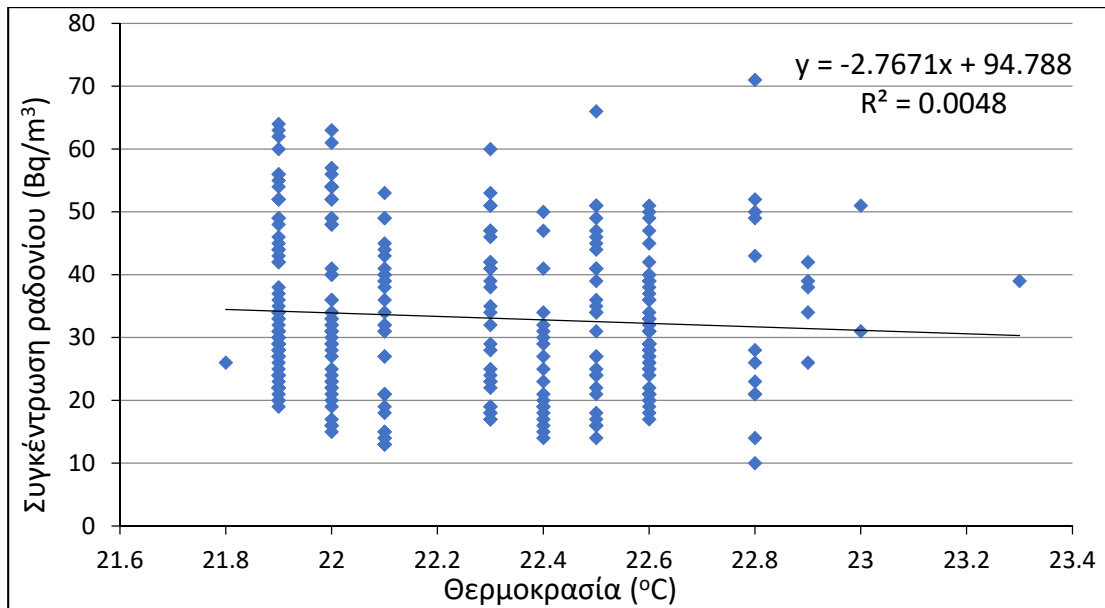
Σχήμα Δ.38 : Συχνότητα παρατηρήσιμων περιοδικών μέγιστων και ελάχιστων της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) μέσα στο 24ωρο στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.



Σχήμα Δ.39 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη συγκέντρωση του ραδονίου (Bq/m^3) στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.

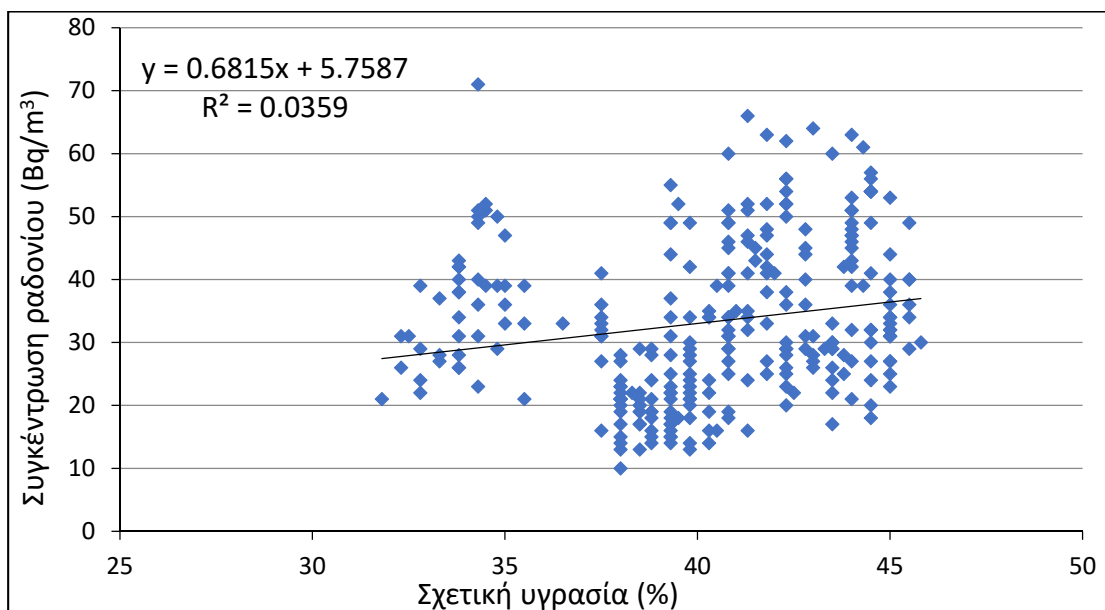


Σχήμα Δ.40 : Κύμανση του συντελεστή ισορροπίας F μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του στον χώρο του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022. Οι κάθετες γραμμές του διαγράμματος συμβολίζουν το πέρας ενός 48ωρου δειγματοληψίας.



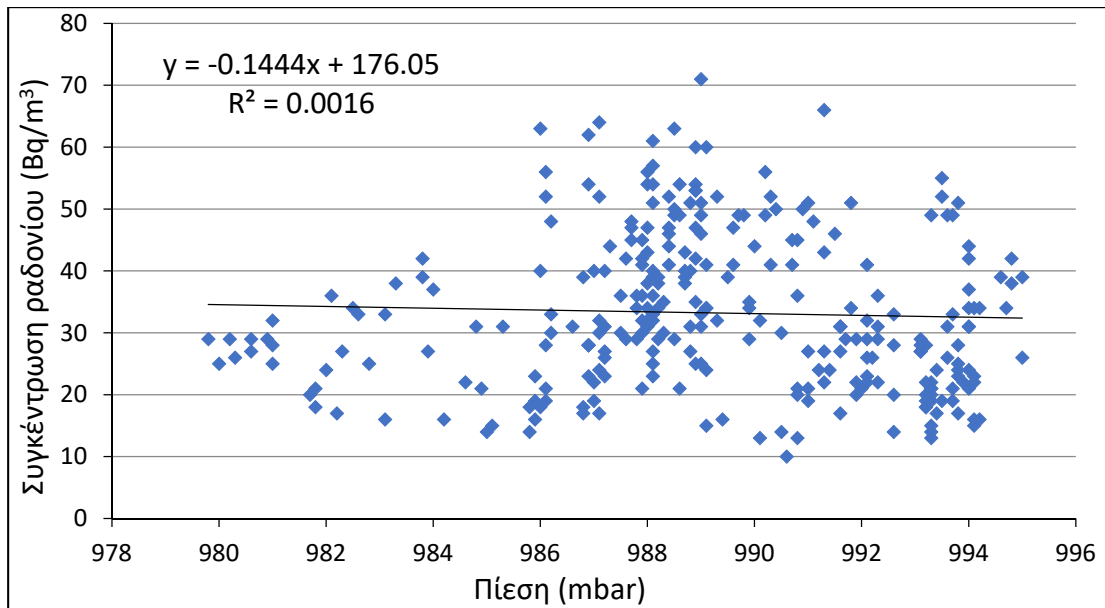
Σχήμα Δ.41 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.35.)



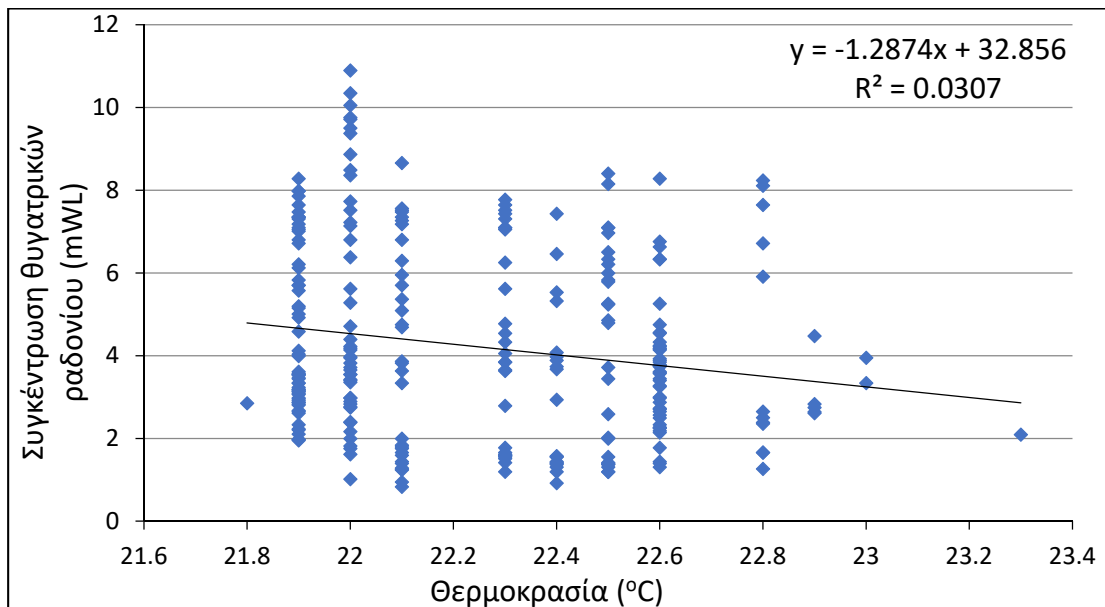
Σχήμα Δ.42 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.

*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.35.)

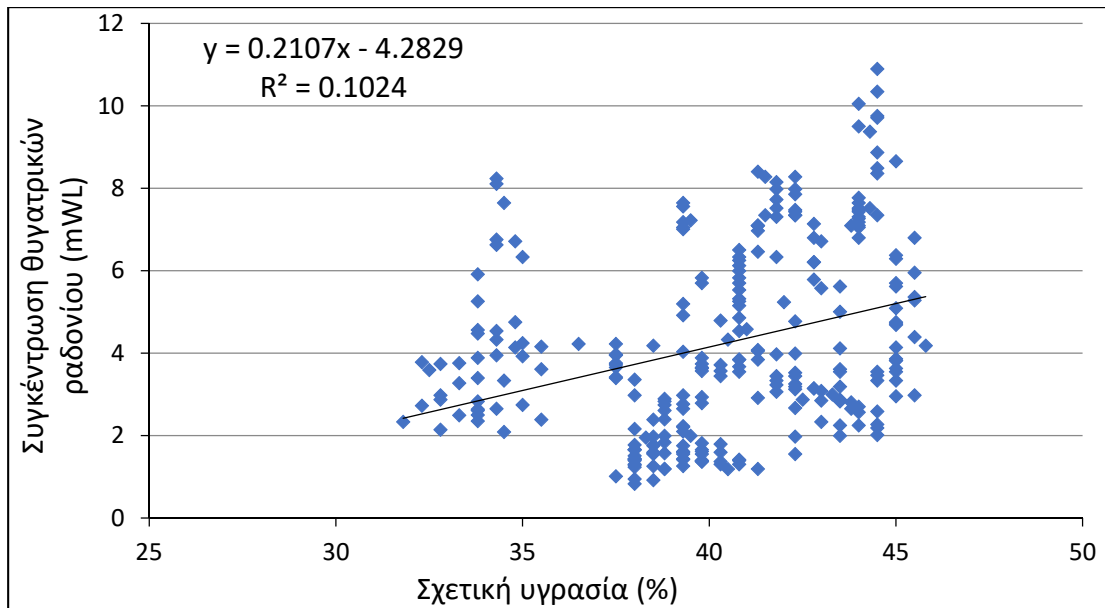


Σχήμα Δ.43 : Κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m^3) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.

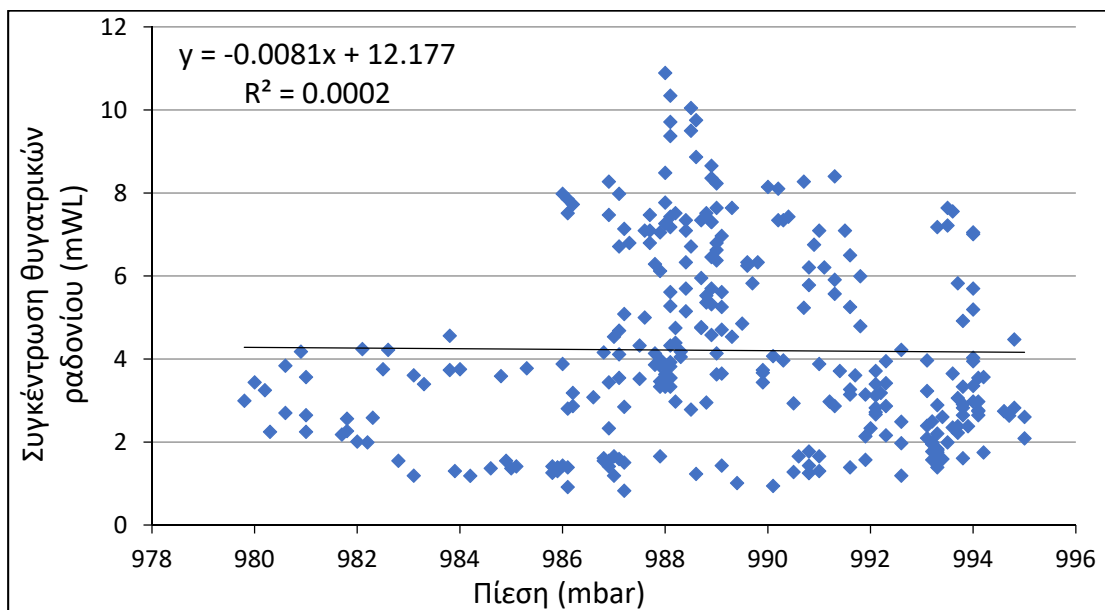
*(Οι αβεβαιότητες της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν περιλαμβάνονται για βελτίωση του τελικού οπτικού αποτελέσματος. Το σύνολο των δεδομένων των ωριαίων συγκεντρώσεων του ραδονίου με τις συνοδευόμενες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ δίνονται στο Σχήμα Δ.35.)



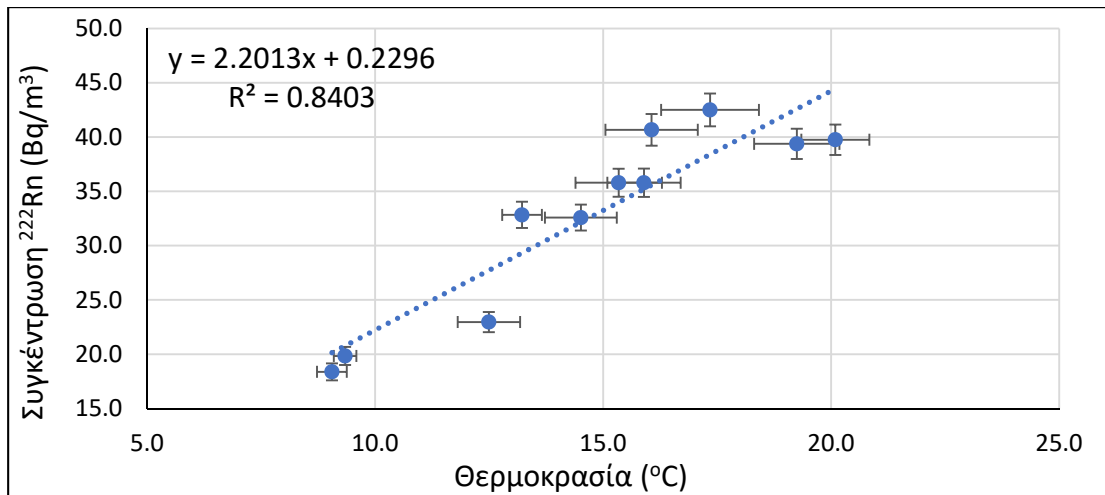
Σχήμα Δ.44 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη θερμοκρασία ($^{\circ}C$) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.



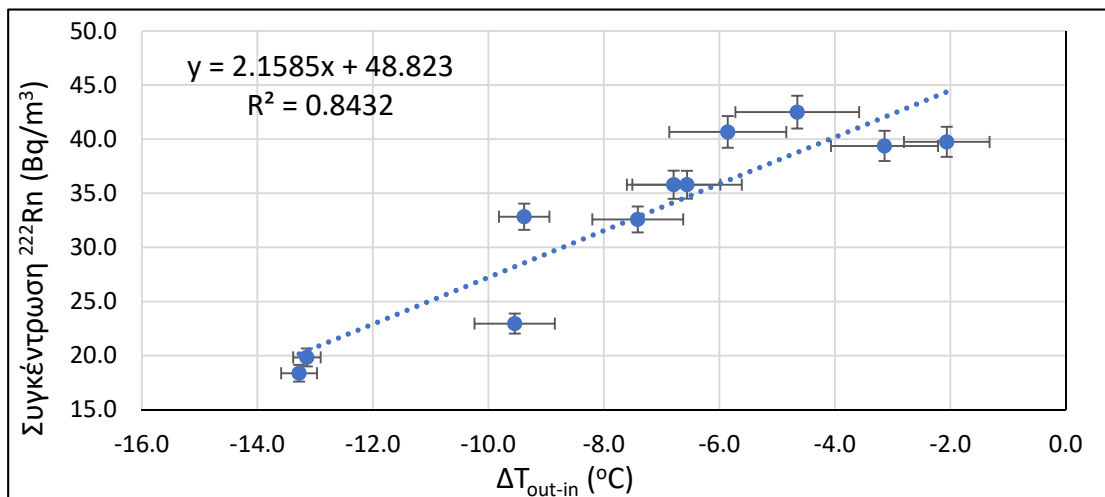
Σχήμα Δ.45 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς τη σχετική υγρασία (%) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.



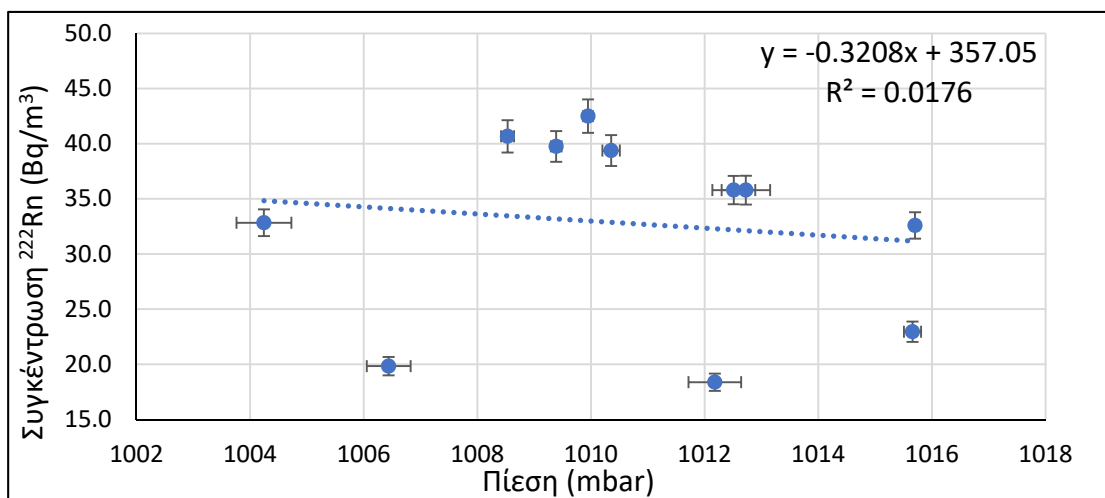
Σχήμα Δ.46 : Κύμανση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (mWL) ως προς την πίεση (mbar) στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ τη χρονική περίοδο 15/4/2022-27/4/2022.



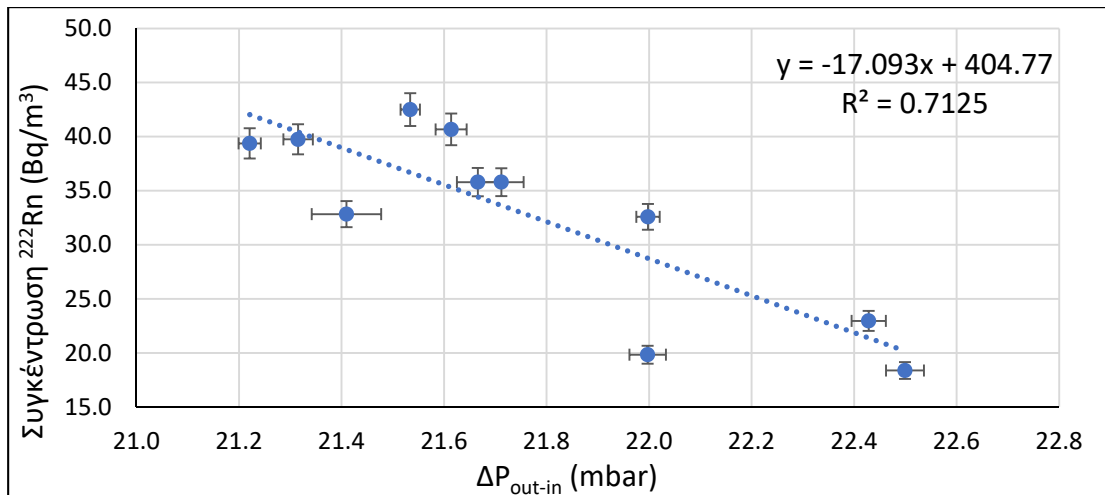
Σχήμα Δ.47: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



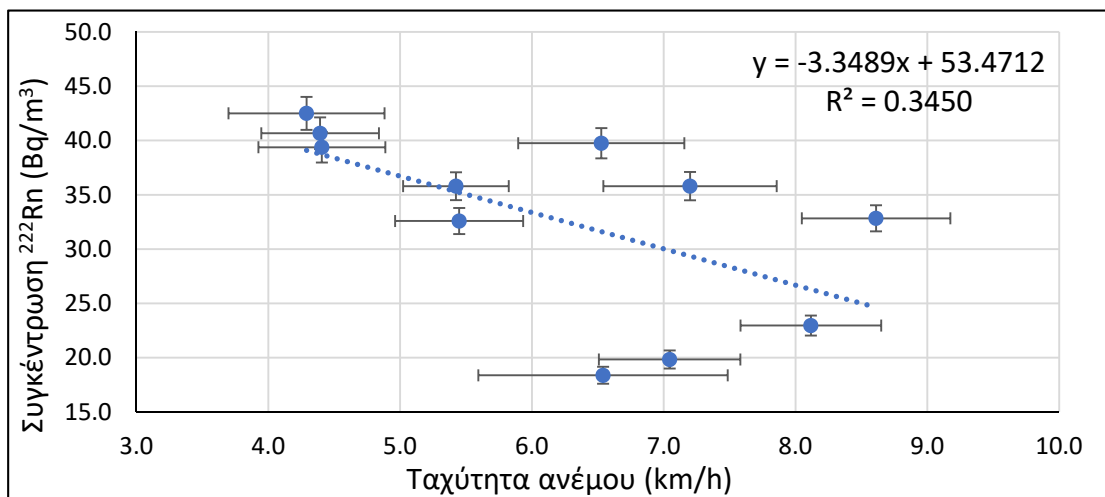
Σχήμα Δ.48: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική θερμοκρασία (ΔT_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα Δ.49: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της εξωτερικής βαρομετρικής πίεσης για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα 4.50: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της διαφοράς της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση (ΔP_{out-in}) για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.



Σχήμα 4.51: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του ραδονίου και της μέσης ημερήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου για τη χρονική περίοδο της 4^{ης} δειγματοληψίας.

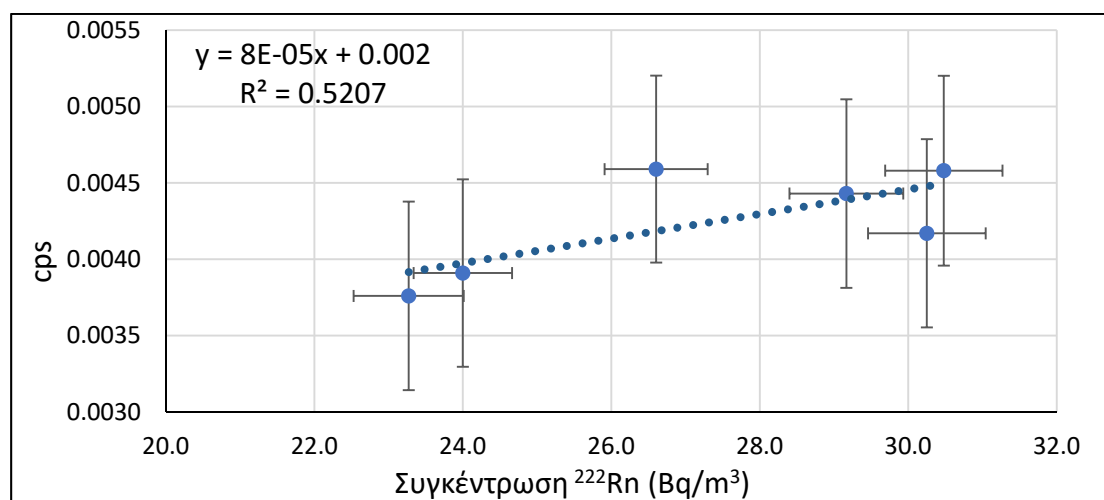
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Διαγράμματα ρυθμού κρούσεων φωτοκορυφής ^{214}Bi ανιχνευτών γερμανίου ως προς τη συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του

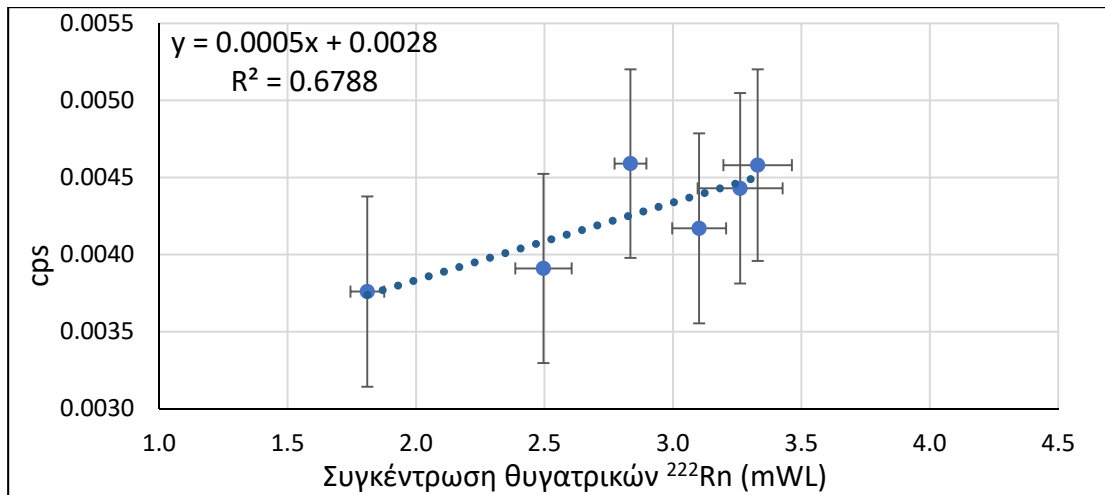
Στο Παράρτημα Ε παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης των τιμών του ρυθμού κρούσεων της φωτοκορυφής του ^{214}Bi (609.32 keV) στα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος των ανιχνευτών XtRa, XtCSS, LEGe, Ge1 και Ge2 με την κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Ε.1 $3^{\text{η}}$ Δειγματοληψία Διερεύνησης Κύμανσης του Ραδονίου και των Θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

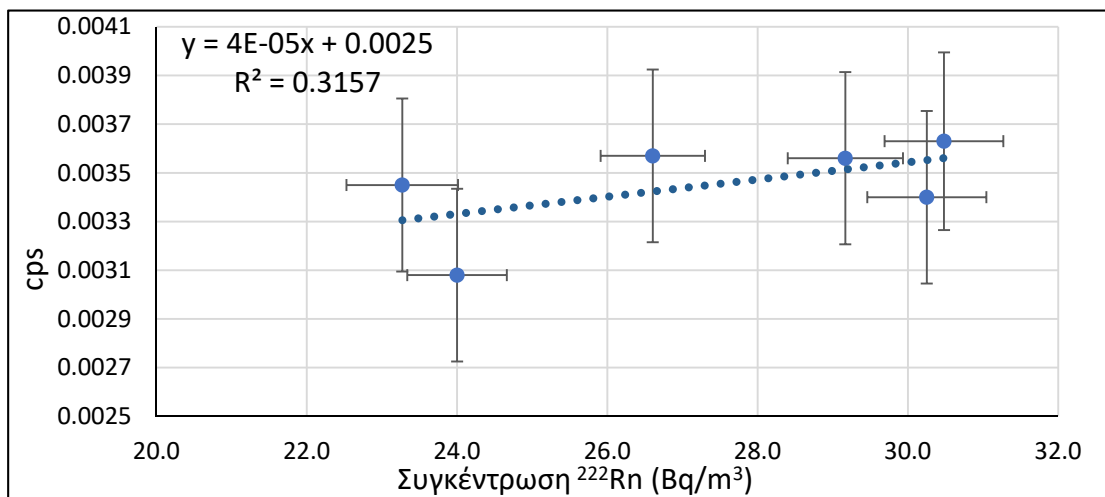
Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν τις συσχετίσεις μεταξύ των μέσω 48h τιμών της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τα 6 διαδοχικά φάσματα υποστρώματος διάρκειας 48h το κάθε ένα για κάθε έναν από τους ανιχνευτές XtRa, XtCSS, LEGe, Ge1 και Ge2.



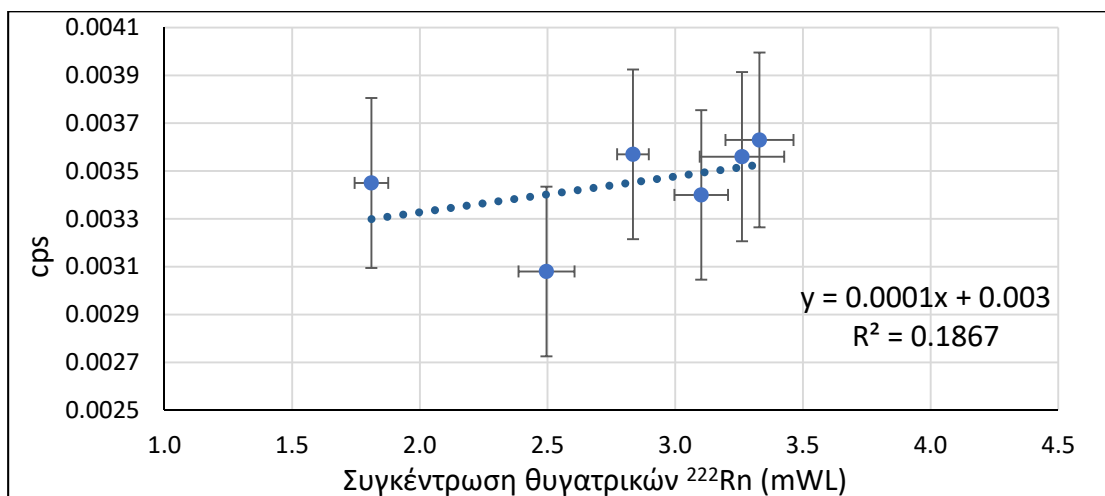
Σχήμα Ε.1: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την $3^{\text{η}}$ δειγματοληψία και τον ανιχνευτή XtRa.



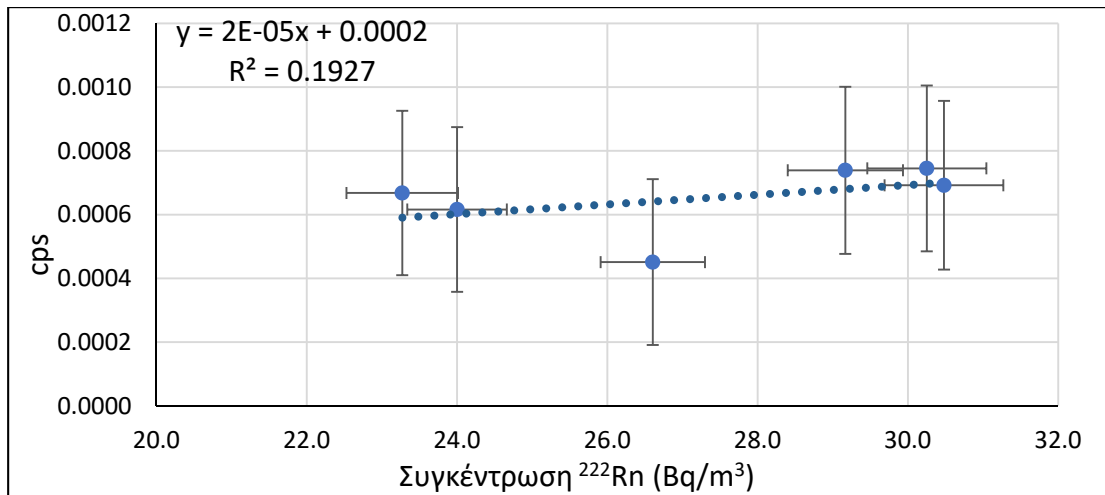
Σχήμα Ε.2: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή XtRa.



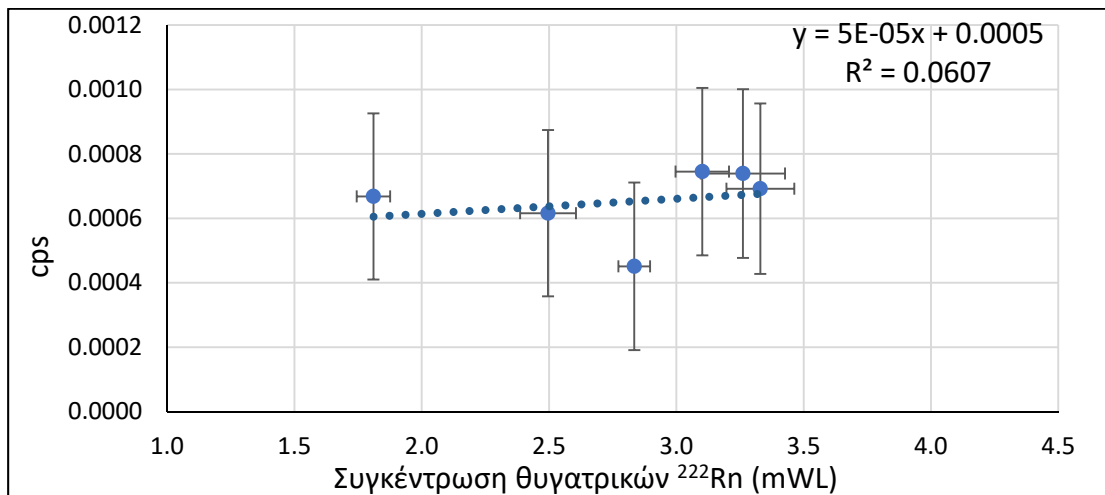
Σχήμα Ε.3: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή XtCSS.



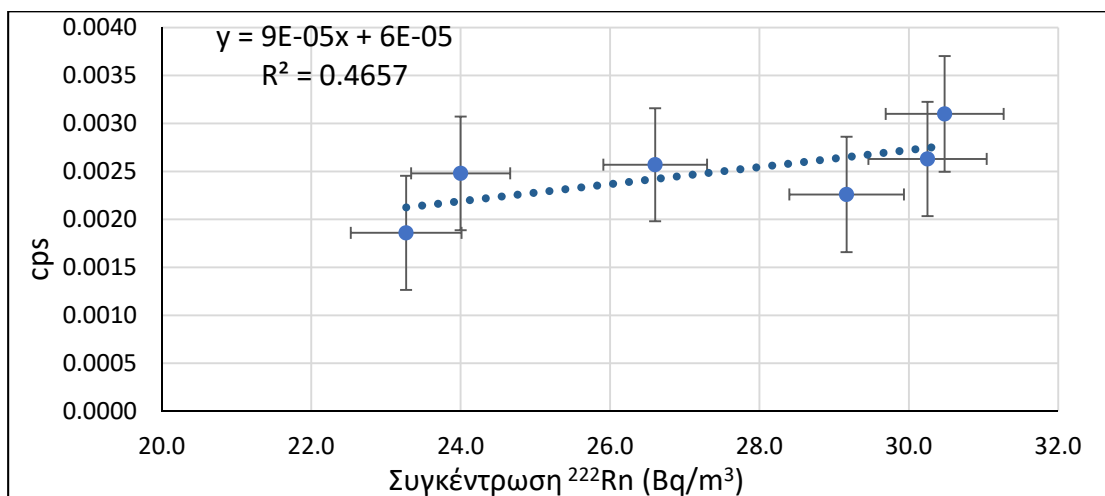
Σχήμα Ε.4: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή XtCSS.



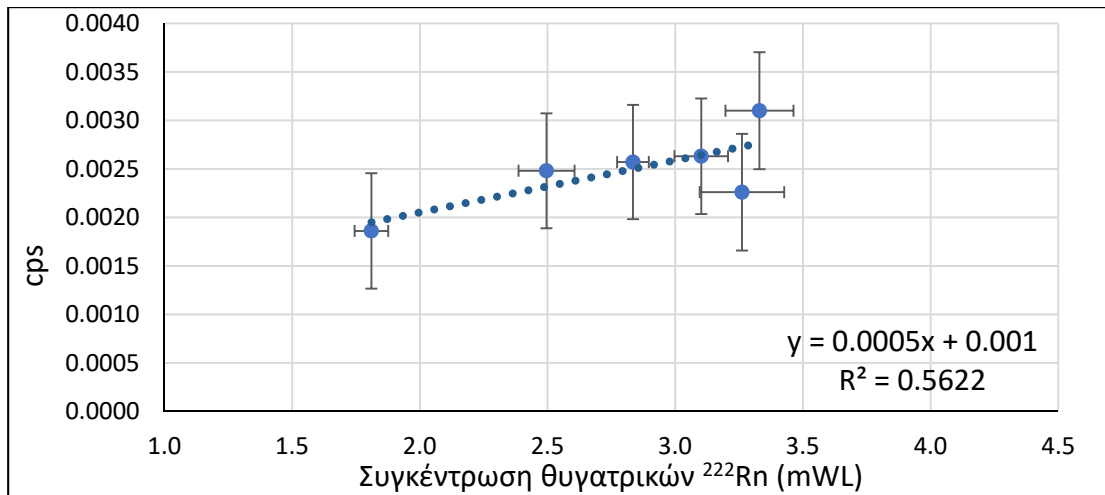
Σχήμα Ε.5: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή LEGe.



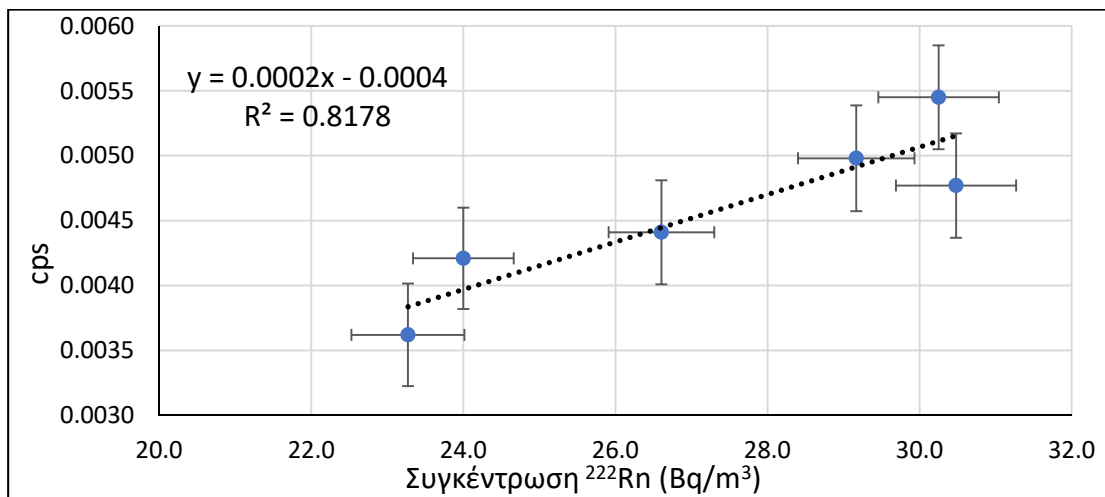
Σχήμα Ε.6: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή LEGe.



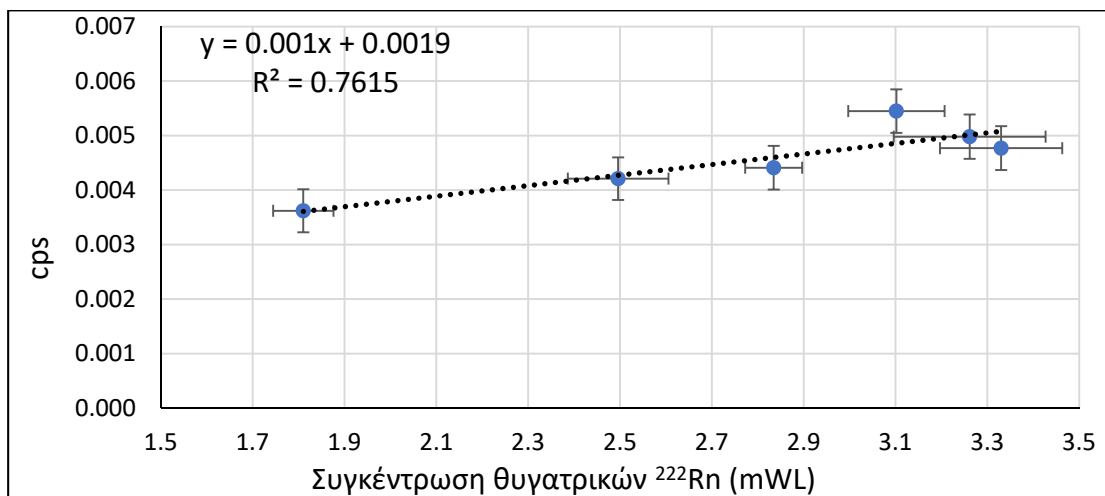
Σχήμα Ε.7: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή GeI.



Σχήμα Ε.8: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge1.



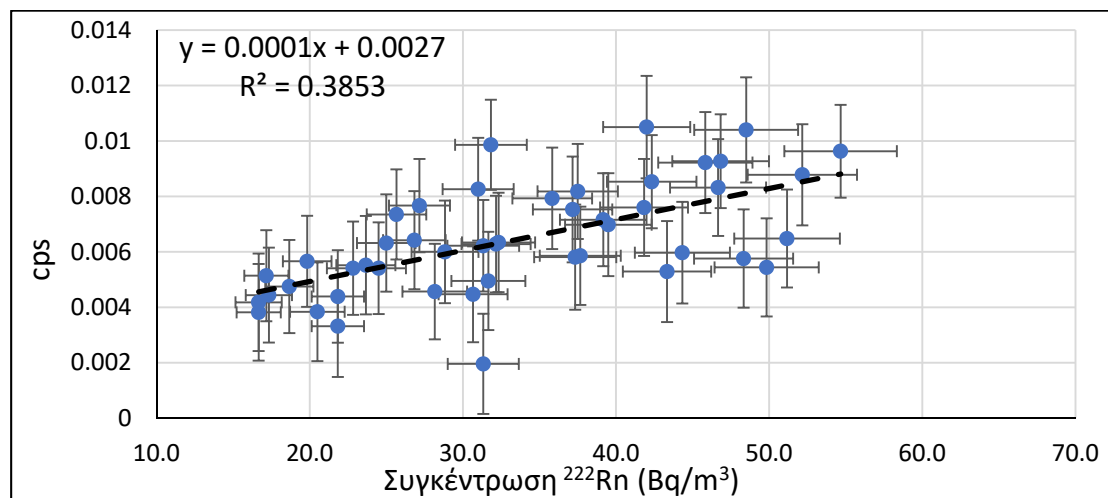
Σχήμα Ε.9: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής του ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.



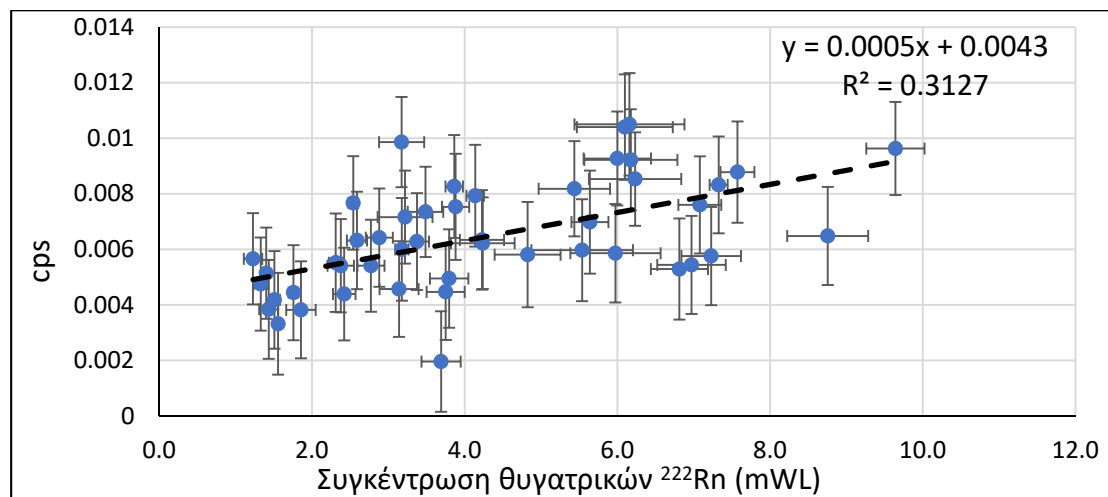
Σχήμα Ε.10: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 48h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 3^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.

E.2 4^η Δειγματοληψία Διερεύνησης Κύμανσης του Ραδονίου και των Θυγατρικών του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

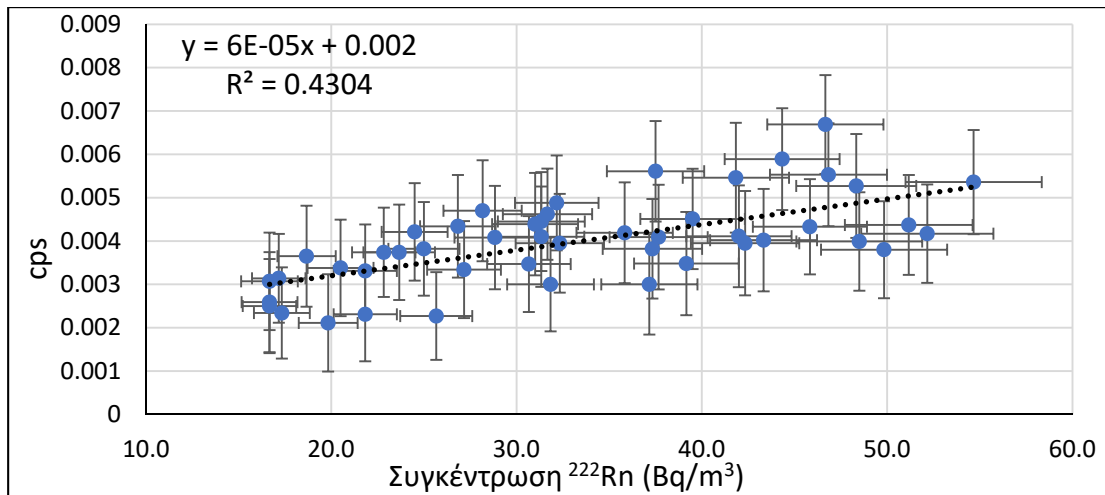
Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν τις συσχετίσεις μεταξύ των μέσων 6h τιμών της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τα 48 διαδοχικά φάσματα υποστρώματος διάρκειας 6h το κάθε ένα για κάθε έναν από τους ανιχνευτές Ge1 και Ge2.



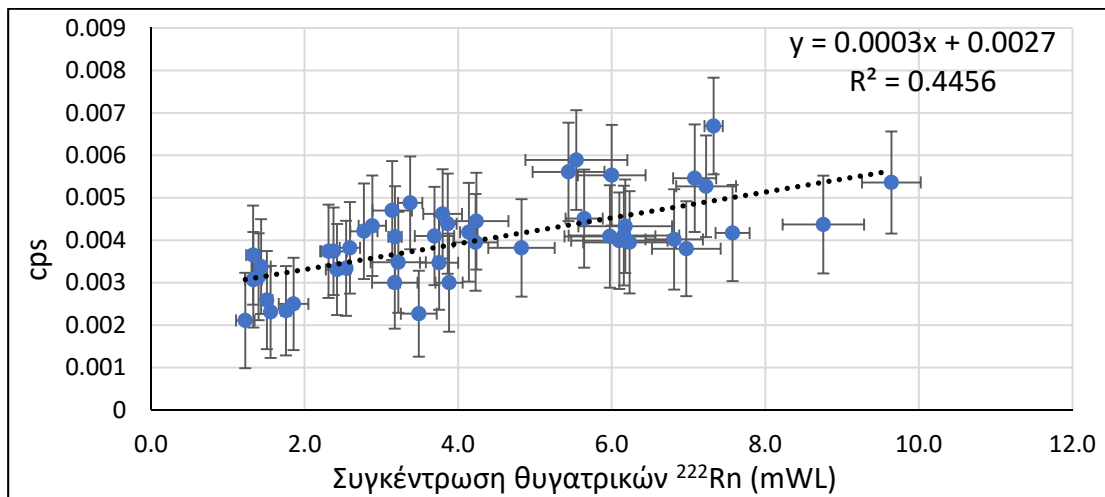
Σχήμα E.11: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge1.



Σχήμα E.12: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge1.



Σχήμα Ε.13: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.



Σχήμα Ε.14: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης 6h συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με τα cps της φωτοκορυφής ^{214}Bi στα 609.32keV για την 4^η δειγματοληψία και τον ανιχνευτή Ge2.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Διαγράμματα διαδοχικών φασμάτων φωτοκορυφών υποστρώματος ανιχνευτών γερμανίου

Στο παράρτημα ΣΤ παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων/διαγραμμάτων από την ανάλυση των διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος των ανιχνευτών ΧtRa, LEGe, Ge1 και Ge2. Σε κάθε διάγραμμα δίνονται τα cps της φωτοκορυφής και η αβεβαιότητά της. Επιπροσθέτως, δίνονται το «Μέσο cps» των 6 διαδοχικών φασμάτων, όπως αυτά υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που αναλύεται στο Παράρτημα ΙΑ , καθώς και τα «Συνολικά cps» που είναι το αποτέλεσμα της ενοποίησης των 6 διαδοχικών φασμάτων υποστρώματος και της ανάλυσής τους ως ένα ενιαίο φάσμα.

ΣΤ.1 Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή ΧtRa

Στους Πίνακες ΣΤ.1-ΣΤ.3 δίνονται ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και η αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ των κυρίαρχων φωτοκορυφών υποστρώματος στον ανιχνευτή ΧtRa για 6 διαδοχικά φάσματα 48h το κάθε ένα, το ολικό («Συνολικά cps»), καθώς και το μέσο φάσμα («Μέσο cps») υποστρώματος. Οι φωτοκορυφές δίνονται με σειρά αύξουσας ενέργειας φωτονίων και αντιστοιχίζονται στο ραδιενεργό ισότοπο στο οποίο οφείλεται η εκπομπή τους.

Πίνακας ΣΤ.1 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 1, 2 και 3 στον ανιχνευτή ΧtRa.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	1° 48h φάσμα		2° 48h φάσμα		3° 48h φάσμα	
		cps	±1σ	cps	±1σ	cps	±1σ
Pb-210	46.52	3.42E-03	7.32E-04	3.46E-03	7.30E-04	4.11E-03	7.35E-04
Th-234	63.29	9.12E-03	8.13E-04	9.53E-03	8.09E-04	1.01E-02	8.20E-04
U-235-Ra-226	185.99	1.35E-02	1.03E-03	1.36E-02	1.04E-03	1.43E-02	1.05E-03
Pb-212	238.63	1.24E-02	9.92E-04	1.19E-02	9.95E-04	1.15E-02	9.90E-04
Pb-214	295.22	Not Detected		1.30E-03	8.40E-04	Not Detected	
Ac-228	338.4	2.35E-03	7.83E-04	1.85E-03	7.90E-04	3.22E-03	7.90E-04
Pb-214	351.99	4.07E-03	7.45E-04	3.42E-03	7.48E-04	3.62E-03	7.53E-04
Tl-208	583.14	4.77E-03	6.22E-04	4.86E-03	6.33E-04	5.49E-03	6.12E-04
Bi-214	609.32	4.66E-03	6.19E-04	4.43E-03	6.15E-04	4.16E-03	6.25E-04
Tl-208	860.47	Not Detected		8.96E-04	5.19E-04	Not Detected	
Ac-228	911.07	4.42E-03	5.22E-04	4.50E-03	5.29E-04	4.63E-03	5.19E-04
Ac-228	968.9	1.81E-03	5.34E-04	1.56E-03	5.34E-04	1.84E-03	5.34E-04
Bi-214	1120.28	1.82E-03	4.94E-04	1.86E-03	5.12E-04	1.73E-03	5.20E-04
K-40	1460.75	2.65E-02	5.62E-04	2.67E-02	5.83E-04	2.75E-02	5.67E-04
Bi-214	1764.51	2.40E-03	3.27E-04	2.45E-03	3.46E-04	2.54E-03	3.45E-04

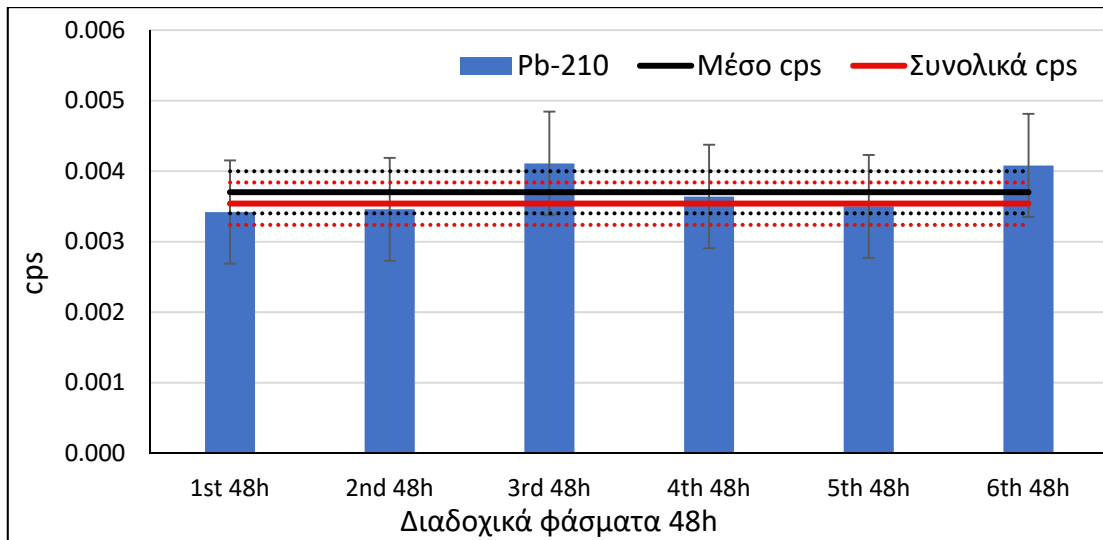
Πίνακας ΣΤ.2 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 4, 5 και 6 στον ανιχνευτή XtRa.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	4 ^ο 48h φάσμα		5 ^ο 48h φάσμα		6 ^ο 48h φάσμα	
		cps	±1σ	cps	±1σ	cps	cps
Pb-210	46.52	3.64E-03	7.35E-04	3.50E-03	7.30E-04	4.08E-03	7.32E-04
Th-234	63.29	1.03E-02	8.18E-04	9.76E-03	8.10E-04	9.01E-03	8.19E-04
U-235-Ra-226	185.99	1.49E-02	1.04E-03	1.42E-02	1.05E-03	1.41E-02	1.04E-03
Pb-212	238.63	1.25E-02	1.00E-03	1.20E-02	9.89E-04	1.13E-02	9.93E-04
Pb-214	295.22	Not Detected		1.20E-03	8.47E-04	Not Detected	
Ac-228	338.4	2.94E-03	7.82E-04	3.41E-03	7.81E-04	2.22E-03	7.86E-04
Pb-214	351.99	3.67E-03	7.47E-04	3.39E-03	7.60E-04	2.93E-03	7.56E-04
Tl-208	583.14	4.77E-03	6.27E-04	4.67E-03	6.25E-04	5.45E-03	6.11E-04
Bi-214	609.32	4.36E-03	6.24E-04	4.64E-03	6.27E-04	4.67E-03	6.25E-04
Tl-208	860.47	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
Ac-228	911.07	4.40E-03	5.28E-04	5.30E-03	5.11E-04	4.47E-03	5.17E-04
Ac-228	968.9	1.84E-03	5.36E-04	1.96E-03	5.32E-04	2.20E-03	5.40E-04
Bi-214	1120.28	1.75E-03	5.10E-04	1.87E-03	5.16E-04	2.02E-03	5.08E-04
K-40	1460.75	2.78E-02	5.56E-04	2.72E-02	5.77E-04	2.77E-02	5.88E-04
Bi-214	1764.51	2.50E-03	3.45E-04	2.47E-03	3.53E-04	2.31E-03	3.49E-04

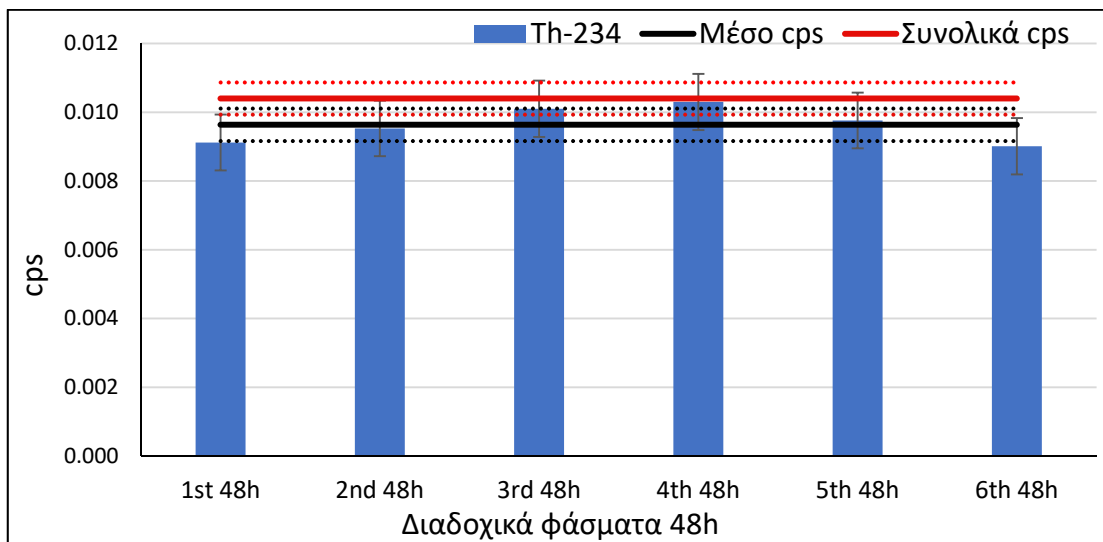
Πίνακας ΣΤ.3 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για το συνολικό («Συνολικά cps») και το μέσο («Μέσο cps») φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή XtRa.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	Συνολικό φάσμα		Μέσο φάσμα	
		cps	±1σ	cps	±1σ
Pb-210	46.52	3.54E-03	3.00E-04	3.70E-03	2.99E-04
Th-234	63.29	1.04E-02	4.66E-04	9.64E-03	4.71E-04
U-235-Ra-226	185.99	1.41E-02	4.27E-04	1.41E-02	4.68E-04
Pb-212	238.63	1.19E-02	4.04E-04	1.19E-02	4.34E-04
Pb-214	295.22	1.69E-03	4.30E-04	1.25E-03	5.96E-04
Ac-228	338.4	2.71E-03	3.20E-04	2.67E-03	5.62E-04
Pb-214	351.99	3.52E-03	3.07E-04	3.52E-03	3.44E-04
Tl-208	583.14	5.00E-03	2.55E-04	5.01E-03	3.39E-04
Bi-214	609.32	4.49E-03	2.56E-04	4.49E-03	2.54E-04
Tl-208	860.47	5.38E-04	2.16E-04	8.96E-04	5.19E-04
Ac-228	911.07	4.65E-03	2.11E-04	4.63E-03	3.17E-04
Ac-228	968.9	2.63E-03	2.44E-04	1.87E-03	2.18E-04
Bi-214	1120.28	1.84E-03	2.07E-04	1.84E-03	2.08E-04
K-40	1460.75	2.72E-02	2.31E-04	2.72E-02	4.91E-04
Bi-214	1764.51	2.44E-03	1.40E-04	2.44E-03	1.40E-04

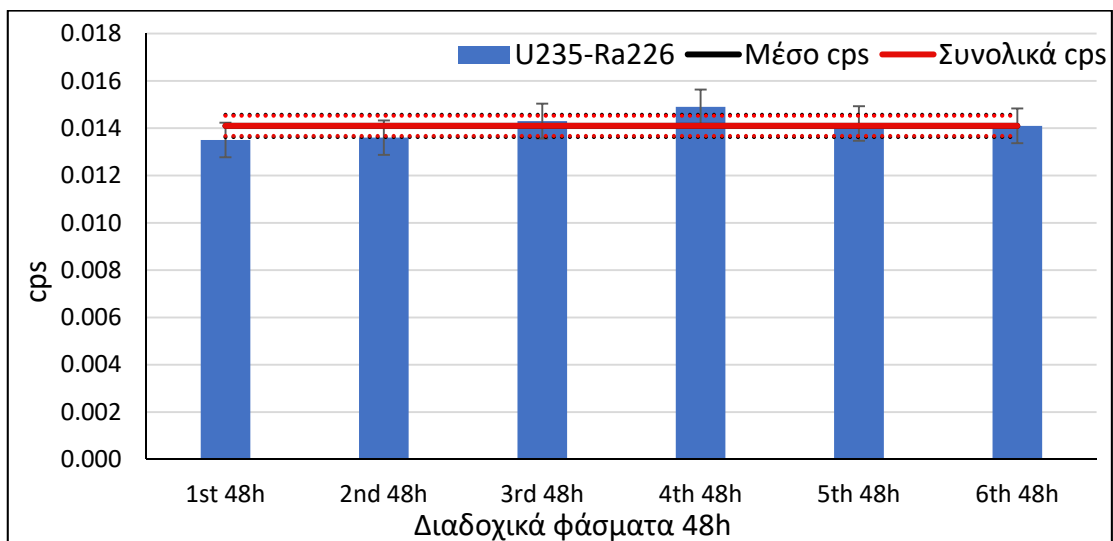
Στα Σχήματα ΣΤ.1-ΣΤ.15 δίνονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες ΣΤ.1-ΣΤ.3.



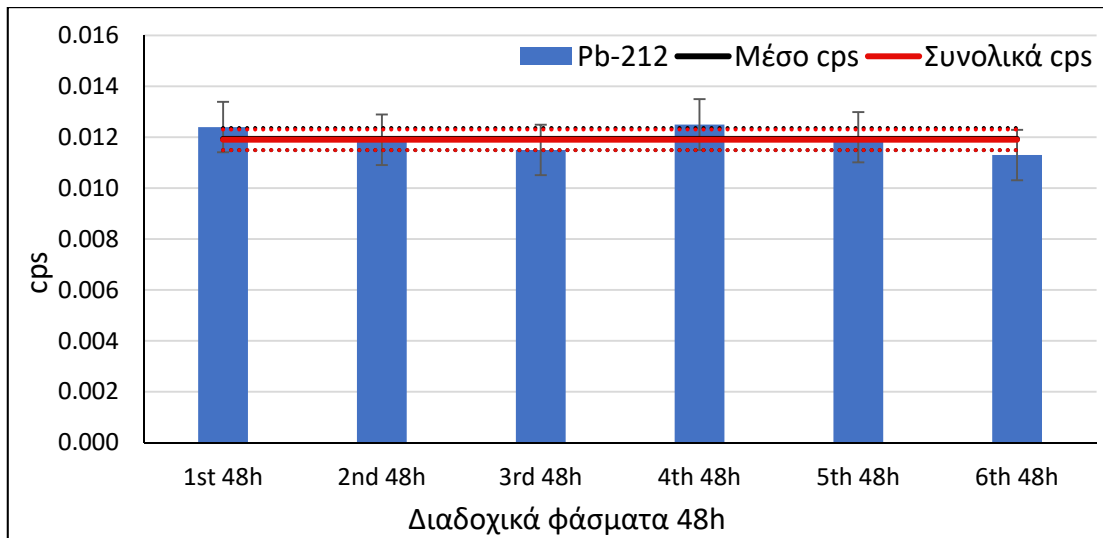
Σχήμα ΣΤ.1 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{210}Pb (46.52 keV).



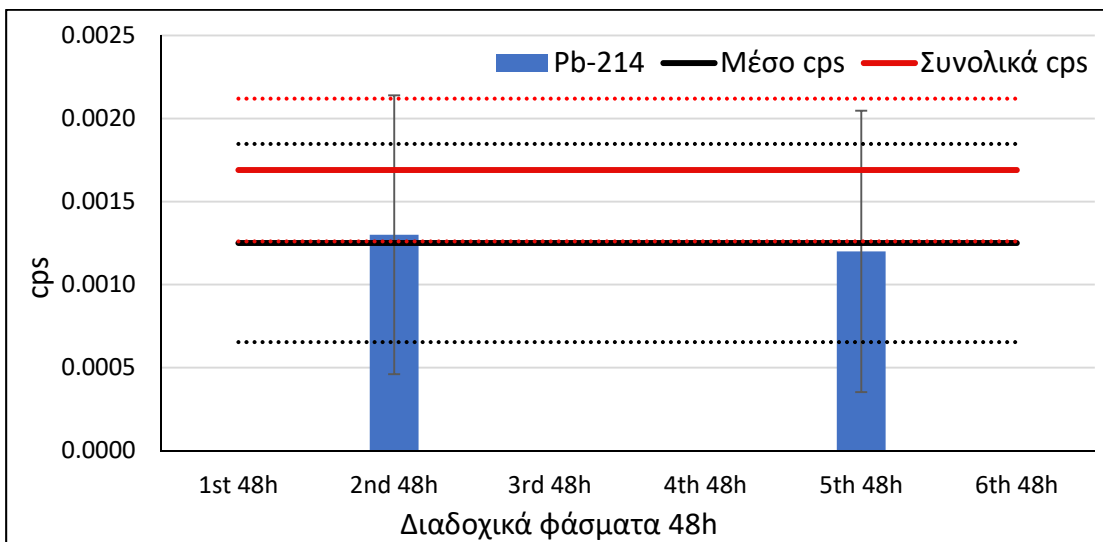
Σχήμα ΣΤ.2 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{234}Th (63.29 keV).



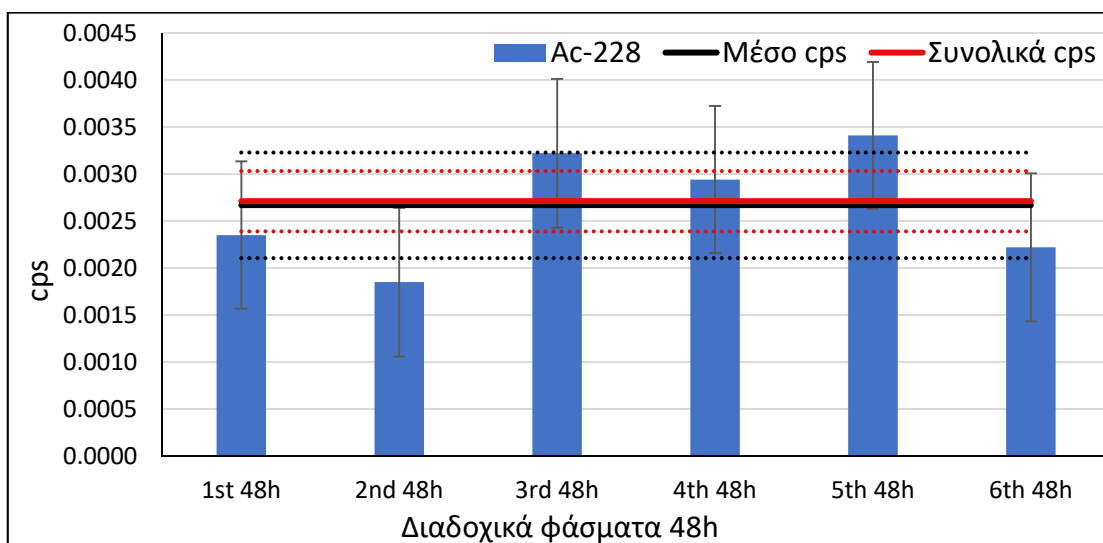
Σχήμα ΣΤ.3 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και την πολλαπλή φωτοκορυφή των ^{235}U - ^{226}Ra (185.99 keV).



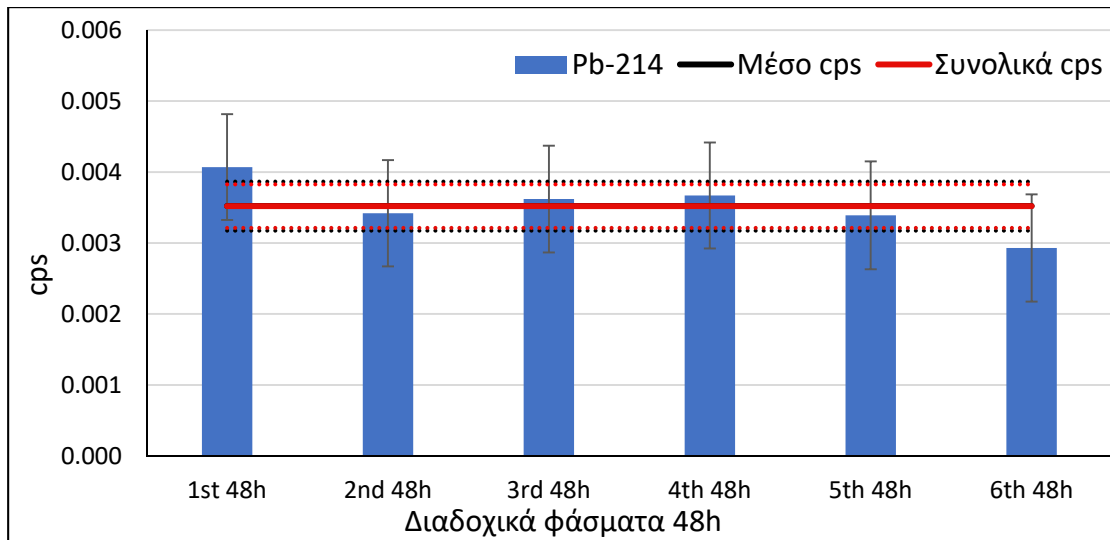
Σχήμα ΣΤ.4 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (238.63 keV).



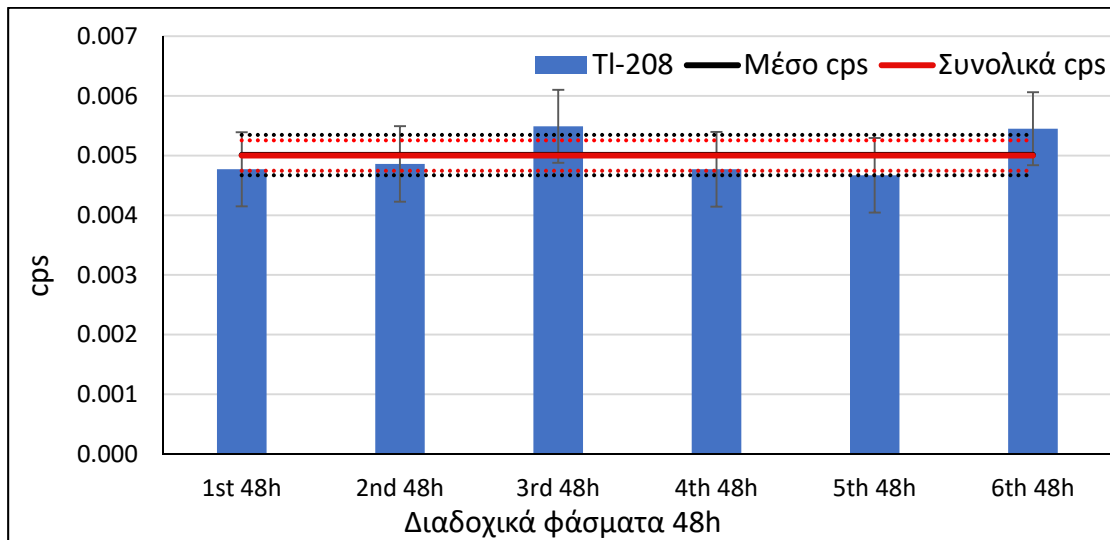
Σχήμα ΣΤ.5 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (295.22 keV).



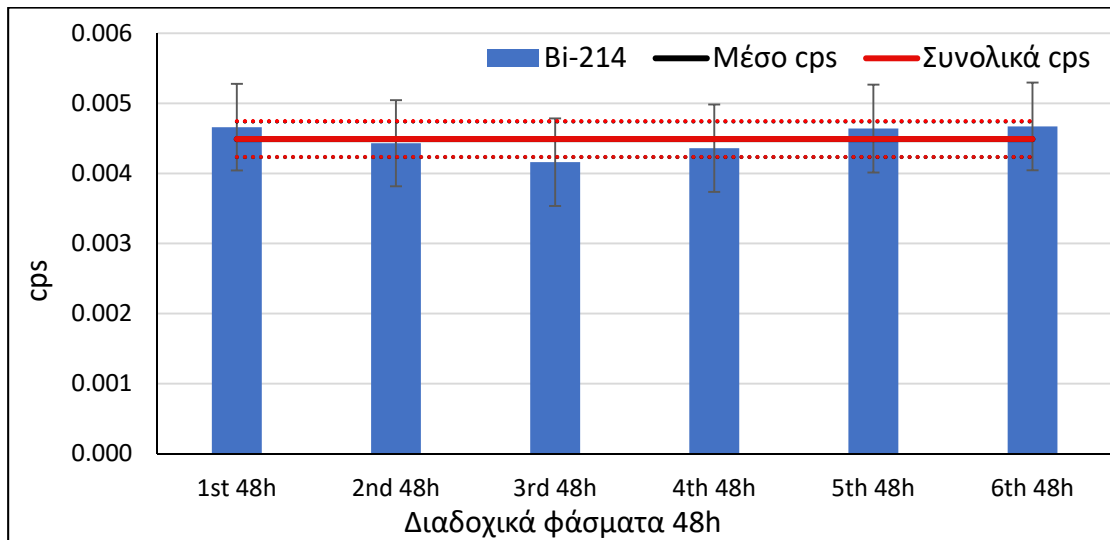
Σχήμα ΣΤ.6 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (338.4 keV).



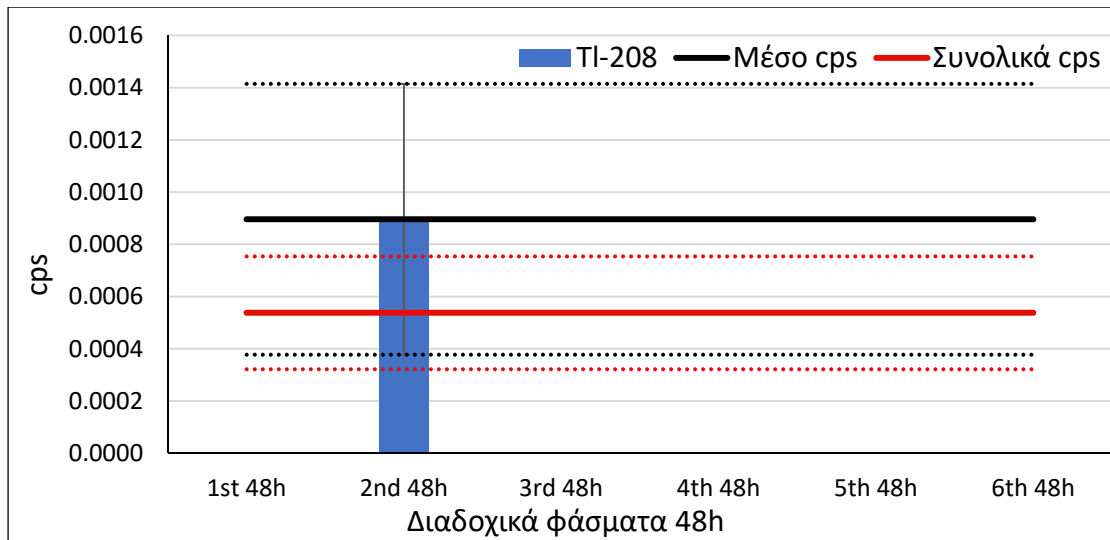
Σχήμα ΣΤ.7 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και την φωτοκορυφή του ^{214}Pb (351.99 keV).



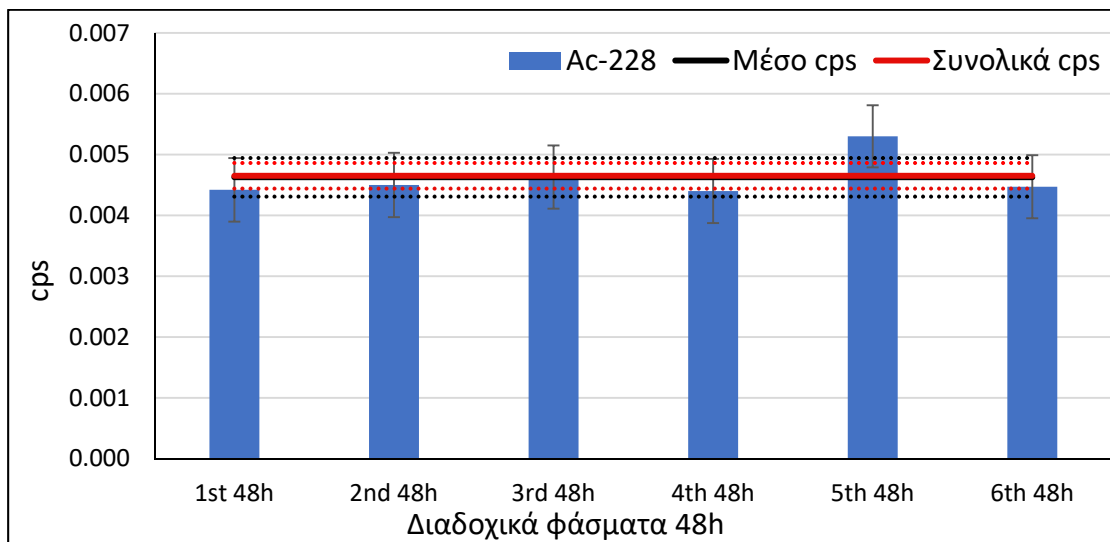
Σχήμα ΣΤ.8 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{208}Tl (583.14 keV).



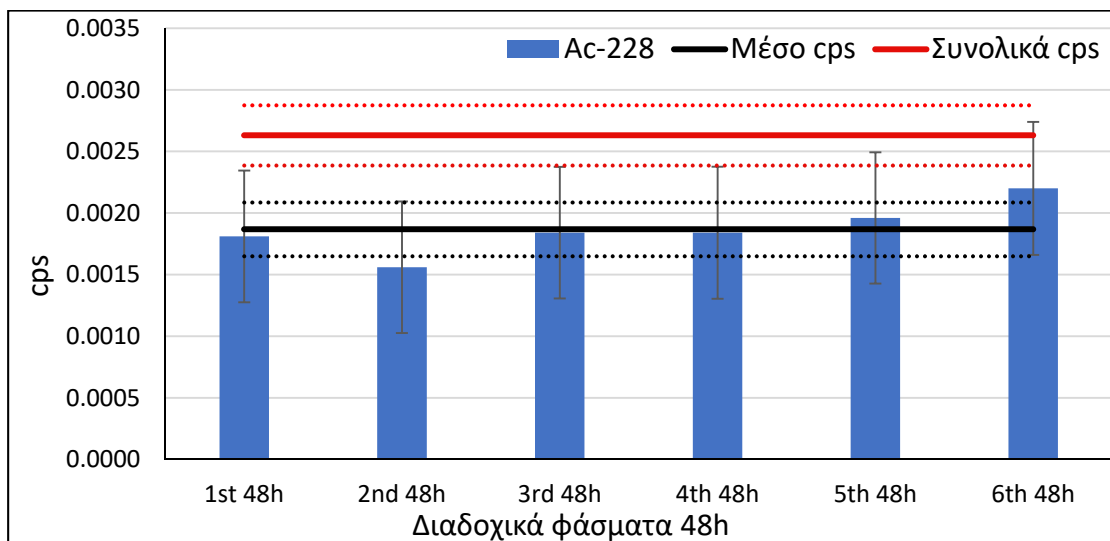
Σχήμα ΣΤ.9 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (609.32 keV).



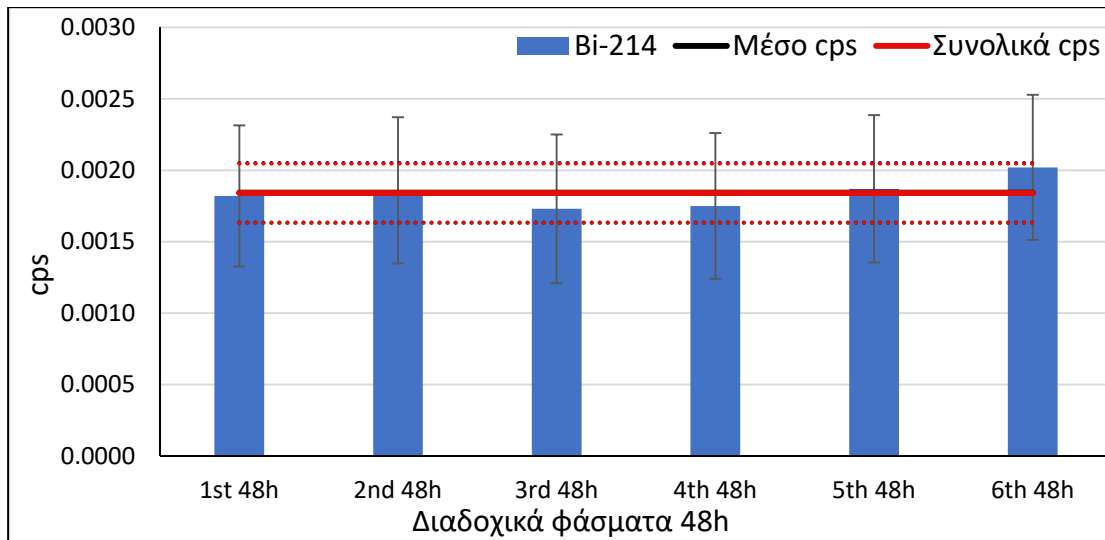
Σχήμα ΣΤ.10 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και την φωτοκορυφή του ^{208}Tl (860.47 keV).



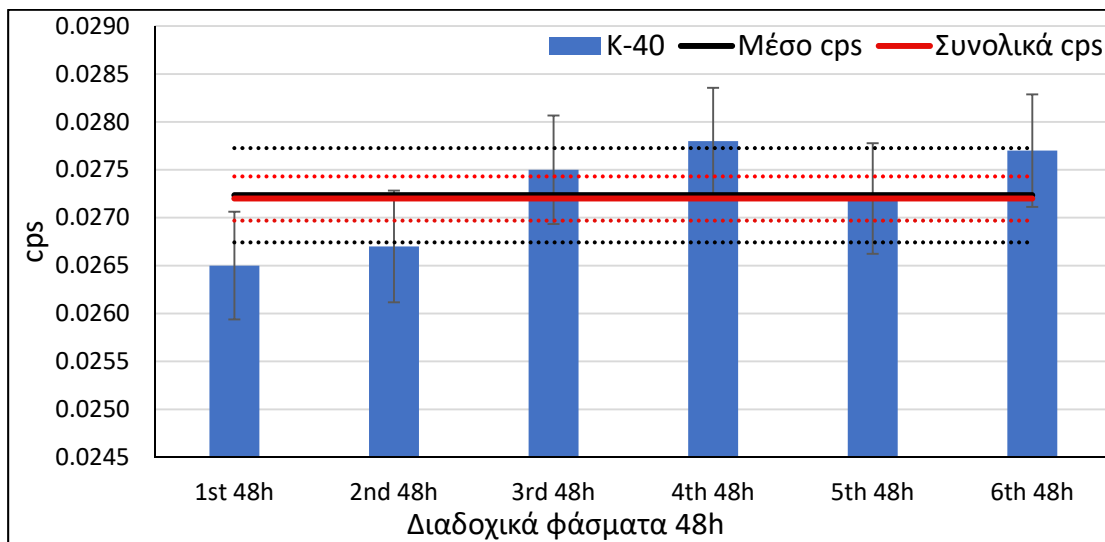
Σχήμα ΣΤ.11 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (911.07 keV).



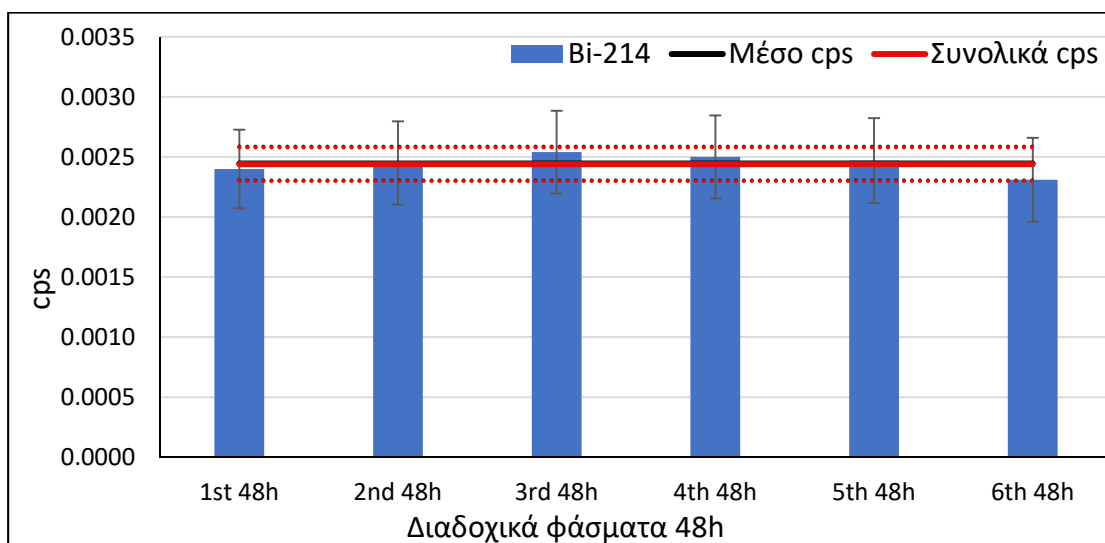
Σχήμα ΣΤ.12 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (968.9 keV).



Σχήμα ΣΤ.13 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1120.28 keV).



Σχήμα ΣΤ.14 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{40}K (1460.75 keV).



Σχήμα ΣΤ.15 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή XtRa και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1764.51 keV).

ΣΤ.2 Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή LEGe

Στους Πίνακες ΣΤ.4-ΣΤ.6 δίνονται ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και η αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ των κυρίαρχων φωτοκορυφών υποστρώματος στον ανιχνευτή LEGe για 6 διαδοχικά φάσματα, το ολικό («Συνολικά cps»), καθώς και το μέσο («Μέσο cps») φάσμα υποστρώματος. Οι φωτοκορυφές δίνονται με σειρά αύξουσας ενέργειας φωτονίων και αντιστοιχίζονται στο ραδιενεργό ισότοπο στο οποίο οφείλεται η εκπομπή τους.

Πίνακας ΣΤ.4 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 1, 2 και 3 στον ανιχνευτή LEGe.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	1 ^ο 48h φάσμα		2 ^ο 48h φάσμα		3 ^ο 48h φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Pb-210	46.52	2.30E-03	3.88E-04	2.37E-03	3.91E-04	2.44E-03	3.87E-04
Th-234	63.29	1.28E-02	4.73E-04	1.30E-02	4.73E-04	1.38E-02	4.77E-04
Pb-212	87.2	8.32E-04	5.21E-04	1.00E-03	5.24E-04	Not Detected	
U235-Ra226	185.99	6.55E-03	5.36E-04	6.29E-03	5.41E-04	6.77E-03	5.37E-04
Pb-212	238.63	1.65E-03	4.37E-04	1.83E-03	4.37E-04	1.22E-03	4.31E-04
Pb-214	295.22	1.20E-03	3.56E-04	1.22E-03	3.56E-04	1.34E-03	3.51E-04
Ac-228	338.4	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
Pb-214	351.99	1.30E-03	3.03E-04	1.10E-03	3.15E-04	1.25E-03	3.18E-04
Tl-208	583.14	4.35E-04	2.70E-04	Not Detected		Not Detected	
Bi-214	609.32	7.05E-04	2.63E-04	1.07E-03	2.64E-04	1.17E-03	2.69E-04
Cs-137	661.62	6.09E-04	2.50E-04	5.57E-04	2.51E-04	5.41E-04	2.43E-04
Ac-228	911.07	Not Detected		Not Detected		3.49E-04	2.35E-04
Bi-214	1120.28	Not Detected		4.84E-04	2.23E-04	Not Detected	
Co-60	1173.22	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
Co-60	1332.51	3.67E-04	1.91E-04	Not Detected		Not Detected	
K-40	1460.75	1.04E-03	1.84E-04	1.03E-03	1.72E-04	1.28E-03	1.78E-04
Bi-214	1764.51	3.05E-04	1.71E-04	2.92E-04	1.54E-04	3.40E-04	1.44E-04

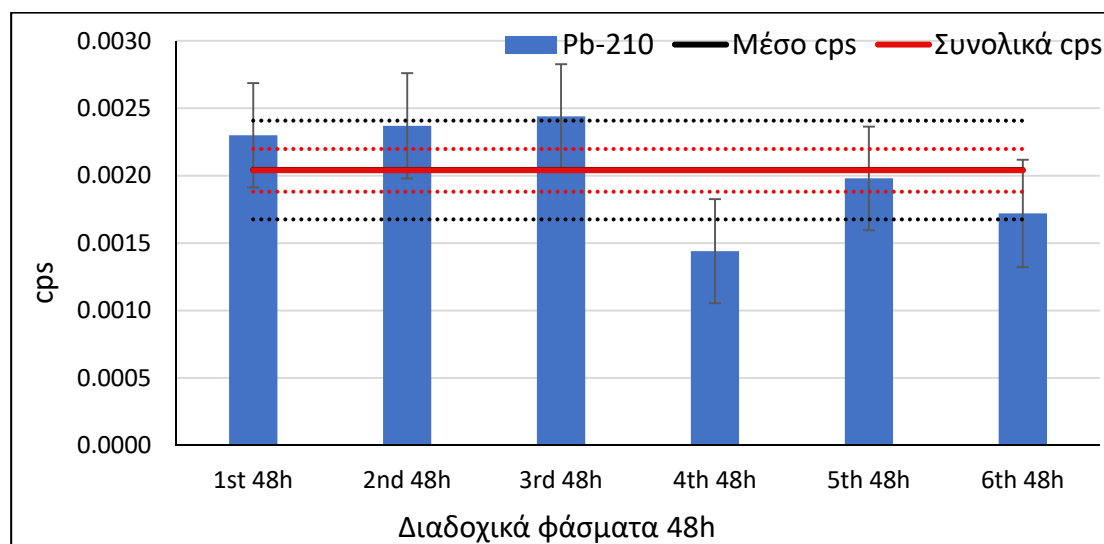
Πίνακας ΣΤ.5 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 4, 5 και 6 στον ανιχνευτή LEGe.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	4 ^ο 48h φάσμα		5 ^ο 48h φάσμα		6 ^ο 48h φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Pb-210	46.52	1.44E-03	3.86E-04	1.98E-03	3.84E-04	1.72E-03	3.98E-04
Th-234	63.29	1.29E-02	4.69E-04	1.33E-02	4.76E-04	1.27E-02	4.77E-04
Pb-212	87.2	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
U235-Ra226	185.99	6.55E-03	5.36E-04	6.64E-03	5.35E-04	7.06E-03	5.35E-04
Pb-212	238.63	1.75E-03	4.36E-04	1.80E-03	4.34E-04	2.26E-03	4.34E-04
Pb-214	295.22	1.05E-03	3.54E-04	9.72E-04	3.51E-04	1.14E-03	3.57E-04
Ac-228	338.4	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
Pb-214	351.99	1.61E-03	3.21E-04	1.80E-03	3.13E-04	1.59E-03	3.10E-04
Tl-208	583.14	5.70E-04	2.63E-04	6.58E-04	2.66E-04	5.48E-04	2.63E-04
Bi-214	609.32	8.61E-04	2.75E-04	1.14E-03	2.63E-04	1.09E-03	2.67E-04
Cs-137	661.62	7.78E-04	2.48E-04	5.95E-04	2.52E-04	6.39E-04	2.54E-04
Ac-228	911.07	Not Detected		Not Detected		4.72E-04	2.28E-04
Bi-214	1120.28	Not Detected		Not Detected		Not Detected	
Co-60	1173.22	5.01E-04	2.24E-04	Not Detected		Not Detected	
Co-60	1332.51	Not Detected		Not Detected		2.93E-04	1.88E-04
K-40	1460.75	8.67E-04	1.78E-04	9.72E-04	1.88E-04	8.02E-04	1.96E-04
Bi-214	1764.51	3.67E-04	1.55E-04	3.53E-04	1.48E-04	Not Detected	

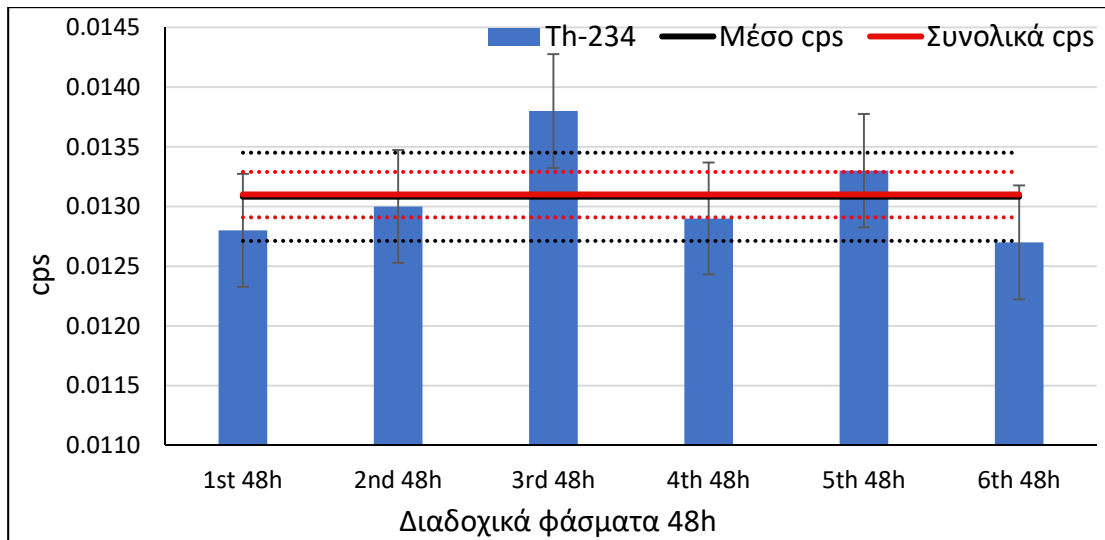
Πίνακας ΣΤ.6 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για το συνολικό και το μέσο φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή LEGe.

Ραδιενεργό ισότοπο	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	Συνολικό φάσμα		Μέσο φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Pb-210	46.52	2.04E-03	1.58E-04	2.04E-03	3.66E-04
Th-234	63.29	1.31E-02	1.91E-04	1.31E-02	3.70E-04
Pb-212	87.2	5.57E-04	2.14E-04	9.15E-04	3.70E-04
U235-Ra226	185.99	6.64E-03	2.17E-04	6.64E-03	2.35E-04
Pb-212	238.63	1.75E-03	1.77E-04	1.75E-03	3.07E-04
Pb-214	295.22	1.16E-03	1.44E-04	1.15E-03	1.45E-04
Ac-228	338.4	2.50E-04	1.29E-04	Not Detected	
Pb-214	351.99	1.44E-03	1.28E-04	1.44E-03	2.42E-04
Tl-208	583.14	4.60E-04	1.09E-04	5.54E-04	1.33E-04
Bi-214	609.32	1.01E-03	1.10E-04	1.01E-03	1.68E-04
Cs-137	661.62	6.19E-04	1.02E-04	6.19E-04	1.02E-04
Ac-228	911.07	2.58E-04	9.73E-05	4.12E-04	1.64E-04
Bi-214	1120.28	2.53E-04	9.57E-05	4.84E-04	2.23E-04
Co-60	1173.22	2.96E-04	9.13E-05	5.01E-04	2.24E-04
Co-60	1332.51	2.58E-04	7.94E-05	3.29E-04	1.34E-04
K-40	1460.75	9.99E-04	7.45E-05	1.01E-03	1.52E-04
Bi-214	1764.51	2.95E-04	6.31E-05	3.33E-04	6.87E-05

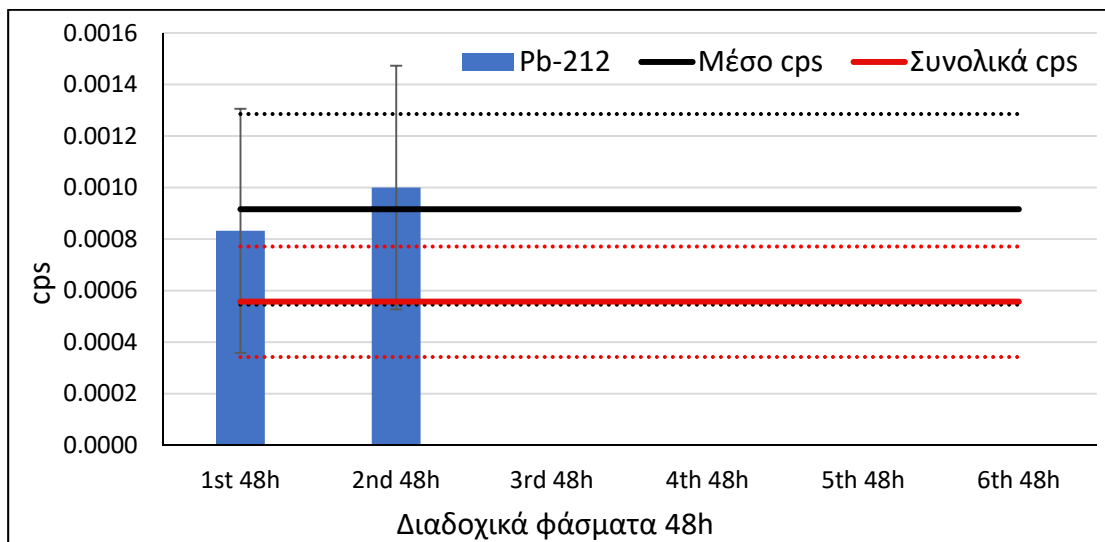
Στα Σχήματα Ε.16-Ε.32 δίνονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες ΣΤ.4-ΣΤ.6.



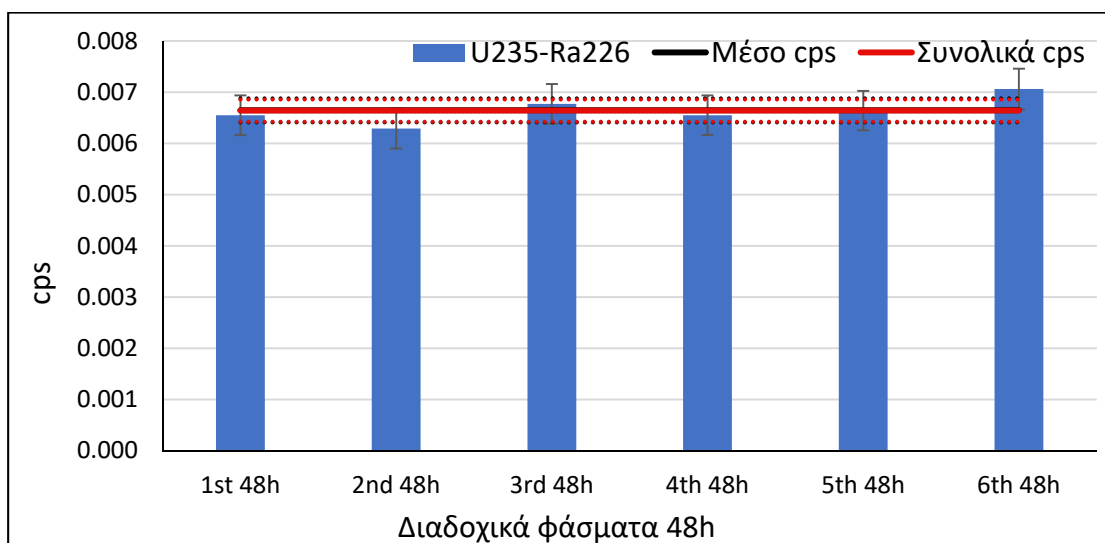
Σχήμα ΣΤ.16 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{210}Pb (46.52 keV).



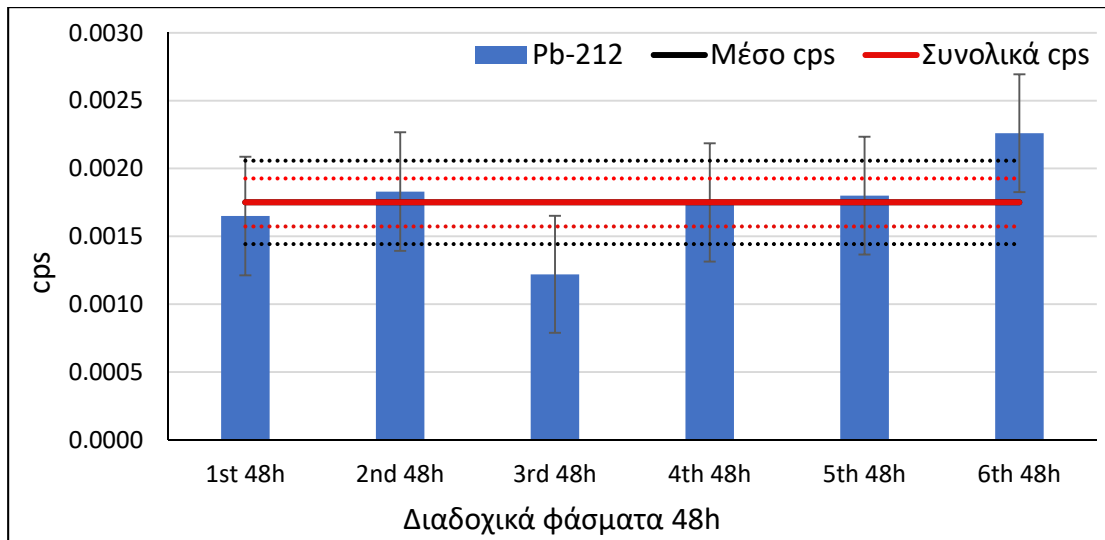
Σχήμα ΣΤ.17 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{234}Th (63.29 keV).



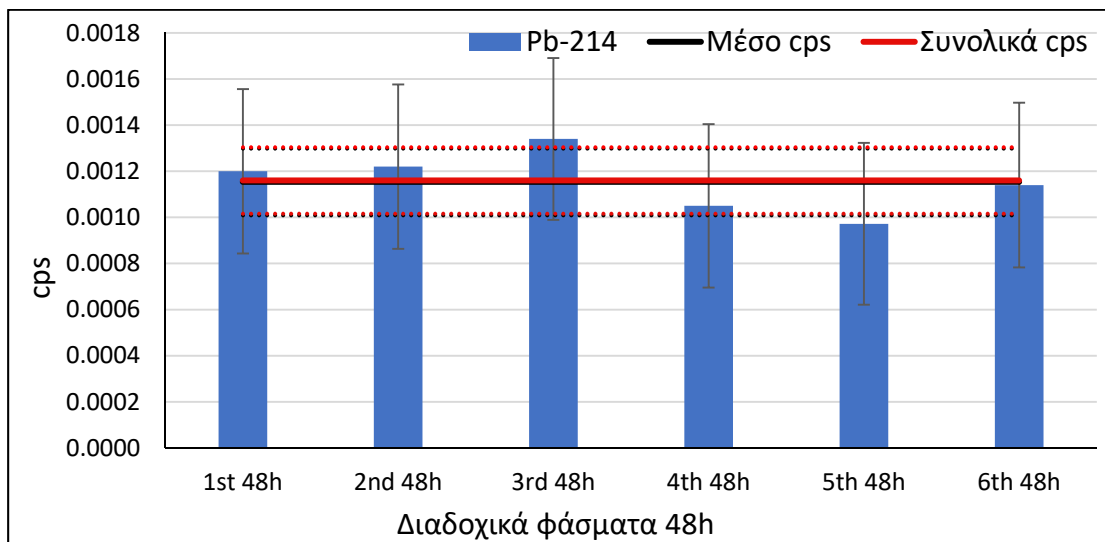
Σχήμα ΣΤ.18 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (87.2 keV).



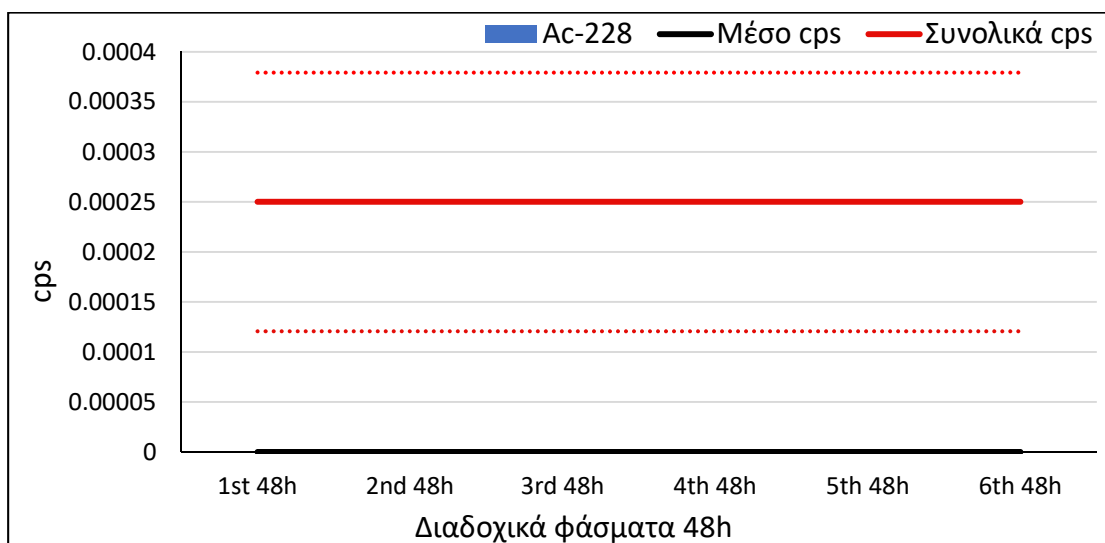
Σχήμα ΣΤ.19 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και την πολλαπλή φωτοκορυφή των ^{235}U - ^{226}Ra (185.99 keV).



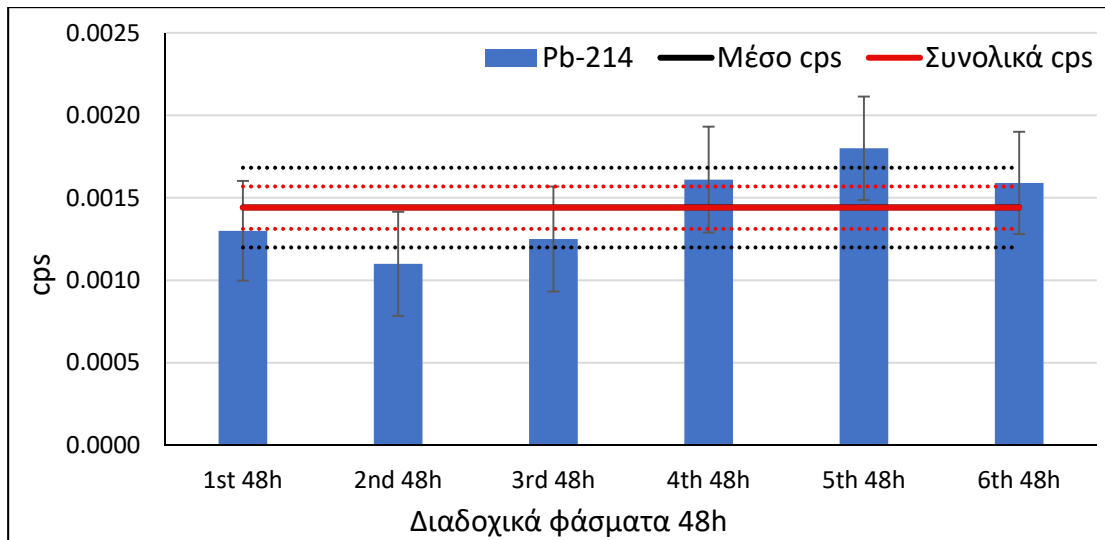
Σχήμα ΣΤ.20 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (238.63 keV).



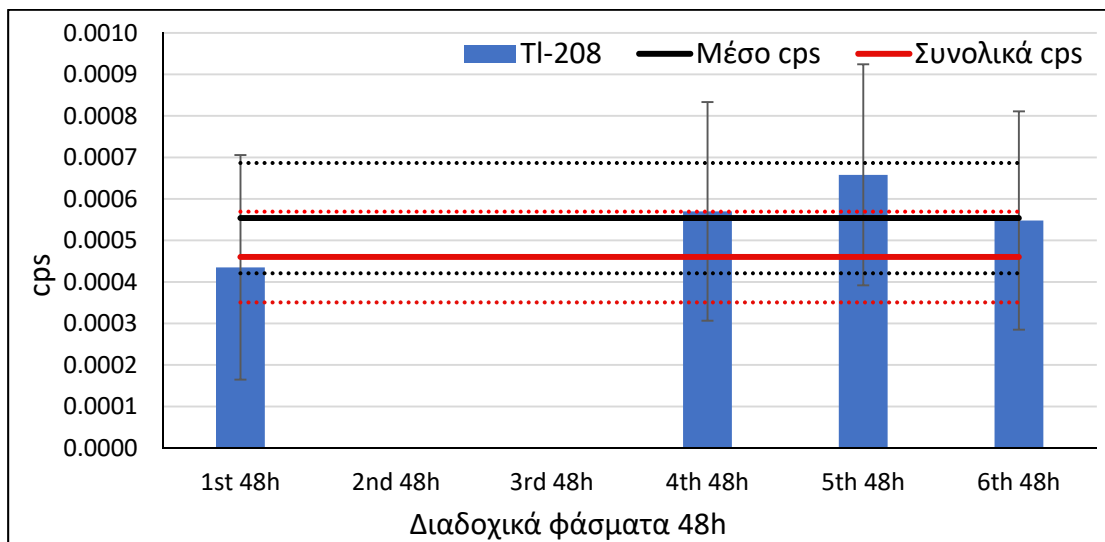
Σχήμα ΣΤ.21 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (295.22 keV).



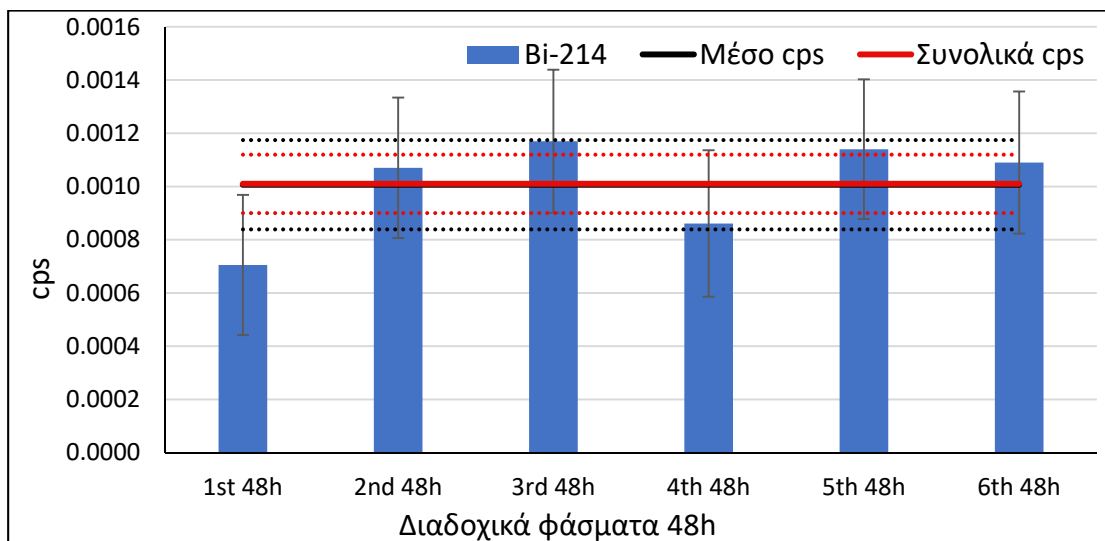
Σχήμα ΣΤ.22 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (338.4 keV).



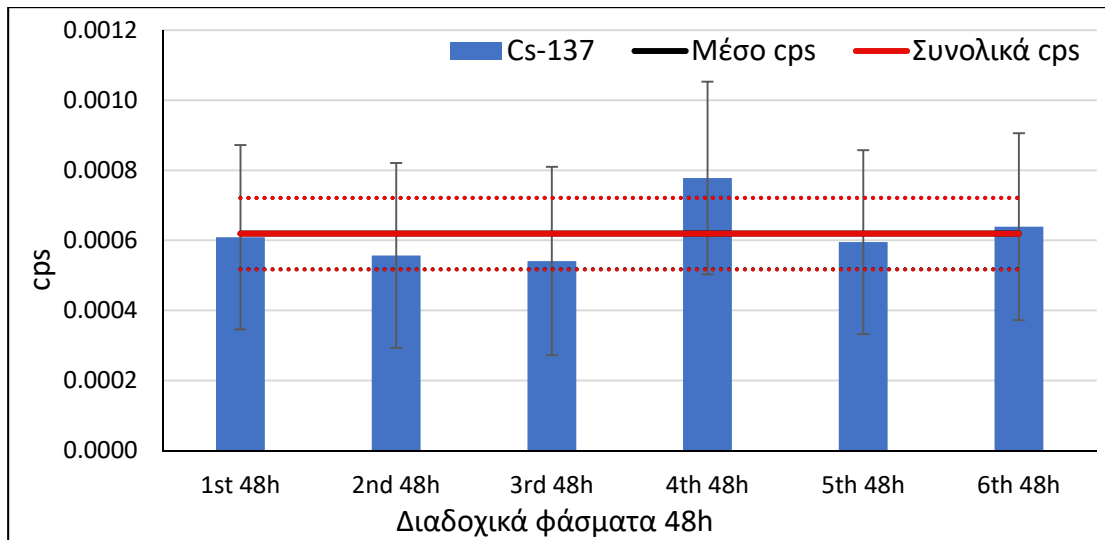
Σχήμα ΣΤ.23 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (351.99 keV).



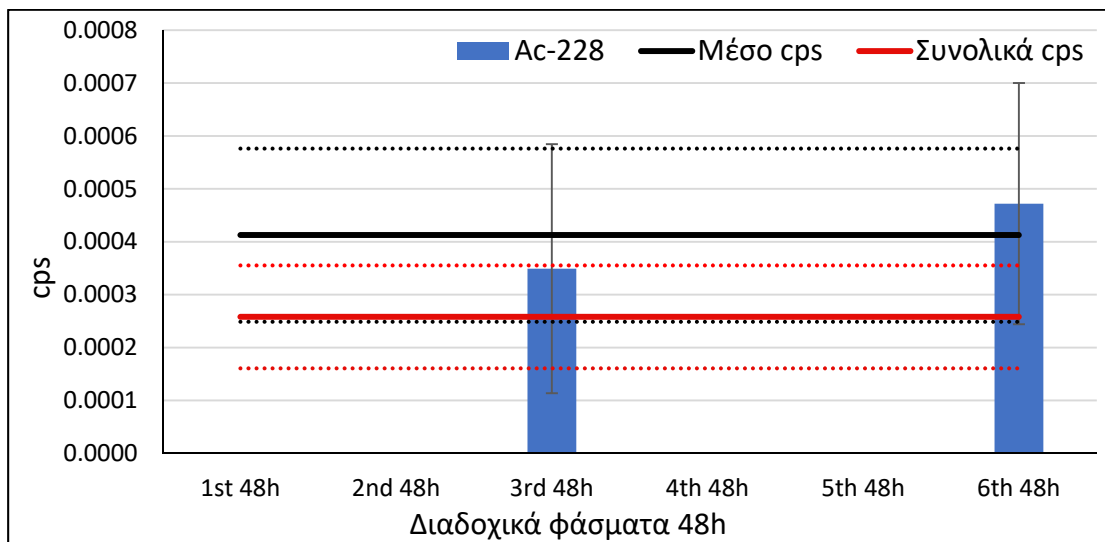
Σχήμα ΣΤ.24 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{208}Tl (583.14 keV).



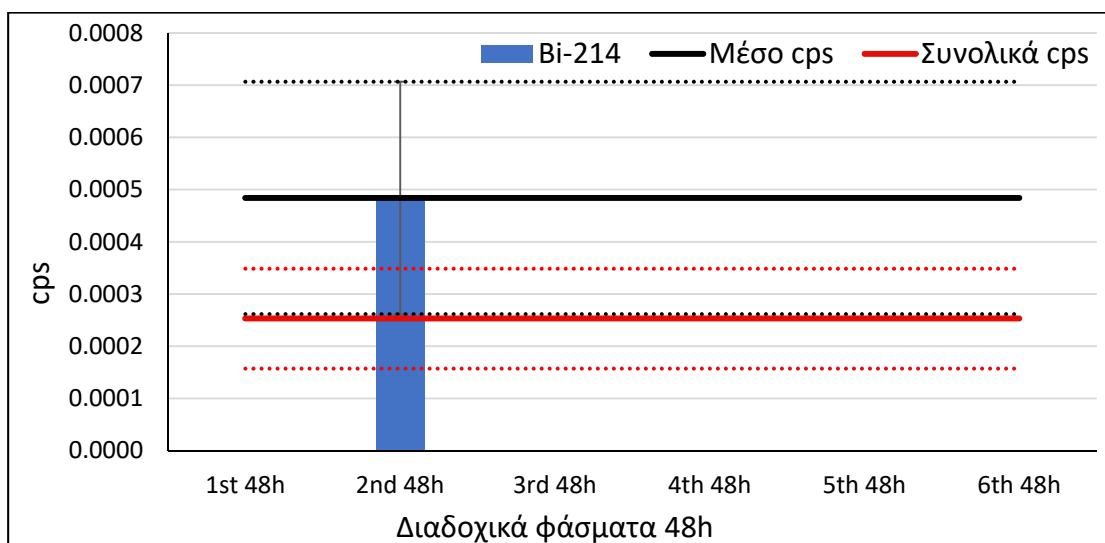
Σχήμα ΣΤ.25 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (609.32 keV).



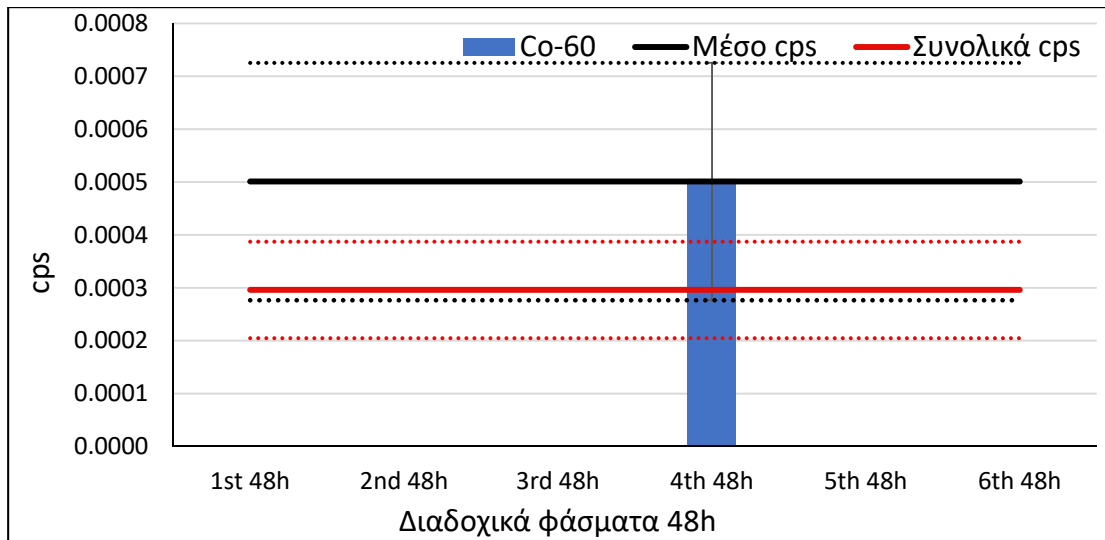
Σχήμα ΣΤ.26 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{137}Cs (661.62 keV).



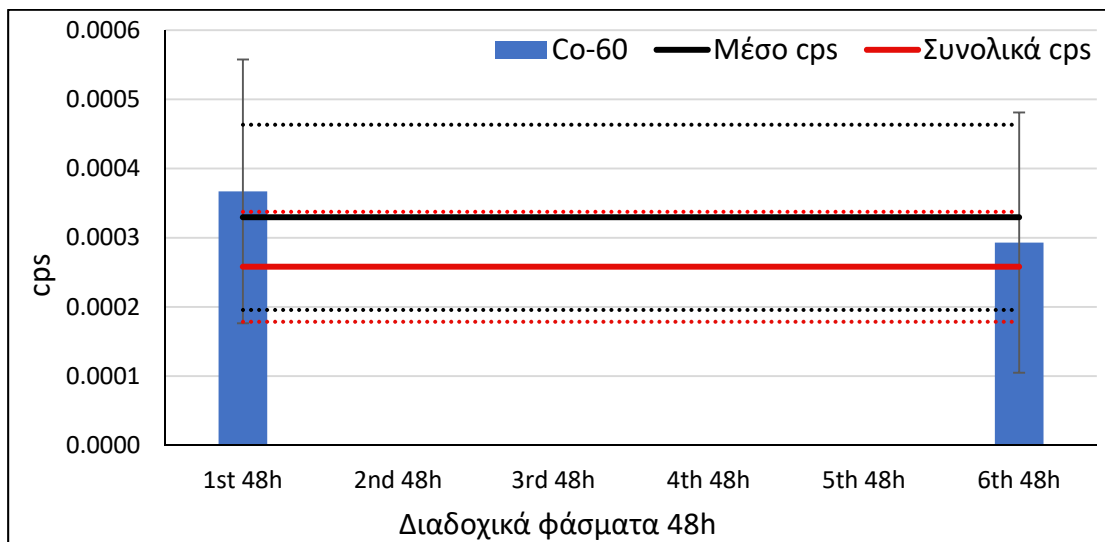
Σχήμα ΣΤ.27 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (911.07 keV).



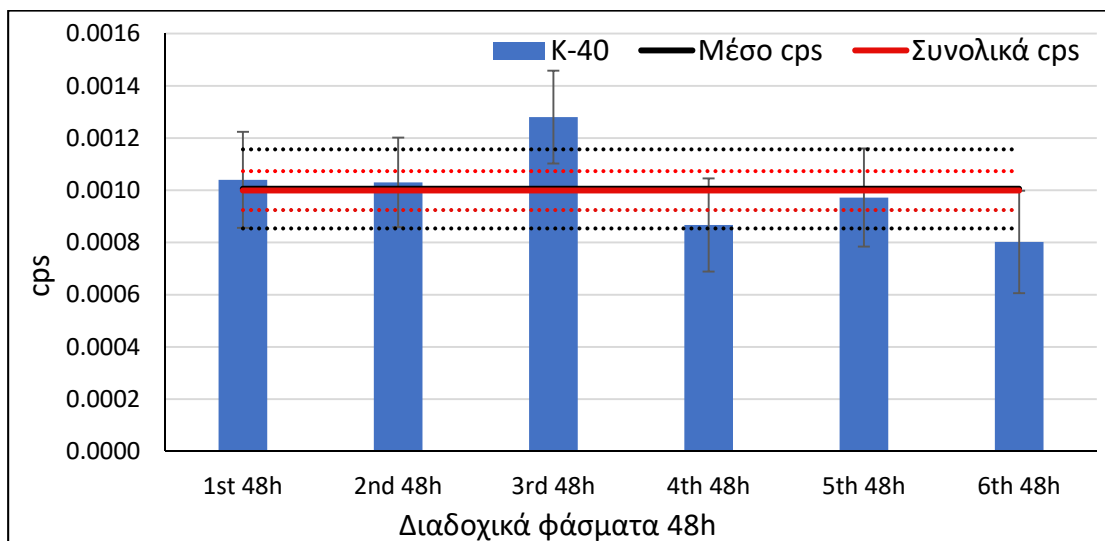
Σχήμα ΣΤ.28 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1120.28 keV).



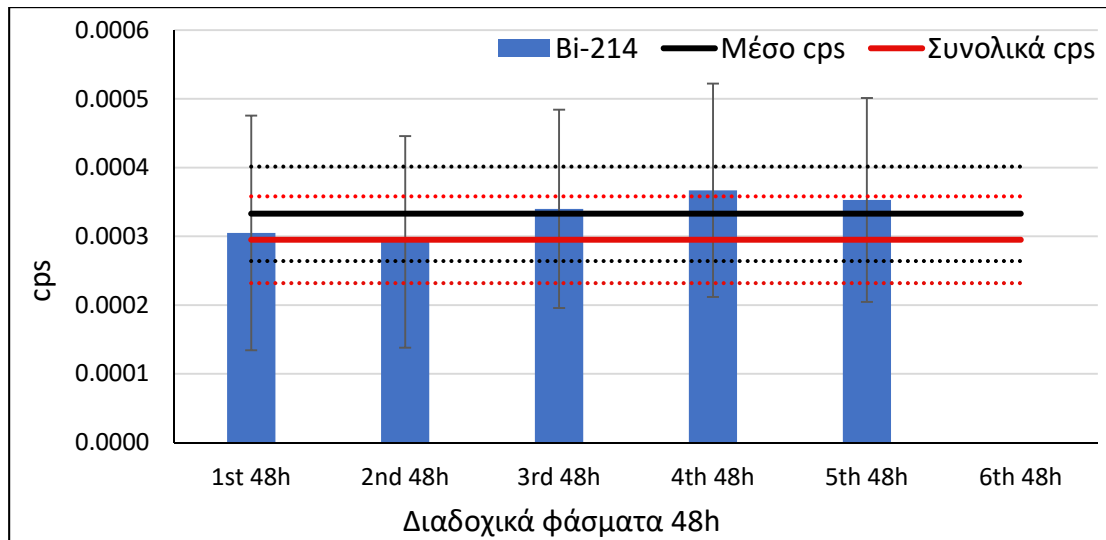
Σχήμα ΣΤ.29 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{60}Co (1173.22 keV).



Σχήμα ΣΤ.30 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{60}Co (1332.51 keV).



Σχήμα ΣΤ.31 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{40}K (1460.75 keV).



Σχήμα ΣΤ.32 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή LEGe και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1764.51 keV).

ΣΤ.3 Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή Ge1

Στους Πίνακες ΣΤ.7-ΣΤ.9 δίνονται ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και η αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ των κυρίαρχων φωτοκορυφών υποστρώματος στον ανιχνευτή Ge1 για 6 διαδοχικά φάσματα, το ολικό («Συνολικά cps»), καθώς και το μέσο («Μέσο cps») φάσμα υποστρώματος. Οι φωτοκορυφές δίνονται με σειρά αύξουσας ενέργειας φωτονίων και αντιστοιχίζονται στο ραδιενεργό ισότοπο στο οποίο οφείλεται η εκπομπή τους.

Πίνακας ΣΤ.7 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 1, 2 και 3 στον ανιχνευτή Ge1.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	1° 48h φάσμα		2° 48h φάσμα		3° 48h φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Th-234	63.29	1.94E-03	9.82E-04	2.44E-03	9.82E-04	3.13E-03	9.54E-04
U-235-Ra-226	185.99	4.12E-03	1.28E-03	5.89E-03	1.26E-03	4.90E-03	1.27E-03
Pb-212	238.63	5.80E-03	1.13E-03	6.93E-03	1.13E-03	6.24E-03	1.13E-03
Pb-214	295.22	3.43E-03	9.27E-04	3.25E-03	9.36E-04	2.79E-03	9.33E-04
Ac-228	338.4	1.52E-03	8.39E-04	1.19E-03	8.39E-04	1.30E-03	8.34E-04
Pb-214	351.99	5.56E-03	8.19E-04	5.05E-03	8.20E-04	5.15E-03	8.08E-04
Tl-208	583.14	2.74E-03	5.43E-04	2.88E-03	5.34E-04	2.20E-03	5.29E-04
Bi-214	609.32	5.30E-03	6.07E-04	5.04E-03	5.96E-04	3.88E-03	6.07E-04
Cs-137	661.62	7.81E-04	5.55E-04	Not Detected		Not Detected	
Ac-228	911.07	2.26E-03	4.38E-04	1.45E-03	4.50E-04	2.06E-03	4.38E-04
Ac-228	968.9	9.61E-04	4.23E-04	9.53E-04	4.14E-04	8.46E-04	4.18E-04
Bi-214	1120.28	1.33E-03	4.22E-04	1.20E-03	4.18E-04	1.31E-03	4.24E-04
K-40	1460.75	6.16E-03	3.81E-04	6.21E-03	3.61E-04	5.95E-03	3.79E-04
Bi-214	1764.51	2.18E-03	3.08E-04	2.23E-03	2.97E-04	2.12E-03	3.03E-04

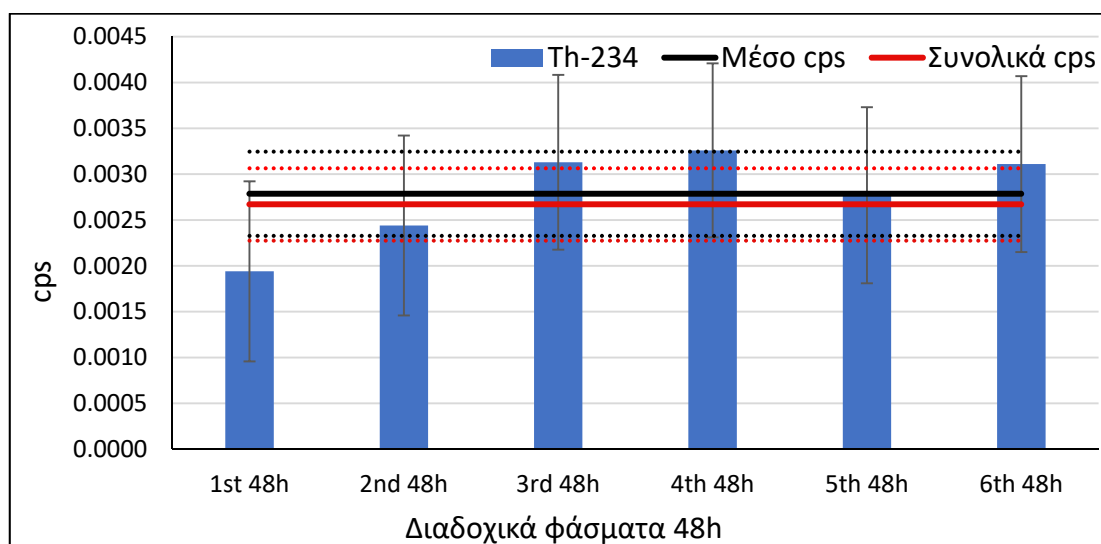
Πίνακας ΣΤ.8 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 4, 5 και 6 στον ανιχνευτή Ge1.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	4° 48h φάσμα		5° 48h φάσμα		6° 48h φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Th-234	63.29	3.26E-03	9.48E-04	2.77E-03	9.60E-04	3.11E-03	9.59E-04
U-235-Ra-226	185.99	4.95E-03	1.26E-03	5.22E-03	1.27E-03	5.30E-03	1.26E-03
Pb-212	238.63	6.15E-03	1.12E-03	6.47E-03	1.12E-03	7.26E-03	1.12E-03
Pb-214	295.22	2.88E-03	9.39E-04	2.37E-03	9.45E-04	2.24E-03	9.39E-04
Ac-228	338.4	2.02E-03	8.28E-04	1.21E-03	8.31E-04	Not Detected	
Pb-214	351.99	4.20E-03	8.22E-04	5.19E-03	8.24E-04	4.50E-03	8.24E-04
Tl-208	583.14	2.67E-03	5.34E-04	2.76E-03	5.32E-04	2.27E-03	5.32E-04
Bi-214	609.32	4.13E-03	6.21E-04	3.86E-03	6.20E-04	4.44E-03	6.14E-04
Cs-137	661.62	8.07E-04	5.47E-04	Not Detected		Not Detected	
Ac-228	911.07	1.33E-03	4.54E-04	1.83E-03	4.33E-04	1.72E-03	4.39E-04
Ac-228	968.9	Not Detected		Not Detected		1.03E-03	4.26E-04
Bi-214	1120.28	1.47E-03	4.11E-04	1.63E-03	4.18E-04	1.59E-03	3.98E-04
K-40	1460.75	6.01E-03	3.75E-04	6.09E-03	3.80E-04	6.09E-03	3.80E-04
Bi-214	1764.51	2.02E-03	2.89E-04	2.12E-03	3.02E-04	1.70E-03	3.13E-04

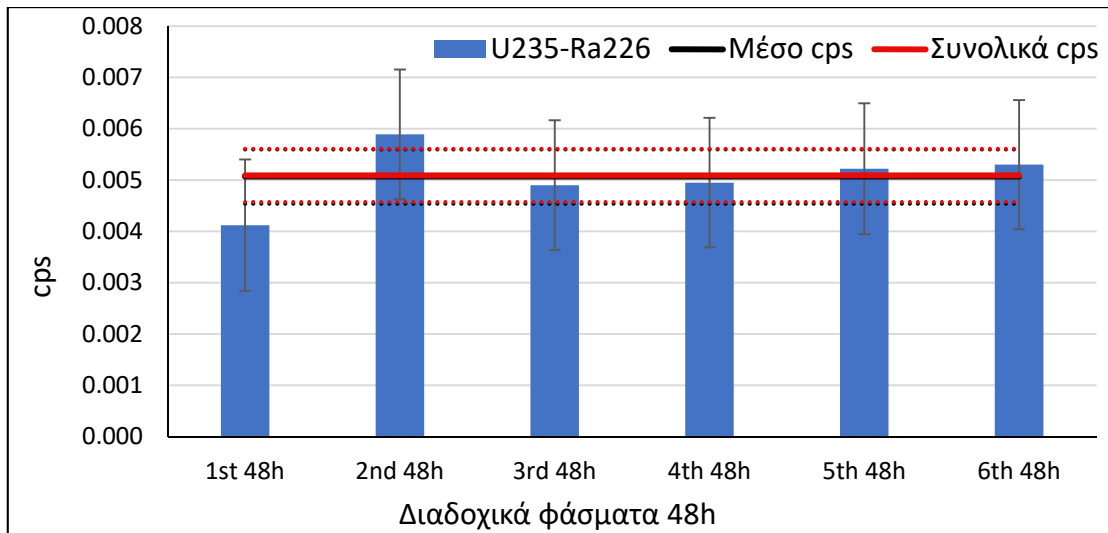
Πίνακας ΣΤ.9 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για το συνολικό και το μέσο φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή Ge1.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	Συνολικό φάσμα		Μέσο φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Th-234	63.29	2.67E-03	3.95E-04	2.79E-03	4.59E-04
U-235-Ra-226	185.99	5.09E-03	5.18E-04	5.07E-03	5.29E-04
Pb-212	238.63	6.48E-03	4.59E-04	6.48E-03	4.90E-04
Pb-214	295.22	2.84E-03	3.82E-04	2.83E-03	4.29E-04
Ac-228	338.4	1.21E-03	3.41E-04	1.45E-03	3.73E-04
Pb-214	351.99	4.95E-03	3.36E-04	4.94E-03	4.55E-04
Tl-208	583.14	2.59E-03	2.18E-04	2.58E-03	2.58E-04
Bi-214	609.32	4.44E-03	2.50E-04	4.45E-03	5.57E-04
Cs-137	661.62	7.15E-04	2.29E-04	7.94E-04	3.90E-04
Ac-228	911.07	1.81E-03	1.80E-04	1.78E-03	3.21E-04
Ac-228	968.9	1.11E-03	2.13E-04	9.47E-04	2.10E-04
Bi-214	1120.28	1.42E-03	1.70E-04	1.43E-03	1.69E-04
K-40	1460.75	6.08E-03	1.55E-04	6.09E-03	1.53E-04
Bi-214	1764.51	2.06E-03	1.24E-04	2.07E-03	1.70E-04

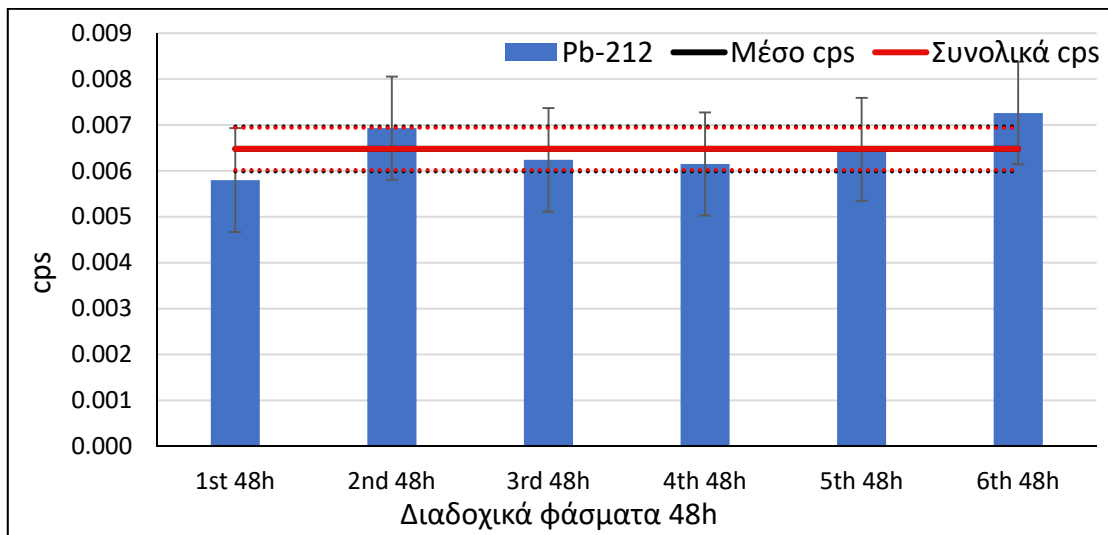
Στα Σχήματα ΣΤ.33-ΣΤ.46 δίνονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες ΣΤ.7-ΣΤ.9.



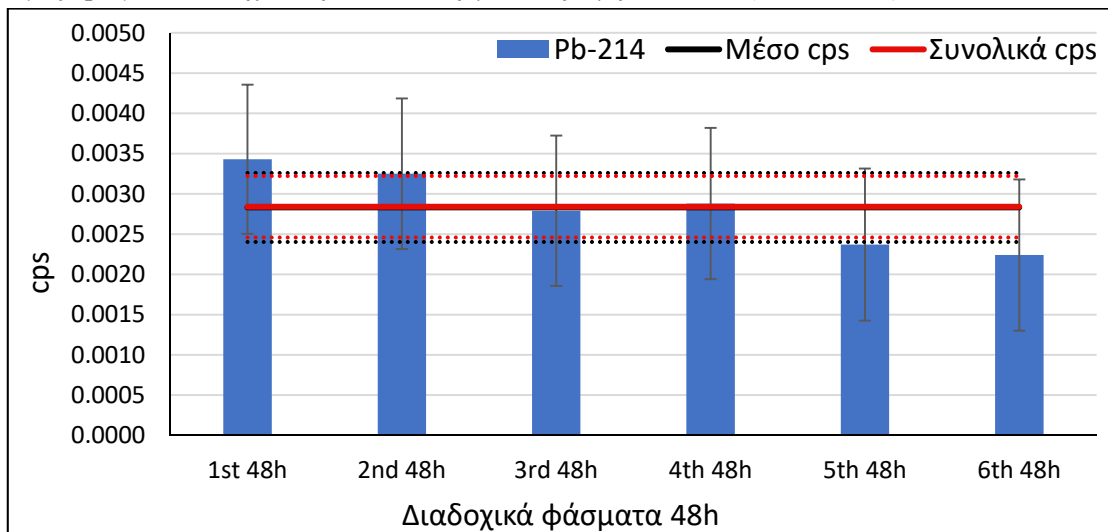
Σχήμα ΣΤ.33 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge1 και τη φωτοκορυφή του ^{234}Th (63.29 keV).



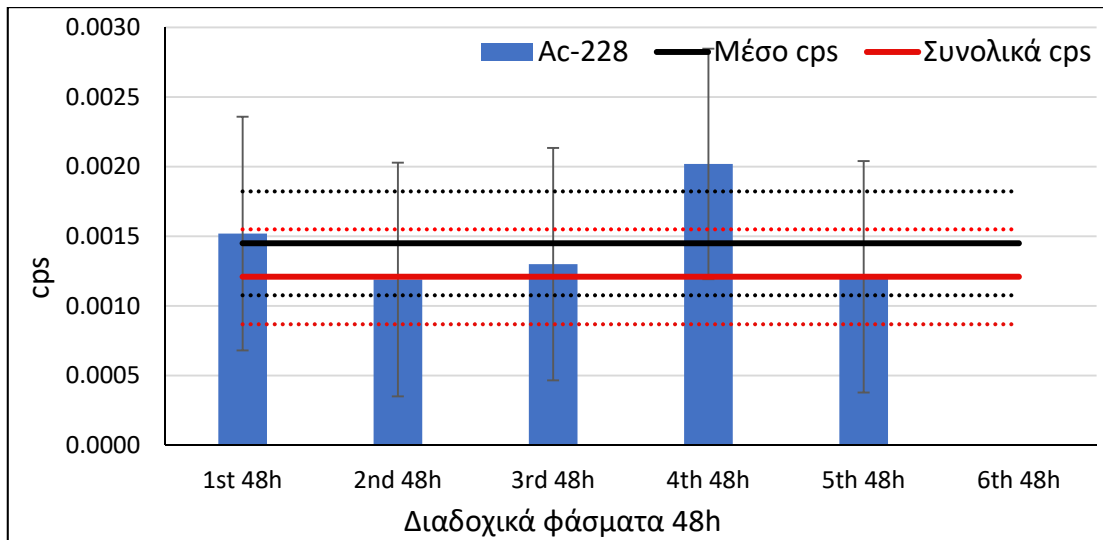
Σχήμα ΣΤ.34 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge1 και την πολλαπλή φωτοκορυφή των ^{235}U - ^{226}Ra (185.99 keV).



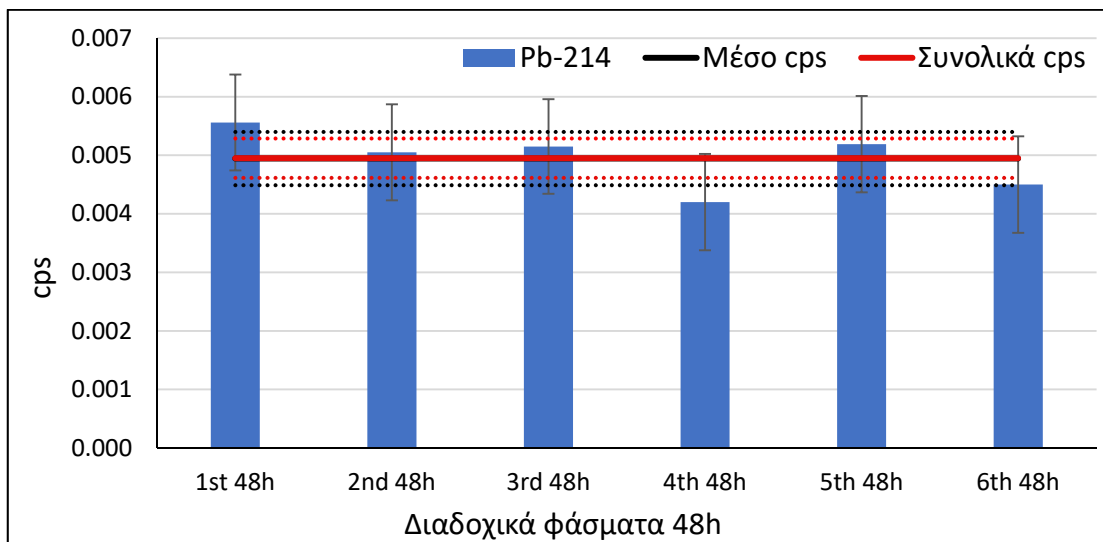
Σχήμα ΣΤ.35 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge1 και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (238.63 keV).



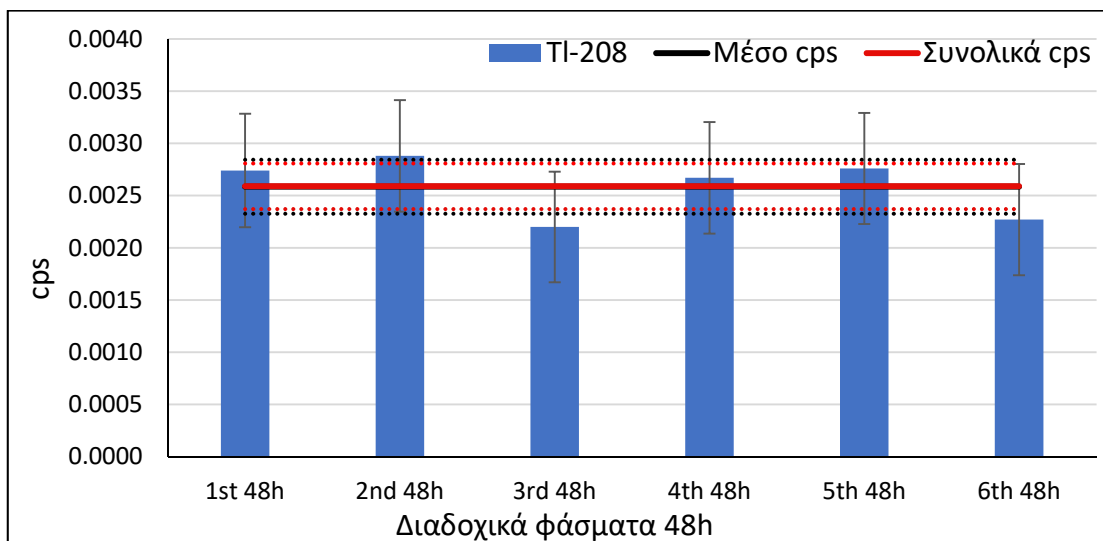
Σχήμα ΣΤ.36 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge1 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (295.22 keV).



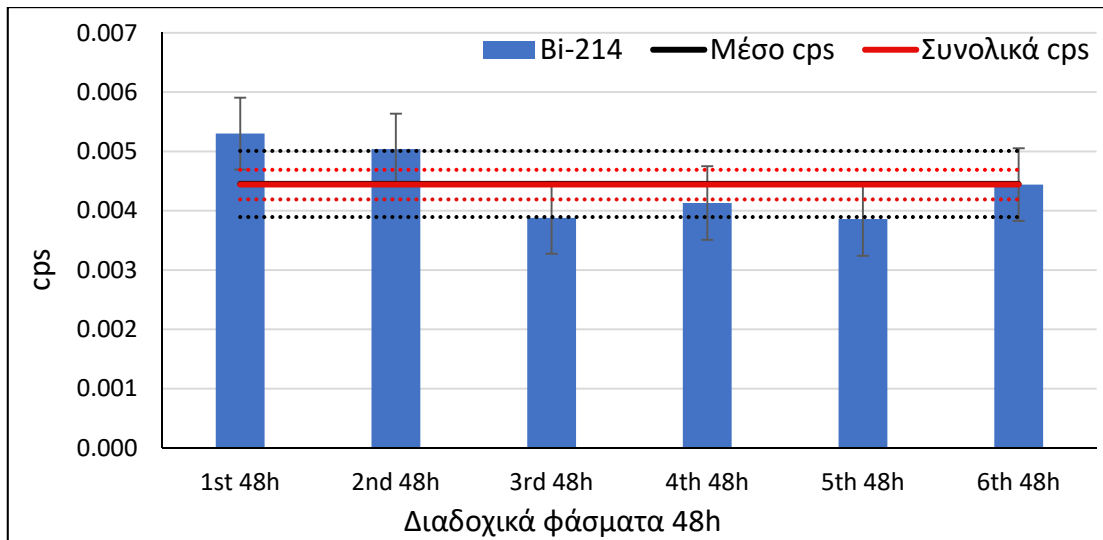
Σχήμα ΣΤ.37 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (338.4 keV).



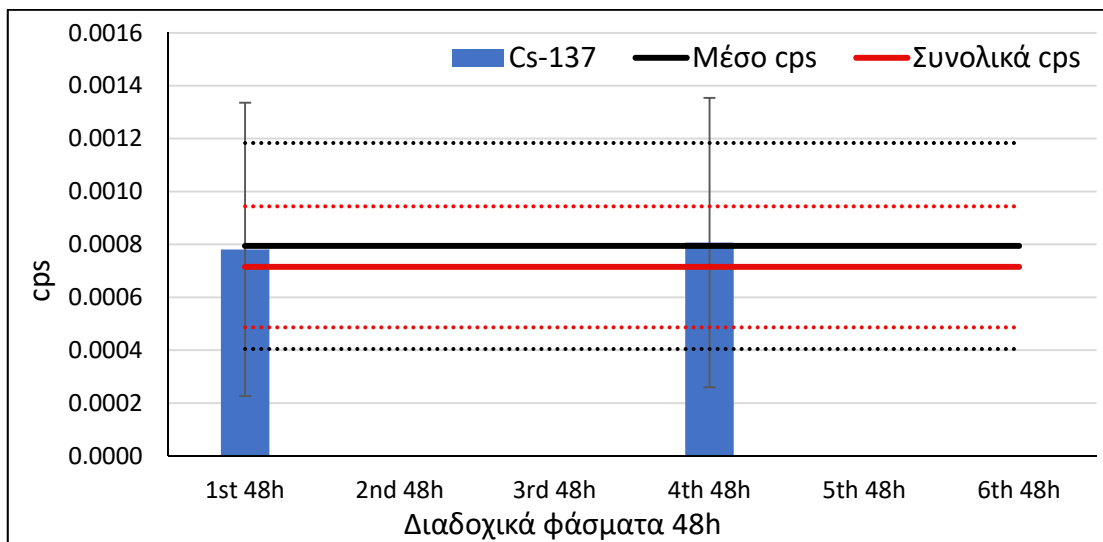
Σχήμα ΣΤ.38 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (351.99 keV).



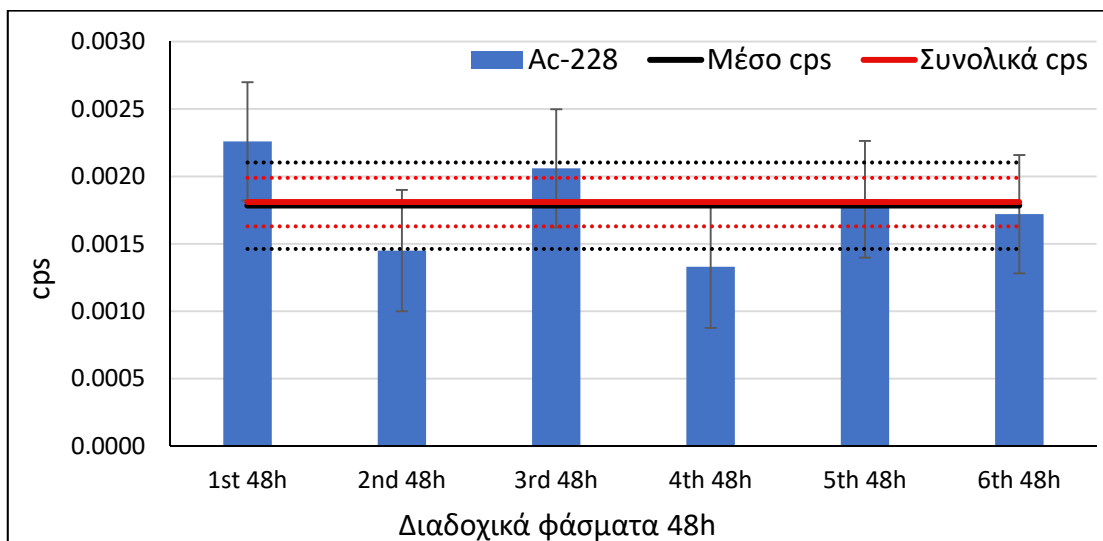
Σχήμα ΣΤ.39 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{208}Tl (583.14 keV).



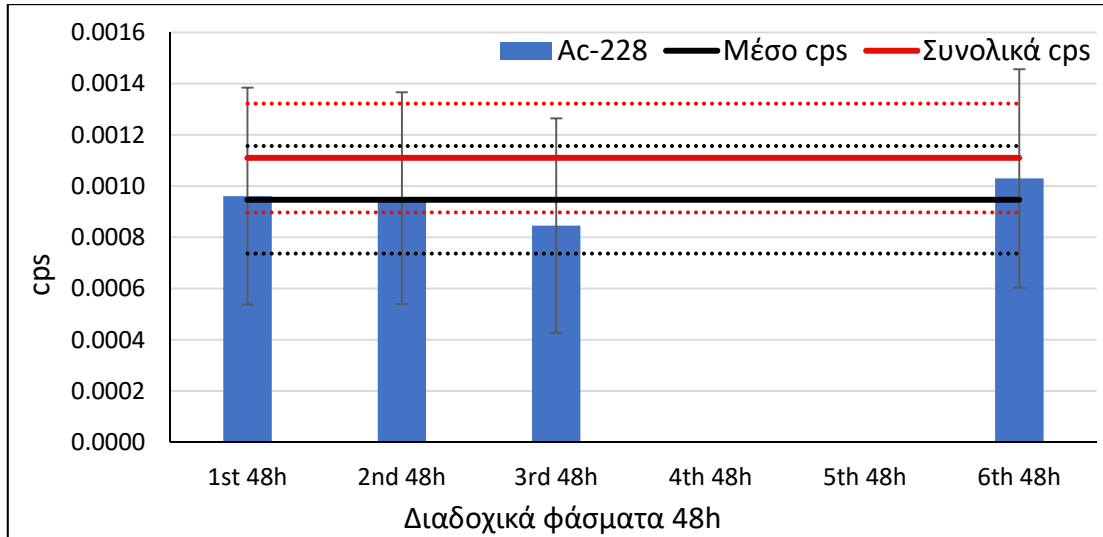
Σχήμα ΣΤ.40 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (609.32 keV).



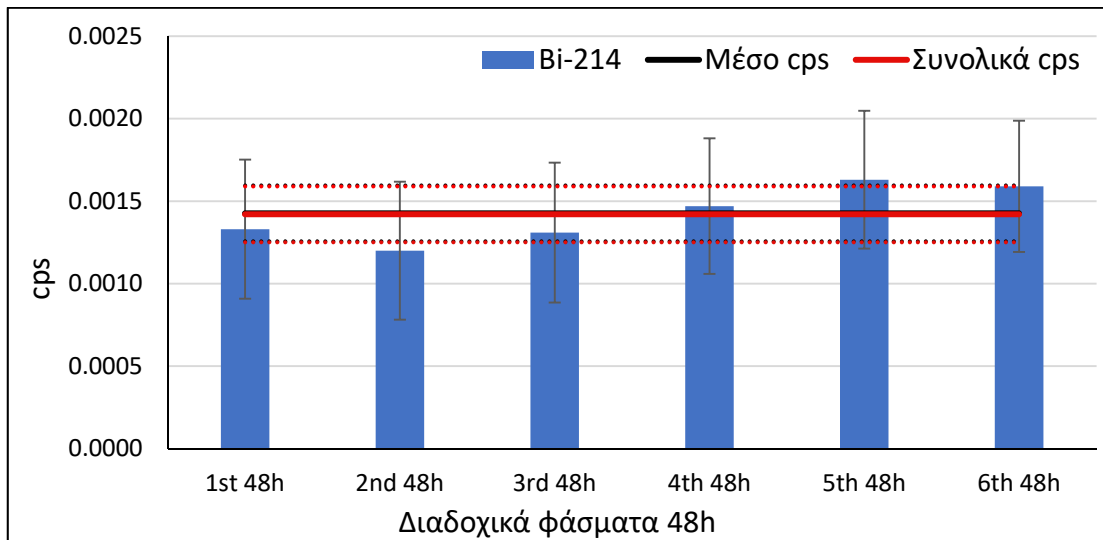
Σχήμα ΣΤ.41 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{137}Cs (661.62 keV).



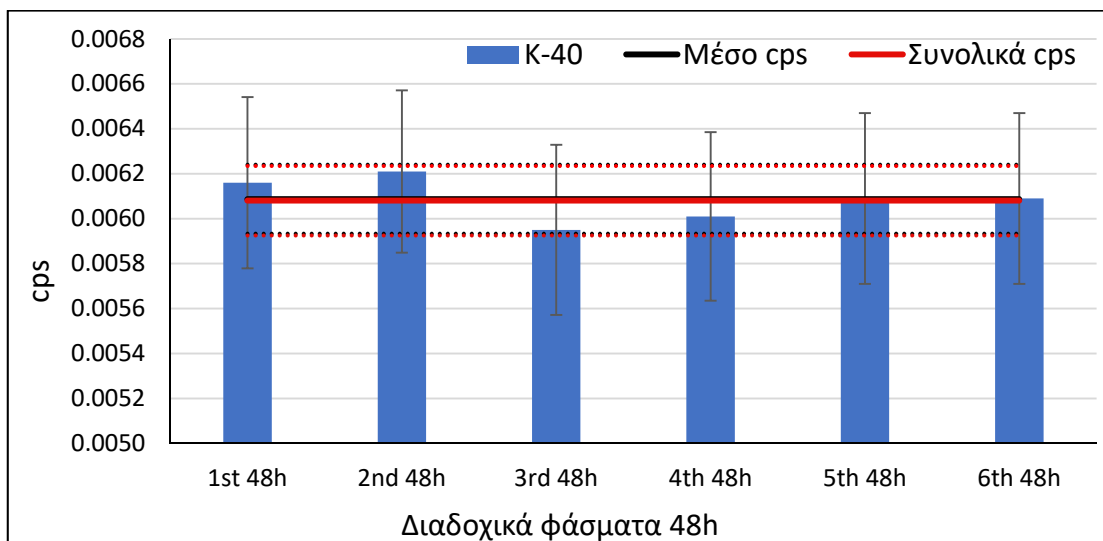
Σχήμα ΣΤ.42 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (911.07 keV).



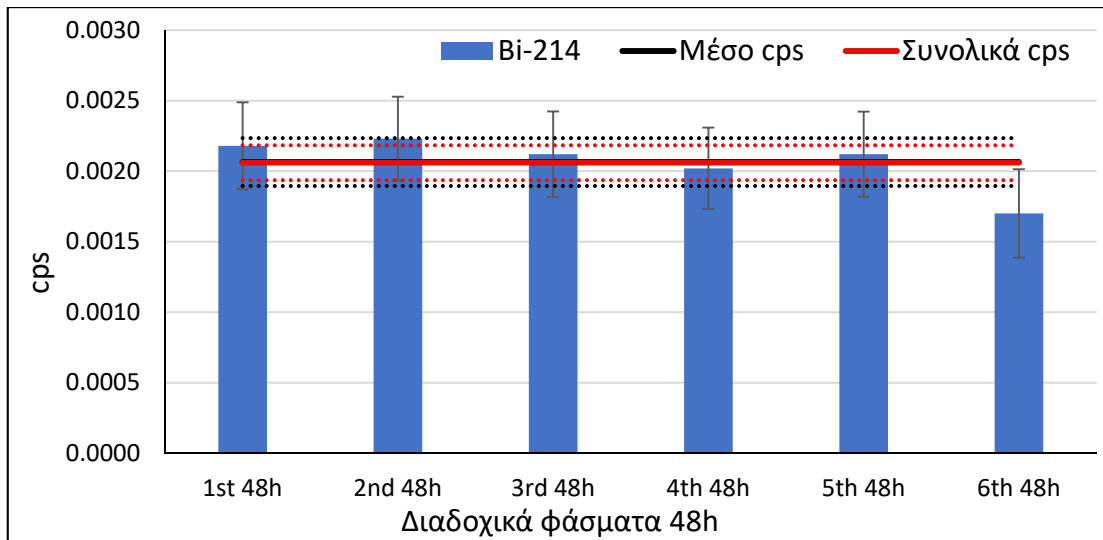
Σχήμα ΣΤ.43 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (968.9 keV).



Σχήμα ΣΤ.44 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1120.28 keV).



Σχήμα ΣΤ.45 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{40}K (1460.75 keV).



Σχήμα ΣΤ.46 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή GeI και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1764.51 keV).

ΣΤ.4 Υπόστρωμα φωτοκορυφών ανιχνευτή Ge2

Στους Πίνακες ΣΤ.10-ΣΤ.12 δίνονται ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) και η αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ των κυρίαρχων φωτοκορυφών υποστρώματος στον ανιχνευτή Ge2 για 6 διαδοχικά φάσματα, το ολικό («Συνολικά cps»), καθώς και το μέσο («Μέσο cps») φάσμα υποστρώματος. Οι φωτοκορυφές δίνονται με σειρά αύξουσας ενέργειας φωτονίων και αντιστοιχίζονται στο ραδιενεργό ισότοπο στο οποίο οφείλεται η εκπομπή τους.

Πίνακας ΣΤ.10 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 1, 2 και 3 στον ανιχνευτή Ge2.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	1° 48h φάσμα		2° 48h φάσμα		3° 48h φάσμα	
		cps	±1σ	cps	±1σ	cps	±1σ
Pb-210	46.52	4.36E-03	6.45E-04	4.36E-03	6.50E-04	4.24E-03	6.55E-04
Th-234	63.29	5.17E-03	7.05E-04	6.32E-03	6.97E-04	5.94E-03	7.02E-04
Pb-212	87.2	3.32E-03	5.37E-04	2.35E-03	5.08E-04	2.59E-03	4.93E-04
U-235-Ra-226	185.99	7.64E-03	8.94E-04	5.73E-03	8.96E-04	6.41E-03	8.97E-04
Pb-212	238.63	2.40E-03	7.80E-04	3.31E-03	8.29E-04	1.27E-03	7.87E-04
Pb-214	295.22	3.02E-03	6.64E-04	4.40E-03	6.64E-04	3.76E-03	6.61E-04
Ac-228	338.4	8.28E-04	5.75E-04	Not Detected		8.84E-04	5.83E-04
Pb-214	351.99	6.10E-03	5.80E-04	5.99E-03	5.88E-04	5.93E-03	5.82E-04
Tl-208A	583.14	7.54E-04	3.89E-04	1.05E-03	3.82E-04	1.29E-03	3.88E-04
Bi-214	609.32	4.64E-03	4.08E-04	4.53E-03	3.95E-04	5.10E-03	4.02E-04
Ac-228	911.07	1.08E-03	3.02E-04	8.85E-04	3.05E-04	9.73E-04	3.21E-04
Ac-228	968.9	5.98E-04	3.00E-04	Not Detected		5.43E-04	3.02E-04
Bi-214	1120.28	1.16E-03	2.66E-04	1.09E-03	2.90E-04	1.47E-03	2.95E-04
K-40	1460.75	3.90E-03	2.65E-04	3.94E-03	2.70E-04	3.72E-03	2.77E-04
Bi-214	1764.51	1.62E-03	2.14E-04	1.68E-03	2.12E-04	1.71E-03	2.19E-04

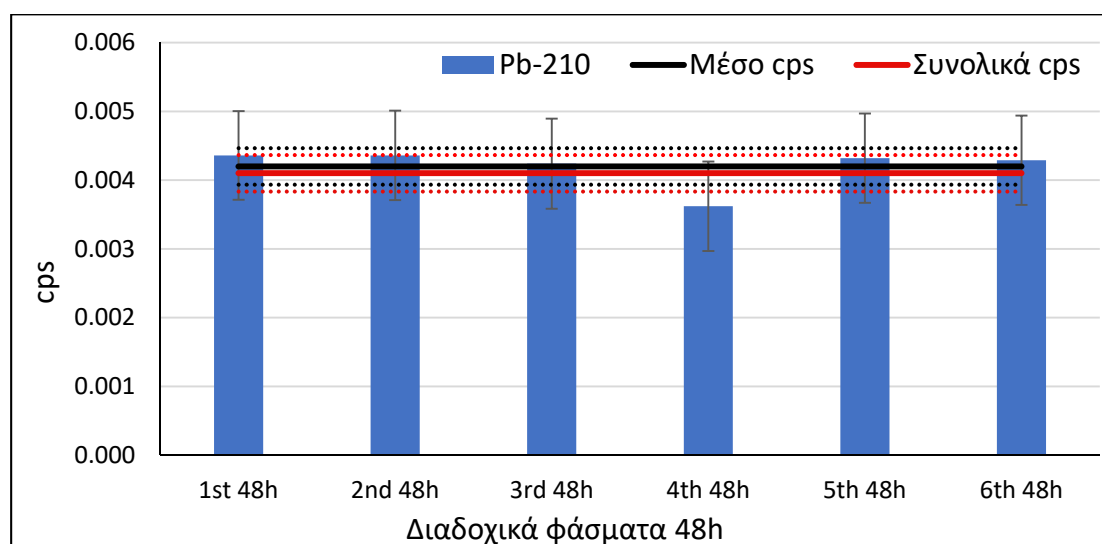
Πίνακας ΣΤ.11 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για τα διαδοχικά φάσματα υποστρώματος 4, 5 και 6 στον ανιχνευτή Ge2.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	4° 48h φάσμα		5° 48h φάσμα		6° 48h φάσμα	
		cps	±1σ	cps	±1σ	cps	±1σ
Pb-210	46.52	3.62E-03	6.52E-04	4.32E-03	6.49E-04	4.29E-03	6.50E-04
Th-234	63.29	6.10E-03	6.84E-04	5.71E-03	6.99E-04	5.25E-03	6.97E-04
Pb-212	87.2	3.07E-03	5.28E-04	2.65E-03	5.16E-04	2.56E-03	5.03E-04
U-235-Ra-226	185.99	6.68E-03	8.95E-04	5.07E-03	9.03E-04	6.54E-03	9.00E-04
Pb-212	238.63	2.86E-03	7.47E-04	1.80E-03	7.80E-04	1.31E-03	7.87E-04
Pb-214	295.22	4.35E-03	6.49E-04	2.81E-03	6.54E-04	3.00E-03	6.53E-04
Ac-228	338.4	Not Detected		Not Detected		8.35E-04	5.89E-04
Pb-214	351.99	6.89E-03	5.76E-04	5.84E-03	5.77E-04	5.20E-03	5.86E-04
Tl-208A	583.14	7.56E-04	3.80E-04	1.20E-03	3.82E-04	1.08E-03	3.83E-04
Bi-214	609.32	4.79E-03	3.95E-04	4.11E-03	3.91E-04	3.93E-03	3.95E-04
Ac-228	911.07	1.24E-03	3.06E-04	8.60E-04	2.91E-04	7.45E-04	3.21E-04
Ac-228	968.9	Not Detected		7.18E-04	2.99E-04	6.44E-04	3.02E-04
Bi-214	1120.28	1.34E-03	2.85E-04	1.36E-03	2.80E-04	1.05E-03	2.77E-04
K-40	1460.75	3.68E-03	2.74E-04	3.56E-03	2.78E-04	3.79E-03	2.76E-04
Bi-214	1764.51	1.80E-03	2.12E-04	1.75E-03	2.09E-04	1.93E-03	2.00E-04

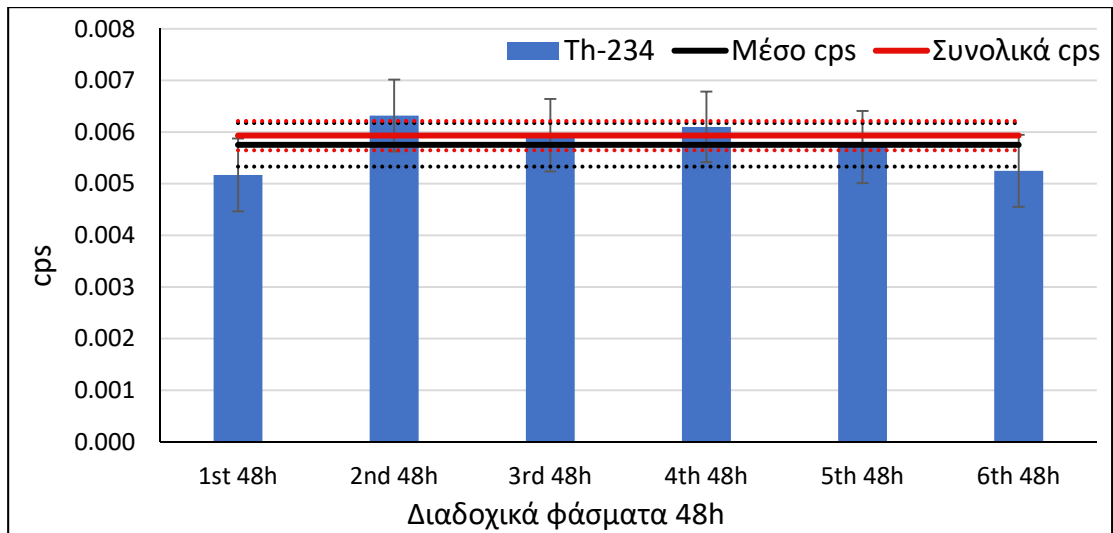
Πίνακας ΣΤ.12 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για το συνολικό και το μέσο φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή Ge2.

Ραδιενεργό Ισότοπο	Ενέργεια Φωτοκορυφής (keV)	Συνολικό φάσμα		Μέσο φάσμα	
		cps	$\pm 1\sigma$	cps	$\pm 1\sigma$
Pb-210	46.52	4.10E-03	2.66E-04	4.20E-03	2.65E-04
Th-234	63.29	5.93E-03	2.84E-04	5.75E-03	4.22E-04
Pb-212	87.2	3.12E-03	2.78E-04	2.74E-03	3.24E-04
U-235-Ra-226	185.99	6.34E-03	3.65E-04	6.35E-03	7.99E-04
Pb-212	238.63	2.93E-03	3.39E-04	2.15E-03	7.54E-04
Pb-214	295.22	3.55E-03	2.69E-04	3.56E-03	6.51E-04
Ac-228	338.4	6.27E-04	2.36E-04	8.49E-04	3.36E-04
Pb-214	351.99	5.99E-03	2.36E-04	6.00E-03	4.96E-04
Tl-208A	583.14	9.84E-04	1.57E-04	1.02E-03	2.04E-04
Bi-214	609.32	4.52E-03	1.62E-04	4.51E-03	3.96E-04
Ac-228	911.07	9.35E-04	1.26E-04	9.66E-04	1.60E-04
Ac-228	968.9	4.96E-04	1.25E-04	6.26E-04	1.50E-04
Bi-214	1120.28	1.26E-03	1.15E-04	1.24E-03	1.52E-04
K-40	1460.75	3.76E-03	1.12E-04	3.77E-03	1.30E-04
Bi-214	1764.51	1.75E-03	8.59E-05	1.75E-03	1.01E-04

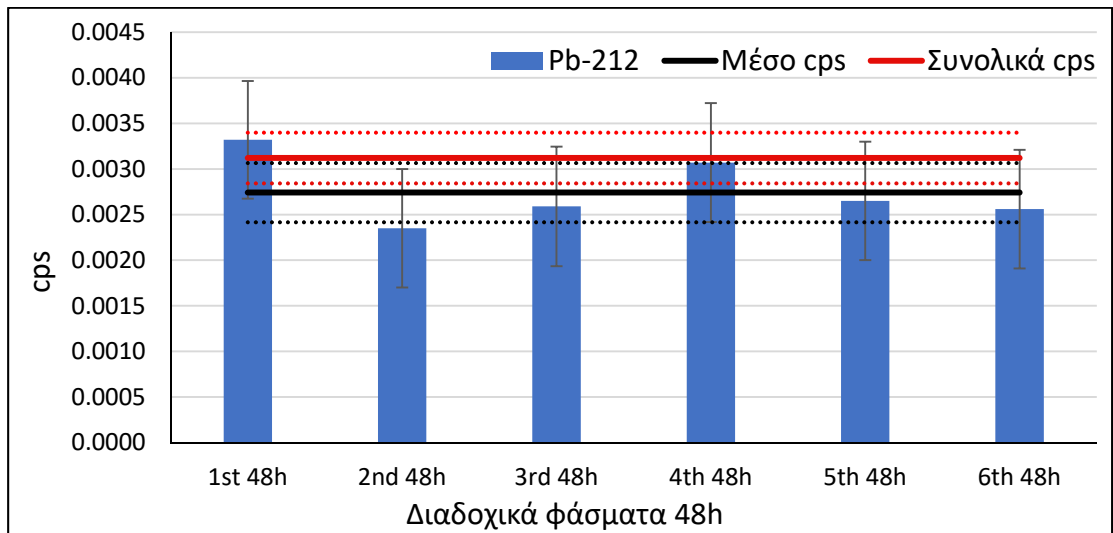
Στα Σχήματα ΣΤ.47-ΣΤ.61 δίνονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες ΣΤ.10-ΣΤ.12.



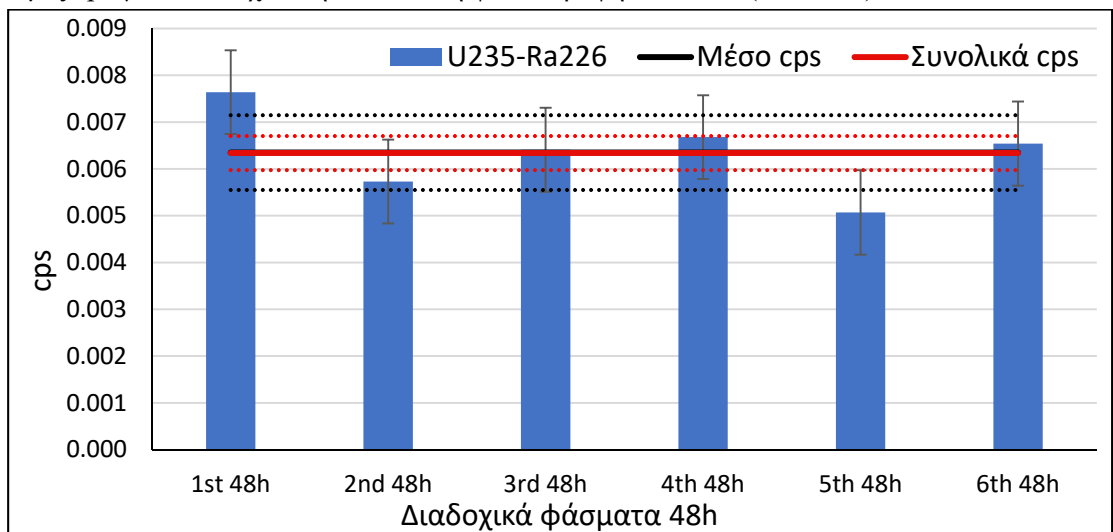
Σχήμα ΣΤ.47 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{210}Pb (46.52 keV).



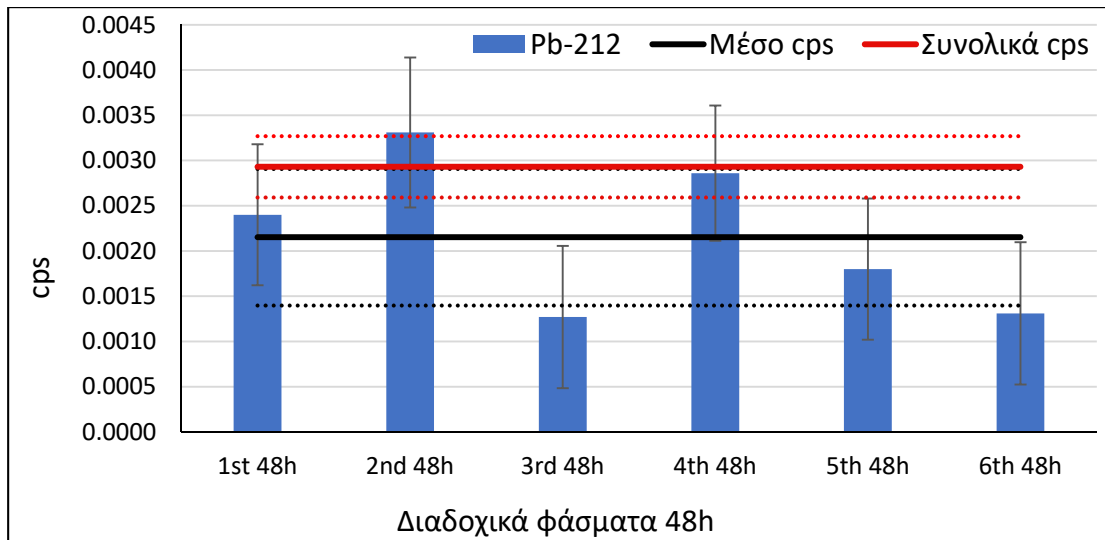
Σχήμα ΣΤ.48 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και την φωτοκορυφή του ^{234}Th (63.29 keV).



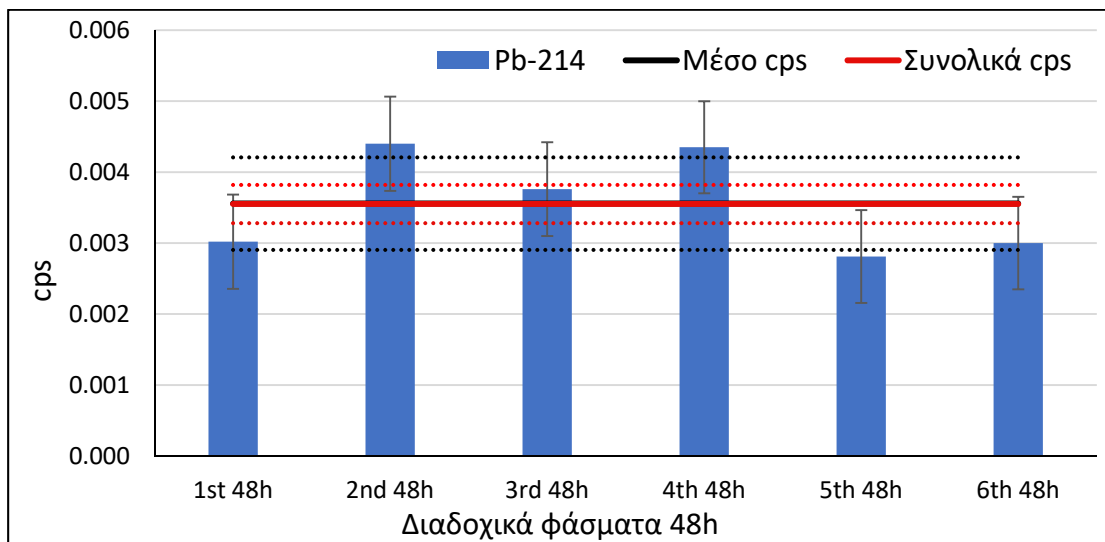
Σχήμα ΣΤ.49 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (87.2 keV).



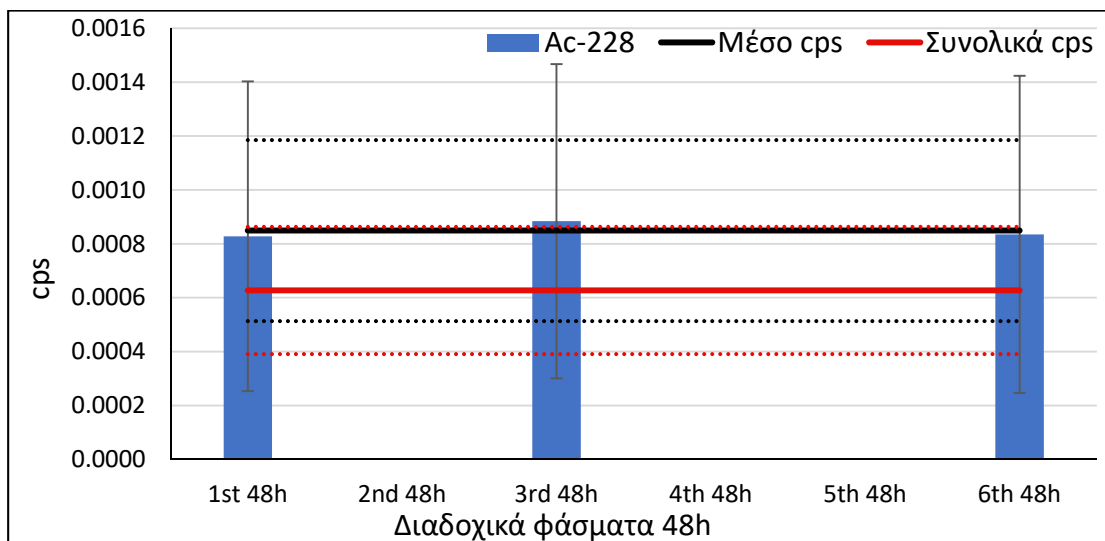
Σχήμα ΣΤ.50 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και την πολλαπλή φωτοκορυφή των ^{235}U - ^{226}Ra (185.99 keV).



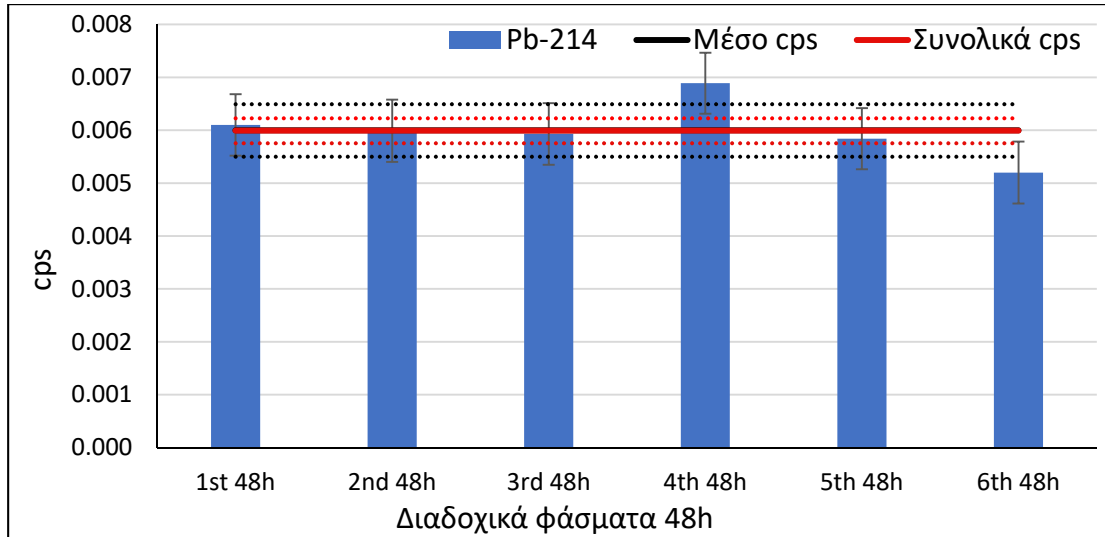
Σχήμα ΣΤ.51 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{212}Pb (238.63 keV).



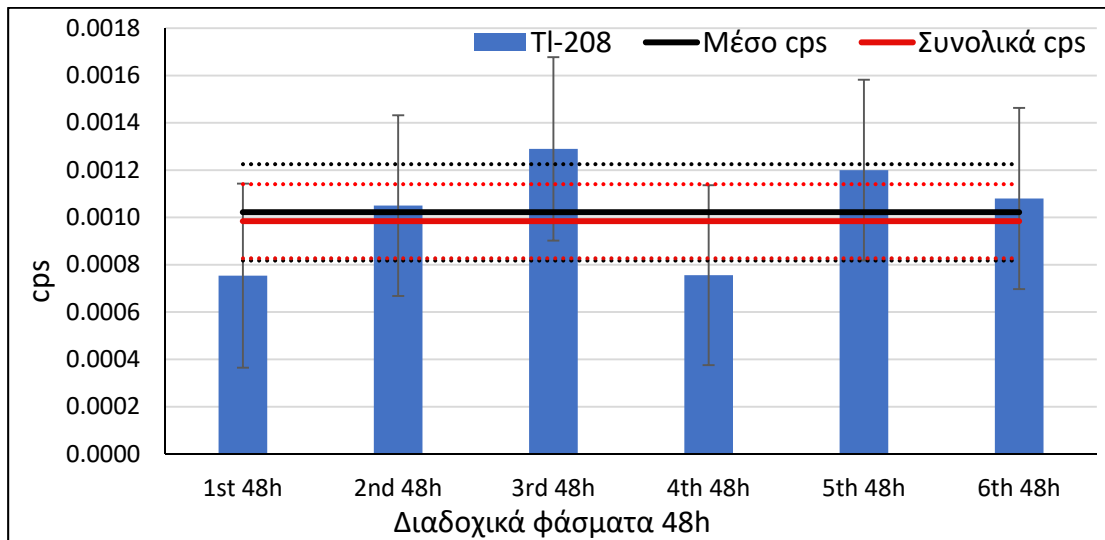
Σχήμα ΣΤ.52 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (295.22 keV).



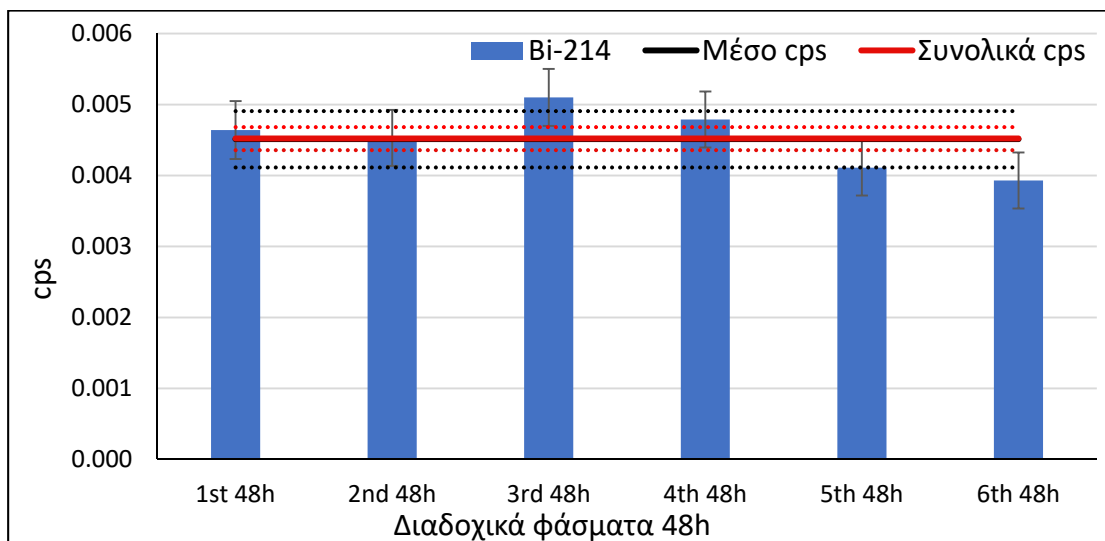
Σχήμα ΣΤ.53 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (338.4 keV).



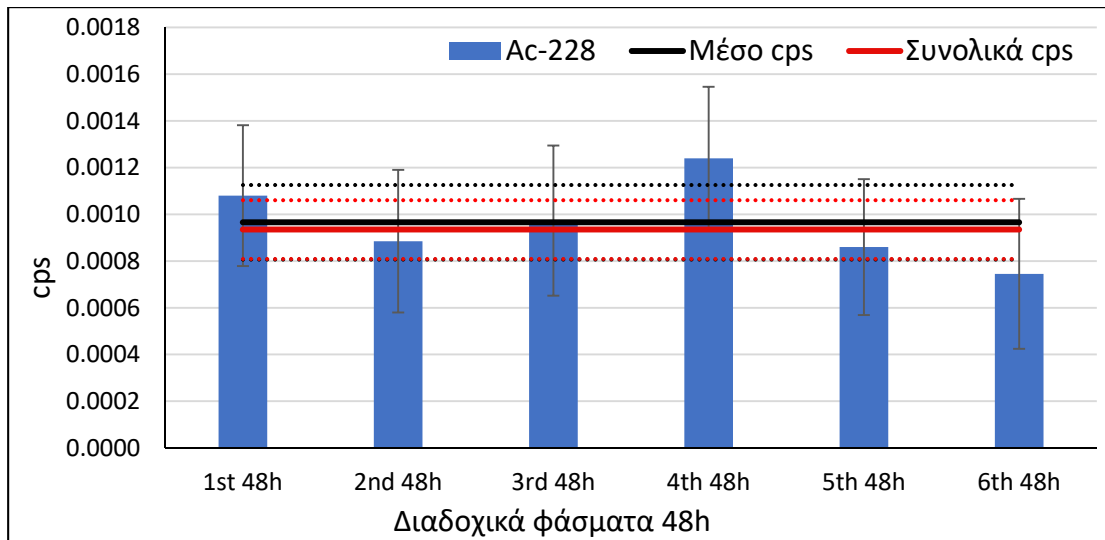
Σχήμα ΣΤ.54 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Pb (351.99 keV).



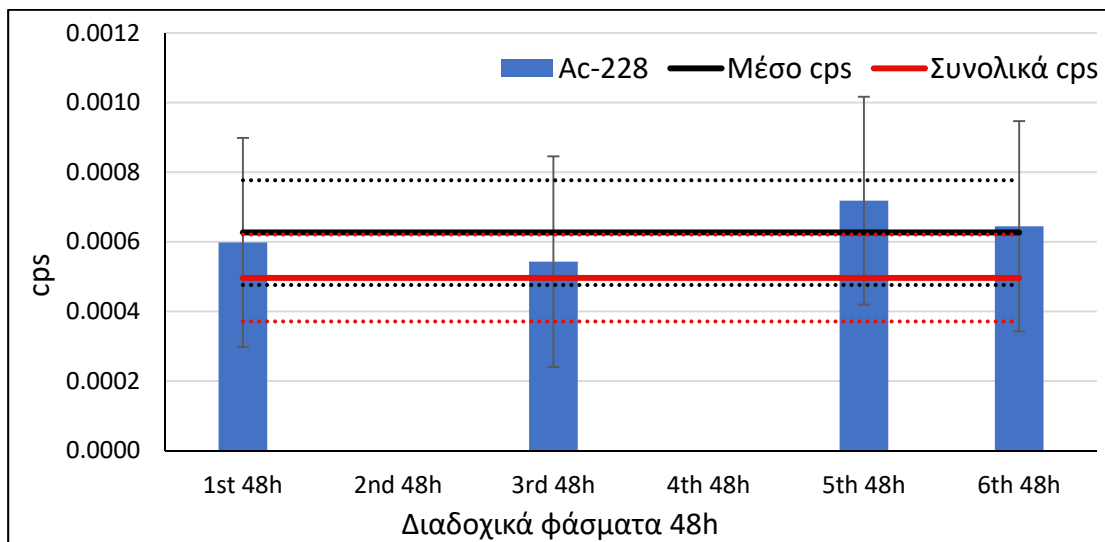
Σχήμα ΣΤ.55 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{208}Tl (583.14 keV).



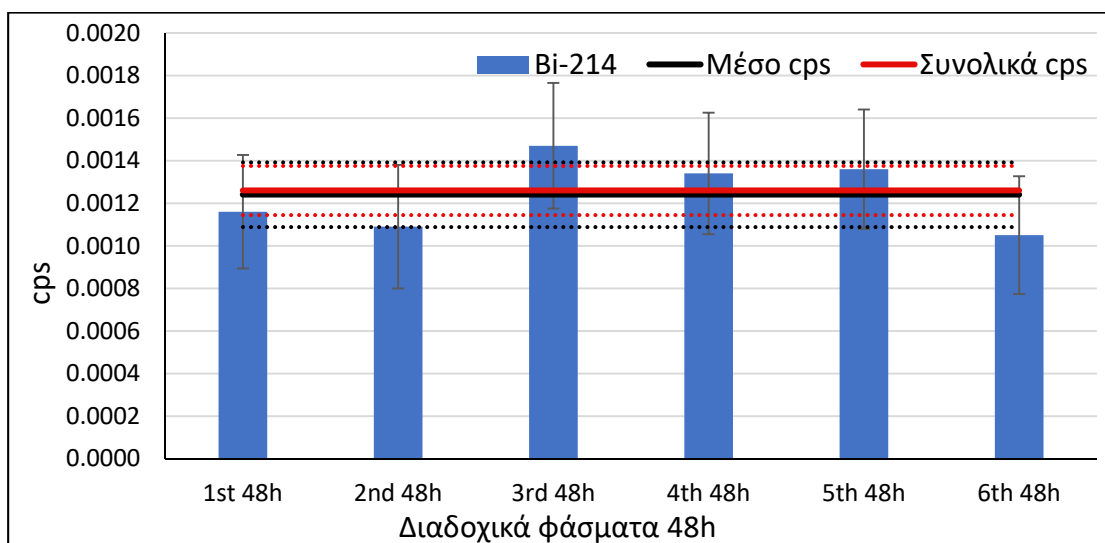
Σχήμα ΣΤ.56 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (609.32 keV).



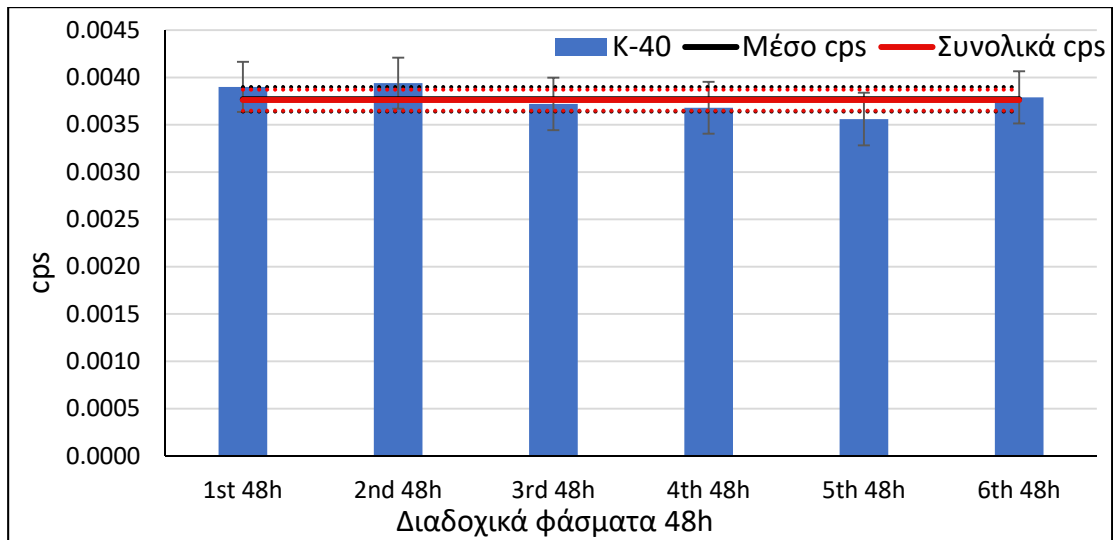
Σχήμα ΣΤ.57 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (911.07 keV).



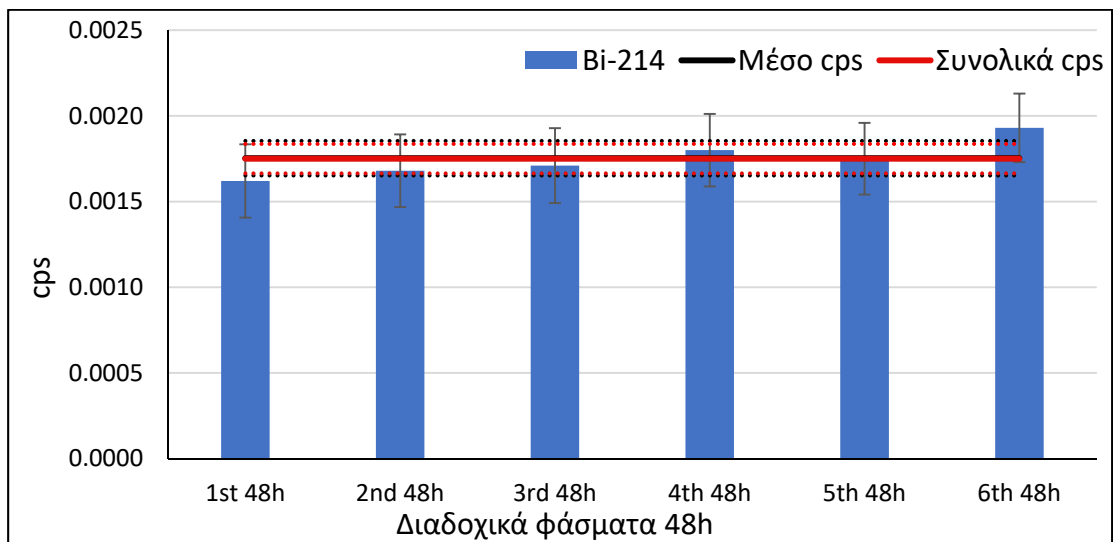
Σχήμα ΣΤ.58 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{228}Ac (968.9 keV).



Σχήμα ΣΤ.59 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1120.28 keV).



Σχήμα ΣΤ.60 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{40}K (1460.75 keV).



Σχήμα ΣΤ.61 : Διαδοχικά φάσματα υποστρώματος με συνολικές και σταθμισμένες μέσες τιμές cps για τον ανιχνευτή Ge2 και τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi (1764.51 keV).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Συνοπτική περιγραφή εργαλείου «Radical»

Στο παράρτημα Ζ παρουσιάζεται το υπολογιστικό φύλλο excel Radical που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ.. Το εργαλείο Radical δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ 5 διαφορετικών ανιχνευτών οι οποίοι προσδιορίζονται μέσω των αντίστοιχων βαθμονομήσεών τους (ενέργειας, διακριτικής ικανότητας και απόδοσης). Στη συνέχεια, ο χρήστης εισάγοντας τις απαραίτητες πληροφορίες, όπως αυτές θα αναλυθούν στην πορεία, μπορεί να προσδιορίσει τη συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων στο δείγμα ενδιαφέροντος, καθώς και τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης. Επιπροσθέτως, περιλαμβάνεται η δυνατότητα εκτέλεσης κάποιων συνήθων υπολογισμών που χρειάζονται κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ραδιενεργών ισοτόπων. Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα από τα επιμέρους υπολογιστικά φύλλα του εργαλείου Radical.

Το υπολογιστικό εργαλείο Radical, όπως αυτό διαμορφώθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ., περιλαμβάνει στο σύνολό του 11 βασικές καρτέλες. Κάθε επιμέρους καρτέλα, καθώς και η λειτουργία της δίνονται συνοπτικά στη λίστα που ακολουθεί:

Λίστα Καρτελών Υπολογιστικού Εργαλείου Radical:

i. «Sample Name»

Η παρούσα καρτέλα παίρνει το όνομα του εκάστοτε δείγματος προς ανάλυση και έχει τη δυνατότητα εισαγωγής 20 διαφορετικών ραδιενεργών ισοτόπων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα:

- σε 5 ανιχνευτές (XtRa, XtCSS, LEGe, HPGe(33.8%) (που στο εργαλείο Radical ονομάζεται Ge), HPGe(40.9%) (που στο εργαλείο Radical ονομάζεται Ge-40)
- σε 8 διαφορετικές βαθμονομημένες γεωμετρίες (δίνεται πίνακας όπου διευκρινίζεται ποια γεωμετρία, για ποιον ανιχνευτή και για ποιο υλικό είναι βαθμονομημένη)
- σε 3 διαφορετικά υλικά δειγμάτων

Ακόμα, ο χρήστης εισάγει:

- τη μάζα ή τον όγκο (για φίλτρα αέρα) του δείγματος
- την ημερομηνία συλλογής και ανάλυσης του δείγματος
- τη χρονική διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του δείγματος
- τις συνοδευόμενες αβεβαιότητες βαθμονόμησης
- το ραδιενεργό ισότοπο με
 - ❖ τον χρόνο ημιζωής του
 - ❖ τις ενέργειες και τα ποσοστά εκπομπής των κυρίαρχων φωτονίων του
 - ❖ την επιφάνεια φωτοκορυφής κάθε φωτονίου και την αβεβαιότητά της σε επίπεδο 1.65σ, όπως αυτά προσδιορίζονται από το λογισμικό SPUNAL
- τον συντελεστή διόρθωσης για το φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης για όσες φωτοκορυφές απαιτείται
- τον συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης στην περίπτωση διεξαγωγής υπολογισμών για συνδυασμό «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος-ανιχνευτή» διαφορετικό από τους ήδη έτοιμους.

Ως τελικό αποτέλεσμα δίνεται η μέση σταθμισμένη συγκέντρωση ενεργότητας για κάθε ραδιενεργό ισότοπο, όπως αυτή προκύπτει από τις επιμέρους φωτοκορυφές του, συνοδευόμενη με τις κατάλληλες διορθώσεις διάσπασης.

ii. «XtRa», «XtCSS», «LEGe», «Ge», «Ge-40»

Στις 5 αυτές καρτέλες δίνονται για κάθε ανιχνευτή που χρησιμοποιείται στο Radical:

- οι συντελεστές της ενεργειακής βαθμονόμησης κάθε ανιχνευτή
- οι συντελεστές της βαθμονόμησης διακριτικής ικανότητας κάθε ανιχνευτή
- οι συντελεστές βαθμονόμησης απόδοσης για κάθε συνδυασμό γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος-ανιχνευτή που χρησιμοποιείται στο εργαλείο Radical.

Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται ως αρχεία εισόδου από την καρτέλα «Sample Name» για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα σε κάθε επιμέρους καρτέλα να χρησιμοποιήσει του συντελεστές αυτούς για ανεξάρτητους υπολογισμούς ενεργειακής βαθμονόμησης, βαθμονόμησης διακριτικής ικανότητας ή βαθμονόμησης απόδοσης.

iii. «BG»

Στην καρτέλα αυτή περιέχονται τα δεδομένα για το υπόστρωμα φωτοκορυφών για κάθε ανιχνευτή που περιέχεται στο Radical, ώστε να χρησιμοποιούνται ως αρχεία εισόδου για την καρτέλα «Sample Name» και να γίνεται αυτοματοποιημένα η διόρθωση των φωτοκορυφών των δειγμάτων ως προς τις φωτοκορυφές υποστρώματος. Επίσης, στην καρτέλα περιέχονται και τα φάσματα υποστρώματος κάθε ανιχνευτή σε μορφή λίστας καναλιών με τις αντίστοιχες κρούσεις το κάθε ένα, ώστε να χρησιμοποιούνται ως αρχεία εισόδου για την καρτέλα «Detection Limits» που ακολουθεί, όπου γίνεται ο υπολογισμός των κατώτερων επιπέδων ανίχνευσης.

iv. «Detection Limits»

Στην καρτέλα αυτή, αντίστοιχα με την καρτέλα «Sample Name» ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το συνδυασμό γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος-ανιχνευτή που χρειάζεται, να εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα του δείγματος προς επεξεργασία, και εισάγοντας για κάθε φωτοκορυφή ενδιαφέροντος την ενέργεια, το ποσοστό εκπομπής, το κανάλι του κεντροειδούς της, καθώς και το FW.1M να υπολογίσει τις τιμές του Ld, του MDA και του Lc (Decision Threshold).

v. «Various Calculations»

Η καρτέλα αυτή δημιουργήθηκε, για να επικουρεί στη διαδικασία επεξεργασίας ενός φάσματος και προσφέρει στον χρήστη τις δυνατότητες:

- Υπολογισμού της ενέργειας φωτονίων ύστερα από σκέδαση Compton για όλο το πιθανό εύρος γωνιών σκέδασης.
- Υπολογισμού διορθώσεων διάσπασης.
- Εφαρμογής του U-test για να διαπιστωθεί αν δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ή όχι μεταξύ τους.
- Εφαρμογή T-test για να διερευνηθεί αν ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 που προκύπτει από μια οποιαδήποτε συσχέτιση δύο μεγεθών είναι στατιστικά σημαντικά διάφορος του μηδενός.

vi. «Normal Distr. Table», «Student Distr. Table»

Οι καρτέλες αυτές περιέχουν τους πίνακες της Κανονικής Κατανομής και της Κατανομής Student, ώστε να χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στους

υπολογισμούς του T-test που λαμβάνει χώρα στην καρτέλα «Various Calculations».

Στα Σχήματα που ακολουθούν περιέχονται στιγμιότυπα από τις διάφορες καρτέλες του υπολογιστικού εργαλείου Radical.

DETECTOR OPTIONS	XtRa 1	Xt-CSS 2	LEGe 3	Ge 4	Ge-40 5	Sample						Uncertainties % (1σ)																																																																																		
GEOMETRY OPTIONS	geom2 1	geom5 2	geom8 3	geom10 4	geomPetri 5	geomPetricap 6	geomAlcap 7	geomELKETHE 8	Mass Net (gr) or (Litres)	Geometry	Reference date (dd/mm/yyyy)	Analysed on	Collect Time (sec)	Total days (for decay correction)	Weighing	0.010%																																																																														
MATERIAL OPTIONS	4MHCL 1	Soil3% 2	Air Filter 3	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Available combinations</th> <th colspan="8">Material & Geometry</th> </tr> <tr> <th colspan="3">4MHCL</th> <th colspan="2">Air Filter</th> <th colspan="3">Soil3%</th> </tr> <tr> <th>Detector</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>8</th> <th>10</th> <th>Petri</th> <th>Petricap</th> <th>Alcap</th> <th>Elkethe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>XtRa</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Xt-CSS</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>LEGe</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> </tr> <tr> <td>Ge</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ge-40</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>												Available combinations	Material & Geometry								4MHCL			Air Filter		Soil3%			Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe	XtRa	√	√	√	√	√				Xt-CSS	√	√	√	√					LEGe	√	√	√		√	√	√	√	Ge	√	√	√						Ge-40	√								282.00	geom2	10/07/2017	10/10/2017	80000	92.46	Simulation	0.00%
Available combinations	Material & Geometry																																																																																													
	4MHCL			Air Filter		Soil3%																																																																																								
Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe																																																																																						
XtRa	√	√	√	√	√																																																																																									
Xt-CSS	√	√	√	√																																																																																										
LEGe	√	√	√		√	√	√	√																																																																																						
Ge	√	√	√																																																																																											
Ge-40	√																																																																																													
DETECTOR	XtRa	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Detector</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>8</th> <th>10</th> <th>Petri</th> <th>Petricap</th> <th>Alcap</th> <th>Elkethe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>XtRa</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Xt-CSS</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>LEGe</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> </tr> <tr> <td>Ge</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ge-40</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>															Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe	XtRa	√	√	√	√	√				Xt-CSS	√	√	√	√					LEGe	√	√	√		√	√	√	√	Ge	√	√	√						Ge-40	√																															
Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe																																																																																						
XtRa	√	√	√	√	√																																																																																									
Xt-CSS	√	√	√	√																																																																																										
LEGe	√	√	√		√	√	√	√																																																																																						
Ge	√	√	√																																																																																											
Ge-40	√																																																																																													
Geometry	geom2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Detector</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>8</th> <th>10</th> <th>Petri</th> <th>Petricap</th> <th>Alcap</th> <th>Elkethe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>XtRa</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Xt-CSS</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>LEGe</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> </tr> <tr> <td>Ge</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ge-40</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>															Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe	XtRa	√	√	√	√	√				Xt-CSS	√	√	√	√					LEGe	√	√	√		√	√	√	√	Ge	√	√	√						Ge-40	√																															
Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe																																																																																						
XtRa	√	√	√	√	√																																																																																									
Xt-CSS	√	√	√	√																																																																																										
LEGe	√	√	√		√	√	√	√																																																																																						
Ge	√	√	√																																																																																											
Ge-40	√																																																																																													
Material	4MHCL	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Detector</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>8</th> <th>10</th> <th>Petri</th> <th>Petricap</th> <th>Alcap</th> <th>Elkethe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>XtRa</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Xt-CSS</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>LEGe</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> </tr> <tr> <td>Ge</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ge-40</td> <td>√</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>															Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe	XtRa	√	√	√	√	√				Xt-CSS	√	√	√	√					LEGe	√	√	√		√	√	√	√	Ge	√	√	√						Ge-40	√																															
Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe																																																																																						
XtRa	√	√	√	√	√																																																																																									
Xt-CSS	√	√	√	√																																																																																										
LEGe	√	√	√		√	√	√	√																																																																																						
Ge	√	√	√																																																																																											
Ge-40	√																																																																																													

Διόρθωση διάσπασης από τη μέση της ανάλυσης

*Currently for simulated geometries there is a 1.26% uncertainty in 1σ

Δεδομένα Δείγματος & Ανάλυσης

Εισαγωγή Πρόσθετων Αβεβαιοτήτων

Επιλογή Ανιχνευτή

Επιλογή Γεωμετρίας

Επιλογή Υλικού

Διαθέσιμοι Συνδυασμοί Γεωμετρίας-Ανιχνευτή-Υλικού

True/False	Radionuclide	T1/2 (days)	λ	Insert 1:Included 0:Not Included	Peak Energy (keV)	Yield (%)	Area (given by spunal)	True coinc. Corr. Factor	Area Corr.	Uncertainty (90%)	Eff. Corr. Factor	eff	Activity (Bq)	Activity[Ri] (Bq/kg)	1σ (of Area given by spunal)	σ _{rel} (cps)*Collect time	Collect Time*Mass*Yield*Eff	1σ (Bq/kg)
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00
Not Inc luded			#DIV/0!	0				1.000	0		1.000	#NUM!	0.00	0.00	0.00	0.00	#NUM!	0.00

Δεδομένα Ραδιενεργού Ισοτόπου

Δεδομένα Φωτοκορυφών

Σχήμα Z.1 : Μέρος 1^ο της καρτέλας «Sample Name»

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Channel → Energy,FW.1M			Συντελεστές Ενεργειακής Βαθμονόμησης		Energy → Channel		Calculations for FW.1M in eV			
Energy factors					Channel	120.1673966	FW.1M from ch	FW.1M to ch	118.2592739	122.0755193
ao	0.4022737				Energy	59.54		Energy from	Energy to	
a1	0.4921308							58.60	60.47903472	
a2	-2.42866E-08									
FW.1M factors			Συντελεστές Βαθμονόμησης Διακριτικής Ικανότητας		FW.1M → Channel					
ao	3.607552				Channel	3124.157781	FW.1M	8.84		
a1	0.001739201									
a2	-2.09101E-08									
channel	120.1673966									
Peak Efficiency										
geom2			Energy (keV)	Peak Efficiency	4M HCL	Συντελεστές από Προσομοίωση των γεωμετριών από Δ.Δ. Μ.Σάββα (σελ. 205)				
	<279.19 keV	>279.19 keV								
ao	-8.89102	1.22497	59.54	0.060285814						
a1	2.72877	-0.9071								
a2	-0.30353	0.02313								
geom5			Energy (keV)	Peak Efficiency	Air Filter	Συντελεστές από calceif από calceif				
	<279.19 keV	>279.19 keV								
ao	-8.64586	1.14905	59.54	0.128387005						
a1	2.98768	-0.6436								
a2	-0.3363	-0.00052								
geom8			Energy (keV)	Peak Efficiency	Soil 3%	Συντελεστές από προσομοίωση 1.Μήτσου				
	<279.19 keV	>279.19 keV								
ao	-7.99385	1.78212	59.54	0.172514865						
a1	2.86099	-0.74892								
a2	-0.32665	0.00596								
geom10			Energy (keV)	Peak Efficiency	Soil 3%	Συντελεστές από προσομοίωση 1.Μήτσου				
	<279.19 keV	>279.19 keV								
ao	-7.233441	1.573618	59.54	0.195248134						
a1	2.58677	-0.6589579								
a2	-0.297668	0.000708808								
geomPetri			Energy (keV)	Peak Efficiency	Soil 3%	Συντελεστές από προσομοίωση 1.Μήτσου				
	<279.19 keV	>279.19 keV								
ao	-10.549	2.2045	59.54	0.18498472						
a1	3.9367	-0.8206								
a2	-0.4327	0.0101								

Σχήμα Z.3 : Καρτέλα «XtRa» (αντιπροσωπευτική των αντίστοιχων καρτελών των υπόλοιπων ανιχνευτών).

A	B	C			D			E			F			G			H			I			J			K			L			M			N			O			P			Q		
Radionuclides	Energies (keV)	XtRa (Mar 2021)			XtCSS (Mar 2021)			LEGe (Mar 2021)			Ge (Mar 2021)			Ge 40% (Mar 2021)																																
		cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ	cps	Error 90%	1σ									
Pb-210	46.52	0.00345	14.2%	0.000296909	0.00343	12.2%	0.000253612	0.002	12.9%	0.000156364	0	0.0%	0	0.0041	10.5%	0.000260909																														
Th-234	63.29	0.0102	8.1%	0.000500727	0.0102	5.6%	0.000346182	0.013	2.4%	0.000189091	0.00257	30.4%	0.000473503	0.00546	8.3%	0.000274655																														
Pb-212A	87.2	0	0.0%	0	0.00136	17.2%	0.00014177	0.000392	67.2%	0.000159651	0	0.0%	0	0.0034	13.4%	0.000276121																														
Pb-212B	238.63	0.0121	7.2%	0.000528	0.0122	4.5%	0.000332727	0.00161	17.9%	0.000174661	0.00616	12.1%	0.000451733	0.003	18.6%	0.000338182																														
Pb-214A	295.22	0.00134	42.3%	0.000343527	0.00105	33.0%	0.00021	0.000587	40.5%	0.000144082	0.0014	44.4%	0.000376727	0.00331	13.2%	0.0002648																														
Ac-228A	338.4	0.00274	19.2%	0.000318836	0.00239	12.9%	0.000186855	0.000373	56.9%	0.000128628	0.00126	44.3%	0.000338291	0.000511	74.7%	0.000231344																														
Pb-214B	351.99	0.0033	15.3%	0.000306	0.00354	8.5%	0.000182364	0.00105	19.7%	0.000125364	0.00255	21.5%	0.000332273	0.00597	6.5%	0.000235182																														
Tl-208A	583.14	0.00504	8.4%	0.000256582	0.00276	8.6%	0.000143855	0.000353	50.0%	0.00010697	0.00214	19.3%	0.000250315	0.00103	24.9%	0.000155436																														
Bi-214A	609.32	0.00424	9.8%	0.00025183	0.00345	7.0%	0.000146364	0.000652	26.9%	0.000106296	0.00248	16.2%	0.000243491	0.00457	5.9%	0.000163412																														
Cs-137	661.62	0	0.0%	0	0	0.0%	0	0.000656	30.1%	0.00011967	0.000767	48.4%	0.000224987	0	0.0%	0																														
Tl-208B	860.47	0.000688	51.4%	0.000214322	0.000506	36.8%	0.000112853	0	0.0%	0	0.00173	17.0%	0.000178242	0	0.0%	0																														
Ac-228B	911.07	0.00446	7.8%	0.000210836	0.00406	5.0%	0.00012303	0.000372	41.8%	0.00009424	0.000847	34.3%	0.000176073	0.000857	25.1%	0.000130368																														
Ac-228H	968.9	0.00279	14.3%	0.0002418	0.00248	9.0%	0.000135273	0.000148	103.4%	9.27467E-05	0.00117	23.0%	0.000163091	0.000336	61.7%	0.000125644																														
Bi-214B	1120.28	0.00169	20.3%	0.000207921	0.00155	10.7%	0.000100515	0.000195	80.4%	9.50182E-05	0.00167	16.8%	0.000170036	0.00139	13.4%	0.000112885																														
Co-60A	1173.22	0	0.0%	0	0	0.0%	0	0.00029	50.4%	8.85818E-05	0	0.0%	0	0	0.0%	0																														
Co-60B	1332.51	0	0.0%	0	0	0.0%	0	0.000224	58.1%	7.88752E-05	0	0.0%	0	0	0.0%	0																														
K-40	1460.75	0.0271	1.4%	0.000229939	0.0271	1.1%	0.000180667	0.000944	13.2%	0.00007552	0.00593	4.0%	0.000143758	0.00384	4.9%	0.000114036																														
Bi-214C	1764.51	0.00233	11.0%	0.000155333	0.00238	5.5%	7.93333E-05	0.000267	37.3%	6.03582E-05	0.00177	10.5%	0.000112636	0.0018	8.2%	8.94545E-05																														

Range of Energies		
45.52	46.52	47.52
62.29	63.29	64.29
86.2	87.2	88.2
237.63	238.63	239.63
294.22	295.22	296.22
337.4	338.4	339.4
350.99	351.99	352.99
582.14	583.14	584.14
608.32	609.32	610.32
660.62	661.62	662.62
859.47	860.47	861.47
910.07	911.07	912.07
967.9	968.9	969.9
1119.28	1120.28	1121.28
1172.22	1173.22	1174.22
1331.51	1332.51	1333.51
1459.75	1460.75	1461.75
1763.51	1764.51	1765.51

Cps φωτοκορυφών υποστρώματος ανιχνευτών

Σχήμα Z.4 : Μέρος 1^ο Καρτέλας «BG».

S Channel	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
	BG Spectrum Counts					Background Collection Time (tb)		
	XtRa (Mar 2021)	XtCSS (Mar 2021)	LEGe (Mar 2021)	Ge (Mar 2021)	Ge40% (Mar 2021)		XtRa (Mar 2021)	1036800
1	0	0	0	0	0		XtCcs (Mar 2021)	1036800
2	0	0	0	0	91298		LEGe (Mar 2021)	1036800
3	0	0	0	0	28774		Ge (Mar 2021)	1036800
4	0	0	0	0	2665		Ge40% (Mar 2021)	1036800
5	0	0	0	0	10693			
6	0	0	0	0	22161			
7	0	0	0	0	28586			
8	0	0	0	0	27454			
9	0	0	0	0	21496			
10	0	0	0	0	19099			
11	0	0	0	0	18549			
12	0	0	0	0	18085			
13	0	0	0	0	17591			
14	0	0	0	0	17432			
15	0	0	0	0	17160			
16	0	0	0	0	16671			
17	0	0	0	0	16421			
18	0	0	0	0	16096			
19	0	0	0	0	15765			
20	0	0	0	0	16599			
21	0	0	0	0	16498			
22	0	0	0	0	15322			
23	0	0	0	0	15013			
24	0	0	0	0	15428			
25	0	0	0	0	16037			
26	0	0	0	0	15552			
27	0	0	0	0	13844			
28	0	0	0	0	12478			
29	0	0	0	0	12233			
30	0	0	0	0	11658			
31	0	0	0	0	11290			
32	0	0	0	0	11151			
33	0	0	0	0	10990			
34	0	0	0	0	10419			
35	0	0	0	0	10277			
36	1	1	0	0	10089			
37	0	207	0	0	9943			
38	1	2445	0	0	9779			

Φάσματα υποστρώματος ανιχνευτών

Σχήμα Z.5 : Μέρος 2^ο Καρτέλας «BG».

Channel	Spectrum Counts	DETECTOR OPTIONS	XtRa	Xt-CSS	LEGe	Ge	Ge-40	Sample											
1		1	2	3	4	5		Mass (gr) or (Litres)	Geometry	Reference date (dd/mm/yyyy)	Analysed on	Collect Time (sec)	Total days (for decay correction)						
2		GEOMETRY OPTIONS								281.90	geom2	01/01/2022	12/08/2022	410712	227.75				
3		MATERIAL OPTIONS			4MHCL	Soil3%	Air Filter												
4		1	2	3															
5		DETECTOR	XtRa			Material & Geometry													
6			1	Available combinations			4MHCL			Air Filter		Soil3%							
7				Detector	2	5	8	10	Petri	Petricap	Alcap	Elkethe							
8		Geometry	geom2			XtRa	√	√	√	√	√								
9			1	Xt-CSS	√	√	√	√	√										
10				LEGe	√	√	√		√	√	√								
11				Ge	√	√	√												
12				Ge-40	√	√	√												
13		Material	4MHCL			Επιλογή Ανιχνευτή													
14			1	Επιλογή Γεωμετρίας			Επιλογή Υλικού												
15				Δεδομένα Δείγματος & Ανάλυσης															
16				Radionuclide	Channel	Peak Energy (keV)	Yield (%)	FW.1M	1.5*FWHM	BG from	Peak from	Peak to	BG to	n	m	Cs _{L-1}	Cs _{U-1}	Bs	Cs _{L-1}
17								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
18								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
20								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
21								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
22								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
23								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
24								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
25								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
26								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
27								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
28								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
29								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
30								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
31								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
32								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
33								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
34								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
35								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
36								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
37								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
38								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
39								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
40								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
41								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
42								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
43								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
44								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
45								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
46								0.00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Σχήμα Z.6 : Μέρος 1^ο Καρτέλας «Detection Limits».

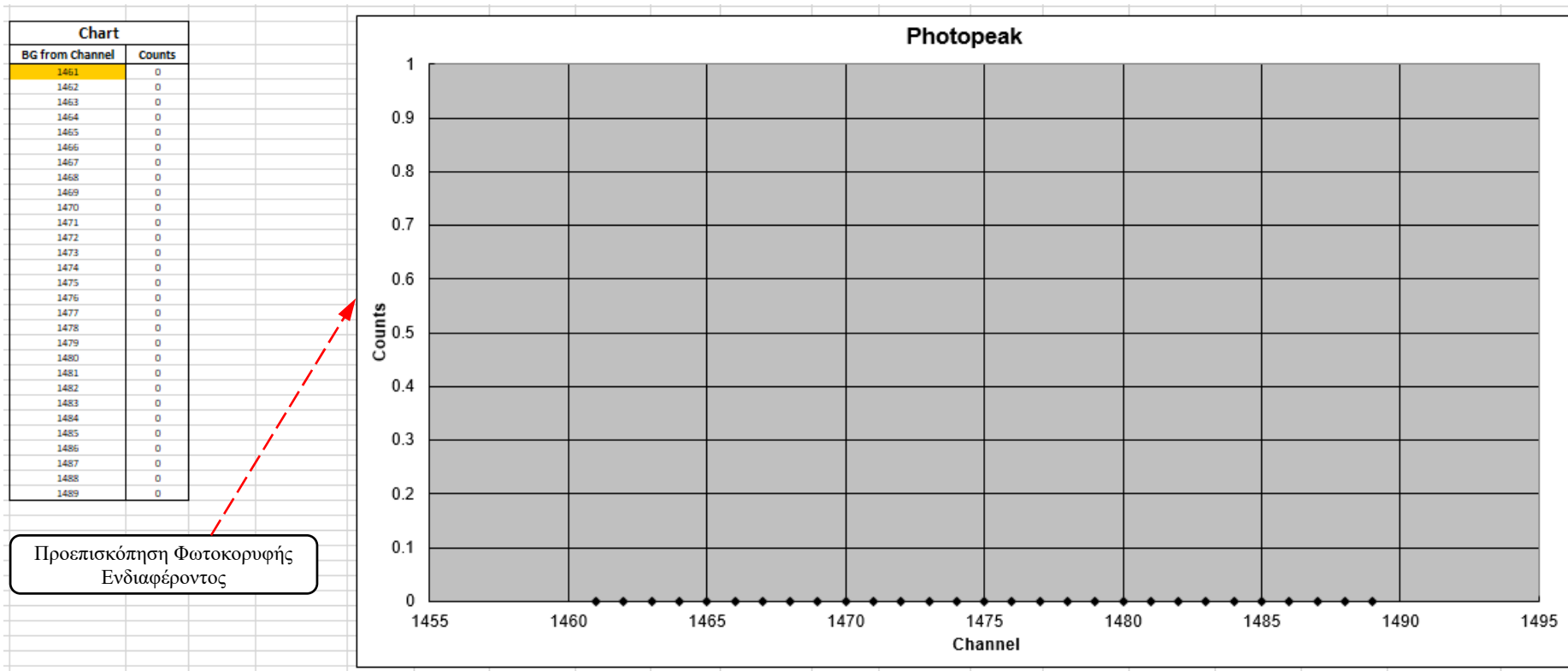
Sample						Background Collection Time								
Mass (gr) or (Litres)	Geometry	Reference date (dd/mm/yyyy)	Analysed on	Collect Time (sec)	Total days (for decay corrections)	tb	1036800							
281.90	geom2	01/01/2022	12/08/2022	410712	227.75									

Soi3%		
Petricap	Alcap	Elkethe
√	√	√

Αποτελέσματα Ld, MDA & Lc

n	m	CS _{u-1}	CS _{u+1}	BS	CB _{l-1}	CB _{u+1}	Bb	Ab	Ld	Eff. Corr. Factor	eff	MDA (Bq)	MDA (Bq/kg) or (Bq/m ³)	Lc (Decision Threshold) [Bq/kg]
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1	0	0	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	1.000	#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Σχήμα Z.7 : Μέρος 2° Καρτέλας «Detection Limits».



Σχήμα Z.8 : Μέρος 3^ο Καρτέλας «Detection Limits».

A	B	C	D	E
Scattering Photon Calculations				
Scattering angle (θ) =	180		Scattering angle (θ) =	180
Energy of Initial photon (keV) =	1076.64		Energy of Scattering Photon (keV) =	209.80
Energy of Scattering Photon (keV) =	206.50		Energy of Initial photon (keV) =	1173.00
U-Test			Decay Corrections	
Value 1 =	0.00347		Date Sampled	06/06/1986
1σ =	0.000309177		Date Analyzed	06/06/2018
Value 2 =	0.00461		Half Life (days)	157680
1σ =	0.000480362		Activity (Bq ή Bq/kg)	1.01535
U-Test Width of acceptance \pm	1.64		Activity with decay corrections (Bq ή Bq/kg)	1.068881509
U-Test Result	-1.995588452			
	Statistic Difference			
Linear Correlation Coefficient Significance				
R²	0.408			
R <small>(linear correlation coefficient)</small>	0.639			
n <small>(number of experimental measurements)</small>	22			
v <small>(degrees of freedom)</small>	20			
p <small>(confidence level)</small>	99.00%			
t ₀ <small>(student stochastic variable)</small>	3.712			
t(1-p)/2, n-2	2.845			
ω_r <small>(linear correlation coefficient distribution)</small>	0.756			
ω <small>(mean)</small>	2.647			
σ_{ω} (mean)	0.229			
(1+p)/2	99.50%			
Z(1+p)/2	2.570			
$\omega_r - Z(1+p)/2 * \sigma_{\omega}$	0.166			
$\omega_r + Z(1+p)/2 * \sigma_{\omega}$	1.346			
R upper limit	0.165			
R lower limit	0.873			
Is it significantly different from zero?	YES			

Υπολογισμός
Ενέργειας
φωτονίων
Compton

U-test

Διορθώσεις
Διάσπασης

T-test

Σχήμα Z.9 : Καρτέλα «Various Calculations».

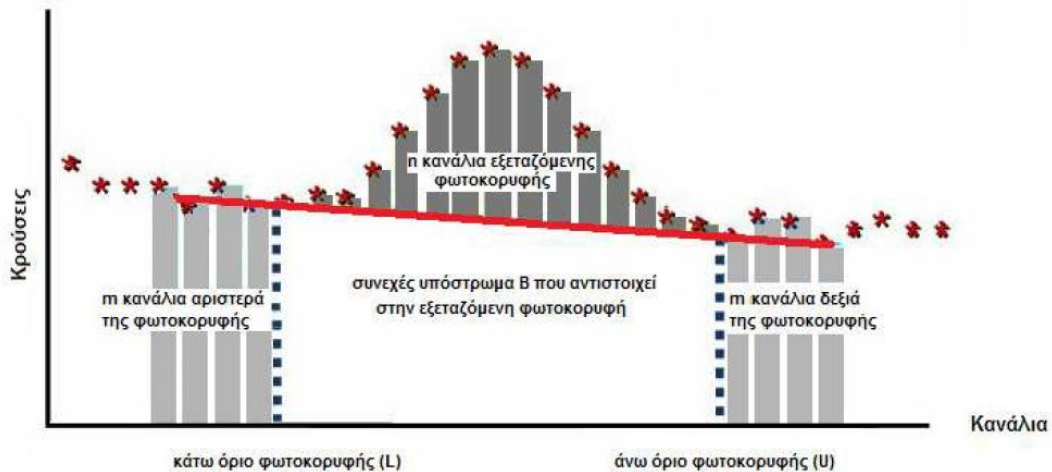
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09		z		
0	0.50000	0.50399	0.50798	0.51197	0.51595	0.51994	0.52392	0.52790	0.53188	0.53586		0.00	0.50000	
0.1	0.53983	0.54380	0.54776	0.55172	0.55567	0.55962	0.56360	0.56749	0.57142	0.57535		0.01	0.50399	
0.2	0.57926	0.58317	0.58706	0.59095	0.59483	0.59871	0.60257	0.60642	0.61026	0.61409		0.02	0.50798	
0.3	0.61791	0.62172	0.62552	0.62930	0.63307	0.63683	0.64058	0.64431	0.64803	0.65173		0.03	0.51197	
0.4	0.65542	0.65910	0.66276	0.66640	0.67003	0.67364	0.67724	0.68082	0.68439	0.68793		0.04	0.51595	
0.5	0.69146	0.69497	0.69847	0.70194	0.70540	0.70884	0.71226	0.71566	0.71904	0.72240		0.05	0.51994	
0.6	0.72575	0.72907	0.73237	0.73565	0.73891	0.74215	0.74537	0.74857	0.75175	0.75490		0.06	0.52392	
0.7	0.75804	0.76115	0.76424	0.76730	0.77035	0.77337	0.77637	0.77935	0.78230	0.78524		0.07	0.52790	
0.8	0.78814	0.79103	0.79389	0.79673	0.79955	0.80234	0.80511	0.80785	0.81057	0.81327		0.08	0.53188	
0.9	0.81594	0.81859	0.82121	0.82381	0.82639	0.82894	0.83147	0.83398	0.83646	0.83891		0.09	0.53586	
1	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214		0.10	0.53983	
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298		0.11	0.54380	
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147		0.12	0.54776	
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91308	0.91466	0.91621	0.91774		0.13	0.55172	
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189		0.14	0.55567	
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408		0.15	0.55962	
1.6	0.94520	0.94630	0.94738	0.94845	0.94950	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449		0.16	0.56360	
1.7	0.95643	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.96080	0.96164	0.96246	0.96327		0.17	0.56749	
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062		0.18	0.57142	
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670		0.19	0.57535	
2	0.97725	0.97778	0.97831	0.97882	0.97932	0.97982	0.98030	0.98077	0.98124	0.98169		0.20	0.57926	
2.1	0.98214	0.98257	0.98300	0.98341	0.98382	0.98422	0.98461	0.98500	0.98537	0.98574		0.21	0.58317	
2.2	0.98610	0.98645	0.98679	0.98713	0.98745	0.98778	0.98809	0.98840	0.98870	0.98899		0.22	0.58706	
2.3	0.98928	0.98956	0.98983	0.99010	0.99036	0.99061	0.99086	0.99111	0.99134	0.99158		0.23	0.59095	
2.4	0.99180	0.99202	0.99224	0.99245	0.99266	0.99286	0.99305	0.99324	0.99343	0.99361		0.24	0.59483	
2.5	0.99379	0.99396	0.99413	0.99430	0.99446	0.99461	0.99477	0.99492	0.99506	0.99520		0.25	0.59871	
2.6	0.99534	0.99547	0.99560	0.99573	0.99585	0.99598	0.99609	0.99621	0.99632	0.99643		0.26	0.60257	
2.7	0.99653	0.99664	0.99674	0.99683	0.99693	0.99702	0.99711	0.99720	0.99728	0.99736		0.27	0.60642	
2.8	0.99744	0.99752	0.99760	0.99767	0.99774	0.99781	0.99788	0.99795	0.99801	0.99807		0.28	0.61026	
2.9	0.99813	0.99819	0.99825	0.99831	0.99836	0.99841	0.99846	0.99851	0.99856	0.99861		0.29	0.61409	
3	0.99865	0.99869	0.99874	0.99878	0.99882	0.99886	0.99889	0.99893	0.99896	0.99900		0.30	0.61791	
3.1	0.99903	0.99906	0.99910	0.99913	0.99916	0.99918	0.99921	0.99924	0.99926	0.99929		0.31	0.62172	
3.2	0.99931	0.99934	0.99936	0.99938	0.99940	0.99942	0.99944	0.99946	0.99948	0.99950		0.32	0.62552	
3.3	0.99952	0.99953	0.99955	0.99957	0.99958	0.99960	0.99961	0.99962	0.99964	0.99965		0.33	0.62930	
3.4	0.99966	0.99968	0.99969	0.99970	0.99971	0.99972	0.99973	0.99974	0.99975	0.99976		0.34	0.63307	
3.5	0.99977	0.99978	0.99978	0.99979	0.99980	0.99981	0.99981	0.99982	0.99983	0.99983		0.35	0.63683	
3.6	0.99984	0.99985	0.99985	0.99986	0.99986	0.99987	0.99987	0.99988	0.99988	0.99989		0.36	0.64058	
3.7	0.99989	0.99990	0.99990	0.99990	0.99991	0.99991	0.99992	0.99992	0.99992	0.99992		0.37	0.64431	
3.8	0.99993	0.99993	0.99993	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99995	0.99995	0.99995		0.38	0.64803	
3.9	0.99995	0.99995	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99997	0.99997		0.39	0.65173	
4	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998		0.40	0.65542	
												0.41	0.65910	
												0.42	0.66276	

Σχήμα Z.10 : Καρτέλα «Normal Distr. Table».

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η

Υπολογισμός L_D και MDA

Στο Παράρτημα Η δίνονται οι εξισώσεις υπολογισμού του κατώτερου ορίου ανίχνευσης L_D , καθώς και της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας MDA. Ως κατώτερο όριο ανίχνευσης L_D ορίζεται εκείνο το όριο επιφάνειας (area) της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής πάνω από το οποίο η φωτοκορυφή ανιχνεύεται για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Εναλλακτικά, αν πρόκειται να μετρηθεί ένα δείγμα (a priori εκτίμηση), το κατώτερο όριο ανίχνευσης αποτελεί η ελάχιστη επιφάνεια που πρέπει να έχει μία φωτοκορυφή, ώστε να ανιχνευτεί με βεβαιότητα, σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Για καλύτερη κατανόηση των μεγεθών που απαιτούνται για τον υπολογισμό του L_D παρατίθεται το ακόλουθο σχήμα, όπου διακρίνονται τα n κανάλια στα οποία κατανέμεται μία φωτοκορυφή (συνιστάται το n να έχει μέγεθος ± 1.5 FWHM), τα m κανάλια αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής για εκτίμηση του υποστρώματος, καθώς και το συνεχές υπόστρωμα B που αντιστοιχεί στην υπόψη φωτοκορυφή.



Σχήμα Η.1: Σκαρίφημα φωτοκορυφής με άξονες κανάλια-κρούσεις (Σάββα, 2009)

Από τη στατιστική προκύπτει ότι η τιμή του L_D σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και σε όρους επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (Gilmore, 2008):

$$L_D = 2.71 + 3.29 \cdot [B \cdot (1 + \frac{n}{2m})]^{1/2} \quad (H.1)$$

Όπου:

B η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη φωτοκορυφή.

m το πλήθος των καναλιών αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής τα οποία χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του συνεχούς υποστρώματος B

n το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η εξεταζόμενη φωτοκορυφή.

Η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος υπολογίζεται με τη μέθοδο του τραπεζίου από την εξίσωση:

$$B = n \cdot \left(\frac{C_{L-1} + C_{U+1}}{2} \right) \quad (\text{H.2})$$

Όπου:

C_{L-1} αριθμός κρούσεων του πρώτου καναλιού πριν τη φωτοκορυφή

C_{U+1} αριθμός κρούσεων του πρώτου καναλιού μετά τη φωτοκορυφή

Στην περίπτωση που η φωτοκορυφή ενδιαφέροντος υπάρχει και στο υπόστρωμα του ανιχνευτή και στο δείγμα προς ανάλυση, τότε έχει υιοθετηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ ο προσδιορισμός του L_D βάσει της εξίσωσης (Luca, 2009):

$$L_D = 2k_a \sqrt{B_s \left(1 + \frac{n_s}{2m_s} \right) + A_b \frac{t_s}{t_b} \left(1 + \frac{t_s}{t_b} \right) + B_b \left(\frac{t_s}{t_b} \right)^2 \left(1 + \frac{n_b}{2m_b} \right)} \quad (\text{H.3})$$

Όπου:

L_d το όριο ανίχνευσης (Detection Limit) μετρούμενο σε πλήθος καταμετρημένων γεγονότων.

B_s, B_b η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος στα φάσματα του δείγματος και του υποστρώματος αντίστοιχα.

A_s η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής στο φάσμα του υποστρώματος.

- t_s, t_b ο χρόνος συλλογής των φασμάτων δείγματος και υποστρώματος από τον ανιχνευτή αντίστοιχα.
- n_s, n_b το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή στα φάσματα δείγματος και υποστρώματος αντίστοιχα.
- m_s, m_b το πλήθος καναλιών αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής στα φάσματα δείγματος και υποστρώματος για τον προσδιορισμό της επιφάνειας του συνεχούς υποστρώματος.

Ανεξαρτήτως του τρόπου προσδιορισμού του L_D , το κατώτερο όριο ανίχνευσης ραδιενέργειας MDA υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$MDA = \frac{L_D}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{eff} \cdot \text{mass}} \quad (\text{H.4})$$

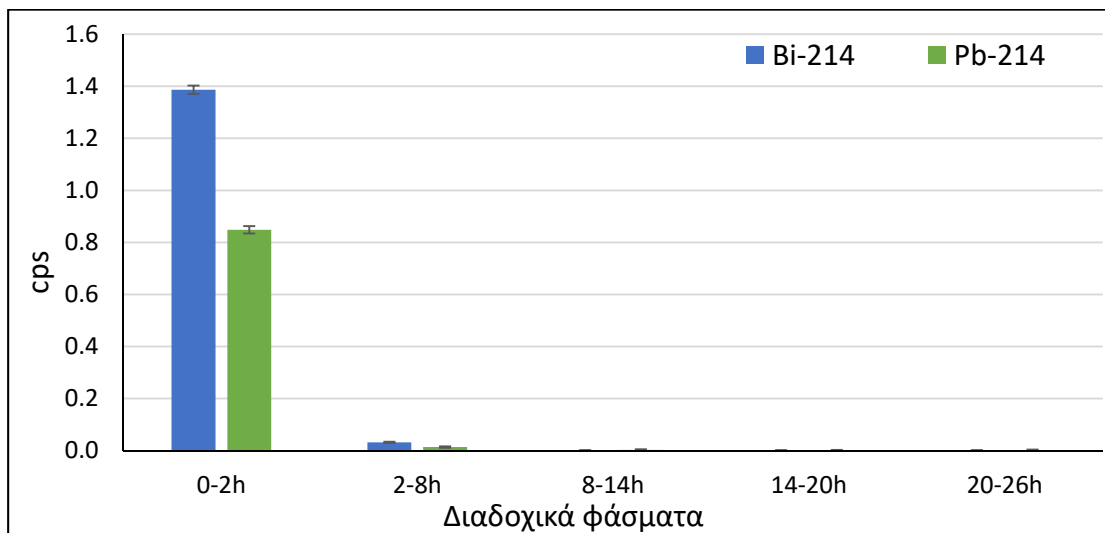
Όπου:

- time η χρονική διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του δείγματος
- yield το ποσοστό εκπομπής της ενέργειας φωτονίου για την οποία γίνεται υπολογισμός του MDA
- eff συντελεστής βαθμονόμησης απόδοσης ανίχνευσης για την ενέργεια φωτονίου που δίνεται ο υπολογισμός του MDA
- mass μάζα του δείγματος που αφορά η γ-φασματοσκοπική ανάλυση

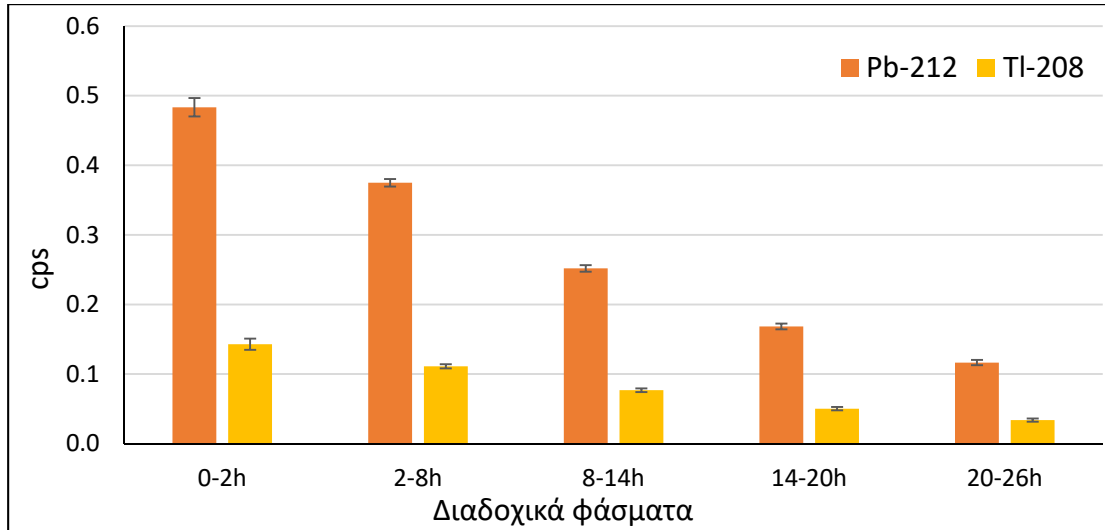
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ

Διαγράμματα χρονική εξέλιξης cps των κυρίαρχων φωτοκορυφών των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στα φίλτρα αέρα

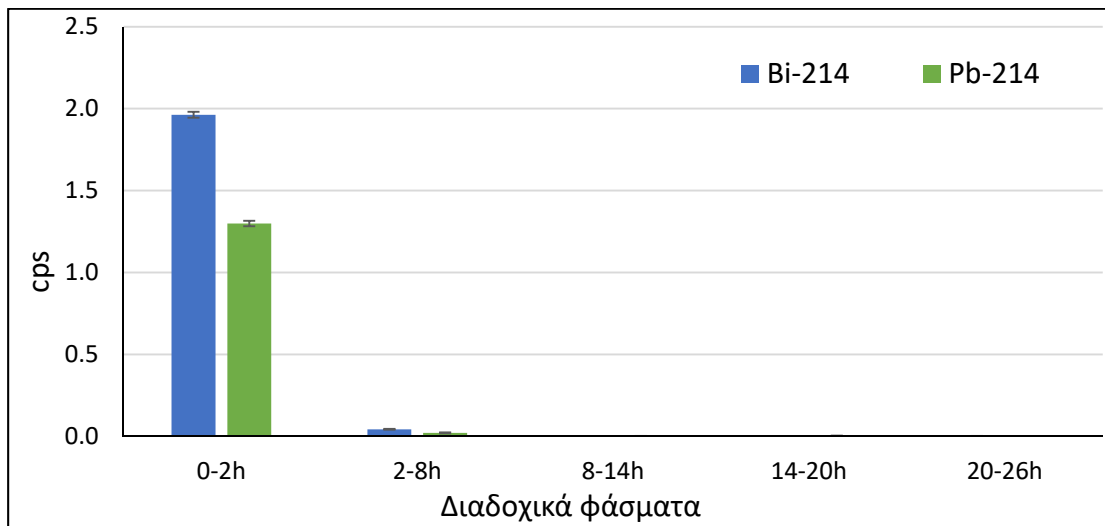
Στο Παράρτημα Θ παρουσιάζονται τα σχήματα του Κεφαλαίου 3 σχετικά με τη διερεύνηση της χρονικής εξέλιξης του ρυθμού καταγραφής γεγονότων (cps) για τις κυρίαρχες φωτοκορυφές των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου στα φίλτρα αέρα, για κάθε σενάριο χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας, όπως δίνεται στον **Πίνακα 3.7**.



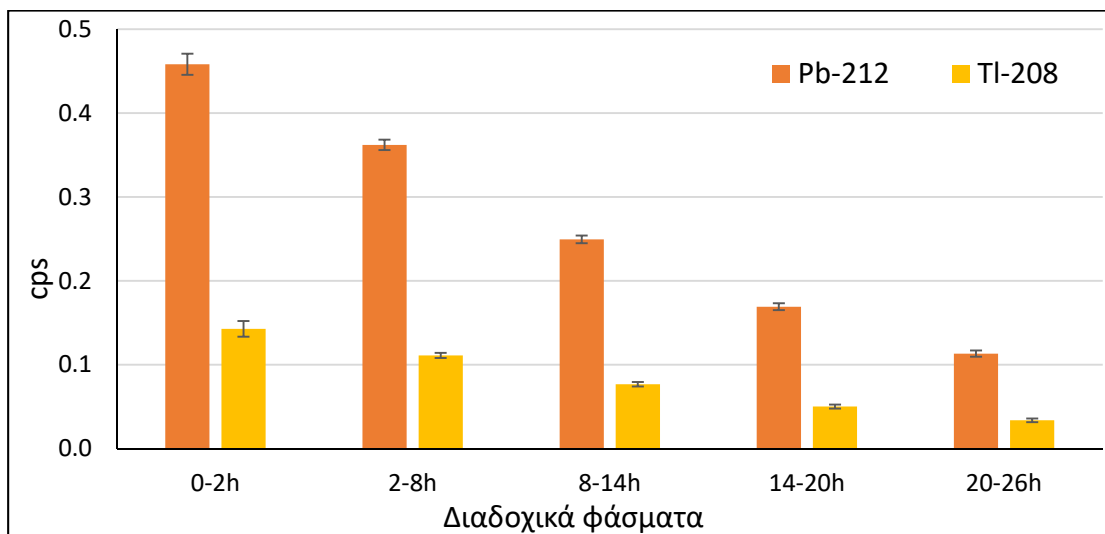
Σχήμα Θ.1 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 6h (φίλτρο a0532).



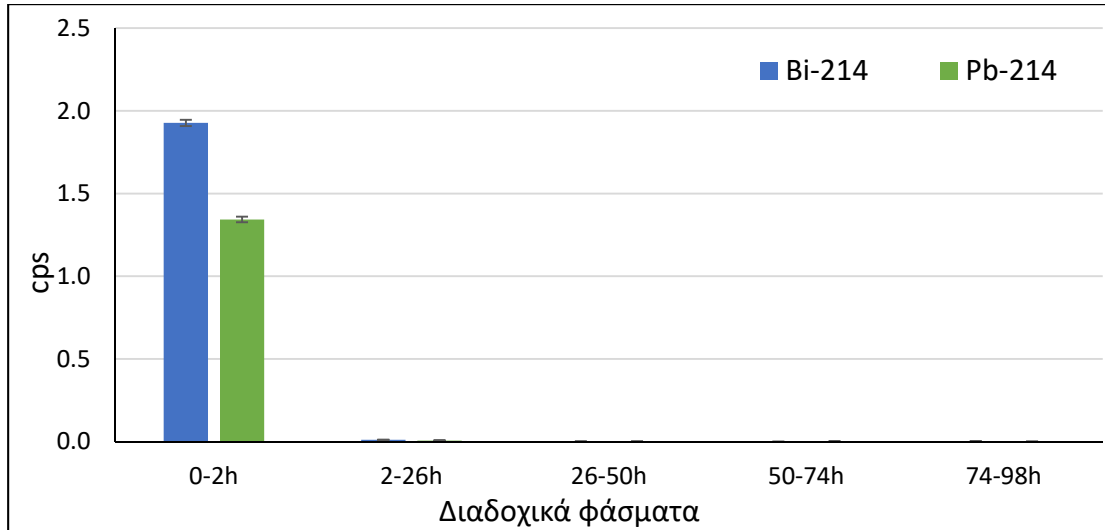
Σχήμα Θ.2 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 6h (φίλτρο a0532).



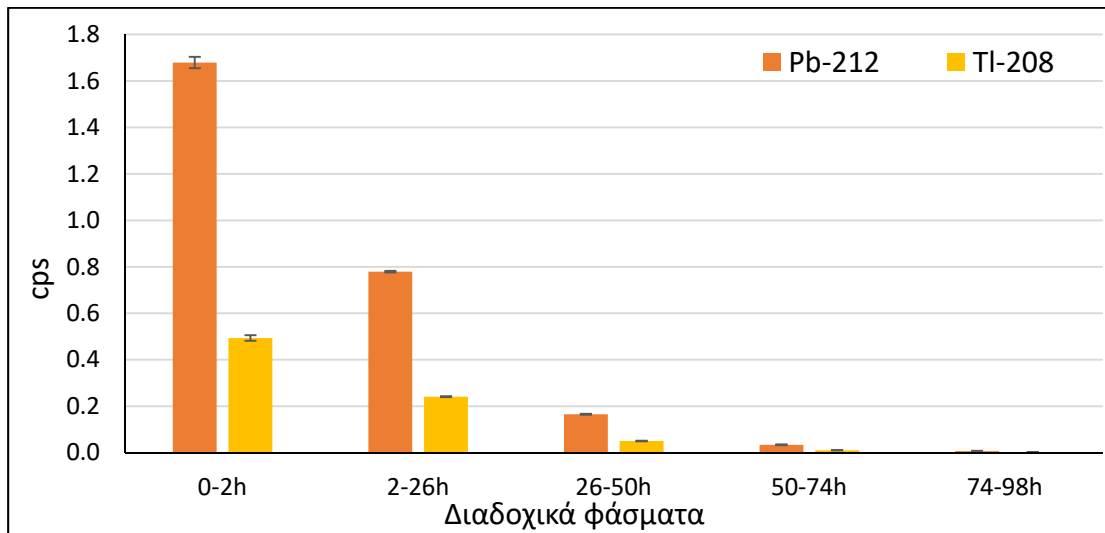
Σχήμα Θ.3 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 6h (φίλτρο a0533).



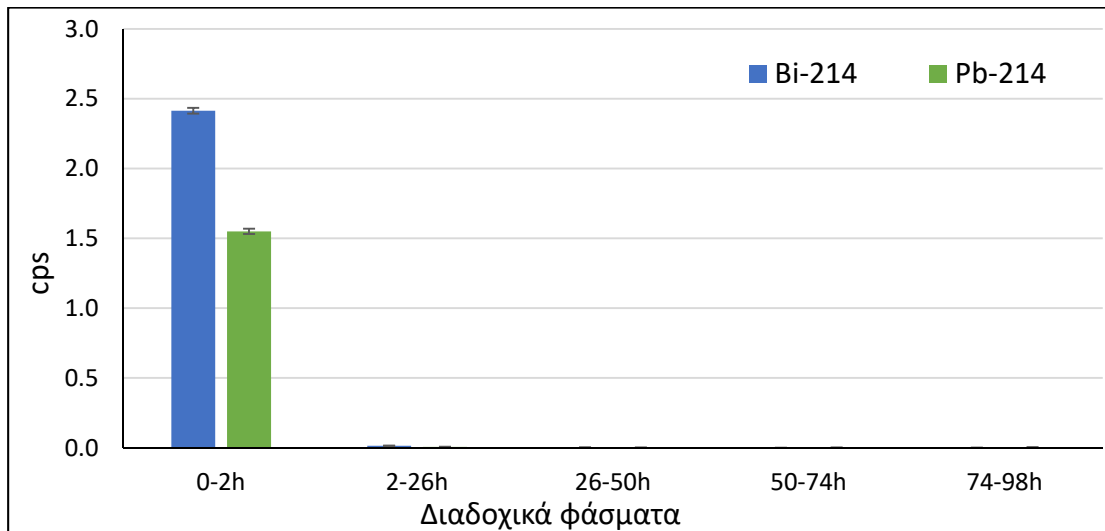
Σχήμα Θ.4 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 6h (φίλτρο a0533).



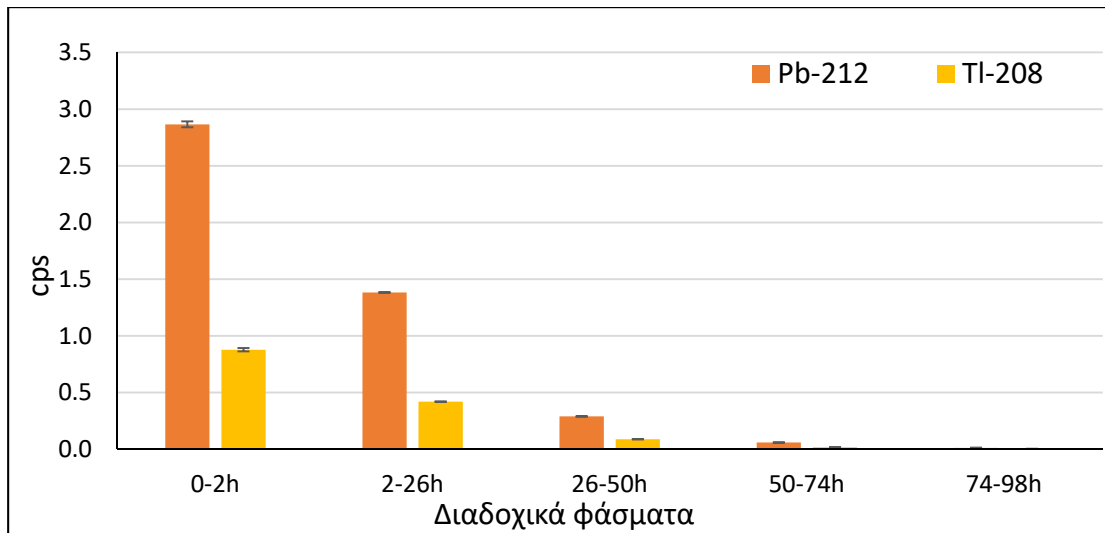
Σχήμα Θ.5 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0534).



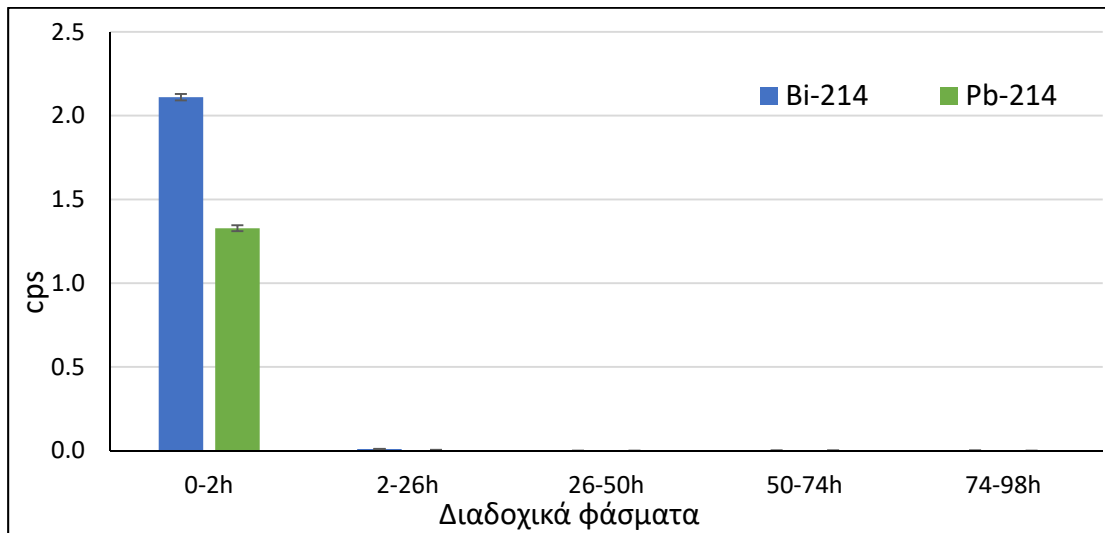
Σχήμα Θ.6 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0534).



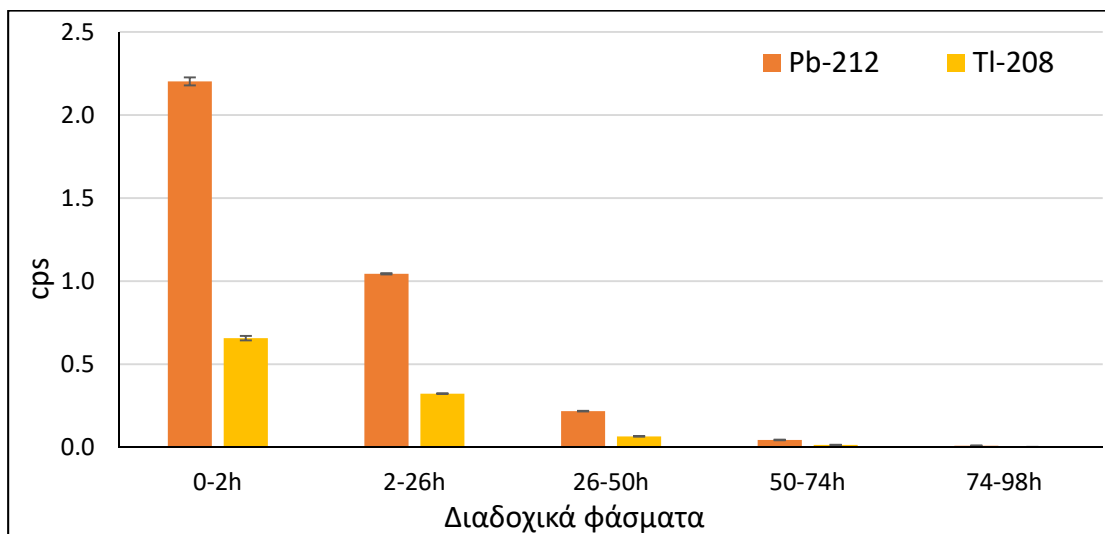
Σχήμα Θ.7 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0535).



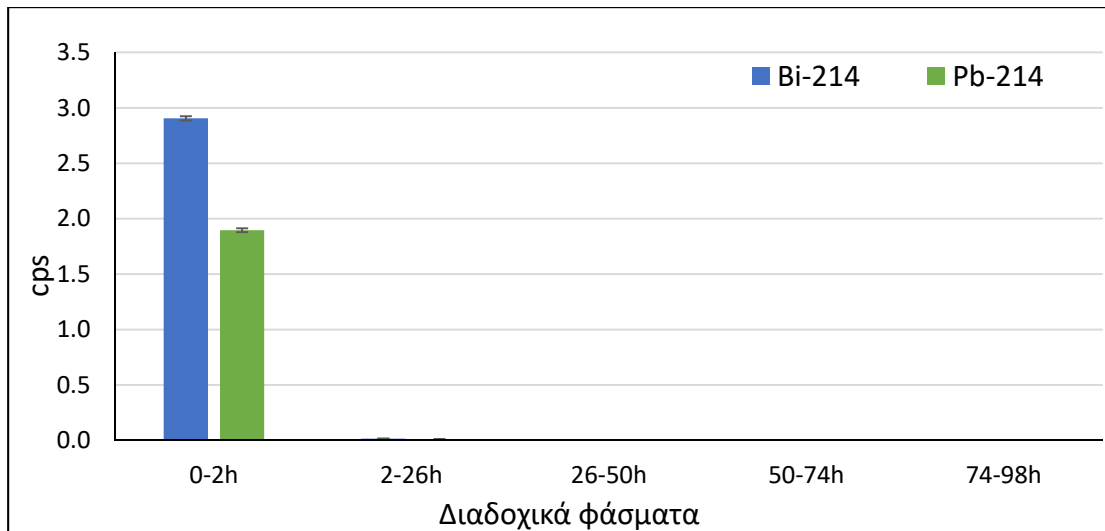
Σχήμα Θ.8 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0535).



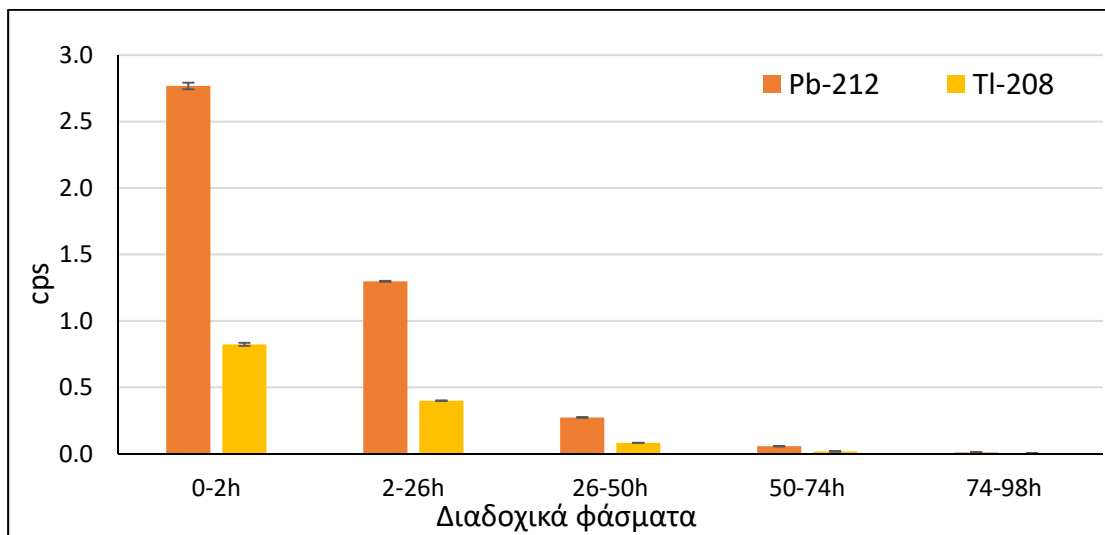
Σχήμα Θ.9 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0536).



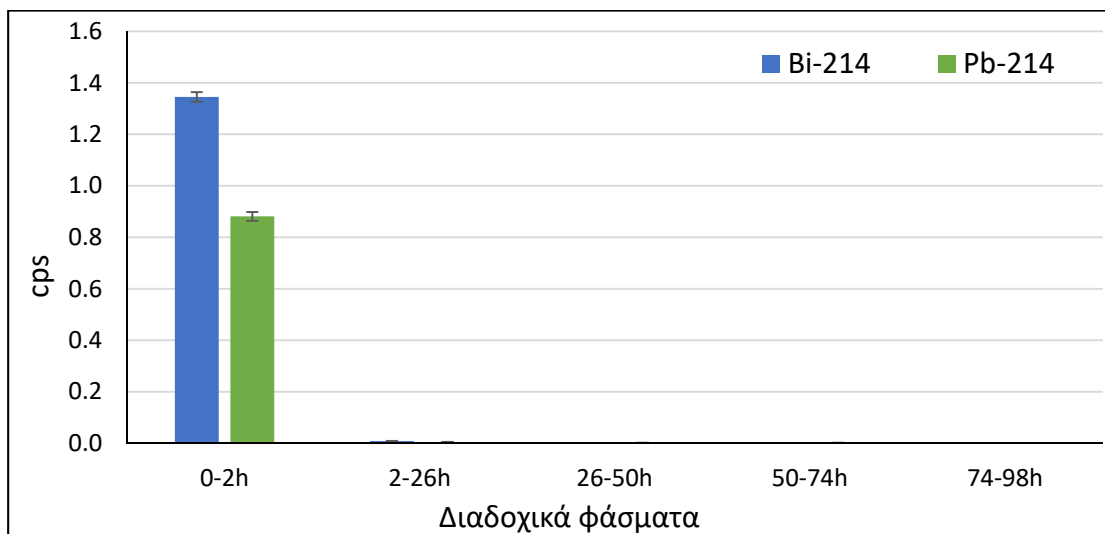
Σχήμα Θ.10 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 24h (φίλτρο a0536).



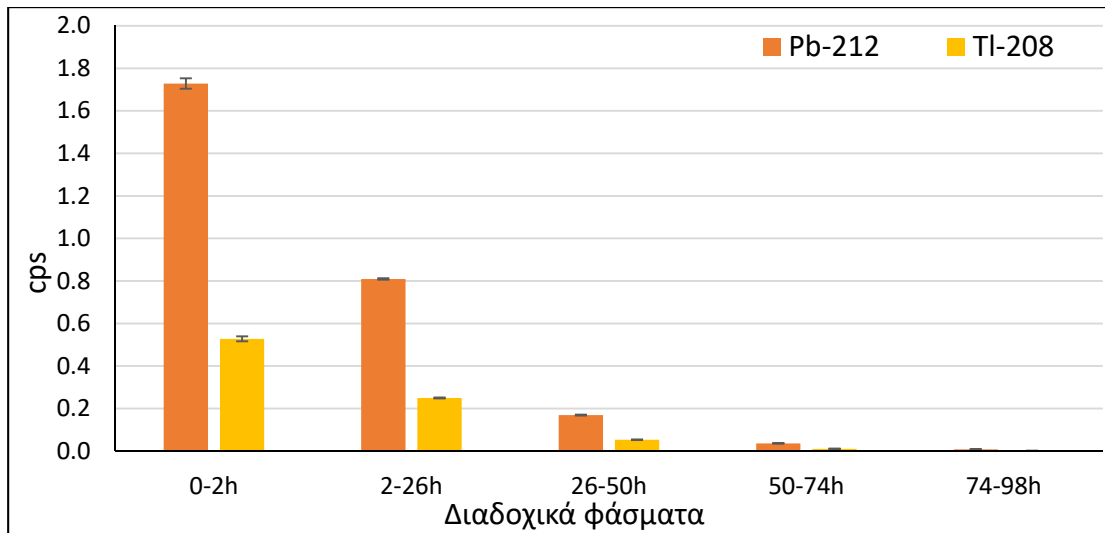
Σχήμα Θ.11 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 48h (φίλτρο a0537).



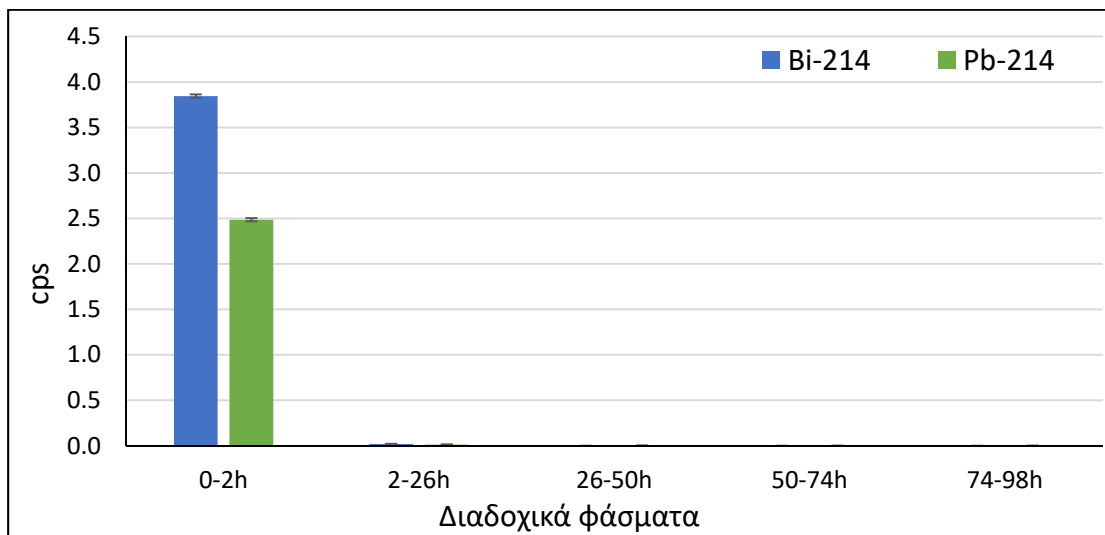
Σχήμα Θ.12 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 48h (φίλτρο a0537).



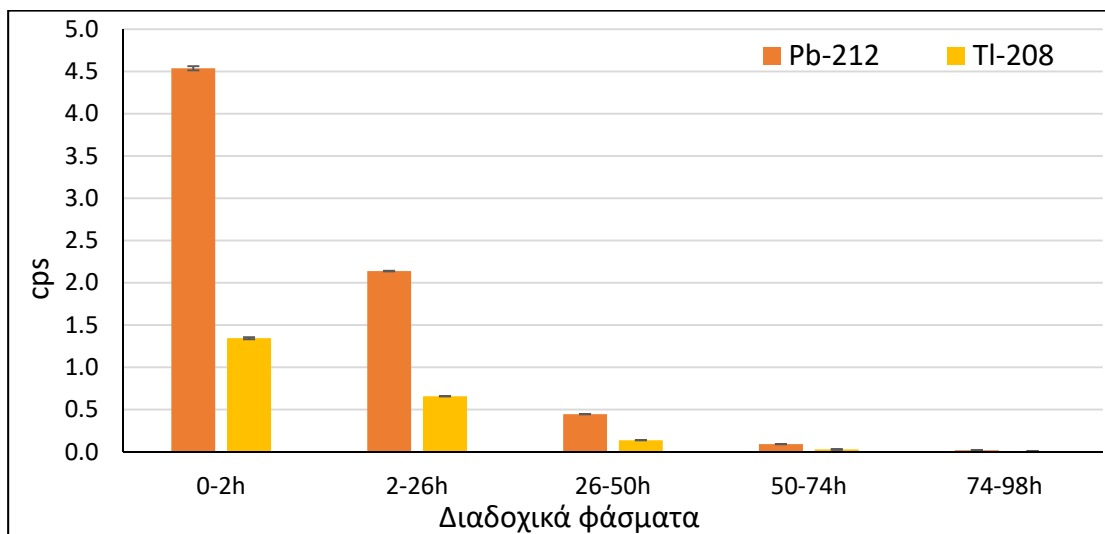
Σχήμα Θ.13 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 48h (φίλτρο a0577).



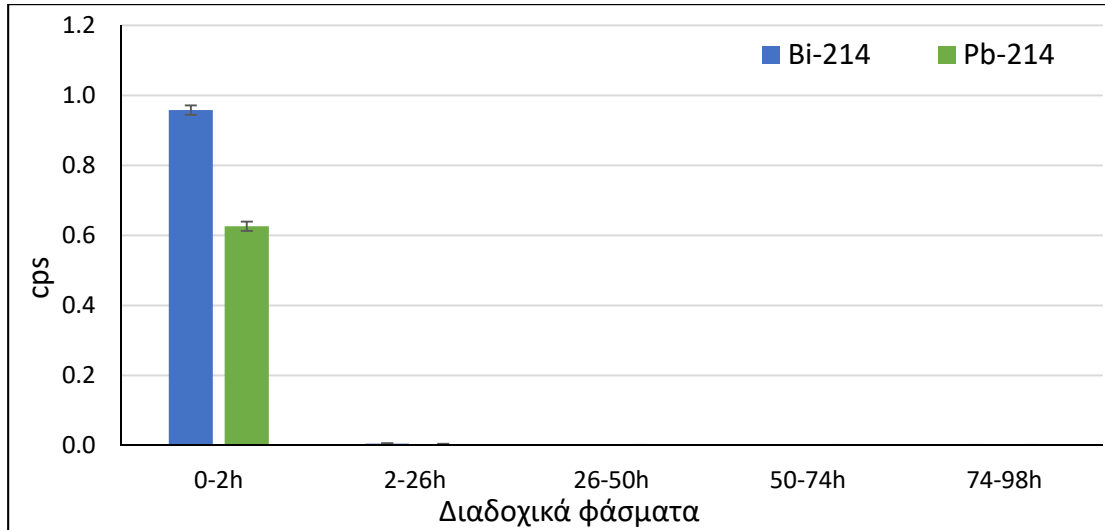
Σχήμα Θ.14 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 48h (φίλτρο a0577).



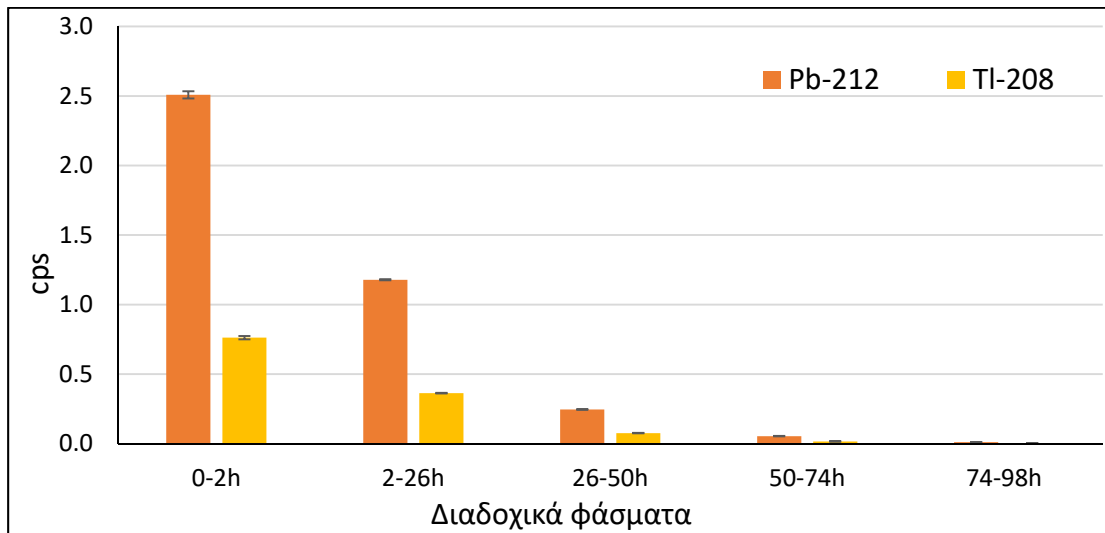
Σχήμα Θ.15 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0538).



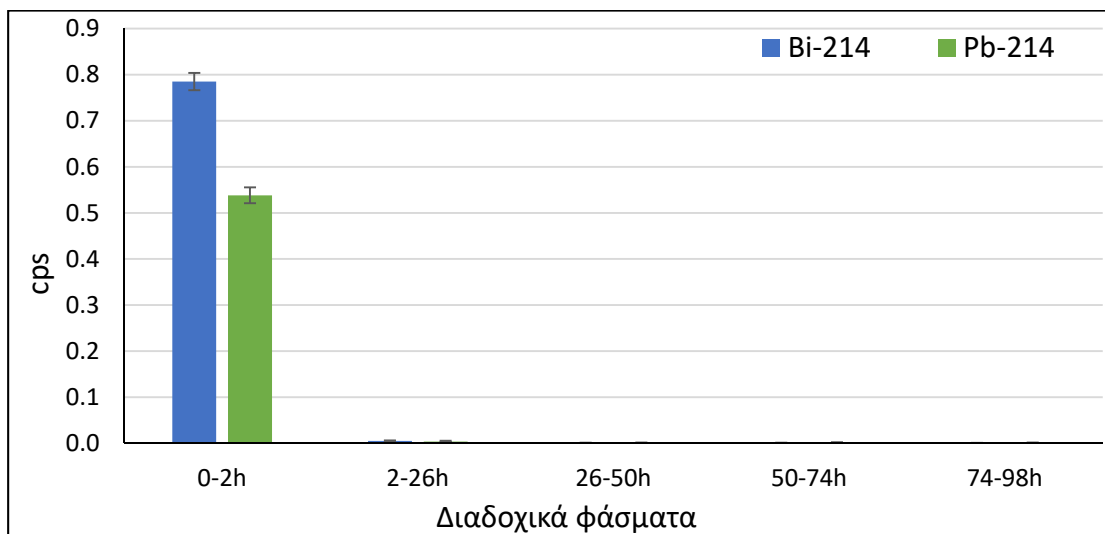
Σχήμα Θ.16 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0538).



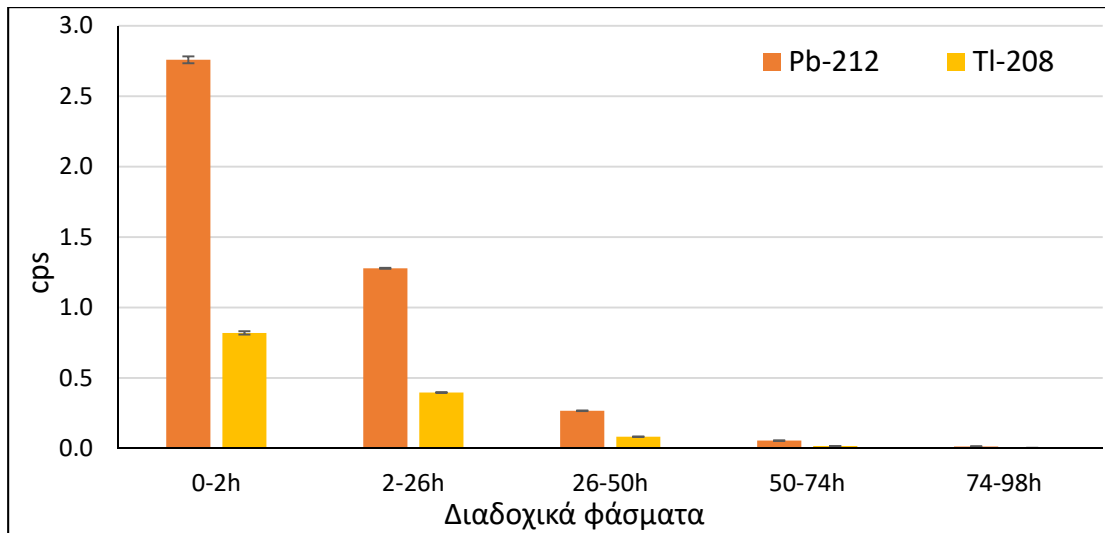
Σχήμα Θ.17 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0542).



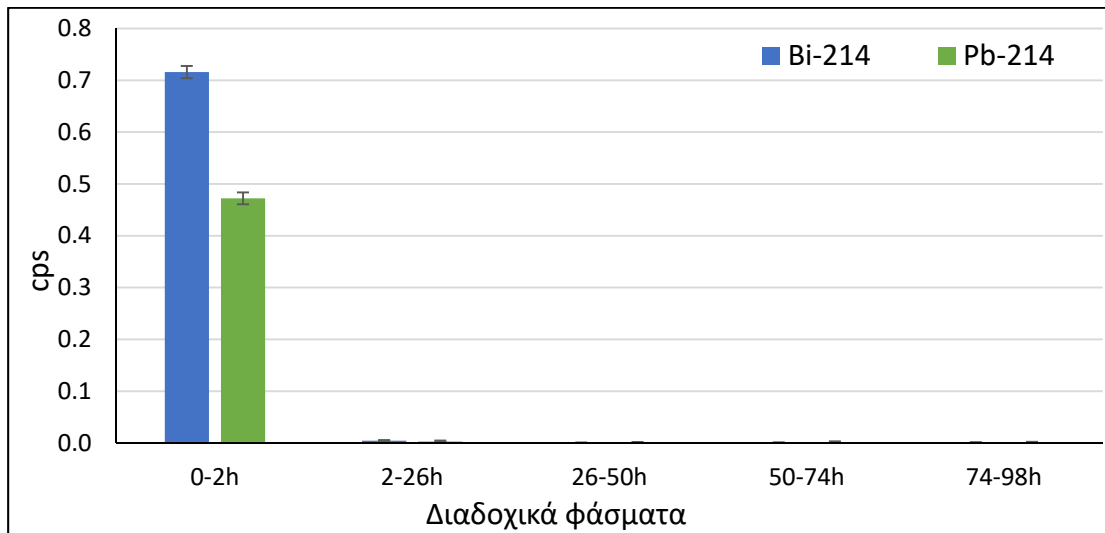
Σχήμα Θ.18 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 120h (φίλτρο a0542).



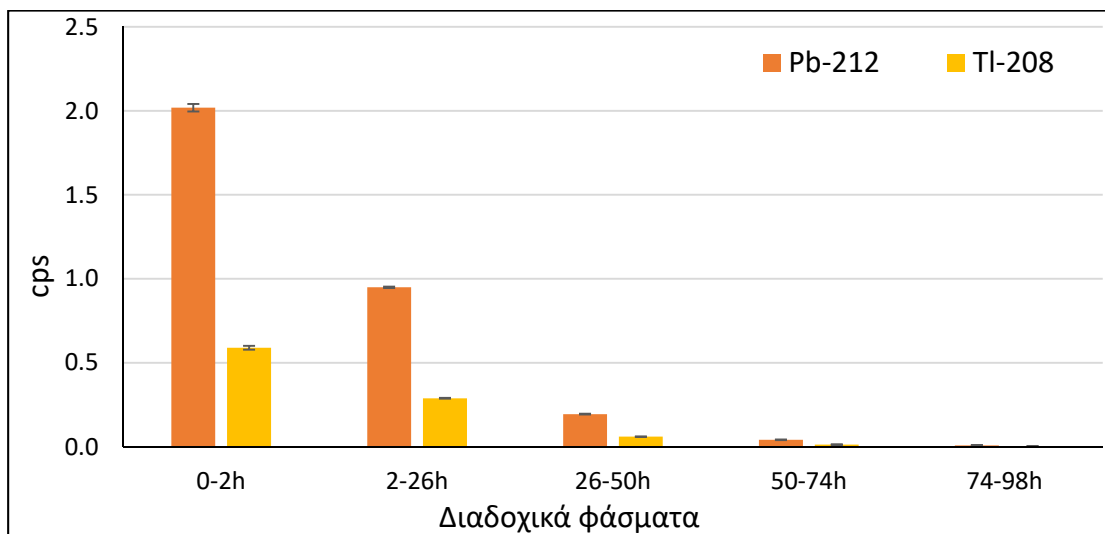
Σχήμα Θ.19 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 168h (φίλτρο a0539).



Σχήμα Θ.20 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 168h (φίλτρο a0539).



Σχήμα Θ.21 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 168h (φίλτρο a0541).

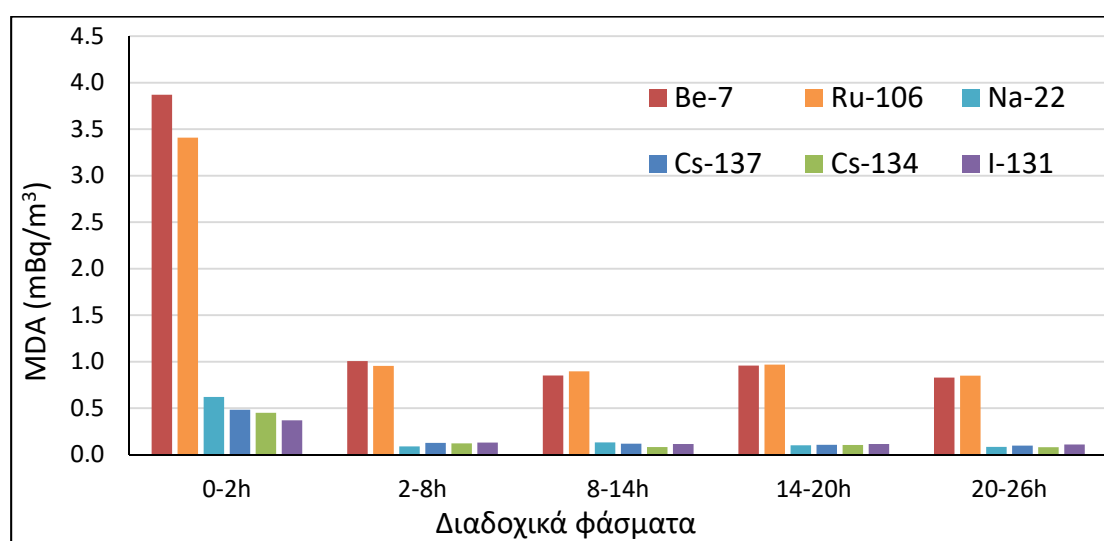


Σχήμα Θ.22 : Ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) των θυγατρικών του θορονίου ^{212}Pb και ^{208}Tl από τη δειγματοληψία φίλτρου αέρα 168h (φίλτρο a0541).

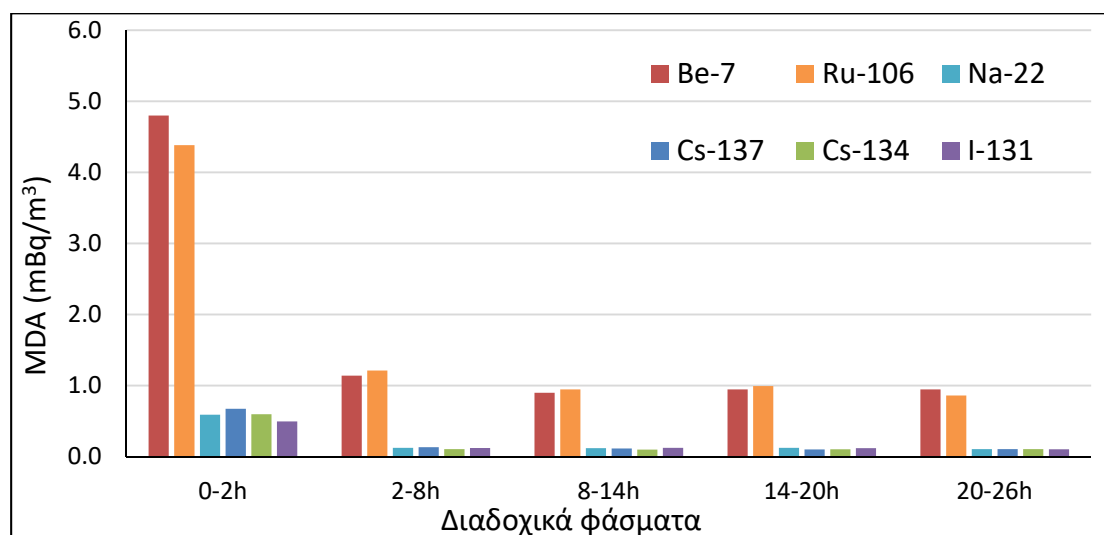
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Χρονική εξέλιξη MDA επιλεγμένων ραδιενεργών ισοτόπων σε φίλτρα αέρα

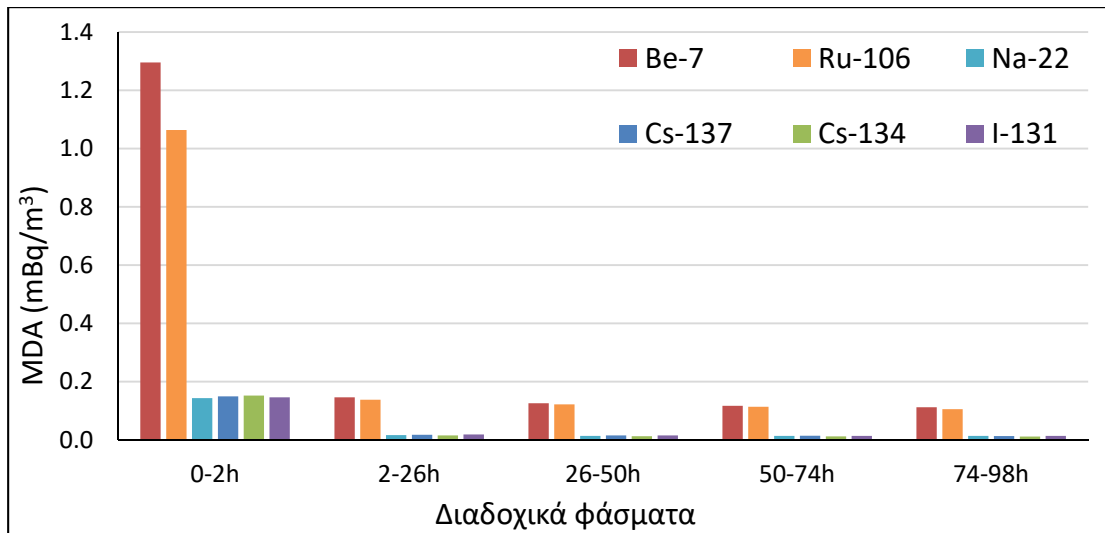
Στο Παράρτημα Ι παρουσιάζονται τα σχήματα του Κεφαλαίου 3 σχετικά με τη διερεύνηση της χρονικής εξέλιξης των MDA επιλεγμένων ραδιενεργών ισοτόπων για κάθε σενάριο χρονικής διάρκειας δειγματοληψίας, όπως δίνεται στον **Πίνακα 3.7**. Όλα τα φίλτρα αναλύθηκαν στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ.



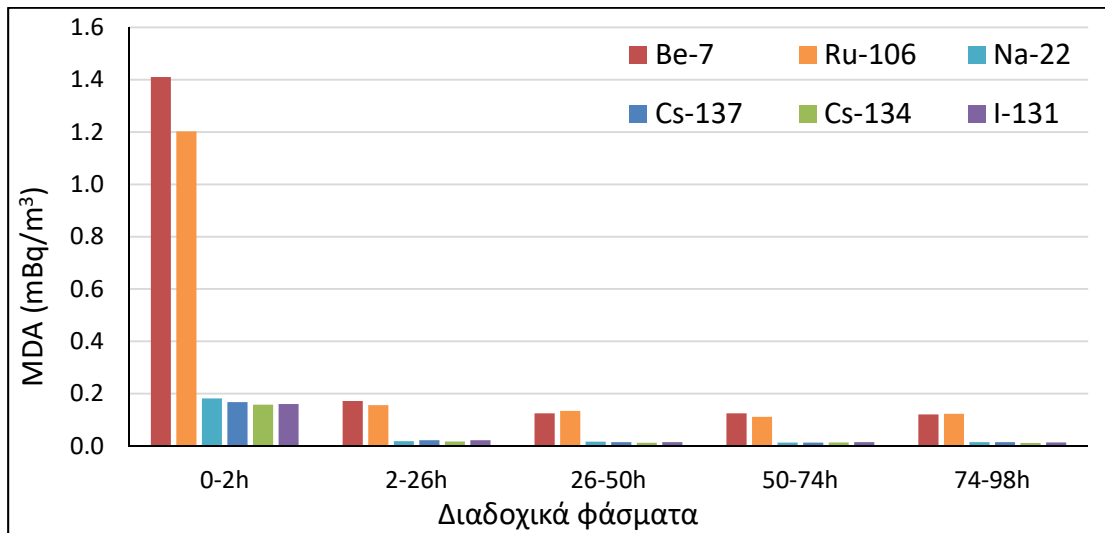
Σχήμα Ι.1: Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 6h (φίλτρο a0532).



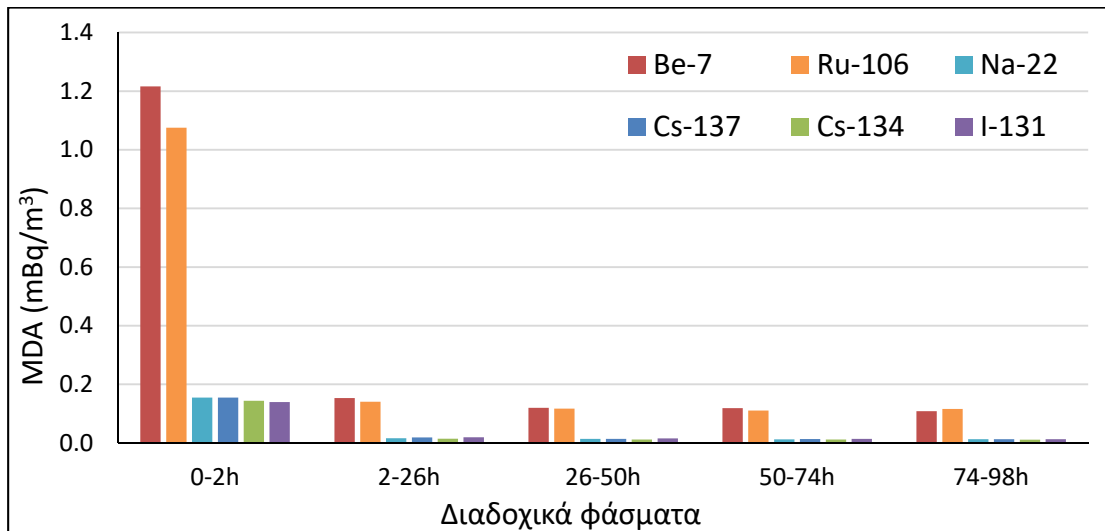
Σχήμα Ι.2: Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 6h (φίλτρο a0533).



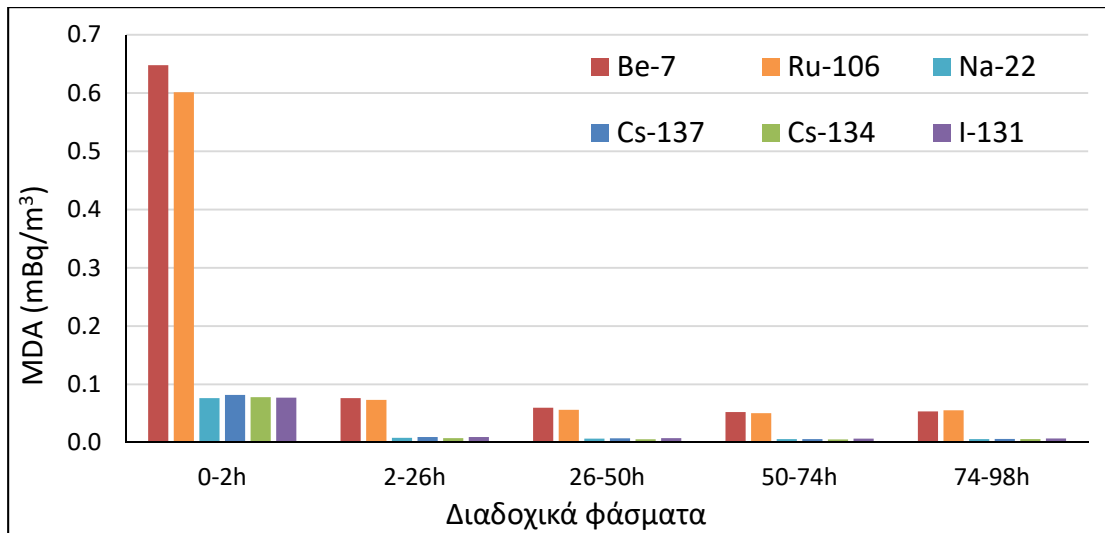
Σχήμα 1.3: Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 24h (φίλτρο a0534).



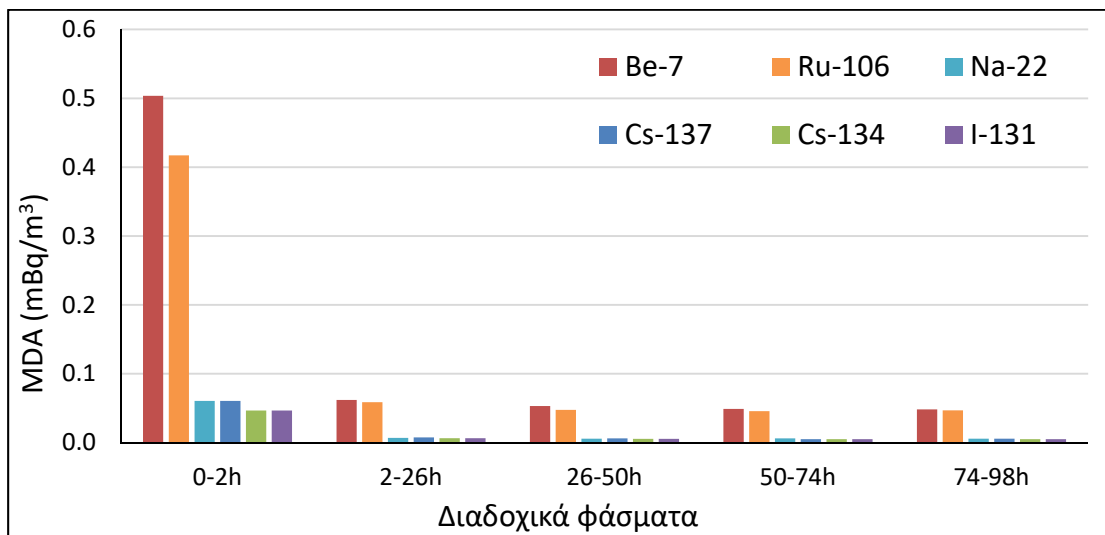
Σχήμα 1.4 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 24h (φίλτρο a0535).



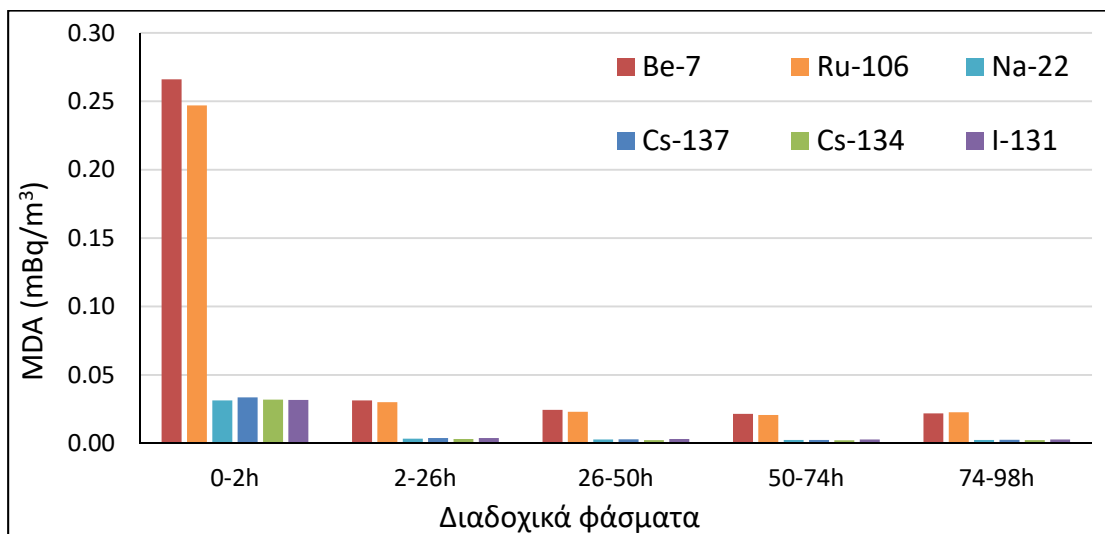
Σχήμα 1.5 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 24h (φίλτρο a0536).



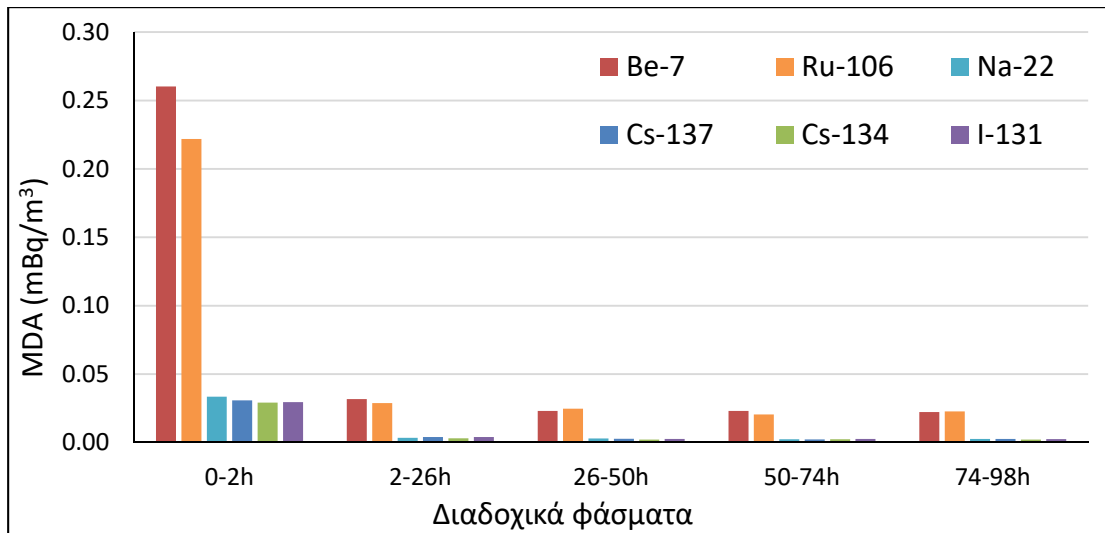
Σχήμα 1.6 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 48h (φίλτρο a0537).



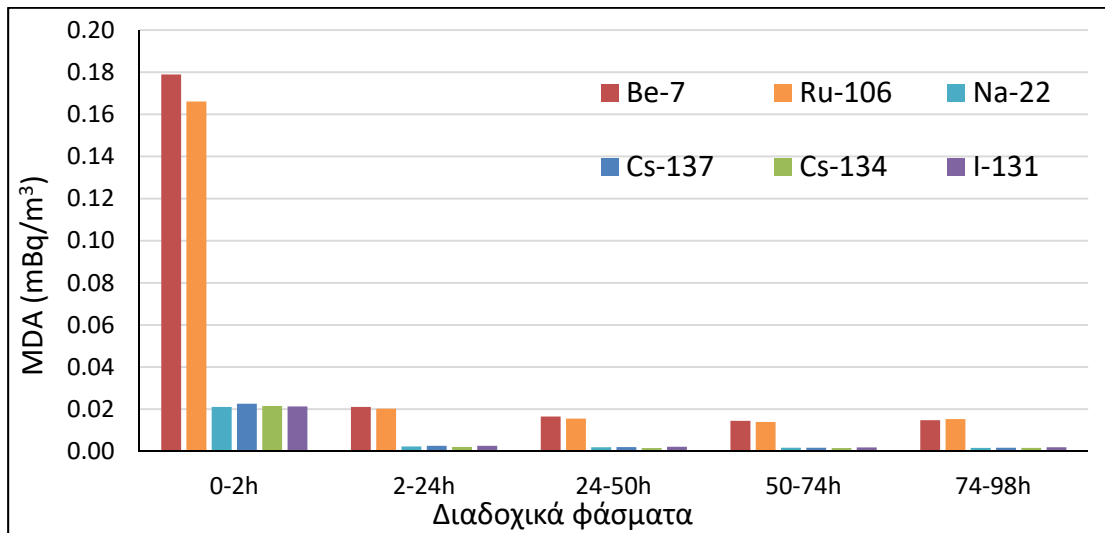
Σχήμα 1.7 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 48h (φίλτρο a0577).



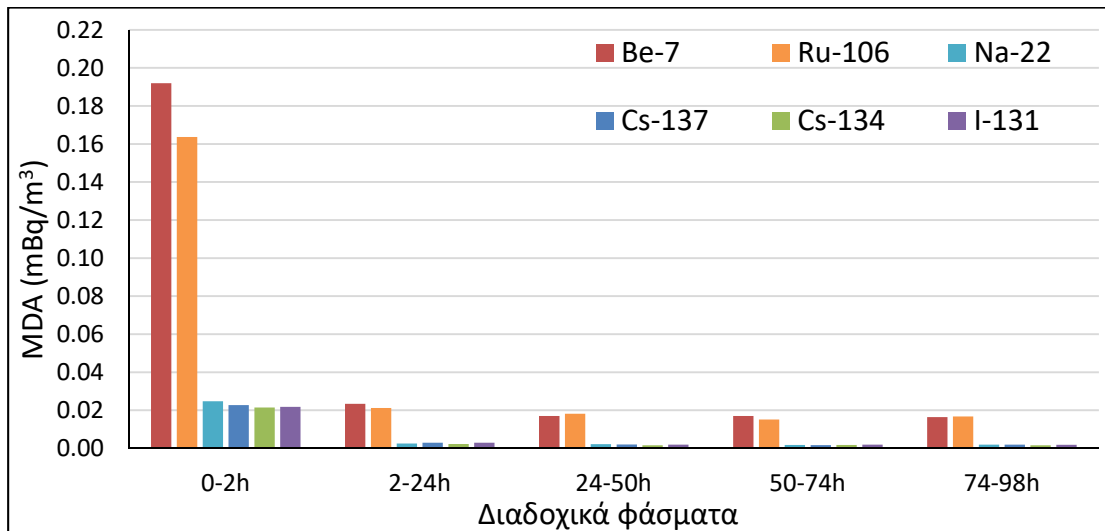
Σχήμα 1.8 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 120h (φίλτρο a0538).



Σχήμα 1.9 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 120h (φίλτρο a0542).



Σχήμα 1.10 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 168h (φίλτρο a0539).



Σχήμα 1.11 : Χρονική εξέλιξη του MDA για επιλεγμένα ραδιενεργά ισότοπα σε φίλτρο ατμοσφαιρικού αέρα δειγματοληψίας 168h (φίλτρο a0541).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΑ

Υπολογισμός σταθμισμένης μέσης τιμής

Στο Παράρτημα ΙΑ δίνονται οι εξισώσεις υπολογισμού της σταθμισμένης μέσης τιμής (weighted mean). Η σταθμισμένη μέση τιμή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται να γίνει ο υπολογισμός της τιμής ενός μεγέθους το οποίο έχει μετρηθεί με δύο ή περισσότερες προσεγγίσεις. Χρησιμοποιώντας τη σταθμισμένη μέση τιμή, το τελικό αποτέλεσμα «κλίνει» περισσότερο στις συνιστώσες με τη μικρότερη αβεβαιότητα και λιγότερο σε αυτές με υψηλές αβεβαιότητες. Η σταθμισμένη μέση τιμή βρίσκει συχνή χρήση στην περίπτωση που προσδιορίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας ενός ραδιενεργού ισοτόπου από δύο ή περισσότερες φωτοκορυφές ή και από δύο ή περισσότερους ανιχνευτές. Με τον τρόπο αυτό, οι φωτοκορυφές του ισοτόπου που έχουν μικρότερη αβεβαιότητα επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα σε αντίθεση με αυτές που έχουν υψηλή αβεβαιότητα. Η εξίσωση υπολογισμού της σταθμισμένης μέσης τιμής είναι η παρακάτω (Debertin & Helmer, 1988):

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \quad (\text{IA. 1})$$

Όπου :

- \bar{x} η σταθμισμένη μέση τιμή
- x_i οι επιμέρους τιμές πλήθους « $i = 1 \dots n$ », για τις οποίες υπολογίζεται η σταθμισμένη μέση τιμή
- w_i οι συντελεστές βαρύτητας (weighting factors) κάθε επιμέρους τιμής x_i

Οι συντελεστές βαρύτητας w_i για κάθε επιμέρους τιμή x_i υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης:

$$w_i = \frac{1}{s_i^2} \quad (\text{IA. 2})$$

Όπου:

s_i^2 η μεταβλητότητα (variance) κάθε επιμέρους τιμής x_i (όπου το s_i ισούται με την

τυπική απόκλιση σ κάθε επιμέρους τιμής x_i)

Η μεταβλητότητα που συνοδεύει τη σταθμισμένη μέση τιμή \bar{x} προσδιορίζεται με δύο τρόπους:

- i. Αρχικά, προσδιορίζεται η «εσωτερική μεταβλητότητα» (internal variance) που προκύπτει από τις επιμέρους μεταβλητότητες s_i^2 και δεν εξαρτάται από τη σύγκλιση των επιμέρους τιμών x_i . Η «εσωτερική μεταβλητότητα» προσδιορίζεται βάσει της εξίσωσης:

$$s_{\text{internal}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{IA. 3})$$

- ii. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η «εξωτερική μεταβλητότητα» (external variance) η οποία συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό της και τις επιμέρους μεταβλητότητες s_i^2 καθώς και τις διαφορές μεταξύ των επιμέρους τιμών x_i από τη σταθμισμένη μέση τιμή \bar{x} . Η «εξωτερική μεταβλητότητα» προσδιορίζεται βάσει της εξίσωσης:

$$s_{\text{external}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1) \cdot \sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{IA. 4})$$

Ως μεταβλητότητα της σταθμισμένης μέσης τιμής \bar{x} χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ της «εσωτερικής» και της «εξωτερικής» μεταβλητότητας.

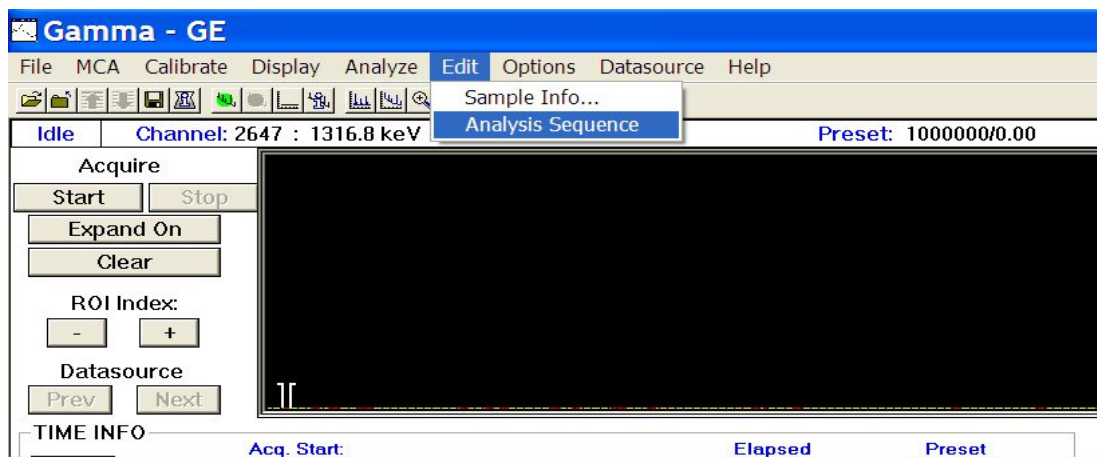
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΒ

Βήματα δημιουργίας «SEQUENCE» στο GENIE2000

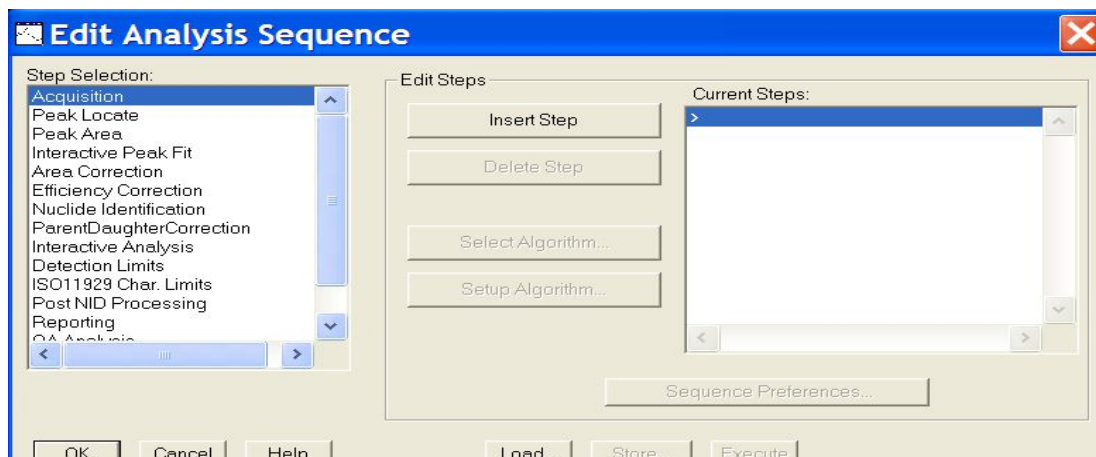
Στο παράρτημα ΙΒ παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία δημιουργίας «SEQUENCE» ή αλλιώς ακολουθίας, στο πρόγραμμα GENIE2000 που χρησιμοποιείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη λήψη των φασμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων. Μέσω της επιλογής «SEQUENCE» δίνεται η δυνατότητα λήψης πολλαπλών κατ' εξακολούθηση φασμάτων ίδιας χρονικής διάρκειας και για συγκεκριμένο ανιχνευτή, χωρίς να απαιτείται η παρουσία ή η αλληλεπίδραση του ερευνητή.

Τα βήματα δημιουργίας και έναρξης ενός «SEQUENCE» στο πρόγραμμα GENIE2000 είναι τα εξής:

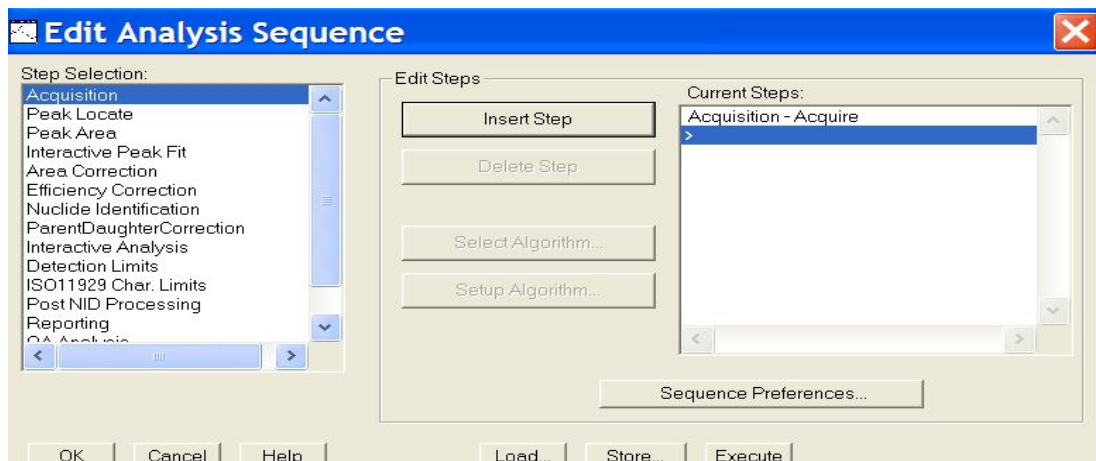
1. Δημιουργία ενός φακέλου στην Επιφάνεια Εργασίας του Υπολογιστή (ή στη συνήθη θέση αποθήκευσης των συλλεχθέντων) και ονομασία του βάσει της χαρακτηριστικής ονομασίας του προς ανάλυση δείγματος.
2. Άνοιγμα του λογισμικού GENIE2000 και επιλογή του ανιχνευτή όπου θα ξεκινήσει η συλλογή φάσματος.
3. Από τη λίστα του μενού γίνεται επιλογή του «Edit > Analysis Sequence».



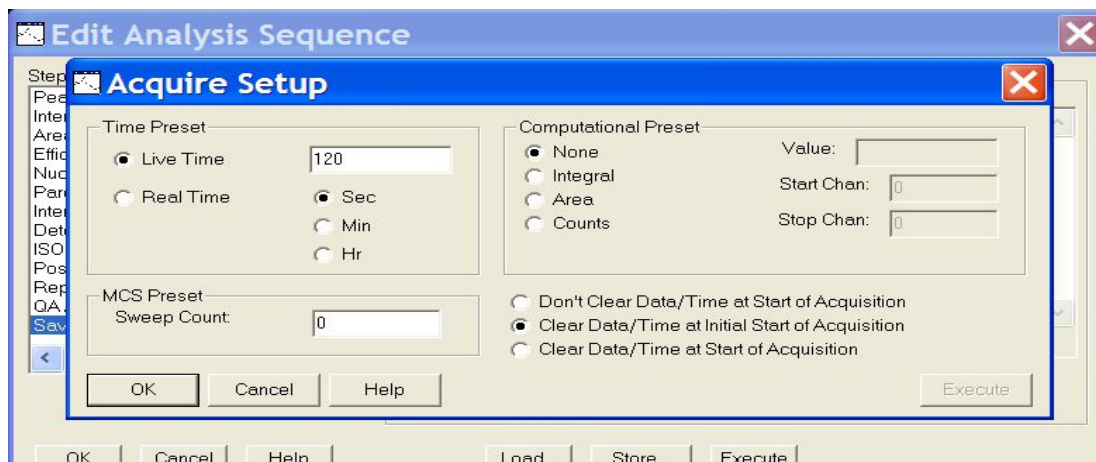
4. Στο παράθυρο που αναδύεται μπορεί να γίνει επιλογή από την αριστερή λίστα με ονομασία «Step Selection» των βημάτων της ακολουθίας προς δημιουργία. Επιλέγοντας το «Insert Step» γίνεται εισαγωγή του επιθυμητού βήματος της ακολουθίας στη λίστα «Current Steps».



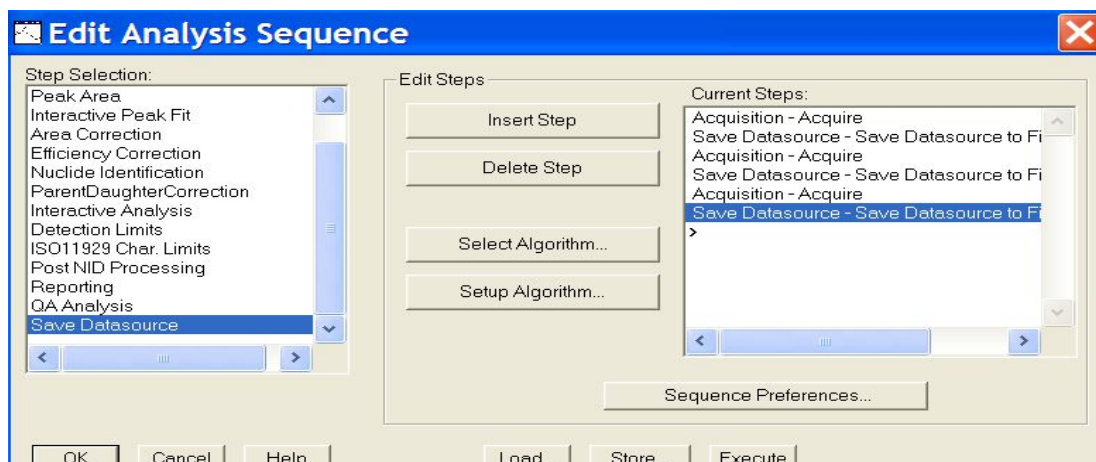
5. Για την έναρξη συλλογής φάσματος πρέπει να γίνει επιλογή του βήματος «Acquisition» από τη λίστα «Step Selection». Επιλέγοντας το «Insert Step», εμφανίζεται το βήμα «Acquisition - Acquire» στη λίστα «Current Steps».



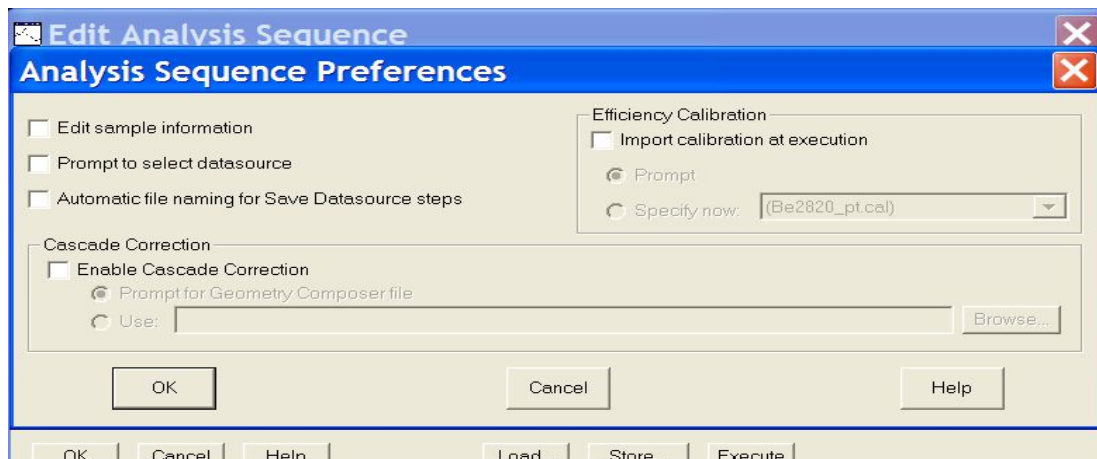
6. Επιλέγοντας το βήμα «Acquisition – Acquire» που εμφανίστηκε στη λίστα «Current Steps» και στη συνέχεια, επιλέγοντας την επιλογή «Setup Algorithm» από την κεντρική λίστα «Edit Steps», αναδύεται το παράθυρο «Acquire Setup», όπου εισάγεται ο επιθυμητός χρόνος συλλογής φάσματος.



7. Στη συνέχεια, επιλέγοντας το βήμα «Save Datasource» από τη λίστα «Step Selection», αποθηκεύεται το συλλεχθέν φάσμα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές είναι αναγκαίο, για την Έναρξη-Λήξη-Αποθήκευση όσων συνεχόμενων φασμάτων χρειάζονται. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι το χρονικό διάστημα λήψης φάσματος που ορίστηκε στο βήμα νι, θα πρέπει να είναι ίδιο σε όλα τα επιμέρους «Acquisition-Acquire» βήματα, διότι δε δίνεται η επιλογή της λήψης διαφορετικής χρονικής διάρκειας φασμάτων σε ακολουθία.

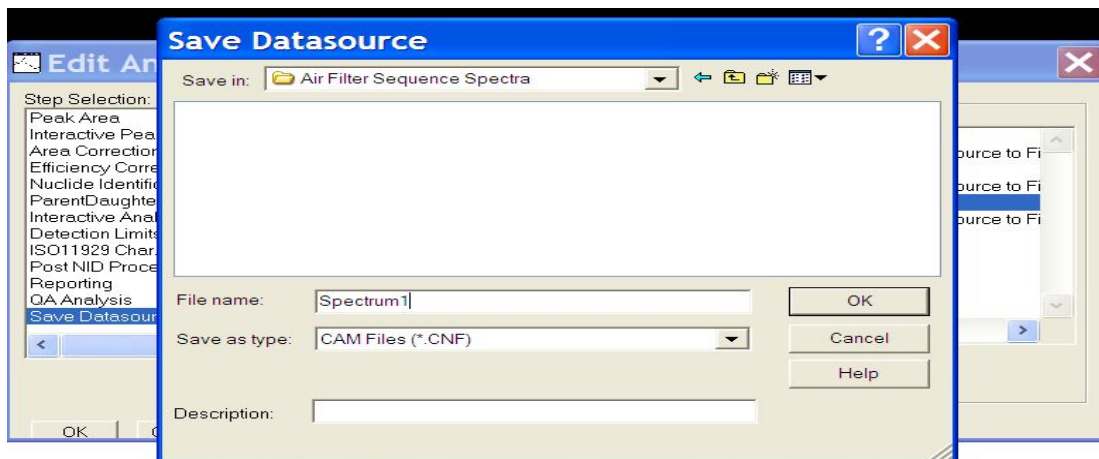


8. Έπειτα, επιλέγοντας το «Sequence Preferences» αναδύεται το παράθυρο «Analysis Sequence Preferences» όπου επιλέγοντας το «Automatic file naming for Save Datasource steps» το ίδιο το λογισμικό αποθηκεύει το αρχείο της συλλογής φάσματος στον φάκελο CAMFILES σε μορφή .CNF και τους δίνει ως όνομα τον εκάστοτε αύξοντα αριθμό ξεκινώντας από το 00000001.CNF έως το 10⁸.

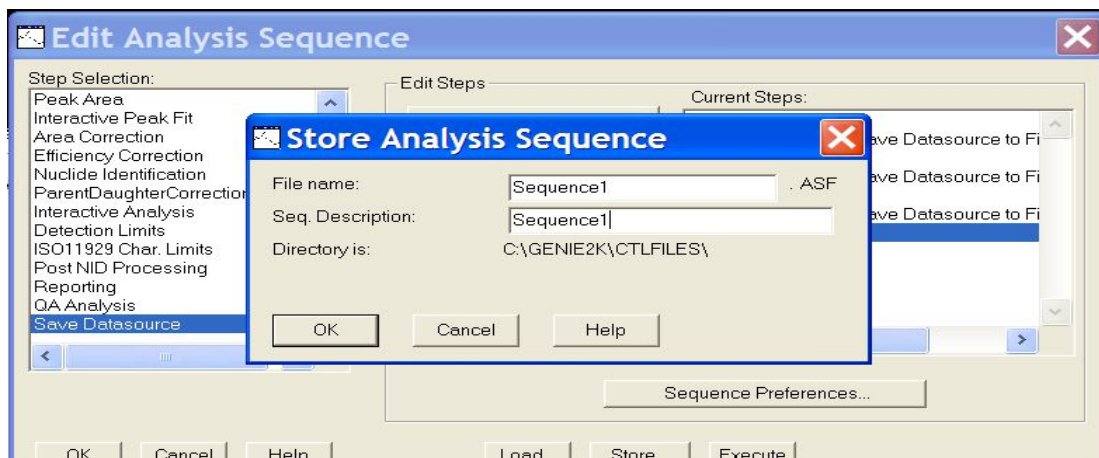


9. Για την επιλογή διαφορετικής ονομασίας των συλλεχθέντων φασμάτων, καθώς και προσδιορισμό του φακέλου αποθήκευσής τους (όπως ορίστηκε στο βήμα i), το βήμα viii παραλείπεται και στο παράθυρο «Edit Analysis Sequence» επιλέγεται είτε «Execute» για εκτέλεση της ακολουθίας είτε «Store» για αποθήκευση της ακολουθίας, όπως φαίνεται στα βήματα x και xi αντίστοιχα.

10. Για την εκτέλεση της ακολουθίας επιλέγεται το «Execute». Στο αναδυόμενο παράθυρο που εμφανίζεται χρειάζεται να προσδιορισθεί η διεύθυνση του φακέλου όπου θα αποθηκεύονται τα φάσματα, καθώς και κάθε όνομα φάσματος που θα συλλεχθεί, με τη σειρά που θα συλλεχθεί. Αν, για παράδειγμα, η ακολουθία ανάλυσης περιλαμβάνει τη συλλογή 10 φασμάτων, θα ζητηθούν με τη σειρά και τα 10 ονόματα πριν ξεκινήσει η λήψη φάσματος. Απαιτείται προσοχή να μη δοθεί το ίδιο όνομα σε 2 ή περισσότερα φάσματα που περιέχονται στον ίδιο φάκελο.



11. Μόλις ετοιμαστεί η ακολουθία ανάλυσης, για την αποθήκευσή της για μελλοντική χρήση, στο παράθυρο «Edit Analysis Sequence» επιλέγεται το «Store», και στο αναδυόμενο παράθυρο δίνεται το όνομα της ακολουθίας, καθώς και μια μικρή περιγραφή της, ώστε να ξεχωρίζει από άλλες αποθηκευμένες ακολουθίες.



12. Για την επιλογή μιας ήδη αποθηκευμένης ακολουθίας ανάλυσης, από το μενού επιλογών του GENIE2000 γίνεται επιλογή του «Analyze». Από τις επιλογές που αναδύονται επιλέγεται το «Execute Sequence», όπου και εμφανίζονται όλες οι αποθηκευμένες ακολουθίες ανάλυσης με τα ονόματά τους. Μόλις επιλεγεί η επιθυμητή ακολουθία, επιλέγοντας το «Start» το πρόγραμμα ζητά από το χρήστη τις πληροφορίες που αναφέρονται στο βήμα x και η λήψη φάσματος ξεκινά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως αν επιλεγεί η λήψη φασμάτων με ακολουθία, το GENIE2000 δε δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να κλείσει το πρόγραμμα και τον υπολογιστή και η λήψη του φάσματος να συνεχιστεί, όπως γίνεται στην απλή λήψη φάσματος. Επομένως, ο υπολογιστής, καθώς και το πρόγραμμα πρέπει να μείνουν ανοιχτά καθ' όλη της διάρκεια της λήψης φάσματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΓ

Συντελεστές επίλυσης εξισώσεων με χρήση της μεθόδου των (Forkkaric, et al., 2012)

Στο Παράρτημα ΙΓ δίνονται οι συντελεστές α_1 έως και α_{18} (για τις *Εξισώσεις 4.31* έως *4.38*) για κάθε φίλτρο αέρα και για κάθε σενάριο χρονικής διάρκειας λήψης διαδοχικών φασμάτων, όπως αυτοί προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα Mathematica, στα πλαίσια της διερεύνησης που έλαβε χώρα στο κεφάλαιο 4 της παρούσας Δ.Δ..

ΙΓ.1 1^ο τρίμηρο Δειγματοληψίας φίλτρων αέρα 4''

Πίνακας ΙΓ.1 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 1^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica, επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 5min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
30/3/2022	a0595	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	28.17	25.57	25.15	22.48	15.89	16.93	23.00	16.82	17.43	19.30
	a0596	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	28.17	25.57	25.15	22.48	15.89	16.93	23.00	16.82	17.43	19.30
	a0597	4.60	30.60	31.70	14.60	15.83	26.02	30.18	28.60	27.70	25.15	24.73	22.11	15.63	16.65	22.62	16.55	17.14	18.99
	a0598	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
31/3/2022	a0599	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	28.17	25.57	25.15	22.48	15.89	16.93	23.00	16.82	17.43	19.30
	a0600	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0601	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0602	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
1/4/2022	a0603	5.02	33.41	34.62	15.94	17.28	28.41	32.95	31.23	30.25	27.46	27.01	24.14	17.07	18.18	24.70	18.07	18.72	20.73
	a0604	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0605	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0606	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89

Πίνακας ΙΓ.2 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 1^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 10min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
30/3/2022	a0595	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	25.15	22.48	19.59	17.37	15.89	16.93	23.00	17.27	17.46	16.20
	a0596	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	25.15	22.48	19.59	17.37	15.89	16.93	23.00	17.27	17.46	16.20
	a0597	4.60	30.60	31.70	14.60	15.83	26.02	30.18	28.60	24.73	22.11	19.27	17.09	15.63	16.65	22.62	16.98	17.17	15.94
	a0598	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
31/3/2022	a0599	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	25.15	22.48	19.59	17.37	15.89	16.93	23.00	17.27	17.46	16.20
	a0600	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0601	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0602	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
1/4/2022	a0603	5.02	33.41	34.62	15.94	17.28	28.41	32.95	31.23	27.01	24.14	21.04	18.66	17.07	18.18	24.70	18.54	18.75	17.40
	a0604	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0605	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0606	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54

Πίνακας ΙΓ.3 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 1^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 15min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
30/3/2022	a0595	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	22.23	19.76	15.16	13.43	15.89	16.93	23.00	17.29	17.14	13.60
	a0596	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	22.23	19.76	15.16	13.43	15.89	16.93	23.00	17.29	17.14	13.60
	a0597	4.60	30.60	31.70	14.60	15.83	26.02	30.18	28.60	21.87	19.44	14.91	13.21	15.63	16.65	22.62	17.00	16.86	13.38
	a0598	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
31/3/2022	a0599	4.68	31.11	32.24	14.84	16.09	26.45	30.69	29.08	22.23	19.76	15.16	13.43	15.89	16.93	23.00	17.29	17.14	13.60
	a0600	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0601	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0602	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
1/4/2022	a0603	5.02	33.41	34.62	15.94	17.28	28.41	32.95	31.23	23.88	21.22	16.28	14.42	17.07	18.18	24.70	18.56	18.41	14.61
	a0604	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0605	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0606	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72

Γ.2 2^ο τρίμηρο Δειγματοληψίας φίλτρων αέρα 4''

Πίνακας Γ.4 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 2^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 5min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
10/5/2022	a0608	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0609	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0610	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0611	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
11/5/2022	a0612	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0613	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0614	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0615	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
12/5/2022	a0616	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0617	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0618	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89
	a0619	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	30.49	27.67	27.22	24.33	17.20	18.32	24.89	18.21	18.86	20.89

Πίνακας ΠΓ.5 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 2^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 10min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
10/5/2022	a0608	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0609	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0610	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0611	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
11/5/2022	a0612	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0613	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0614	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0615	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
12/5/2022	a0616	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0617	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0618	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54
	a0619	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	27.22	24.33	21.20	18.81	17.20	18.32	24.89	18.69	18.90	17.54

Πίνακας ΙΓ.6 : Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη δειγματοληψία και κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα φίλτρα αέρα 4'' του 2^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022, όπως αυτοί προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Mathematica επιλέγοντας συγκεντρώσεις ενεργότητας δύο διαδοχικών φασμάτων χρονικής διάρκειας 15min το κάθε ένα.

Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Κωδικός Φίλτρου	Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη Δειγματοληψία						Συντελεστές Επίλυσης Εξισώσεων κατά τη γ-φασματοσκοπική Ανάλυση											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈
10/5/2022	a0608	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0609	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0610	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0611	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
11/5/2022	a0612	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0613	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0614	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0615	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
12/5/2022	a0616	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0617	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0618	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72
	a0619	5.06	33.67	34.89	16.07	17.42	28.63	33.22	31.48	24.07	21.39	16.41	14.54	17.20	18.32	24.89	18.71	18.55	14.72

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΑ

Συμπληρωματικές καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης

Πέραν των βασικών βαθμονομήσεων απόδοσης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5 της παρούσας Δ.Δ., στα πλαίσια των ερευνών που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής πραγματοποιήθηκαν 15 επιπρόσθετες βαθμονομήσεις στους ανιχνευτές XtRa, LEGe και Ge2 του ΕΠΤ-ΕΜΠ για πλήθος συνδυασμών «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος-ανιχνευτή», οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα ΙΑ.

Να σημειωθεί ότι για κάθε καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης δίνονται οι συντελεστές των εξισώσεων της (για χαμηλές $<279.19\text{keV}$, και υψηλές ενέργειες $>279.19\text{keV}$) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\ln(\text{eff}) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot \ln(E)^2$$

όπου eff είναι η απόδοση φωτοκορυφής για την εκάστοτε ενέργεια φωτονίου και E είναι η ενέργεια του φωτονίου σε keV.

ΙΑ.1 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή XtRa

Οι συνδυασμοί «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» που βαθμονομήθηκαν στον ανιχνευτή XtRa είναι οι ακόλουθοι:

- i. *Συνδυασμός 1* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 3.9cm από αλουμίνιο, κλεισμένη με πλαστική μεμβράνη (στην πλευρά της γεωμετρίας που είναι στραμμένη προς τον ανιχνευτή), γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.07gr/cm^3 .
- ii. *Συνδυασμός 2* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 3.9cm από αλουμίνιο, κλεισμένη με φύλλο αλουμινίου (στην πλευρά της γεωμετρίας που είναι στραμμένη προς τον ανιχνευτή), γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.07gr/cm^3 .
- iii. *Συνδυασμός 3* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 3.9cm από αλουμίνιο, κλεισμένη με φύλλο αλουμινίου (στην πλευρά της γεωμετρίας που είναι στραμμένη προς τον ανιχνευτή), γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.49gr/cm^3 .

- iv. *Συνδυασμός 4* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.00gr/cm^3 .
- v. *Συνδυασμός 5* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, γεμισμένη με σκωρία υψικαμίνου (blast furnace slag) πυκνότητας 1.724gr/cm^3 .
- vi. *Συνδυασμός 6* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, με τοποθετημένο στο εσωτερικό της φίλτρο αέρα κομμένο σε σχήμα δίσκου διαμέτρου 4.275cm και πάχους 0.2mm .
- vii. *Συνδυασμός 7* : Φίλτρο αέρα 4'' ενεργής διαμέτρου 9cm (καθώς από την προσαρμογή του φίλτρου στην αντλία για τη δειγματοληψία αέρα, μέρος της εξωτερικής επιφάνειας του φίλτρου, σχήματος δακτυλίου και πάχους $\sim 0.58\text{cm}$, δεν είναι διαθέσιμο για συλλογή δείγματος) πάχους 0.5mm .

Πίνακας ΙΑ.1α : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή XtRa για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 1		Συνδυασμός 2		Συνδυασμός 3	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a_0	-8.544	2.497	-8.7828	2.3818	-9.4838	2.3637
a_1	3.2241	-0.8382	3.3093	-0.8079	3.5632	-0.8145
a_2	-0.3629	0.0103	-0.3709	0.0081	-0.3946	0.0092
RMS	0.88%	0.66%	1.03%	0.72%	1.43%	0.70%
R^2	0.9979	0.9998	0.9970	0.9998	0.9937	0.9998

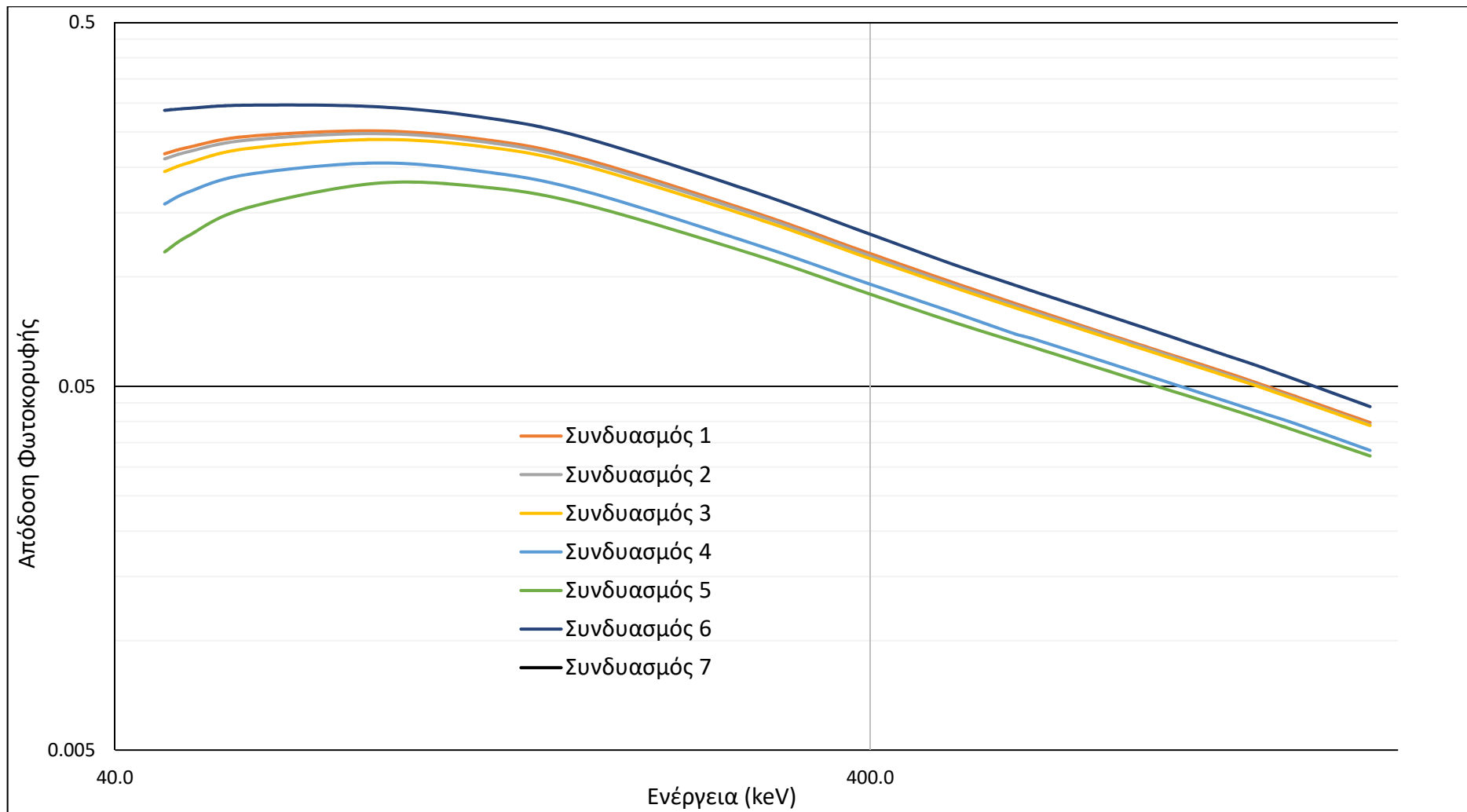
Πίνακας ΙΑ.1β : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή XtRa για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 4		Συνδυασμός 5		Συνδυασμός 6	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a_0	-10.549	2.2045	-13.524	1.9854	-6.4168	2.7706
a_1	3.9367	-0.8206	5.0262	-0.7854	2.4547	-0.8745
a_2	-0.4327	0.0101	-0.5347	0.0086	-0.289	0.0122
RMS	2.38	0.72	3.48%	0.99%	0.445	0.79%
R^2	0.9837	0.9998	0.9711	0.9998	0.9996	0.9997

Πίνακας ΙΔ.1γ : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή XtRa για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 7	
	<279.19 keV	>279.19 keV
a ₀	-6.6843	2.3313
a ₁	2.4301	-0.8547
a ₂	-0.2857	0.0131
RMS	0.16	0.75
R ²	0.9999	0.9997

Στο *Σχήμα ΙΔ.1* που ακολουθεί δίνεται η συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή XtRa.



Σχήμα 1Α.1 : Συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή XtRa.

ΙΔ.2 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή LEGe

Οι συνδυασμοί «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» που βαθμονομήθηκαν στον ανιχνευτή LEGe είναι οι ακόλουθοι:

- i. *Συνδυασμός 1* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 3.9cm από αλουμίνιο, κλεισμένη με πλαστική μεμβράνη (στην πλευρά της γεωμετρίας που είναι στραμμένη προς τον ανιχνευτή), γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.00gr/cm^3 .
- ii. *Συνδυασμός 2* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 60.57cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 6.77cm από PVC, γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.00gr/cm^3 .
- iii. *Συνδυασμός 3* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, με τοποθετημένο στο εσωτερικό της φίλτρο αέρα κομμένο σε σχήμα δίσκου διαμέτρου 4.275cm και πάχους 0.2mm .
- iv. *Συνδυασμός 4* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.00gr/cm^3 .
- v. *Συνδυασμός 5* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 18.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.58cm από πολυπροπυλένιο, γεμισμένη με τυπικής σύστασης χώμα πυκνότητας 1.00gr/cm^3 .
- vi. *Συνδυασμός 6* : Κυλινδρική γεωμετρία όγκου 26.1cm^3 , εσωτερικής διαμέτρου 5.23cm από πολυπροπυλένιο, γεμισμένη με σκωρία υψικαμίνου (blast furnace slag) πυκνότητας 1.724gr/cm^3 .

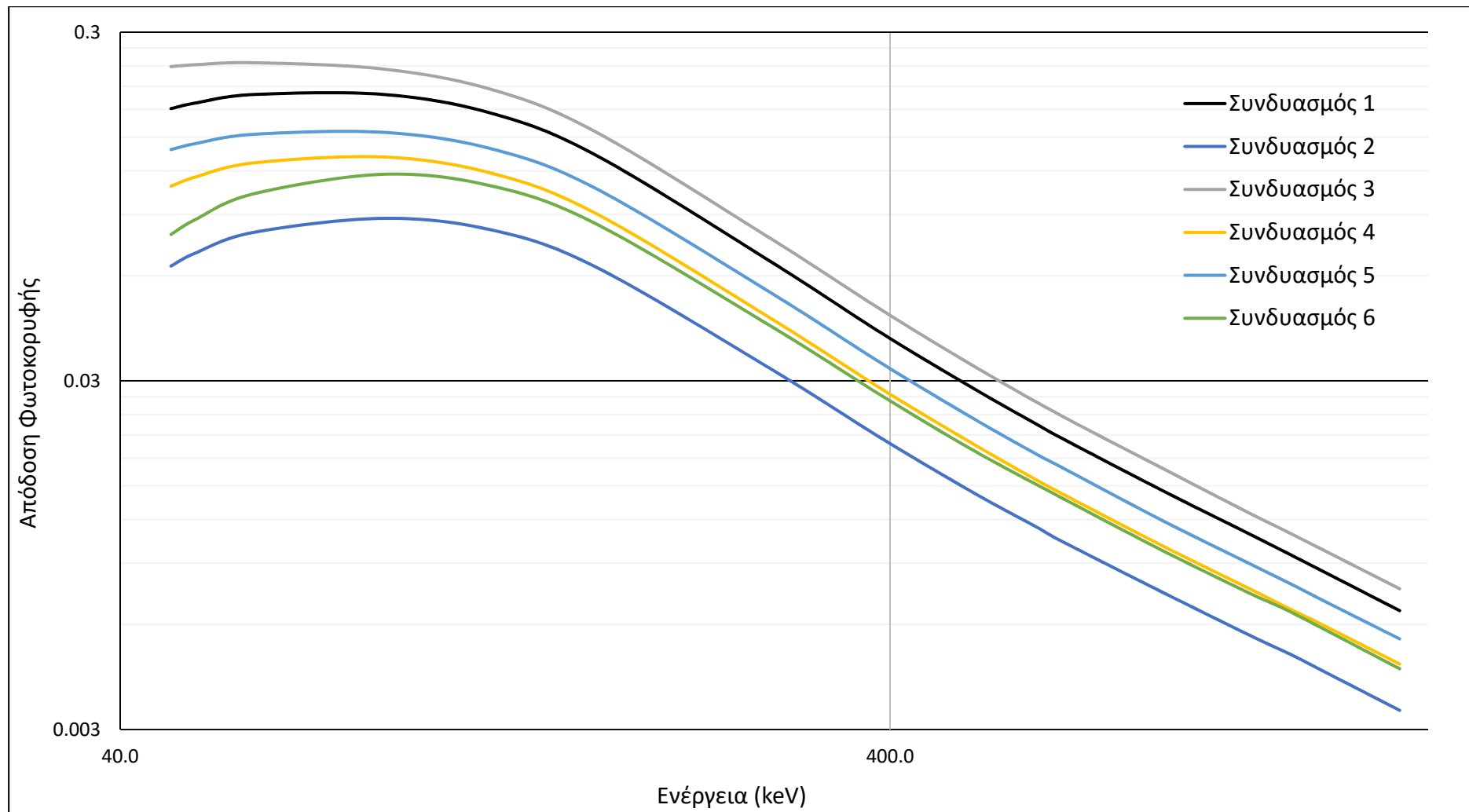
Πίνακας ΙΔ.2α : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή LEGe για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 1		Συνδυασμός 2		Συνδυασμός 3	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a_0	-13.046	8.7218	-17.268	7.613	-11.025	8.8398
a_1	5.3468	-2.6488	6.6332	-2.5451	4.6194	-2.6313
a_2	-0.6237	0.1094	-0.7415	0.1036	-0.5533	0.1074
RMS	0.65%	1.09%	1.45%	1.19%	1.46%	1.01%
R^2	0.9998	0.9998	0.9984	0.9997	0.9990	0.9998

Πίνακας ΙΑ.2β : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή LEGe για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 4		Συνδυασμός 5		Συνδυασμός 6	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a ₀	-15.006	8.4265	-13.463	8.4948	-18.444	7.687
a ₁	5.9387	-2.6806	5.3852	-2.6471	7.2185	-2.4759
a ₂	-0.6789	0.1126	-0.6238	0.1098	-0.7997	0.0979
RMS	0.85%	1.03%	0.72%	0.95%	2.23%	1.45%
R ²	0.9996	0.9998	0.9997	0.9998	0.9962	0.9997

Στο *Σχήμα ΙΑ.2* που ακολουθεί δίνεται η συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή LEGe.



Σχήμα 1Α.2 : Συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή LEGe.

ΙΔ.3 Βαθμονομήσεις απόδοσης στον ανιχνευτή Ge

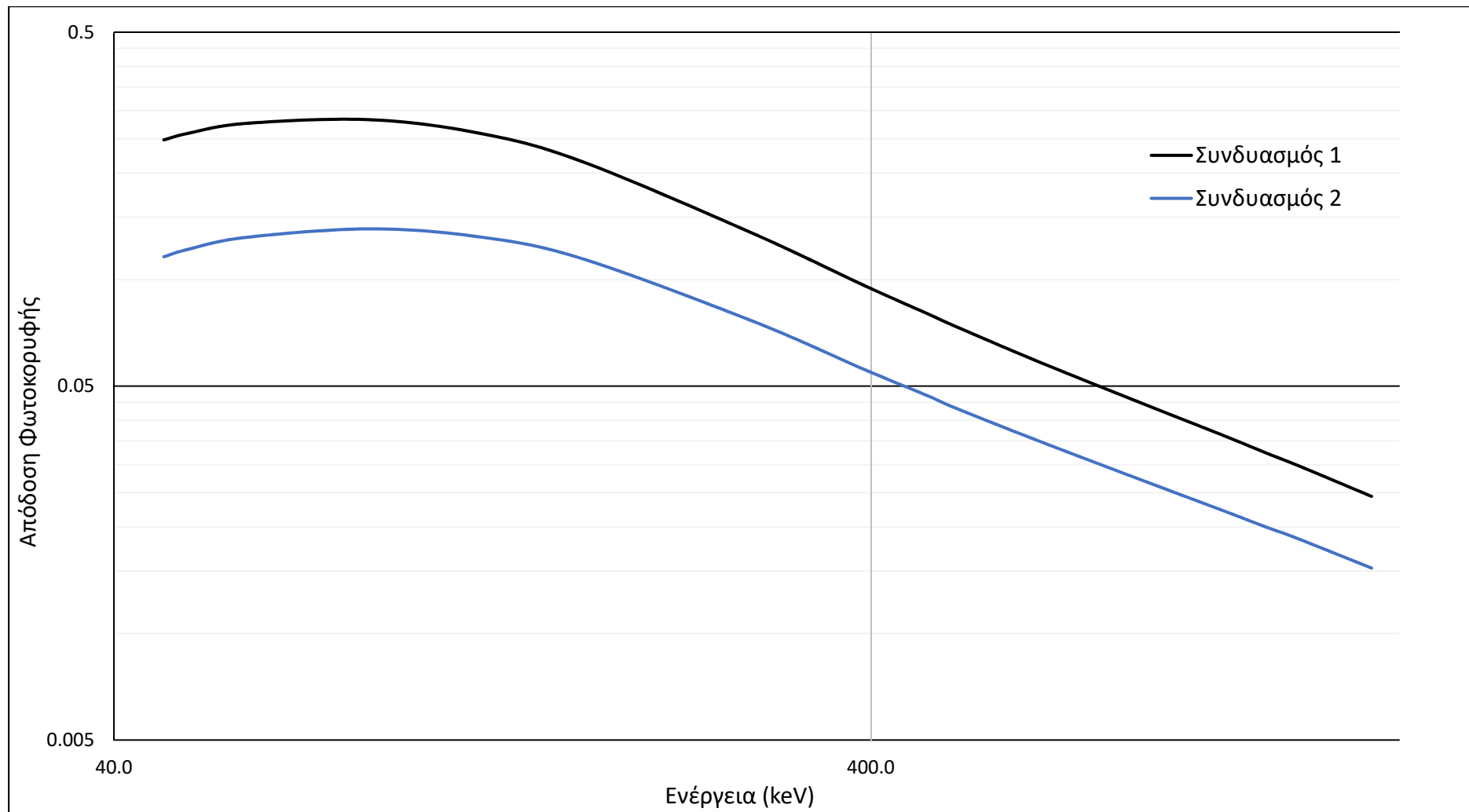
Οι συνδυασμοί «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» που βαθμονομήθηκαν στον ανιχνευτή Ge2 είναι οι ακόλουθοι:

- i. Συνδυασμός 1 : Φίλτρο Whatman 90mm, διπλωμένο σε γεωμετρία $3.2 \times 3.2 \text{cm}^2$ πάχους 1.5mm.
- ii. Συνδυασμός 2 : Φίλτρο Whatman 90mm, το οποίο έχει διάμετρο 9cm και πάχος 0.5mm.

Πίνακας ΙΔ.3 : Συντελεστές καμπύλων βαθμονόμησης απόδοσης για τον ανιχνευτή Ge για διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος».

	Συνδυασμός 1		Συνδυασμός 2	
	<279.19 keV	>279.19 keV	<279.19 keV	>279.19 keV
a_0	-9.986	5.059	-10.768	3.8647
a_1	4.0032	-1.522	3.9393	-1.3687
a_2	-0.4592	0.0474	-0.4412	0.0399
RMS	0.81%	0.72%	0.61%	0.66%
R^2	0.9992	0.9998	0.9992	0.9999

Στο **Σχήμα ΙΔ.3** που ακολουθεί δίνεται η συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή Ge2



Σχήμα 1Α.3 : Συγκριτική αναπαράσταση των καμπύλων βαθμονόμησης για τους διάφορους συνδυασμούς «γεωμετρίας δείγματος-υλικού δείγματος» στον ανιχνευτή Ge2.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΕ

Ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου

Στο Παράρτημα ΙΕ δίνεται το σύνολο των επιμέρους συγκεντρώσεων πυρήνων/m³ των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου για κάθε συλλεχθέν φίλτρο 4'' και κάθε μέθοδος που εφαρμόστηκε για τα 2 τριήμερα δειγματοληψίας (30/3/2022-1/4/2022 και 10/5/2022-12/5/2022), όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 της παρούσας Δ.Δ..

ΙΕ.1 Υπολογισθείσες συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Στους Πίνακες *ΙΕ.1, ΙΕ.2, ΙΕ.3, ΙΕ.4, ΙΕ.5* και *ΙΕ.6*, που ακολουθούν δίνονται οι συγκεντρώσεις πυρήνων/m³ των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα συλλεχθέντα φίλτρα 4'', όπως αυτοί υπολογίστηκαν με τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται ως «Κάτω» και «Άνω» όριο λόγω της διερεύνησης που έλαβε χώρα για αναζήτηση θετικών λύσεων του συστήματος αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί των μετρούμενων τιμών του ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi από τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις των φίλτρων. Η συνεισφορά των πυρήνων του ²¹⁴Po στην τελική ατμοσφαιρική συγκέντρωση των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου είναι αμελητέα και γι' αυτό δε συμπεριλαμβάνεται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας ΙΕ.1 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 5min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³			
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο		
a0595	Po-218	-							
	Pb-214								
	Bi-214								
a0596	Po-218	1411	1355	5.31	5.10	3618	4510		
	Pb-214	867	1582	0.37	0.68				
	Bi-214	1340	1573	0.78	0.92				
a0597	Po-218	320	2565	1.2	9.65	4187	4917		
	Pb-214	2217	116	0.95	0.05				
	Bi-214	1650	2236	0.96	1.30				
a0598	Po-218	172	1413	0.65	5.32	2209	2913		
	Pb-214	1102	212	0.47	0.09				
	Bi-214	935	1288	0.55	0.75				
a0599	Po-218	-	389	-	1.46	-	4260		
	Pb-214		2577		1.11				
	Bi-214		1294		0.76				
a0600	Po-218	154	1121	0.58	4.22	2256	2441		
	Pb-214	1217	287	0.52	0.12				
	Bi-214	885	1033	0.52	0.60				
a0601	Po-218	783	1332	2.95	5.01	2684	2888		
	Pb-214	718	254	0.31	0.11				
	Bi-214	1183	1302	0.69	0.76				
a0602	Po-218	949	127	3.57	0.48	2100	2596		
	Pb-214	254	1418	0.11	0.61				
	Bi-214	897	1051	0.52	0.61				
a0603	Po-218	667	1643	2.51	6.18	3147	3415		
	Pb-214	1173	255	0.5	0.11				
	Bi-214	1307	1517	0.76	0.89				
a0604	Po-218	807	1321	3.04	4.97	3018	4073		
	Pb-214	993	1183	0.43	0.51				
	Bi-214	1218	1569	0.71	0.92				
a0605	Po-218	-	316	-	1.19	-	4740		
	Pb-214		2563		1.10				
	Bi-214		1861		1.09				
a0606	Po-218	-							
	Pb-214								
	Bi-214								

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

Πίνακας ΙΕ.2 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 10min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³	
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο
a0595	Po-218	76	1433	0.29	5.39	4410	5089
	Pb-214	2831	1788	1.22	0.77		
	Bi-214	1503	1868	0.88	1.09		
a0596	Po-218	1429	2149	5.37	8.08	3478	3911
	Pb-214	717	203	0.31	0.09		
	Bi-214	1332	1559	0.78	0.91		
a0597	Po-218	-					
	Pb-214						
	Bi-214						
a0598	Po-218	364	1282	1.37	4.82	2354	2638
	Pb-214	1035	211	0.44	0.09		
	Bi-214	955	1145	0.56	0.67		
a0599	Po-218	284	2502	1.07	9.41	3085	4175
	Pb-214	1804	165	0.77	0.07		
	Bi-214	997	1508	0.58	0.88		
a0600	Po-218	849	735	3.19	2.77	1986	2805
	Pb-214	222	940	0.10	0.4		
	Bi-214	915	1130	0.53	0.66		
a0601	Po-218	-	536	-	2.02	3594	
	Pb-214		1653		0.71		
	Bi-214		1405		0.82		
a0602	Po-218	230	563	0.86	2.12	2357	3298
	Pb-214	1122	1406	0.48	0.60		
	Bi-214	1005	1329	0.59	0.78		
a0603	Po-218	131	1958	0.49	7.37	2876	3696
	Pb-214	1540	84	0.66	0.04		
	Bi-214	1205	1654	0.70	0.96		
a0604	Po-218	358	1956	1.35	7.36	3537	4273
	Pb-214	1746	477	0.75	0.20		
	Bi-214	1433	1840	0.84	1.07		
a0605	Po-218	730	1885	2.75	7.09	3434	3849
	Pb-214	1320	314	0.57	0.13		
	Bi-214	1384	1650	0.81	0.96		
a0606	Po-218	14	625	0.05	2.35	3501	4036
	Pb-214	2100	1786	0.90	0.77		
	Bi-214	1387	1625	0.81	0.95		

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

Πίνακας ΙΕ.3 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 15min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³	
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο
a0595	Po-218	306	1661	1.15	6.25	4646	5131
	Pb-214	2684	1461	1.15	0.63		
	Bi-214	1656	2009	0.97	1.17		
a0596	Po-218	-					
	Pb-214						
	Bi-214						
a0597	Po-218	1230	-	4.63	-	3888	
	Pb-214	1223		0.53			
	Bi-214	1435		0.84			
a0598	Po-218	1049	1405	3.95	5.28	2122	2840
	Pb-214	130	234	0.06	0.10		
	Bi-214	943	1201	0.55	0.70		
a0599	Po-218	-	66	-	0.25	-	3963
	Pb-214		2711		1.16		
	Bi-214		1186		0.69		
a0600	Po-218	412	1041	1.55	3.92	2236	2364
	Pb-214	895	280	0.38	0.12		
	Bi-214	929	1043	0.54	0.61		
a0601	Po-218	446	1030	1.68	3.88	3424	3578
	Pb-214	1677	1132	0.72	0.49		
	Bi-214	1301	1416	0.76	0.83		
a0602	Po-218	-	155	-	0.58	-	2418
	Pb-214		1176		0.5		
	Bi-214		1087		0.63		
a0603	Po-218	-	566	-	2.13	-	3589
	Pb-214		1563		0.67		
	Bi-214		1460		0.85		
a0604	Po-218	171	1269	0.64	4.77	3630	3810
	Pb-214	2075	973	0.89	0.42		
	Bi-214	1384	1568	0.81	0.91		
a0605	Po-218	447	2316	1.68	8.71	3822	4485
	Pb-214	1931	232	0.83	0.10		
	Bi-214	1444	1937	0.84	1.13		
a0606	Po-218	381	1081	1.43	4.07	3956	4128
	Pb-214	1979	1313	0.85	0.56		
	Bi-214	1596	1734	0.93	1.01		

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

Πίνακας ΙΕ.4 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 5min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³			
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο		
a0608	Po-218	-							
	Pb-214								
	Bi-214								
a0609	Po-218	79	1375	0.30	5.17	2262	3064		
	Pb-214	1424	245	0.61	0.11				
	Bi-214	759	1444	0.44	0.84				
a0610	Po-218	-	151	-	0.57	-	1812		
	Pb-214		1156		0.50				
	Bi-214		505		0.29				
a0611	Po-218	269	568	1.01	2.14	1386	1827		
	Pb-214	460	548	0.20	0.24				
	Bi-214	657	711	0.38	0.41				
a0612	Po-218	445	712	1.67	2.68	2188	2895		
	Pb-214	1084	1318	0.47	0.57				
	Bi-214	659	865	0.38	0.50				
a0613	Po-218	744	556	2.91	2.09	2861	3469		
	Pb-214	887	1532	0.38	0.66				
	Bi-214	1230	1381	0.72	0.81				
a0614	Po-218	938	1300	3.53	4.89	2137	2946		
	Pb-214	151	313	0.06	0.13				
	Bi-214	1048	1333	0.61	0.78				
a0615	Po-218	589	-	2.21	-	2412	-		
	Pb-214	740		0.32					
	Bi-214	1083		0.63					
a0616	Po-218	3023	3205	11.37	12.06	4765	5624		
	Pb-214	218	877	0.09	0.38				
	Bi-214	1524	1542	0.89	0.90				
a0617	Po-218	31	755	0.12	2.84	3595	4029		
	Pb-214	2348	1868	1.01	0.8				
	Bi-214	1216	1406	0.71	0.82				
a0618	Po-218	581	820	2.18	3.09	3210	4049		
	Pb-214	1287	1774	0.55	0.76				
	Bi-214	1342	1455	0.78	0.85				
a0619	Po-218	897	196	3.37	0.74	3208	3402		
	Pb-214	857	1789	0.37	0.77				
	Bi-214	1454	1417	0.85	0.83				

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

Πίνακας ΙΕ.5 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 10min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³	
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο
a0608	Po-218	-	197	-	0.74	-	4237
	Pb-214		3254		1.40		
	Bi-214		786		0.46		
a0609	Po-218	967	753	3.64	2.83	2357	2846
	Pb-214	418	935	0.18	0.40		
	Bi-214	972	1158	0.57	0.68		
a0610	Po-218	-					
	Pb-214						
	Bi-214						
a0611	Po-218	337	837	1.27	3.15	1739	1871
	Pb-214	668	198	0.29	0.08		
	Bi-214	734	836	0.43	0.49		
a0612	Po-218	417	1540	1.57	5.79	2130	2665
	Pb-214	1071	152	0.46	0.07		
	Bi-214	642	973	0.37	0.57		
a0613	Po-218	1533	739	5.77	2.78	3434	3585
	Pb-214	441	1459	0.19	0.63		
	Bi-214	1460	1387	0.85	0.81		
a0614	Po-218	190	1415	0.72	5.32	2298	2797
	Pb-214	1125	56	0.48	0.02		
	Bi-214	983	1326	0.57	0.77		
a0615	Po-218	1122	-	4.22	-	2300	-
	Pb-214	91		0.04			
	Bi-214	1087		0.63			
a0616	Po-218	1967	892	7.40	3.35	4078	4347
	Pb-214	971	2368	0.42	1.02		
	Bi-214	1140	1087	0.67	0.63		
a0617	Po-218	104	1793	0.39	6.74	3499	4234
	Pb-214	2067	715	0.89	0.31		
	Bi-214	1328	1726	0.77	1.01		
a0618	Po-218	1096	720	4.12	2.71	3168	4004
	Pb-214	719	1745	0.31	0.75		
	Bi-214	1353	1539	0.79	0.90		
a0619	Po-218	325	820	1.22	3.08	3986	4168
	Pb-214	2039	1613	0.88	0.69		
	Bi-214	1622	1735	0.95	1.01		

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

Πίνακας ΙΕ.6 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 15min η κάθε μία και τη μέθοδο επίλυσης του πλήρους συστήματος αναλυτικών εξισώσεων.

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³		Bq/m ³		Σύνολο πυρήνων/m ³	
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Άνω όριο
a0608	Po-218	108	1486	0.41	5.59	3656	4180
	Pb-214	2785	1677	1.20	0.72		
	Bi-214	763	1017	0.45	0.59		
a0609	Po-218	610	-	2.29	-	2680	-
	Pb-214	1027		0.44			
	Bi-214	1043		0.61			
a0610	Po-218	379	80	1.42	0.30	1478	1910
	Pb-214	559	1222	0.24	0.52		
	Bi-214	540	608	0.32	0.35		
a0611	Po-218	180	608	0.68	2.29	1558	2128
	Pb-214	747	694	0.32	0.30		
	Bi-214	631	826	0.37	0.48		
a0612	Po-218	683	1372	2.57	5.16	2346	2493
	Pb-214	901	235	0.39	0.10		
	Bi-214	762	886	0.44	0.52		
a0613	Po-218	-	73	-	0.28	-	3639
	Pb-214		2244		0.96		
	Bi-214		1322		0.77		
a0614	Po-218	35	17	0.13	0.06	2044	2912
	Pb-214	1173	1684	0.50	0.72		
	Bi-214	836	1211	0.49	0.71		
a0615	Po-218	266	1327	1.00	4.99	2505	2692
	Pb-214	1197	113	0.51	0.05		
	Bi-214	1042	1252	0.61	0.73		
a0616	Po-218	1471	884	5.53	3.33	4589	5440
	Pb-214	1953	3107	0.84	1.33		
	Bi-214	1165	1449	0.68	0.85		
a0617	Po-218	872	1543	3.28	5.80	3311	3489
	Pb-214	1029	402	0.44	0.17		
	Bi-214	1410	1544	0.82	0.90		
a0618	Po-218	28	62	0.11	0.23	3147	3664
	Pb-214	1832	2263	0.79	0.97		
	Bi-214	1287	1339	0.75	0.78		
a0619	Po-218	453	1851	1.71	6.96	3362	3698
	Pb-214	1628	303	0.70	0.13		
	Bi-214	1281	1544	0.75	0.90		

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα αναλυτικών εξισώσεων σε εύρος $\pm 3\sigma$ περί της μετρούμενης τιμής.

ΙΕ.2 Υπολογισθείσες συγκεντρώσεις βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Στους *Πίνακες ΙΕ.7, ΙΕ.8, ΙΕ.9, ΙΕ.10, ΙΕ.11 και ΙΕ.12*, που ακολουθούν δίνονται οι συγκεντρώσεις πυρήνων/m³ των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στα συλλεχθέντα φίλτρα 4'', όπως αυτοί υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012). Τα αποτελέσματα δίνονται ως τιμή ±1σ. Η συνεισφορά των πυρήνων του ²¹⁴Po στην τελική ατμοσφαιρική συγκέντρωση των πυρήνων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου είναι αμελητέα και γι' αυτό δε συμπεριλαμβάνεται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας ΙΕ.7 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 5min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0595	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0596	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0597	Po-218	2200 ± 985	8.28 ± 3.70	7061 ± 1325
	Pb-214	802 ± 820	0.34 ± 0.35	
	Bi-214	4058 ± 338	2.37 ± 0.20	
a0598	Po-218	90 ± 640	0.34 ± 2.41	4021 ± 856
	Pb-214	1449 ± 542	0.62 ± 0.23	
	Bi-214	2481 ± 173	1.45 ± 0.10	
a0599	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0600	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0601	Po-218	734 ± 748	2.76 ± 2.81	5134 ± 997
	Pb-214	1312 ± 629	0.56 ± 0.27	
	Bi-214	3088 ± 197	1.80 ± 0.11	
a0602	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0603	Po-218	54 ± 829	0.20 ± 3.12	4950 ± 1107
	Pb-214	1854 ± 690	0.80 ± 0.30	
	Bi-214	3042 ± 249	1.77 ± 0.15	
a0604	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0605	Po-218	575 ± 871	2.16 ± 3.28	6614 ± 1165
	Pb-214	2020 ± 737	0.87 ± 0.32	
	Bi-214	4018 ± 237	2.34 ± 0.14	
a0606	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Πίνακας ΙΕ.8 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 10min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0595	Po-218			-
	Pb-214			
	Bi-214			
a0596	Po-218			-
	Pb-214			
	Bi-214			
a0597	Po-218			-
	Pb-214			
	Bi-214			
a0598	Po-218	39 ± 552	0.15 ± 2.08	3979 ± 777
	Pb-214	1521 ± 527	0.65 ± 0.23	
	Bi-214	2419 ± 142	1.41 ± 0.08	
a0599	Po-218			-
	Pb-214			
	Bi-214			
a0600	Po-218	201 ± 556	0.75 ± 2.09	3847 ± 790
	Pb-214	1270 ± 541	0.55 ± 0.23	
	Bi-214	2376 ± 145	1.39 ± 0.08	
a0601	Po-218	1036 ± 654	3.90 ± 2.46	5263 ± 920
	Pb-214	1030 ± 625	0.44 ± 0.27	
	Bi-214	3198 ± 167	1.87 ± 0.10	
a0602	Po-218	403 ± 677	1.51 ± 2.55	4429 ± 973
	Pb-214	1273 ± 672	0.55 ± 0.29	
	Bi-214	2753 ± 193	1.61 ± 0.11	
a0603	Po-218	146 ± 647	0.55 ± 2.43	5055 ± 912
	Pb-214	1777 ± 621	0.76 ± 0.27	
	Bi-214	3133 ± 167	1.83 ± 0.10	
a0604	Po-218	254 ± 712	0.95 ± 2.68	5961 ± 1005
	Pb-214	2031 ± 684	0.87 ± 0.29	
	Bi-214	3677 ± 187	2.15 ± 0.11	
a0605	Po-218	294 ± 778	1.10 ± 2.93	6563 ± 1096
	Pb-214	2285 ± 744	0.98 ± 0.32	
	Bi-214	3984 ± 207	2.32 ± 0.12	
a0606	Po-218			-
	Pb-214			
	Bi-214			

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Πίνακας ΙΕ.9 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 30/3/2022-1/4/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 15min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0595	Po-218	26 ± 967	0.10 ± 3.64	7253 ± 1395
	Pb-214	2852 ± 973	1.22 ± 0.42	
	Bi-214	4376 ± 255	2.55 ± 0.15	
a0596	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0597	Po-218	195 ± 971	0.73 ± 3.65	6432 ± 1398
	Pb-214	2392 ± 964	1.03 ± 0.41	
	Bi-214	3845 ± 286	2.24 ± 0.17	
a0598	Po-218	5 ± 906	0.02 ± 3.41	3990 ± 1257
	Pb-214	1525 ± 861	0.65 ± 0.37	
	Bi-214	2461 ± 134	1.44 ± 0.08	
a0599	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0600	Po-218	158 ± 587	0.59 ± 2.21	3778 ± 841
	Pb-214	1263 ± 587	0.54 ± 0.25	
	Bi-214	2357 ± 136	1.38 ± 0.08	
a0601	Po-218	108 ± 715	0.41 ± 2.69	5118 ± 1026
	Pb-214	1859 ± 717	0.80 ± 0.31	
	Bi-214	3151 ± 166	1.84 ± 0.10	
a0602	Po-218	278 ± 832	1.05 ± 3.13	4358 ± 1216
	Pb-214	1399 ± 872	0.60 ± 0.37	
	Bi-214	2681 ± 160	1.56 ± 0.09	
a0603	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0604	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0605	Po-218	195 ± 863	0.74 ± 3.25	6612 ± 1245
	Pb-214	2391 ± 868	1.03 ± 0.37	
	Bi-214	4025 ± 231	2.35 ± 0.14	
a0606	Po-218	228 ± 780	0.86 ± 2.93	5880 ± 1119
	Pb-214	1994 ± 782	0.86 ± 0.34	
	Bi-214	3657 ± 184	2.13 ± 0.11	

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkkaric, et al., 2012).

Πίνακας ΙΕ.10 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 5min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0608	Po-218	388 ± 967	1.46 ± 3.64	6785 ± 1290
	Pb-214	2695 ± 823	1.16 ± 0.35	
	Bi-214	3702 ± 224	2.16 ± 0.13	
a0609	Po-218	563 ± 1730	2.12 ± 6.51	3971 ± 2167
	Pb-214	1110 ± 1272	0.48 ± 0.55	
	Bi-214	2298 ± 287	1.34 ± 0.17	
a0610	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			
a0611	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			
a0612	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			
a0613	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			
a0614	Po-218	269 ± 687	1.01 ± 2.59	3874 ± 908
	Pb-214	1212 ± 568	0.52 ± 0.24	
	Bi-214	2392 ± 171	1.40 ± 0.10	
a0615	Po-218	327 ± 871	1.23 ± 3.28	4176 ± 1129
	Pb-214	1280 ± 690	0.55 ± 0.30	
	Bi-214	2570 ± 198	1.50 ± 0.12	
a0616	Po-218	108 ± 1373	0.41 ± 5.17	8611 ± 1863
	Pb-214	3707 ± 1224	1.59 ± 0.53	
	Bi-214	4797 ± 296	2.80 ± 0.17	
a0617	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			
a0618	Po-218	404 ± 920	1.52 ± 3.46	5605 ± 1247
	Pb-214	1818 ± 813	0.78 ± 0.35	
	Bi-214	3382 ± 214	1.97 ± 0.12	
a0619	Po-218			
	Pb-214		-	
	Bi-214			

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Πίνακας ΙΕ.11 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήνου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 10min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0608	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0609	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0610	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0611	Po-218	687 ± 477	2.58 ± 1.79	3117 ± 670
	Pb-214	517 ± 453	0.22 ± 0.19	
	Bi-214	1913 ± 128	1.12 ± 0.07	
a0612	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0613	Po-218	213 ± 769	0.80 ± 2.89	5192 ± 1099
	Pb-214	1777 ± 764	0.76 ± 0.33	
	Bi-214	3201 ± 180	1.87 ± 0.11	
a0614	Po-218	497 ± 547	1.87 ± 2.06	3991 ± 774
	Pb-214	1021 ± 523	0.44 ± 0.22	
	Bi-214	2473 ± 164	1.44 ± 0.10	
a0615	Po-218	861 ± 594	3.24 ± 2.23	4274 ± 839
	Pb-214	773 ± 569	0.33 ± 0.24	
	Bi-214	2639 ± 165	1.54 ± 0.10	
a0616	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0617	Po-218	618 ± 737	2.32 ± 2.77	6076 ± 1039
	Pb-214	1783 ± 708	0.77 ± 0.30	
	Bi-214	3675 ± 187	2.14 ± 0.11	
a0618	Po-218		-	
	Pb-214			
	Bi-214			
a0619	Po-218	483 ± 695	1.82 ± 2.62	5912 ± 980
	Pb-214	1781 ± 666	0.76 ± 0.29	
	Bi-214	3648 ± 183	2.13 ± 0.11	

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Πίνακας ΙΕ.12 : Αποτελέσματα συγκεντρώσεων (πυρήνες/m³) βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια του 2^{ου} τριμήρου δειγματοληψίας 10/5/2022-12/5/2022 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων χρονικής διάρκειας 15min η κάθε μία και τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

Κωδικός φάσματος	Ραδιενεργό ισότοπο	Πυρήνες/m ³	Bq/m ³	Σύνολο πυρήνων/m ³
a0608	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0609	Po-218	5 ± 804	0.02 ± 3.02	3930 ± 1126
	Pb-214	1525 ± 774	0.65 ± 0.33	
	Bi-214	2400 ± 153	1.40 ± 0.09	
a0610	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0611	Po-218	38 ± 525	0.14 ± 1.98	3016 ± 750
	Pb-214	1128 ± 524	0.48 ± 0.22	
	Bi-214	1851 ± 113	1.08 ± 0.07	
a0612	Po-218	262 ± 692	0.98 ± 2.60	4481 ± 991
	Pb-214	1597 ± 692	0.69 ± 0.30	
	Bi-214	2622 ± 157	1.53 ± 0.09	
a0613	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0614	Po-218	295 ± 606	1.11 ± 2.28	3992 ± 872
	Pb-214	1200 ± 606	0.52 ± 0.26	
	Bi-214	2497 ± 161	1.46 ± 0.09	
a0615	Po-218	568 ± 668	2.14 ± 2.51	4359 ± 958
	Pb-214	1075 ± 662	0.46 ± 0.28	
	Bi-214	2716 ± 183	1.58 ± 0.11	
a0616	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0617	Po-218	502 ± 819	1.89 ± 3.08	6187 ± 1177
	Pb-214	1868 ± 823	0.80 ± 0.35	
	Bi-214	3816 ± 191	2.23 ± 0.11	
a0618	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			
a0619	Po-218	-		
	Pb-214			
	Bi-214			

*Στα κελιά όπου υπάρχει «-» δεν έγινε δυνατή η εύρεση θετικής λύσης για το σύστημα εξισώσεων με τη μέθοδο των (Forkaric, et al., 2012).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΣΤ

Αντιπροσωπευτικά αρχεία εισόδου PENELOPE

Στο Παράρτημα ΙΣΤ παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αρχεία εισόδου «.geo» και «.in» για τον κώδικα Monte Carlo «PENELOPE», έκδοση του 2011, που χρησιμοποιήθηκαν για τις βαθμονομήσεις απόδοσης των διαφόρων συνδυασμών «ανιχνευτή-γεωμετρία δείγματος-υλικού δείγματος». Ενδεικτικά αναφέρεται ότι:

- τα αρχεία εισόδου «.in» αποτελούν τα κατευθυντήρια αρχεία εισόδου δεδομένων. Σε αυτά δηλώνονται σημαντικά στοιχεία όπως η ενέργεια/ες του σωματιδίου/ων της σημειακής πηγής, το είδος της ακτινοβολίας, ο αριθμός των ιστοριών σωματιδίων προς προσομοίωση, ο χρόνος προσομοίωσης, το είδος και το πλήθος των εικονικών ανιχνευτών ενέργειας δόσης, κτλ. Επίσης, στα αρχεία αυτά δηλώνονται τα ονόματα του αρχείου γεωμετρίας και υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση.
- στα αρχεία εισόδου «.geo» περιγράφεται η γεωμετρία του προβλήματος που προσομοιώνεται. Οι διάφορες γεωμετρίες όγκου περιγράφονται ως στοιχειώδη γεωμετρικά σχήματα των επιθυμητών διαστάσεων, φραγμένα από τις κατάλληλες επιφάνειες, τα οποία αποτελούνται από ομογενή υλικά. Κάθε μια από τις επιφάνειες που ορίζουν το σώμα συνοδεύεται από κατάλληλο μοναδιαίο δείκτη, που ορίζει σε ποια πλευρά της επιφάνειας βρίσκεται το ομογενές υλικό. Το υλικό από το οποίο αποτελείται το κάθε σώμα ορίζεται από έναν αύξοντα αριθμό υλικού που αντιστοιχεί με εξωτερικό αρχείο υλικού «.mat», το οποίο μπορεί να ληφθεί είτε από την έτοιμη βιβλιοθήκη υλικών του κώδικα Monte Carlo «PENELOPE» είτε να δημιουργηθεί εκ νέου.

Αρχείο εισόδου «.in» για τον ανιχνευτή XtRa και την κυλινδρική γεωμετρία όγκου 8.72cm^3 και διαμέτρου 3.9cm , που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δειγμάτων ρητίνης.

```
TITLE XtRa Geometry Alcap - Resin
. (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 661620 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0.0,0.0,-15.95
SBOX 4,4,1.5
SBODY 64
SCONE 0.0,0,180.0

.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME Carbon.dat
MFNAME Aluminum.dat
MFNAME Copper.dat
MFNAME Germanium.dat
MFNAME Iron.dat
MFNAME Lead.dat
MFNAME Tin.dat
MFNAME Polypropylene.dat
MFNAME NaI.dat
MFNAME resin.dat

.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN XtRa_Alcap.geo [Geometry file, up to 20 chars]

.
>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 0,662000,100 [Energy window and no. of bins]
NBANGL 10,10 [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]

.
ENDETC 0,662000,1000
EDBODY 15
EDBODY 16

.
>>>>>>> Job properties.
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 10000000 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 500000 [Allotted simulation time, in sec]
RSEED 12345 54321 [Random number generator seeds]

END [Ends the reading of input data]
```


SURFACE (7), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (4) Down Aluminum
MATERIAL(2)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (5) Side Cu 1/9
MATERIAL(3)
SURFACE (8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (6) Side Cu 2/9
MATERIAL(3)
SURFACE (9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (7) Side Cu 3/9
MATERIAL(3)
SURFACE (13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (10), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (8) Side Cu 4/9
MATERIAL(3)
SURFACE (13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (9) Side Cu 5/9
MATERIAL(3)
SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (15), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (10), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (10) Side Cu 6/9
MATERIAL(3)
SURFACE (15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (11) Side Cu 7/9
MATERIAL(3)
SURFACE (17), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (18), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (12) Side Cu 8/9
MATERIAL(3)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(-1)

SURFACE (19), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (18), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (20), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (13) Side Cu 9/9
MATERIAL(3)
SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (20), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (14) Ge front Dead Layer
MATERIAL(4)
SURFACE (21), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (15) Ge Crystal Upper
MATERIAL(4)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (47), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (16) Ge Crystal Well
MATERIAL(4)
SURFACE (24), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (49), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (47), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (17) Shield Upper 1/4
MATERIAL(5)
SURFACE (26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (18) Shield Upper 2/4
MATERIAL(6)
SURFACE (27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (19) Shield Upper 3/4
MATERIAL(7)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (20) Shield Upper 4/4
MATERIAL(3)
SURFACE (29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (21) Shield Side 1/4
MATERIAL(5)
SURFACE (30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (32), SIDE POINTER=(+1)
00


```

SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 31) Polyprorylene patoura
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 89), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 90), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 32) Ge Dead Layer peripheral
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 33) patoura tapsiou 1/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 55), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 58), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 34) patoura tapsiou 2/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 60), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 58), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 35) patoura tapsiou 3/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 61), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 55), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 36) patoura tapsiou 4/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 62), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 58), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 55), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 37) tapsi 1/5
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 63), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 65), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 67), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 68), SIDE POINTER=(+1)

```


BODY (54) NaI plug detector
MATERIAL(9)
SURFACE (95), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (87), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (55) upper Al of plug
MATERIAL(2)
SURFACE (82), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (84), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (77), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (56) back dead layer
MATERIAL(4)
SURFACE (23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (47), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (25), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (57) NaI plug dead layer down
MATERIAL(9)
SURFACE (86), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (95), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (87), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (58) NaI annulus periphreal d.l. in
MATERIAL(9)
SURFACE (81), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (96), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (75), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (59) NaI annulus periphreal d.l. out
MATERIAL(9)
SURFACE (97), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (79), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (75), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (60) NaI annulus up d.l.
MATERIAL(9)
SURFACE (98), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (97), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (96), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (61) plastic foil
MATERIAL(8)
SURFACE (99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (101), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (62) Al cap sides
MATERIAL(2)
SURFACE (101), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (102), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (100), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (103), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (63) Al cap bottom (upside down)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΖ

Κωδικοί φίλτρων και υγρών κλασμάτων επεξεργασίας δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας

Στο Παράρτημα ΙΖ και συγκεκριμένα στον *Πίνακα ΙΖ.1* που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κωδικοί του συνόλου των φίλτρων και υγρών κλασμάτων που προέκυψαν και αναλύθηκαν ως αποτέλεσμα της ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας, στα πλαίσια της παρούσας Δ.Δ..

Πίνακας ΙΖ.1 : Σύνολο κωδικών δειγμάτων φίλτρων και υγρών κλασμάτων που προέκυψαν και αναλύθηκαν ως αποτέλεσμα της ανάλυσης δειγμάτων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και υγρασίας.

Δείγμα ατμοσφαιρικής απόθεσης/υγρασίας	Δείγμα φίλτρου	Δείγμα υγρού κλάσματος
QSA1	RF003	-
QSA2	RF004	-
QSA3	RF005	-
QSA4	RF006	-
HR001	FHR001	-
WR001	-	-
HR002	-	-
WR002	FWR002	WT123
WR003	FWR003	-
WR004	FWR004	-
WR005	FWR005	-
DR001	FDR001	WT127
DR002	FDR002	WT128
DR003	-	WT129
TR001	FTR001	WTR001
DR004	FDR004	WDR004
DR005	FDR005	WDR005
TR003	FTR003	WTR003
TR002	FTR002	WTR002
DR006	FDR006	WDR006
TR004	FTR004	WTR004
TR005	FTR005	WTR005
TR006	FTR006	WTR006
WR006	FWR006	WWR006
DR007	FDR007	WDR007
DR008	FDR008	WDR008
TR007	FTR007	WTR007

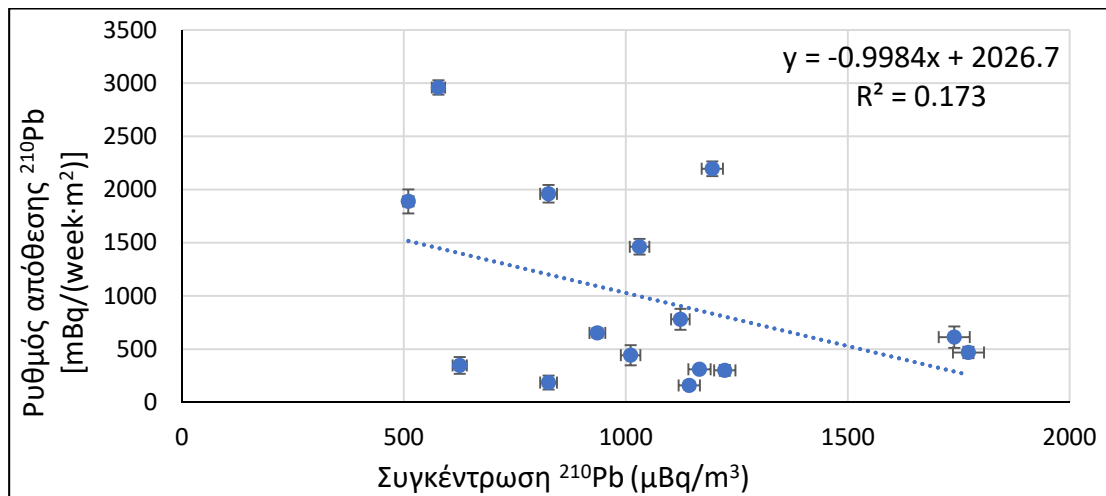
TR008	FTR008	WTR008
TR009	FTR009	WTR009
TR010	FTR010	WTR010
DR009	FDR009	WDR009
DR010	FDR010	WDR010
DR011	FDR011	WDR011
DR012	FDR012	WDR012
DR013	FDR013	WDR013
TR011	FTR011	WTR011
WR007	FWR007	WWR007
TR012	FTR012	WTR012
DR014	FDR014	WDR014
DR015	FDR015	WDR015
DR016	FDR016	WDR016
DR017	FDR017	WDR017
DR018	FDR018	WDR018
DR019	FDR019	WDR019
DR020	FDR020	WDR020
DR021	FDR021	WDR021
TR013	FTR013	WWTR013
DR022	FDR022	WDR022
TR014	FTR014	WTR014
DR023	FDR023	WDR023
HR003	FHR003	WHR003
WR008	FWR008	WWR008
HR004	FHR004	WHR004
WR010	FWR010	WWR010
WR011	FWR011	WWR011
WR012	FWR012	WWR012
WR013	FWR013	WWR013
WR014	FWR014	WWR014
WR015	FWR015	-
WR016	FRW016	-
WR017	FWR017	-
WR018	-	-
WR019	-	WWR019
WR020	FWR020	-
WR021	FWR021	-
HR005	FHR005	-
HR006	FHR006	-
HR007	FHR007	-
HR008	FHR008	-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΗ

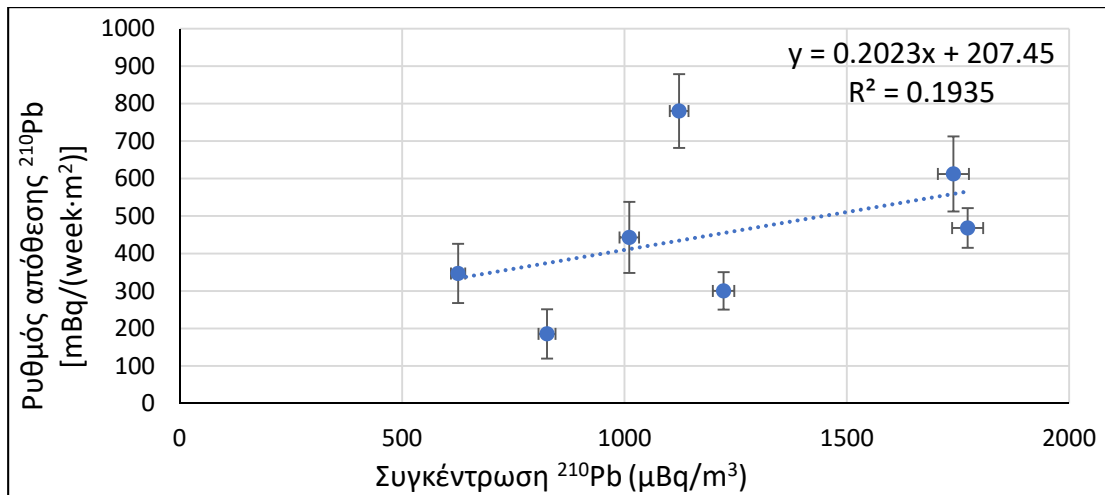
Συμπληρωματικά διαγράμματα συσχετίσεων συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων με μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους

Στο Παράρτημα ΙΗ παρουσιάζονται τα συμπληρωματικά διαγράμματα συσχετίσεων μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και των ρυθμών απόθεσης ραδιενεργών ισοτόπων με διάφορες μετεωρολογικές και άλλες παραμέτρους, όπως αυτές διερευνήθηκαν στο Κεφάλαιο 6 της παρούσας Δ.Δ..

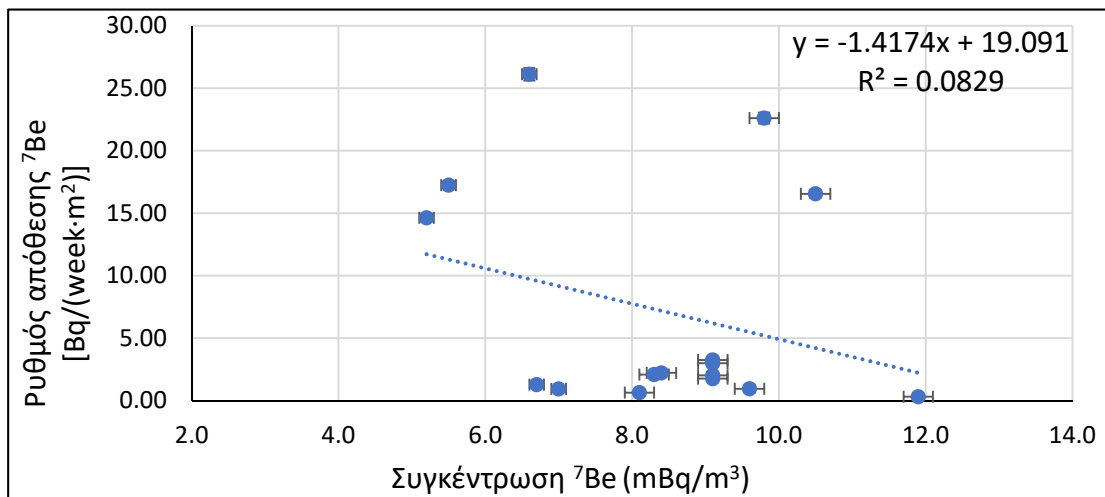
ΙΗ.1 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στις ατμοσφαιρικές αποθέσεις ως προς τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα



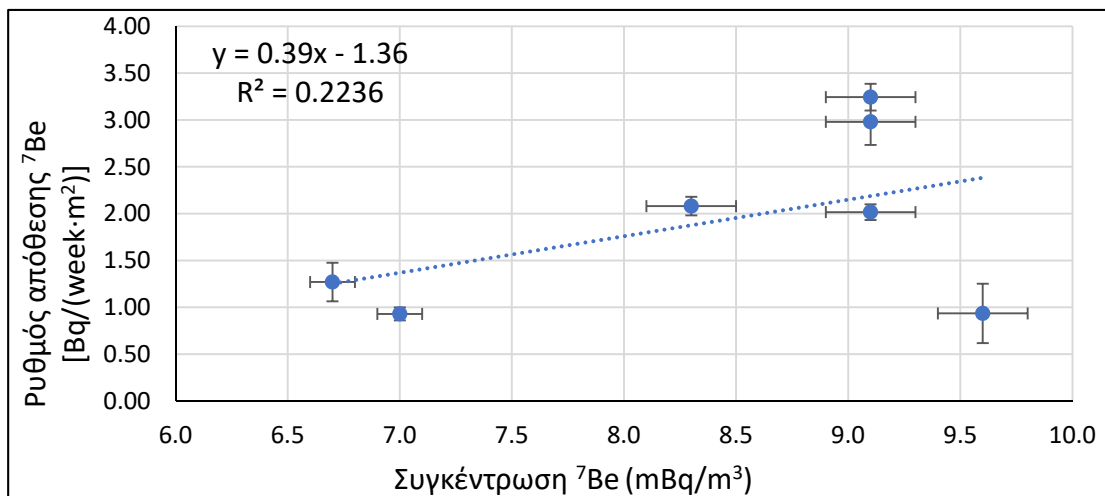
Σχήμα ΙΗ.1 : Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης του ^{210}Pb στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα και ατμοσφαιρικών αποθέσεων (όλες οι παράλληλες δειγματοληψίες).



Σχήμα ΙΙΙ.2 : Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης του ^{210}Pb στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα και ατμοσφαιρικών αποθέσεων (παράλληλες δειγματοληψίες με 100% αλληλοεπικάλυψη).

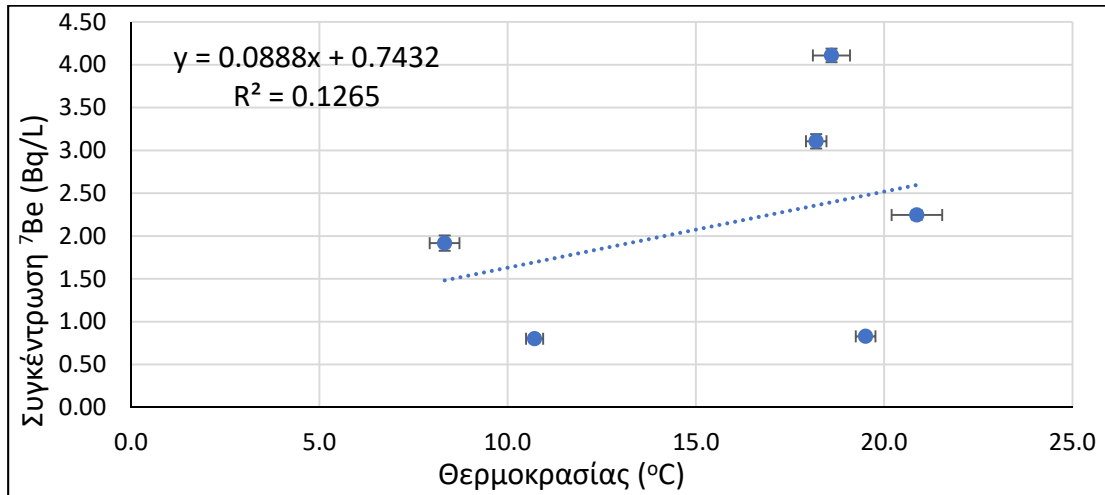


Σχήμα ΙΙΙ.3 : Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης του ^7Be στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα και ατμοσφαιρικών αποθέσεων (όλες οι παράλληλες δειγματοληψίες).

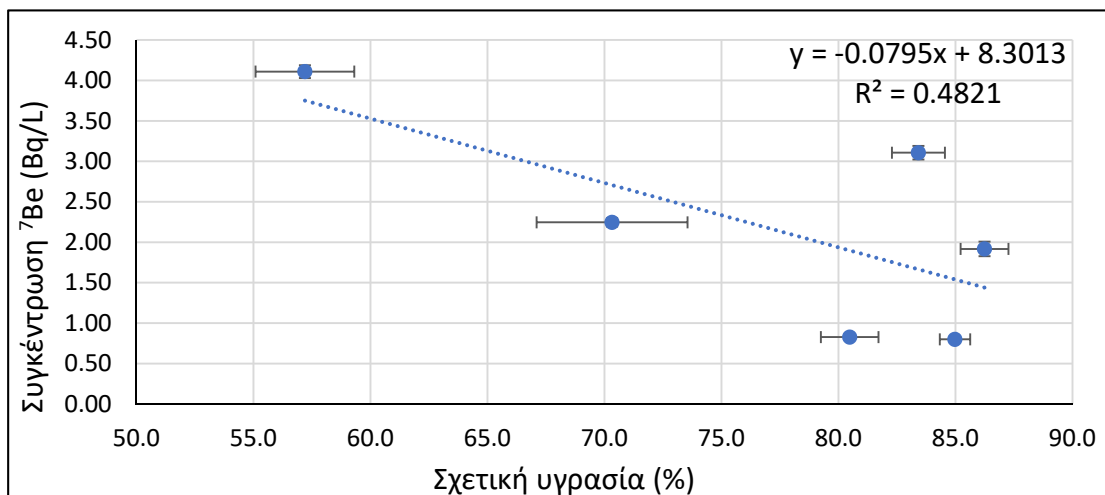


Σχήμα ΙΙΙ.4 : Συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ενεργότητας και ρυθμών απόθεσης του ^7Be στις παράλληλες δειγματοληψίες φίλτρων αέρα και ατμοσφαιρικών αποθέσεων (παράλληλες δειγματοληψίες με 100% αλληλοεπικάλυψη).

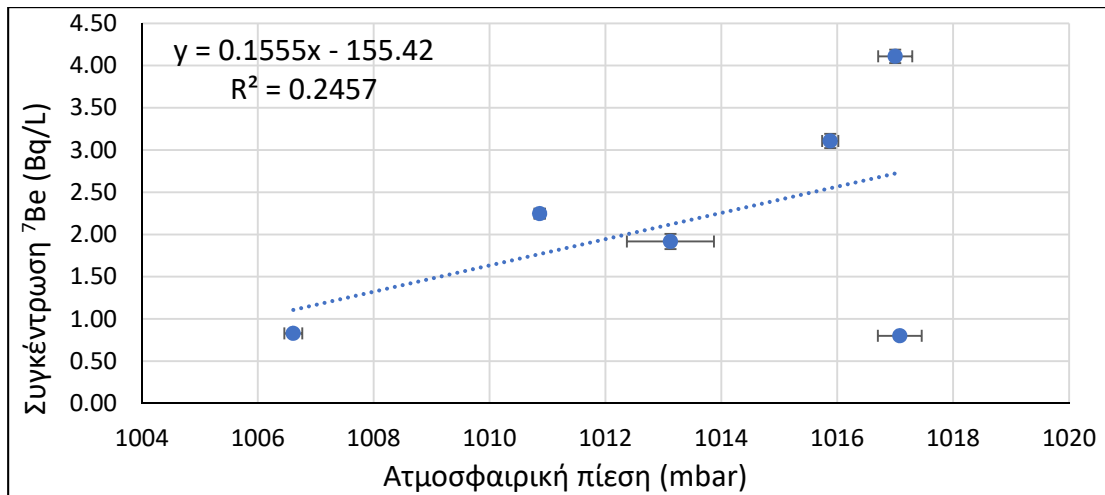
III.2 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ${}^7\text{Be}$ και ${}^{210}\text{Pb}$ στις υγρές αποθέσεις ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



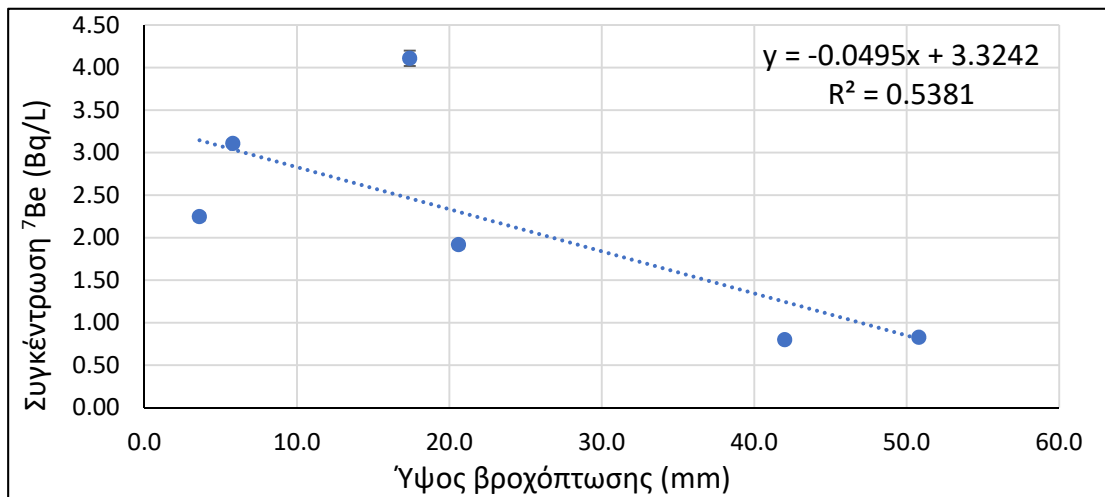
Σχήμα III.5 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στις υγρές αποθέσεις και της θερμοκρασίας.



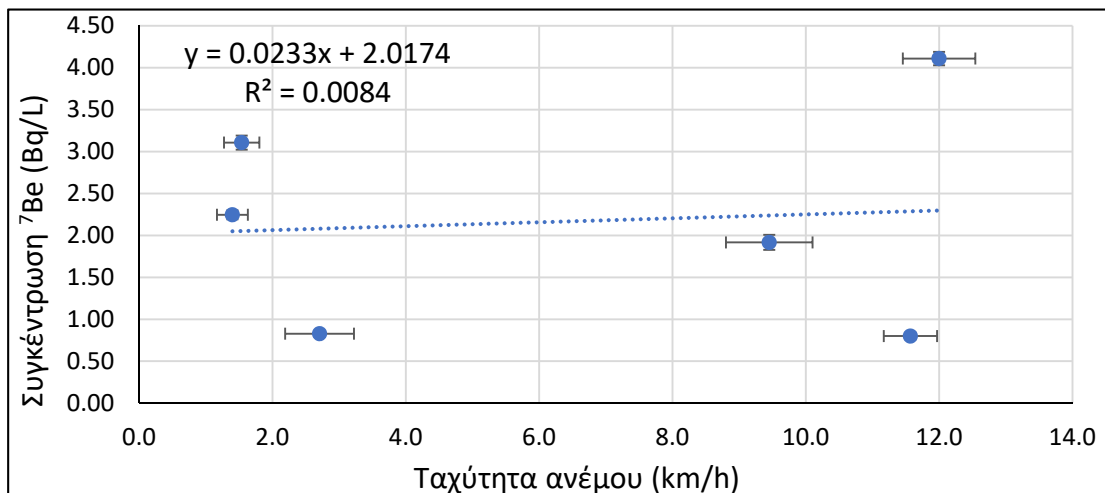
Σχήμα III.6 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στις υγρές αποθέσεις και της σχετικής υγρασίας.



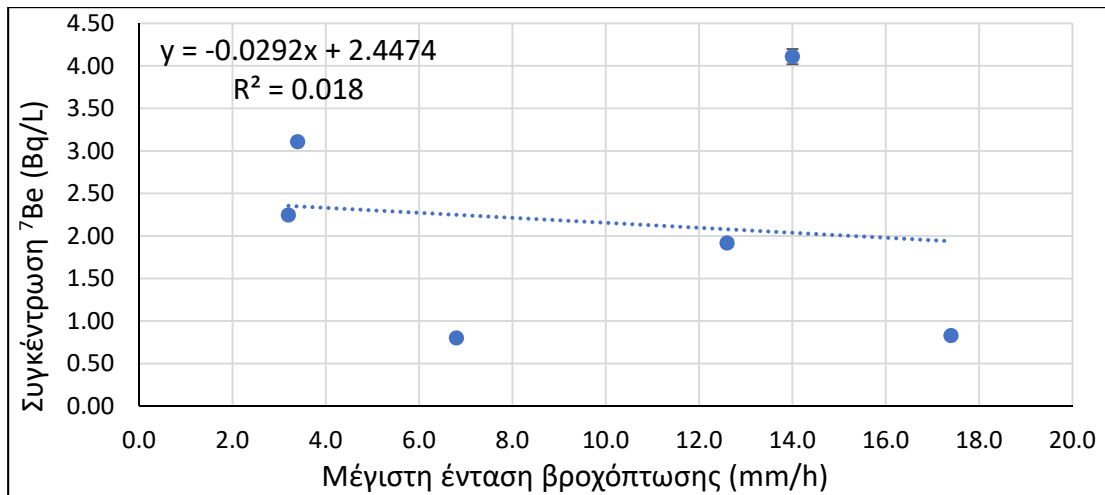
Σχήμα ΙΗ.7 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be στις υγρές αποθέσεις και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



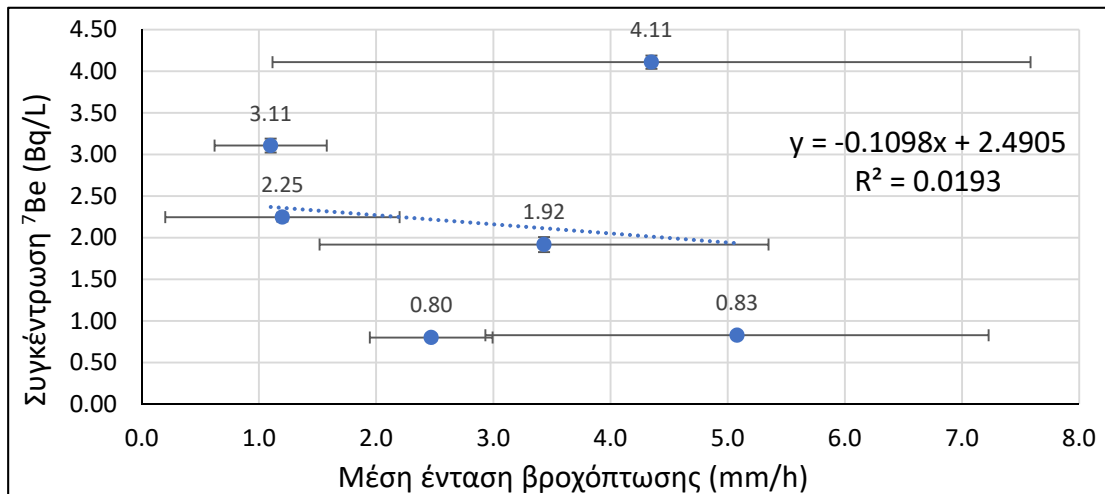
Σχήμα ΙΗ.8 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be στις υγρές αποθέσεις και του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.



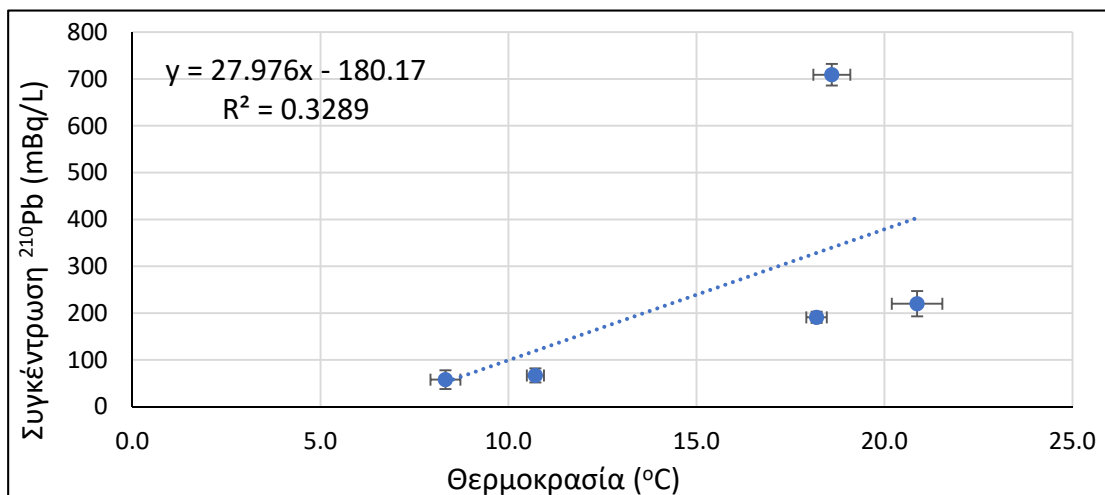
Σχήμα ΙΗ.9 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be στις υγρές αποθέσεις και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.



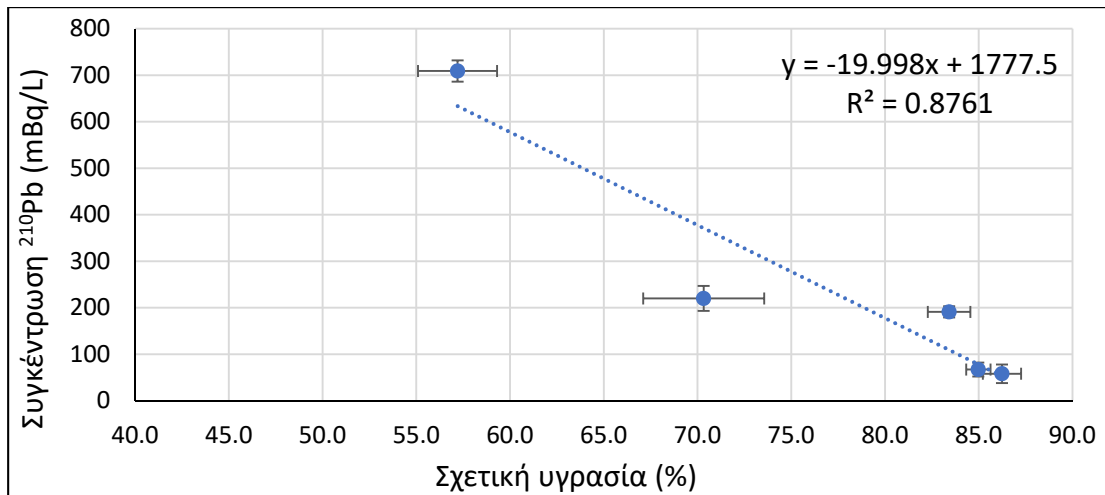
Σχήμα ΙΗ.10 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στις υγρές αποθέσεις και της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.



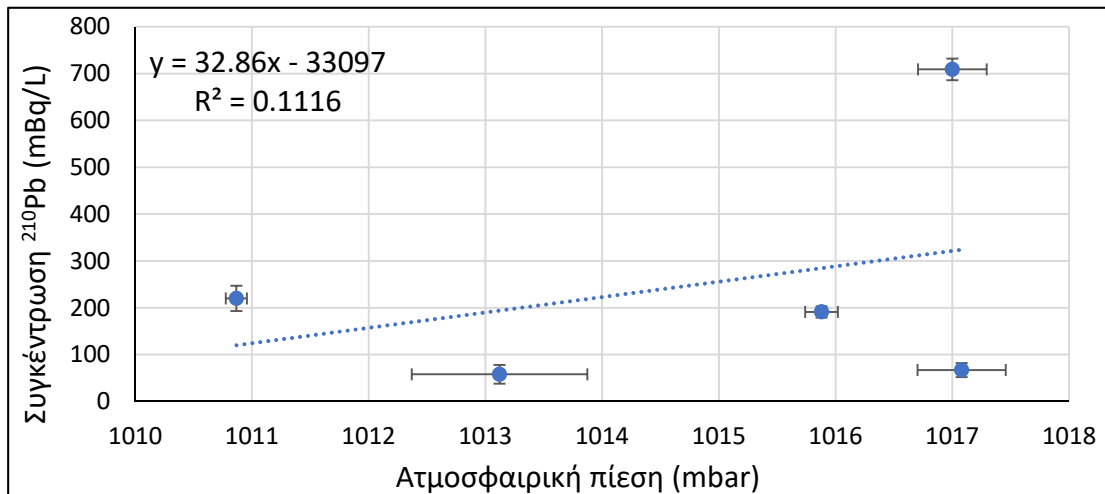
Σχήμα ΙΗ.11 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στις υγρές αποθέσεις και της μέσης έντασης βροχόπτωσης.



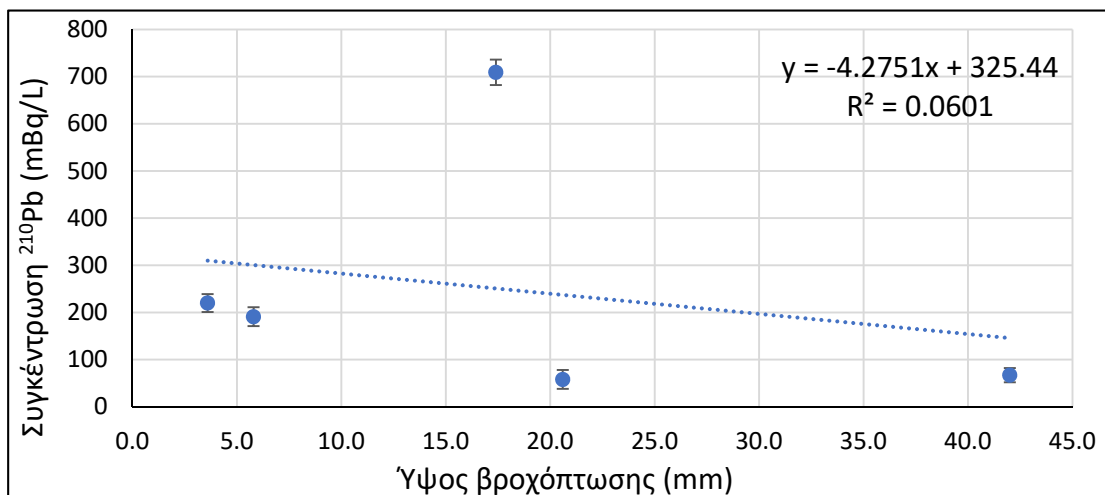
Σχήμα ΙΗ.12 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στις υγρές αποθέσεις και της θερμοκρασίας.



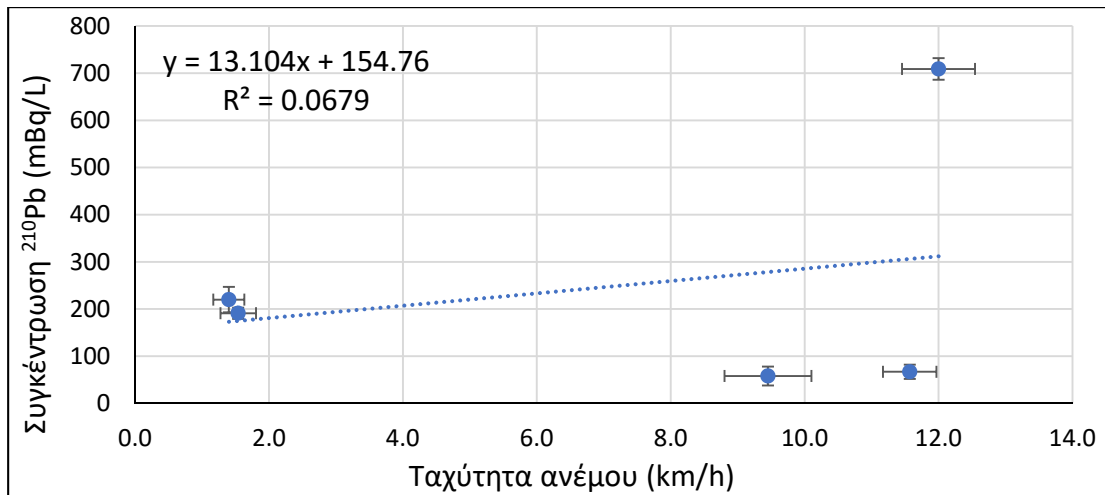
Σχήμα ΙΗ.13 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και της σχετικής υγρασίας.



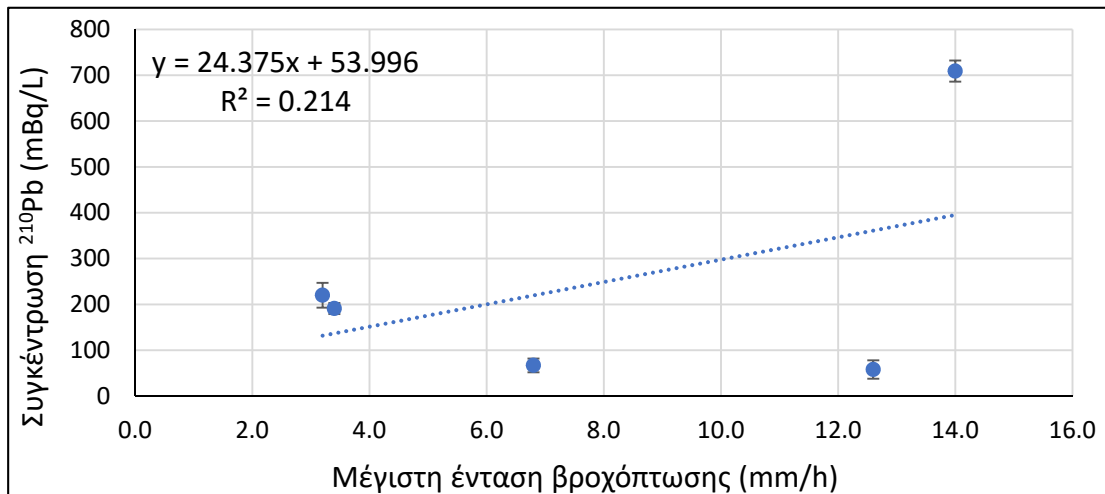
Σχήμα ΙΗ.14 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



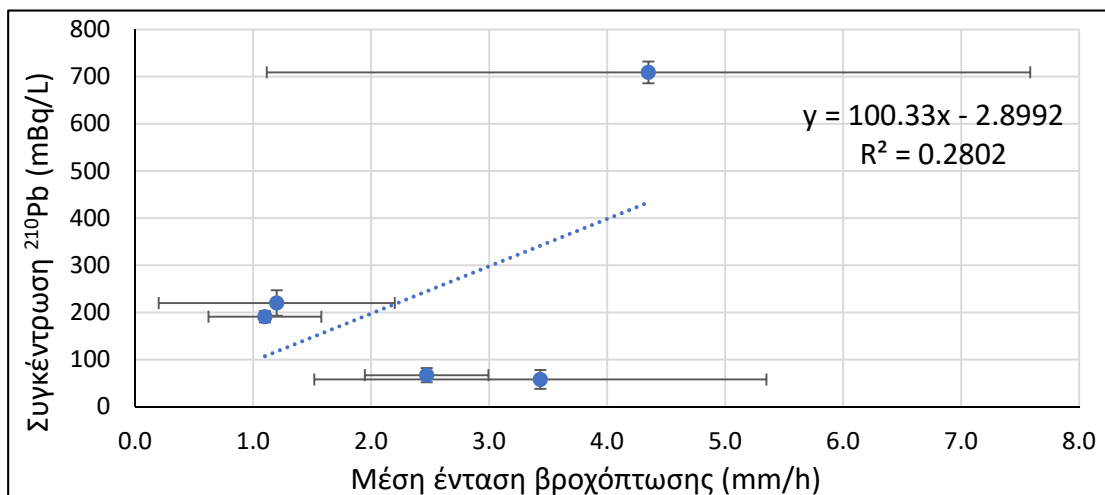
Σχήμα ΙΗ.15 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.



Σχήμα ΙΗ.16 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

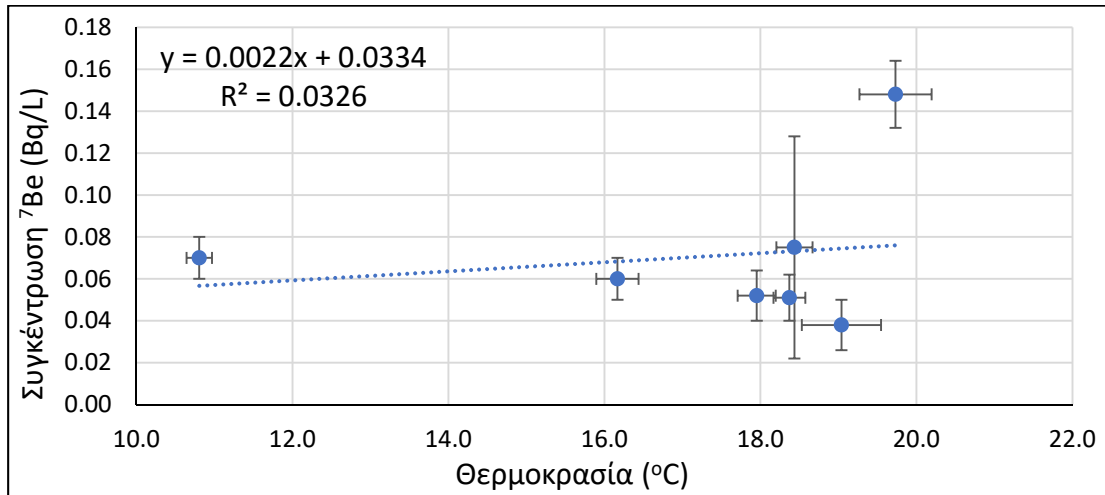


Σχήμα ΙΗ.17 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.

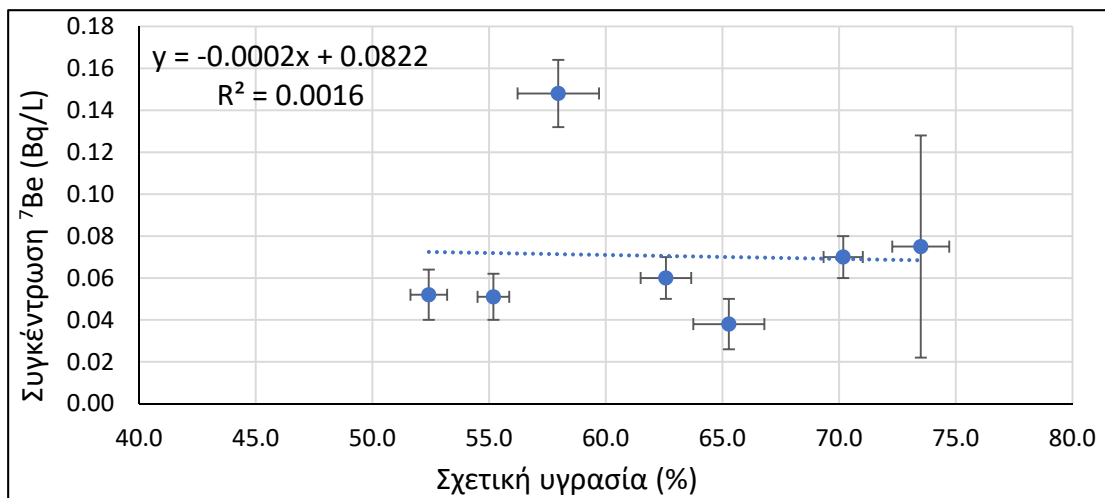


Σχήμα ΙΗ.18 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στις υγρές αποθέσεις και της μέσης έντασης βροχόπτωσης.

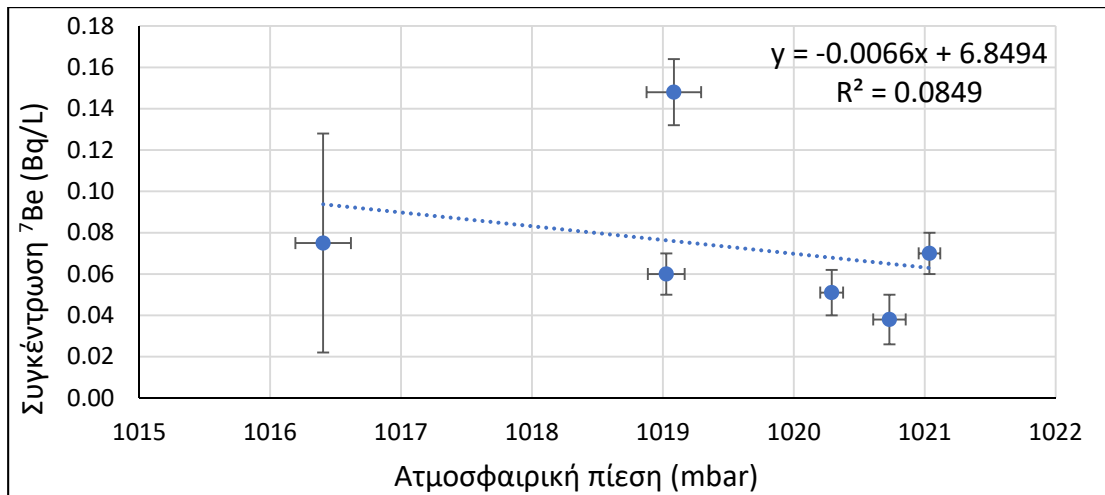
III.3 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be στα δείγματα υγρασίας ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



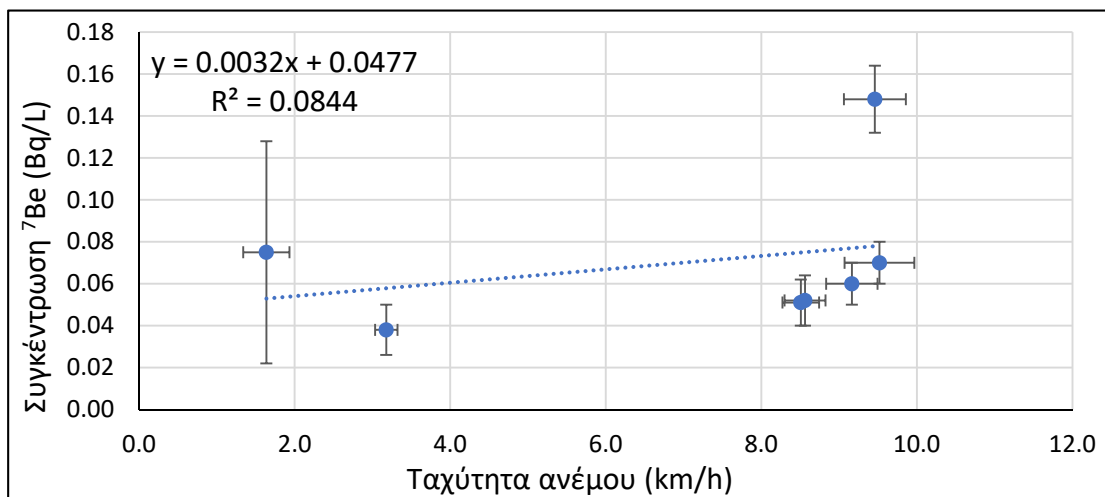
Σχήμα III.19 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στην υγρασία και της θερμοκρασίας.



Σχήμα III.20 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στην υγρασία και της σχετικής υγρασίας.

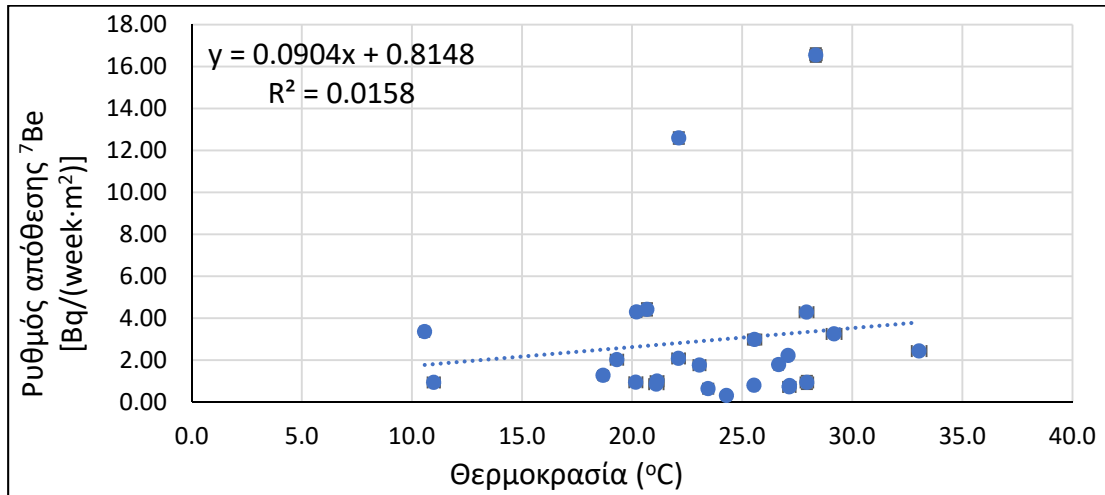


Σχήμα 3.21 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be στην υγρασία και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

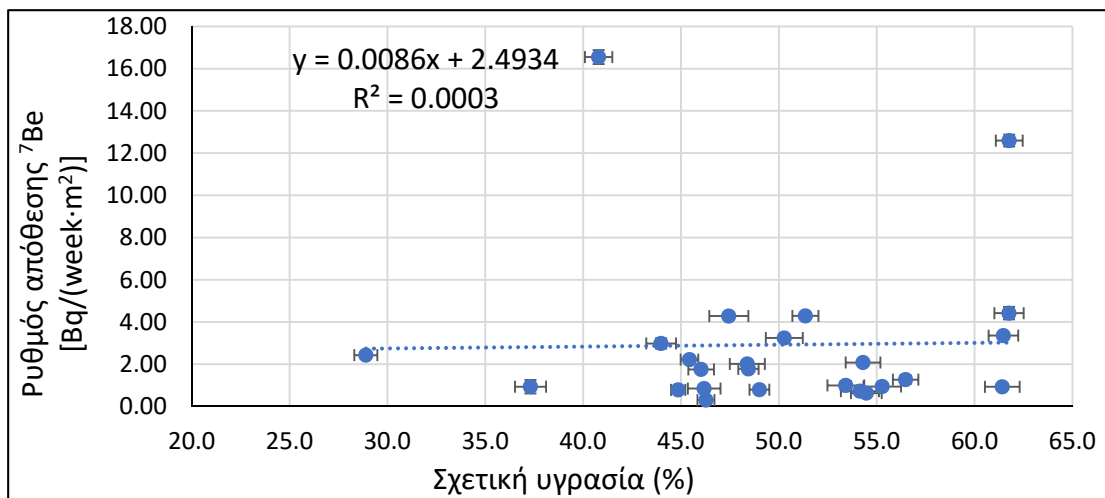


Σχήμα 3.22 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ⁷Be στην υγρασία και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

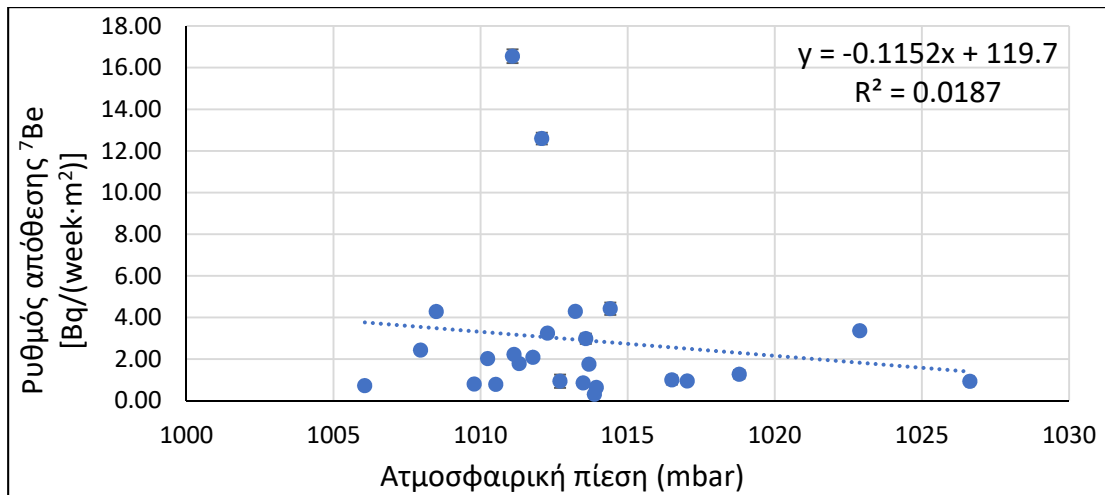
ΙΗ.4 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



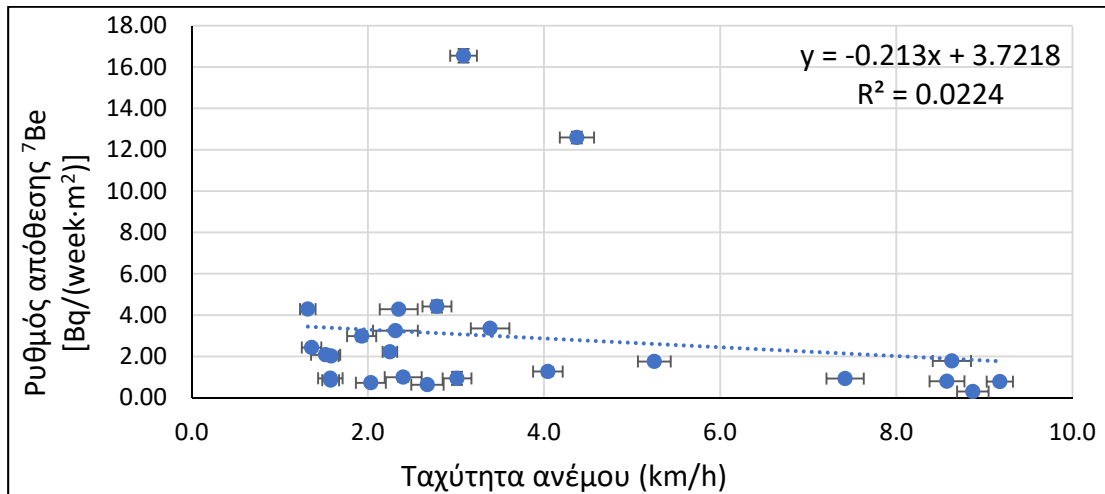
Σχήμα ΙΗ.23 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της θερμοκρασίας.



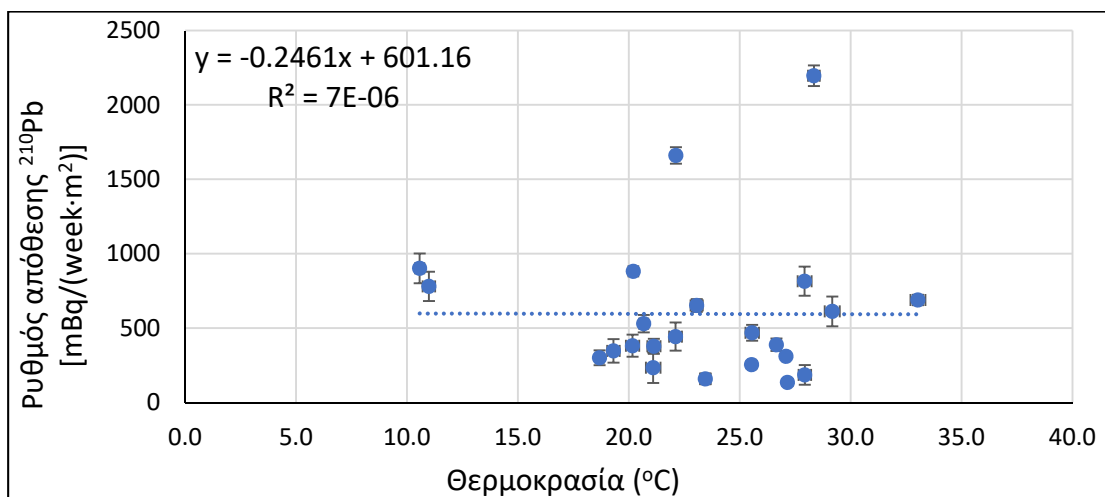
Σχήμα ΙΗ.24 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της σχετικής υγρασίας.



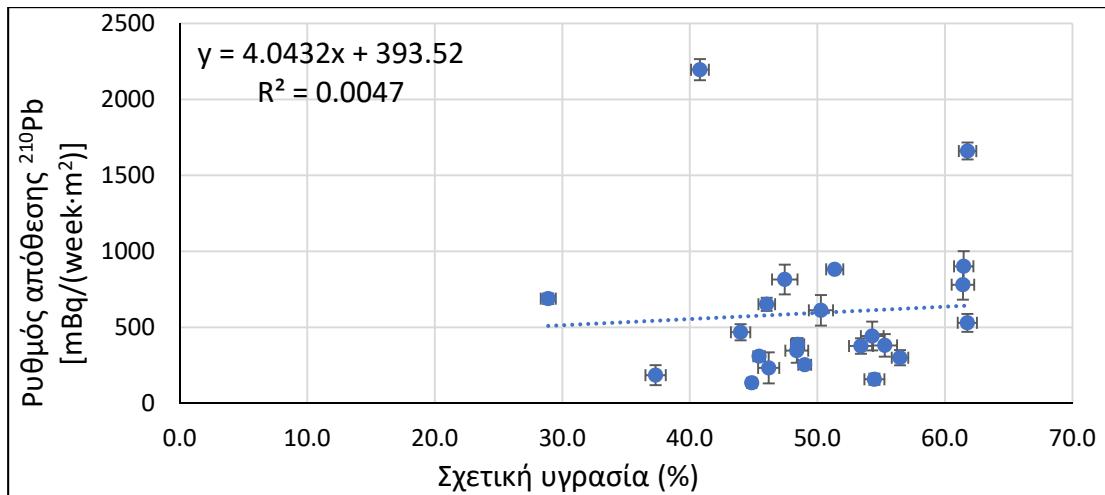
Σχήμα ΙΗ.25 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



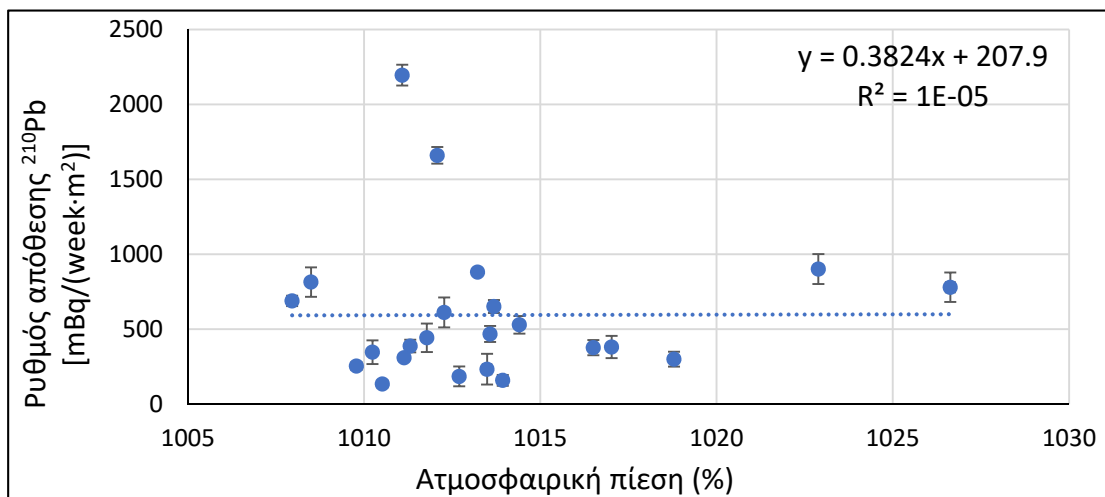
Σχήμα ΙΗ.26 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.



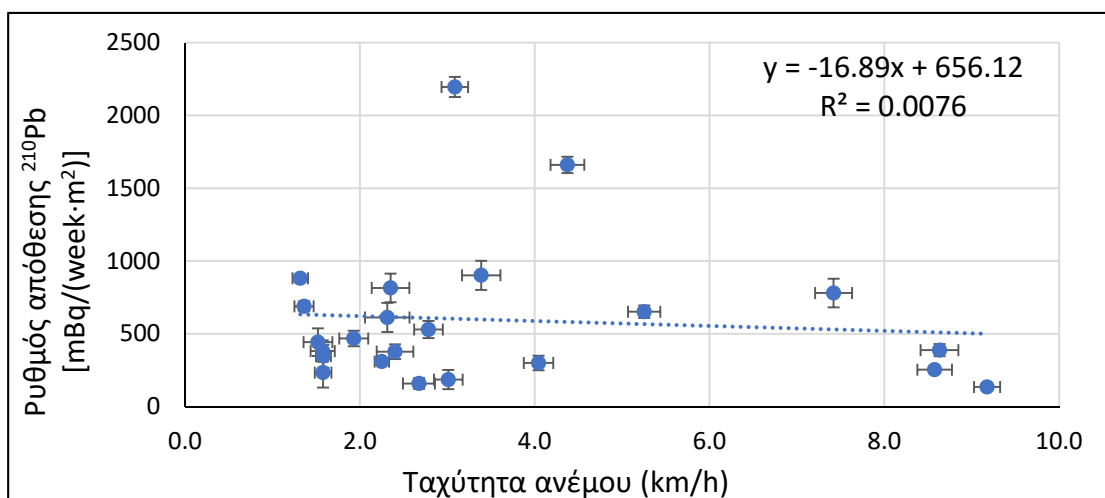
Σχήμα ΙΗ.27 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της θερμοκρασίας.



Σχήμα ΙΗ.28 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της σχετικής υγρασίας.

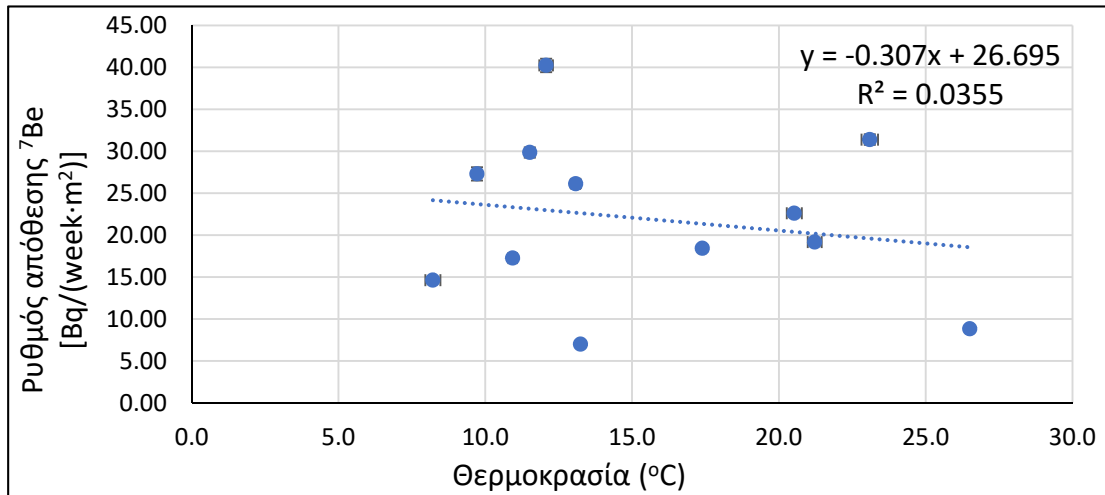


Σχήμα ΙΗ.29 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

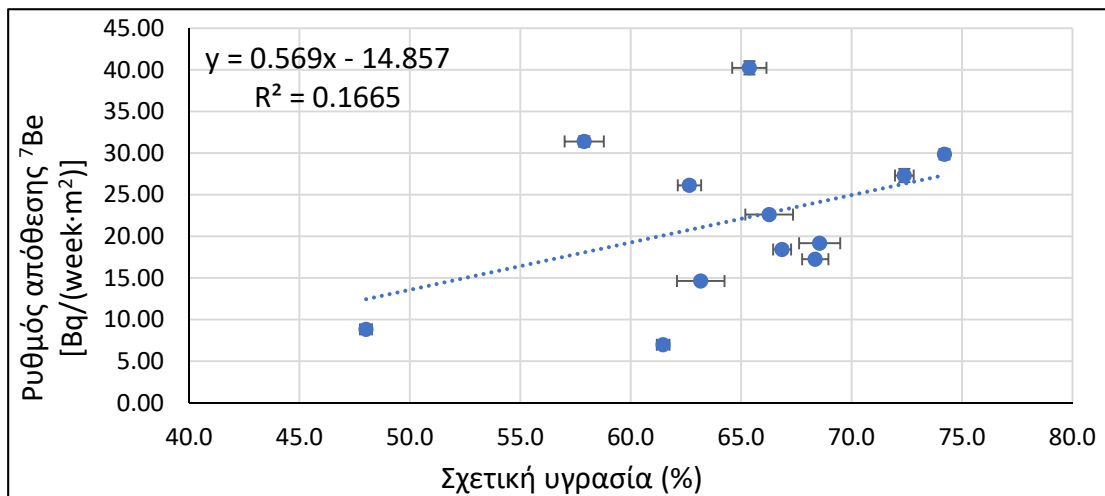


Σχήμα ΙΗ.30 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

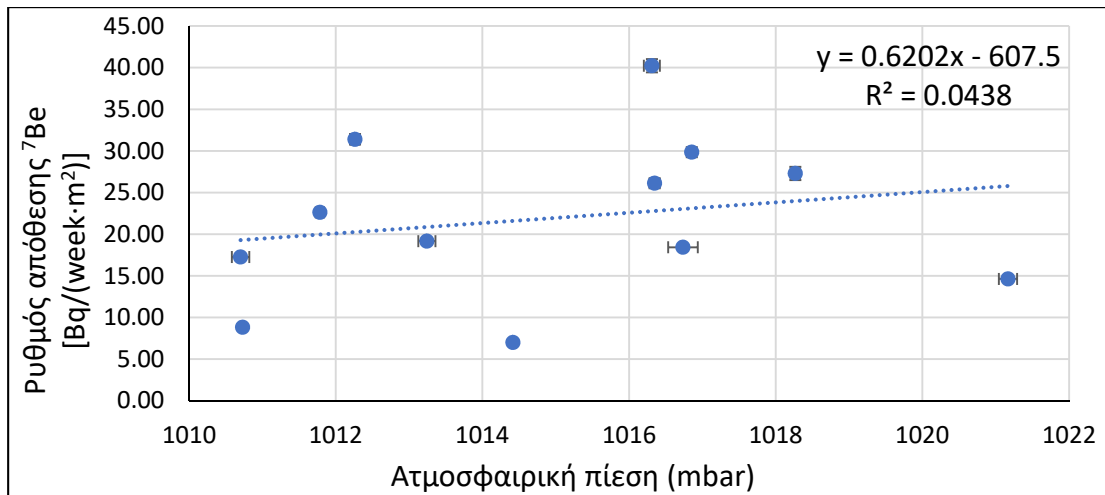
ΙΗ.5 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



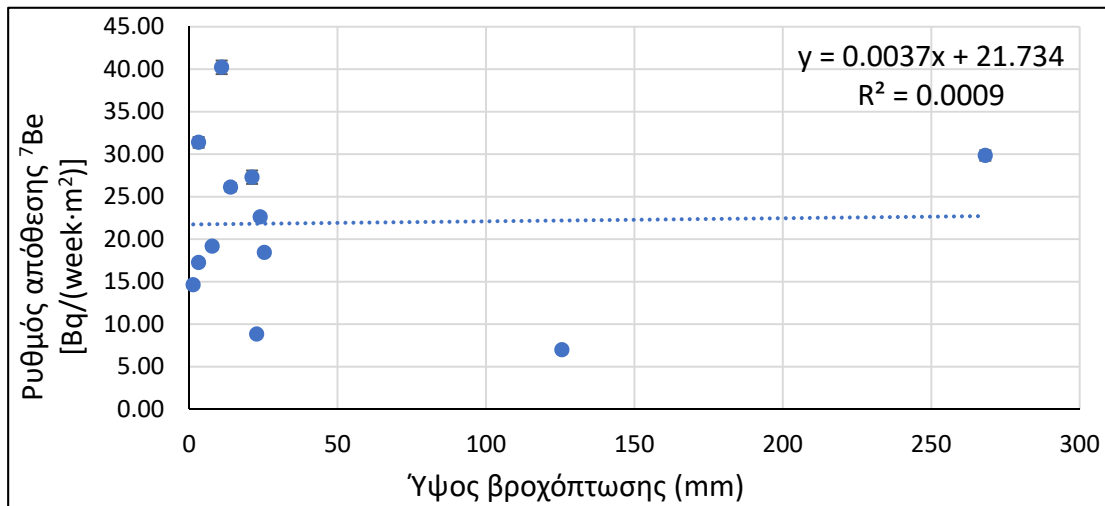
Σχήμα ΙΗ.31 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της θερμοκρασίας.



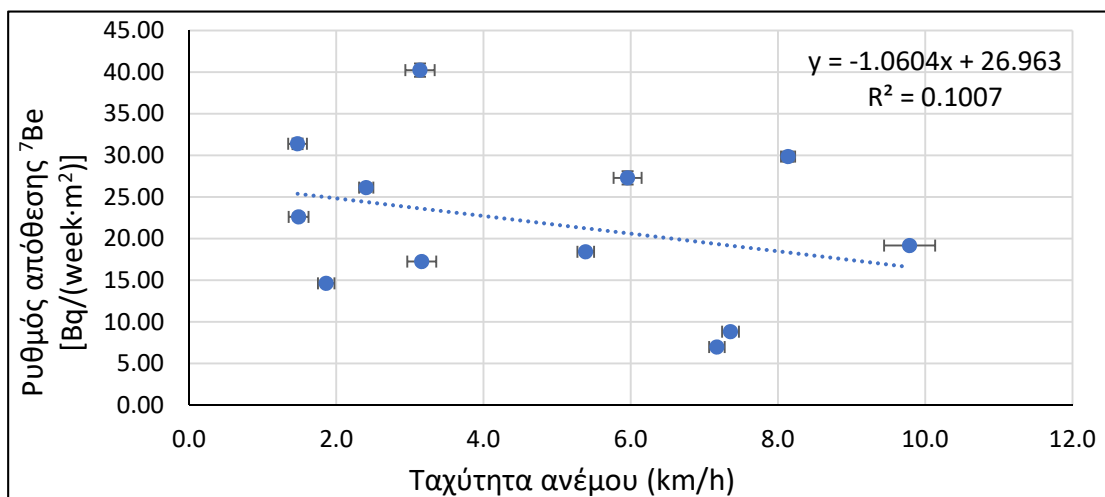
Σχήμα ΙΗ.32 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της σχετικής υγρασίας.



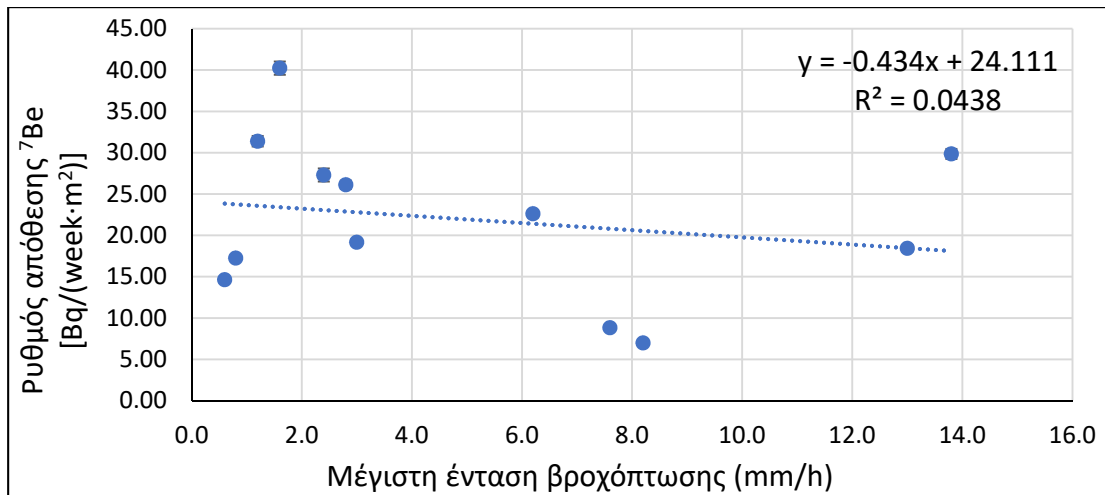
Σχήμα ΙΗ.33 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



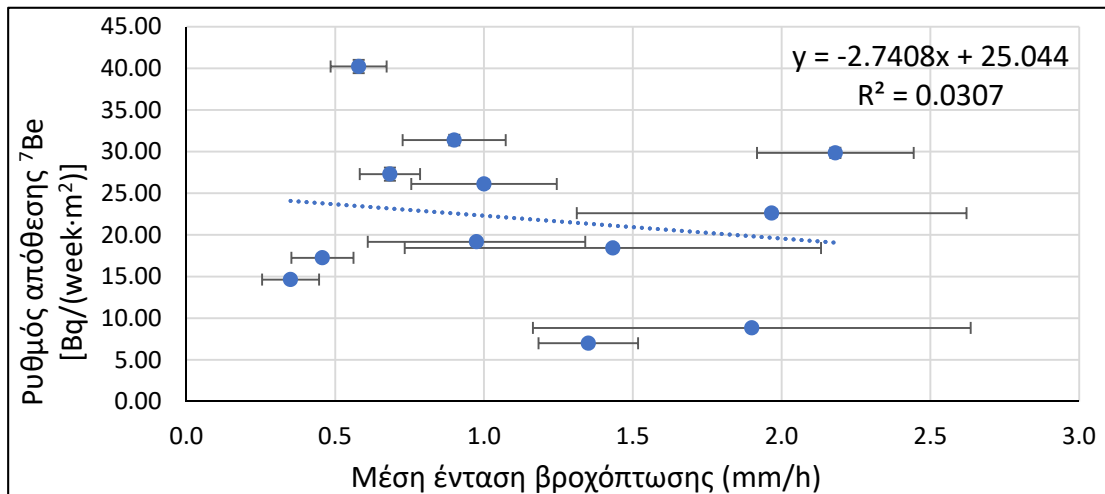
Σχήμα ΙΗ.34 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.



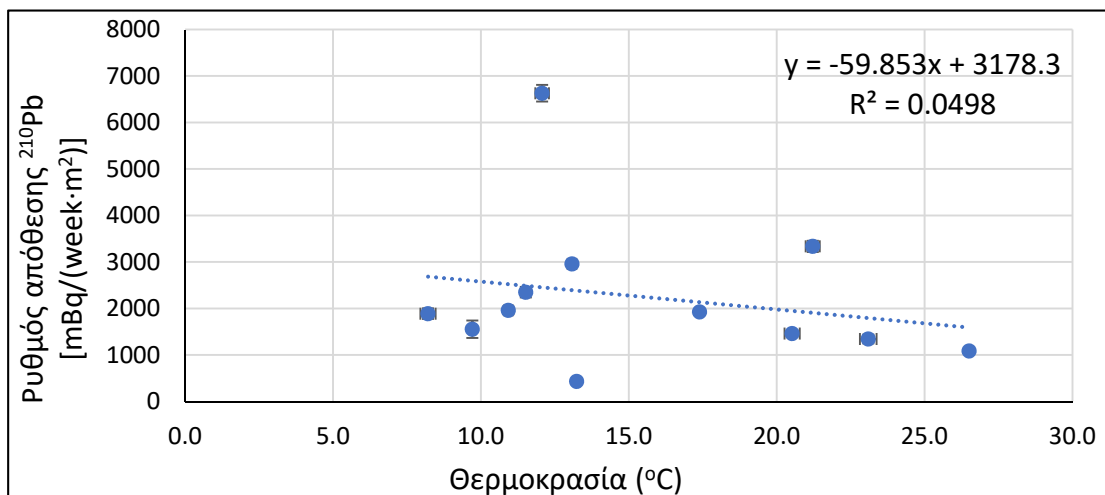
Σχήμα ΙΗ.35 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.



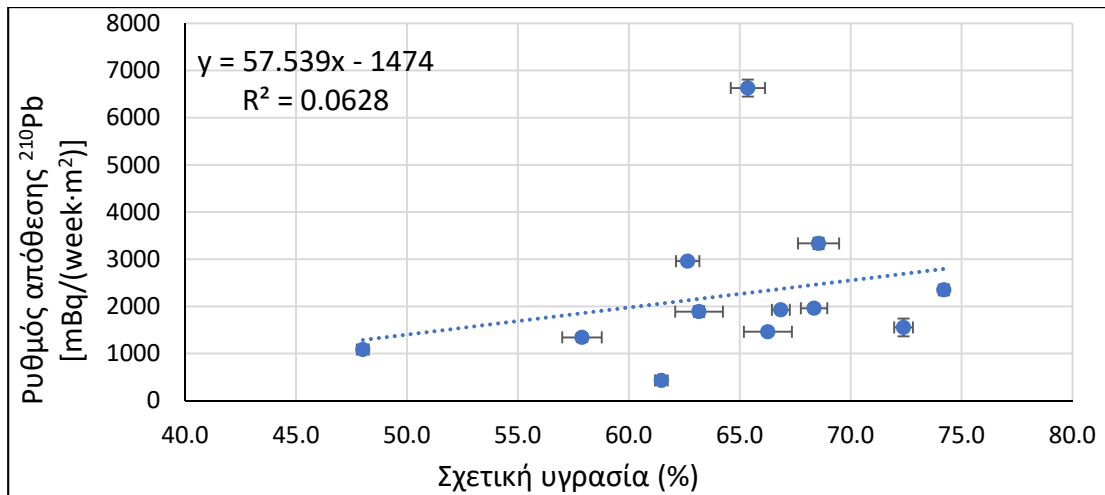
Σχήμα ΙΗ.36 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.



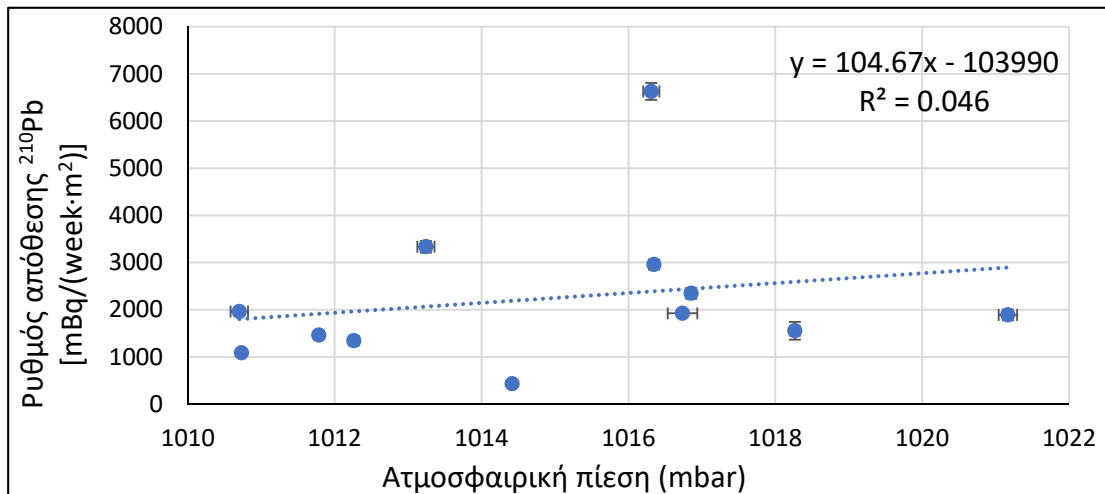
Σχήμα ΙΗ.37 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της μέσης έντασης βροχόπτωσης.



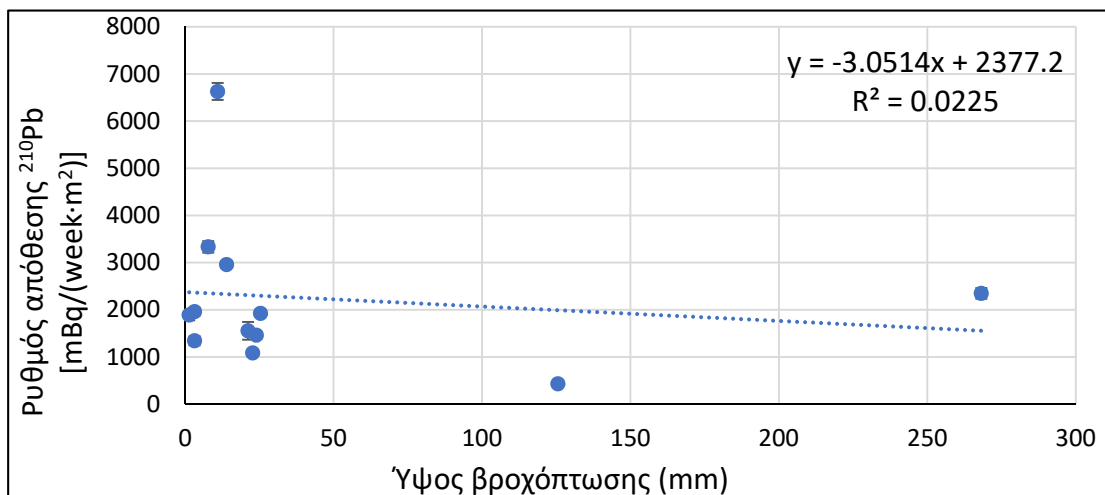
Σχήμα ΙΗ.38 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}$ στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της θερμοκρασίας.



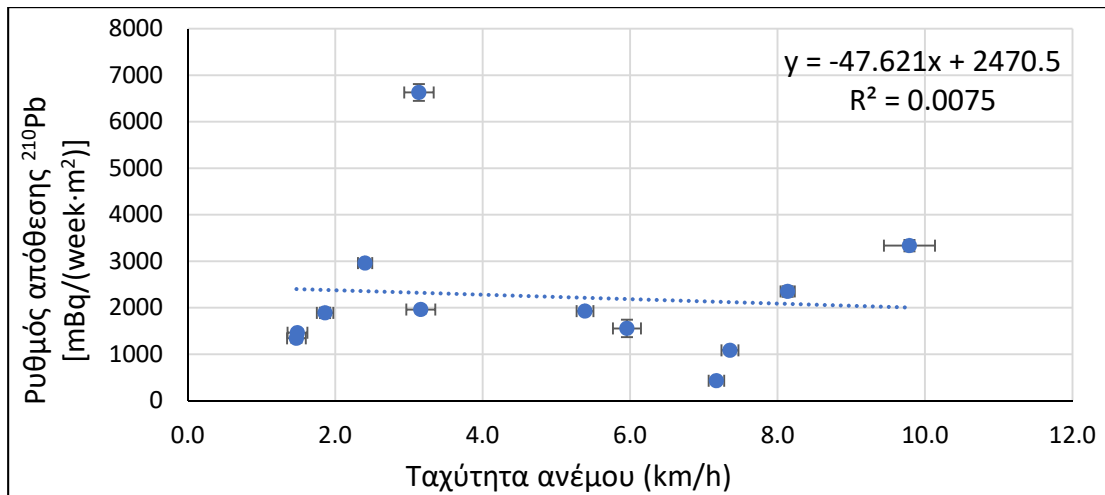
Σχήμα ΙΗ.39 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της σχετικής υγρασίας.



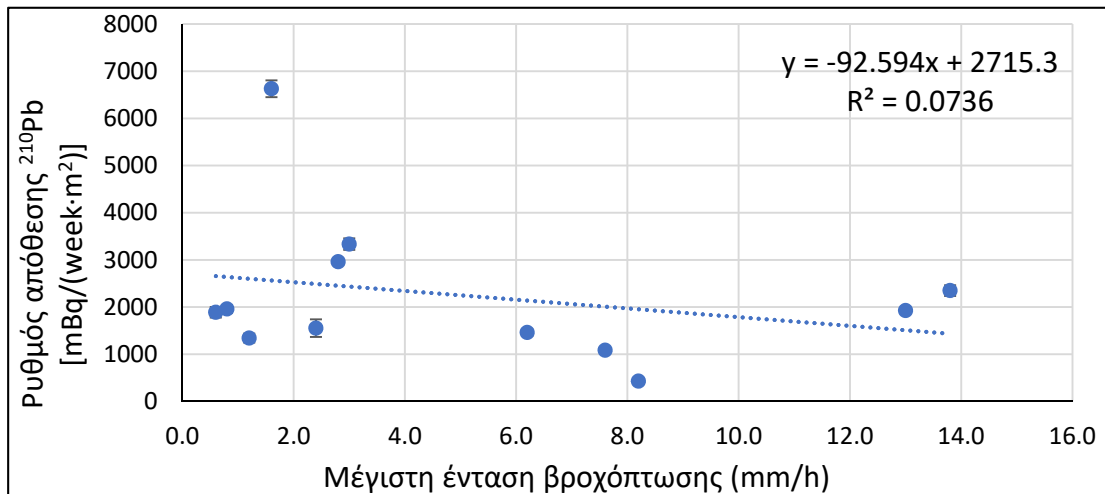
Σχήμα ΙΗ.40 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



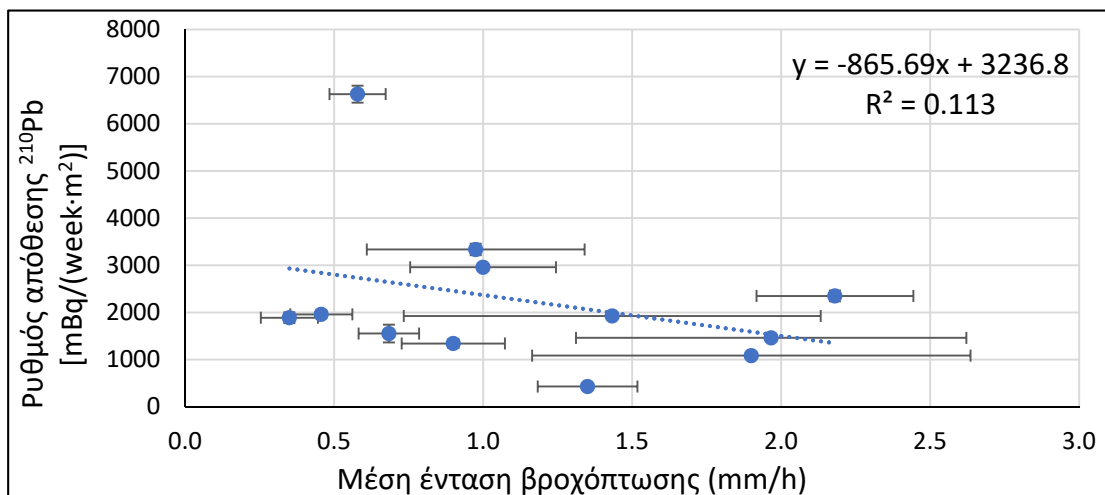
Σχήμα ΙΗ.41 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.



Σχήμα 11.42 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της ταχύτητας του ανέμου.



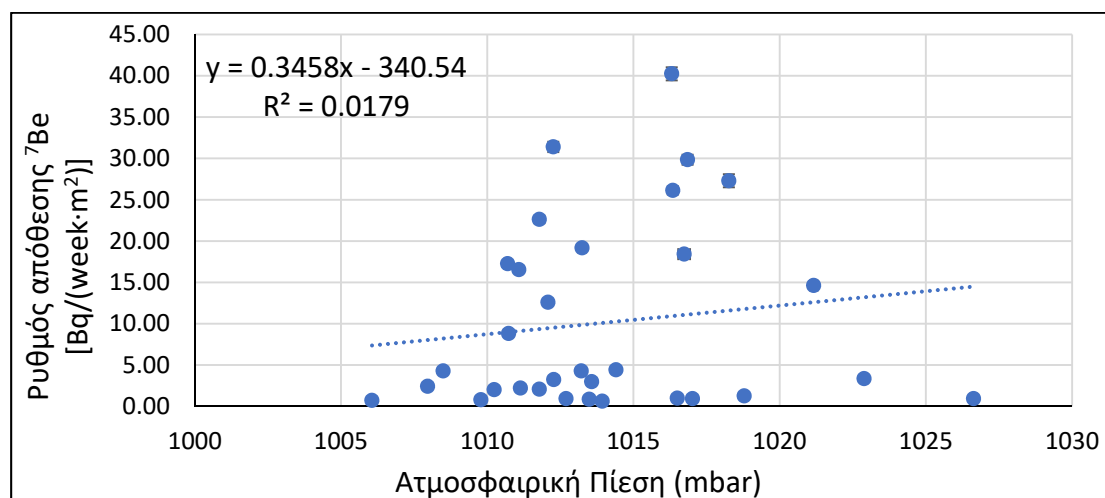
Σχήμα 11.43 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.



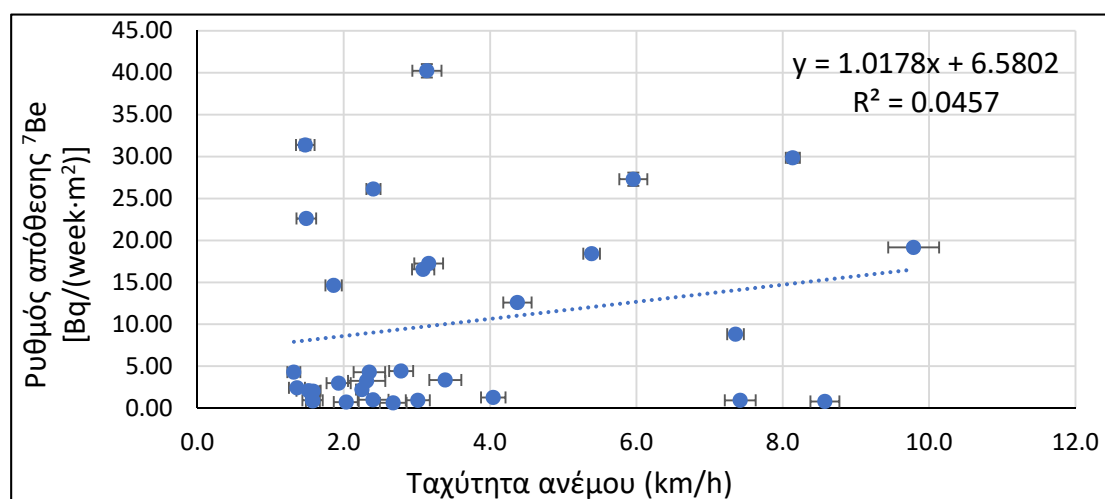
Σχήμα 11.44 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της μέσης έντασης βροχόπτωσης.

III.6 Συμπληρωματικά διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα συνεχόμενα δείγματα αποθέσεων ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους

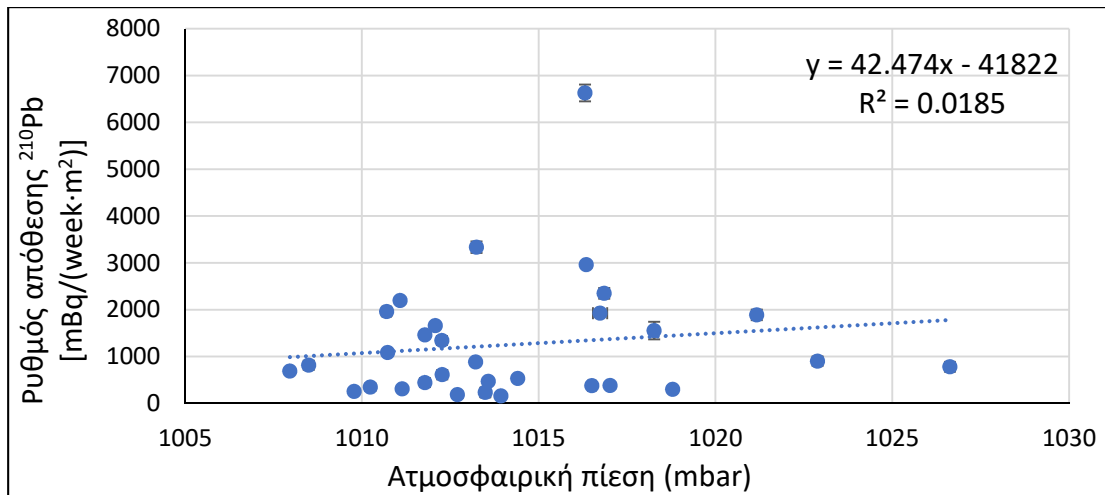
Στην παράγραφο αυτή δίνονται τα συμπληρωματικά διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb με την ατμοσφαιρική πίεση και τη μέση ταχύτητα ανέμου στα συνεχόμενα δείγματα αποθέσεων, καθώς τα διαγράμματα που αφορούν τις συσχετίσεις με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία δόθηκαν στο Κεφάλαιο 6 και είναι τα Σχήματα 6.20, 6.21, 6.22 και 6.23.



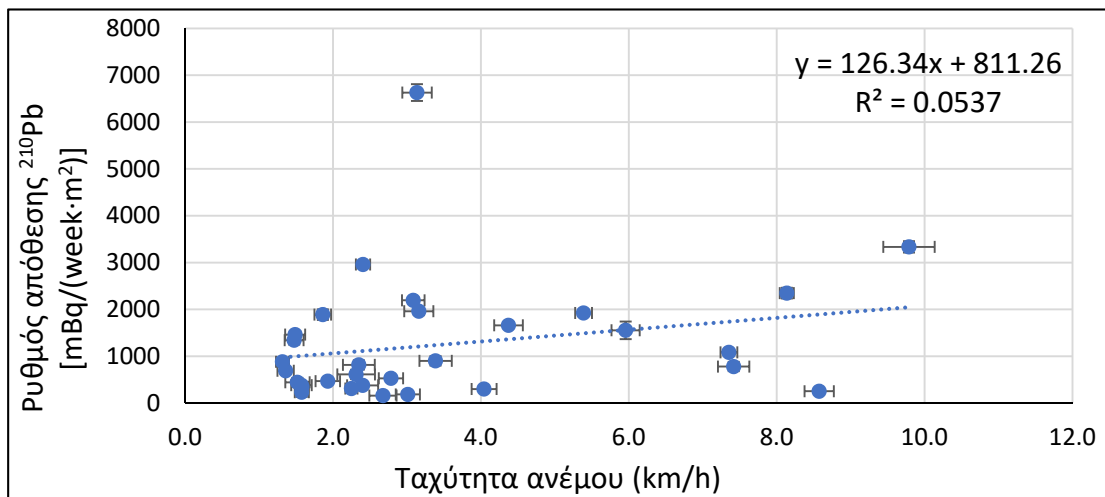
Σχήμα III.45 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



Σχήμα III.46 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

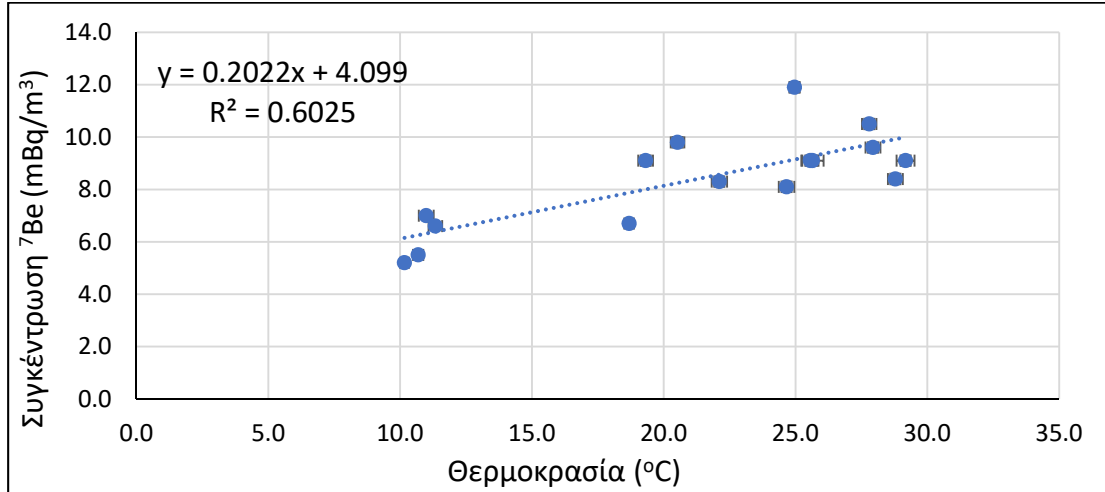


Σχήμα ΙΗ.47 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

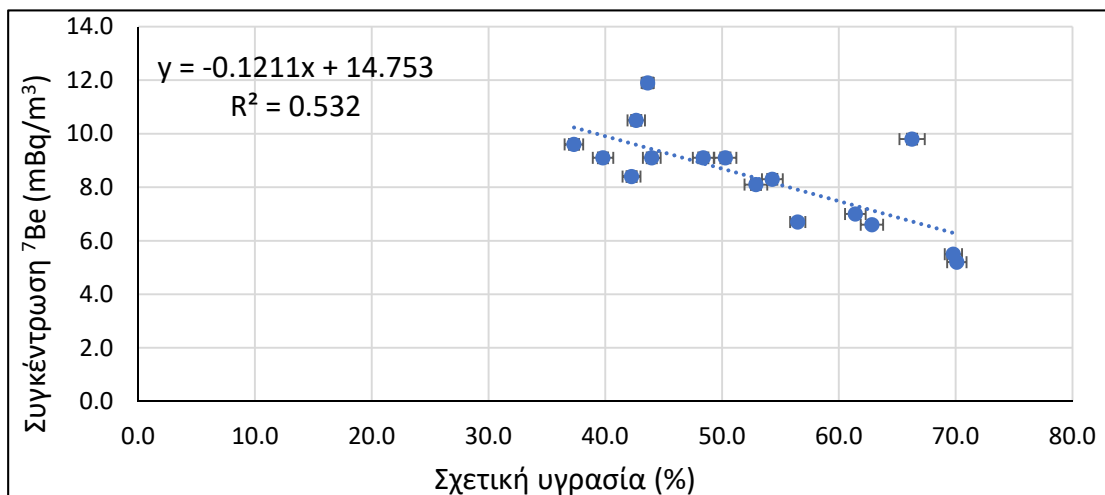


Σχήμα ΙΗ.48 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα συνεχόμενα δείγματα ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

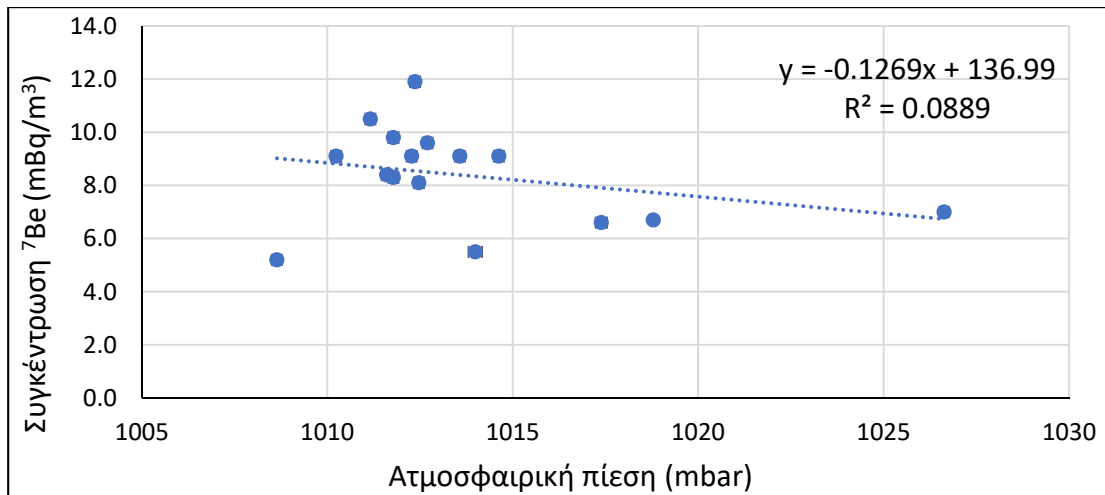
Π.7 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ^7Be και ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



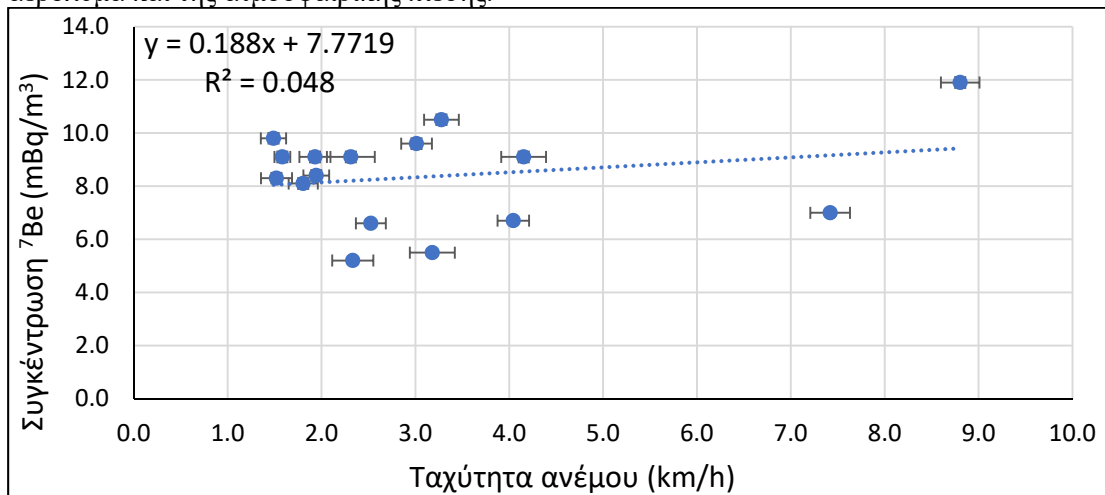
Σχήμα Π.49 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της θερμοκρασίας.



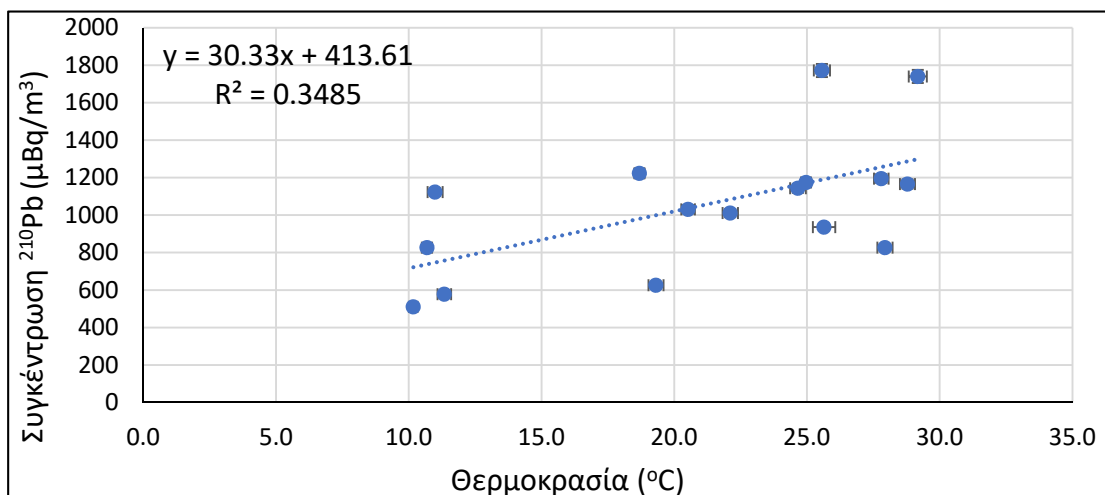
Σχήμα Π.50 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της σχετικής υγρασίας.



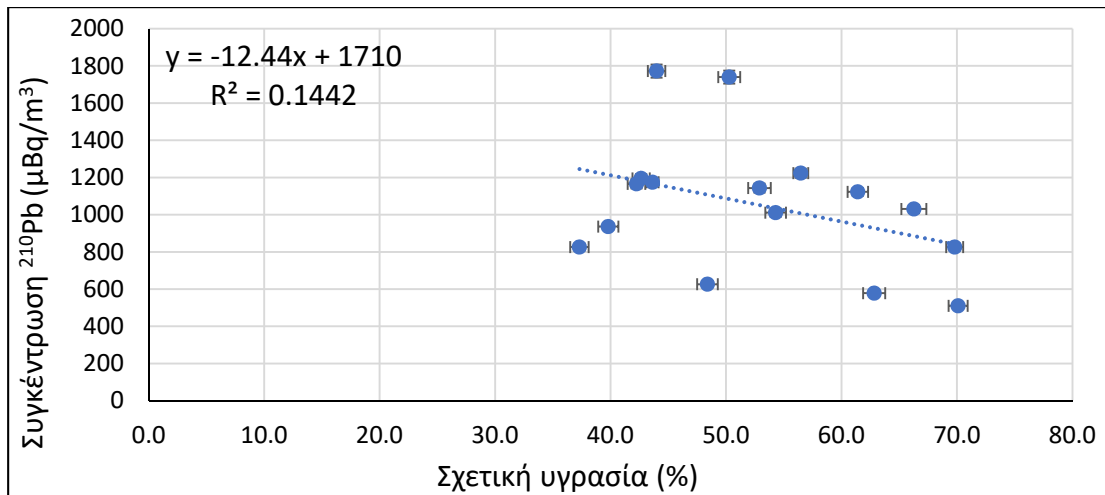
Σχήμα ΙΗ.51 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



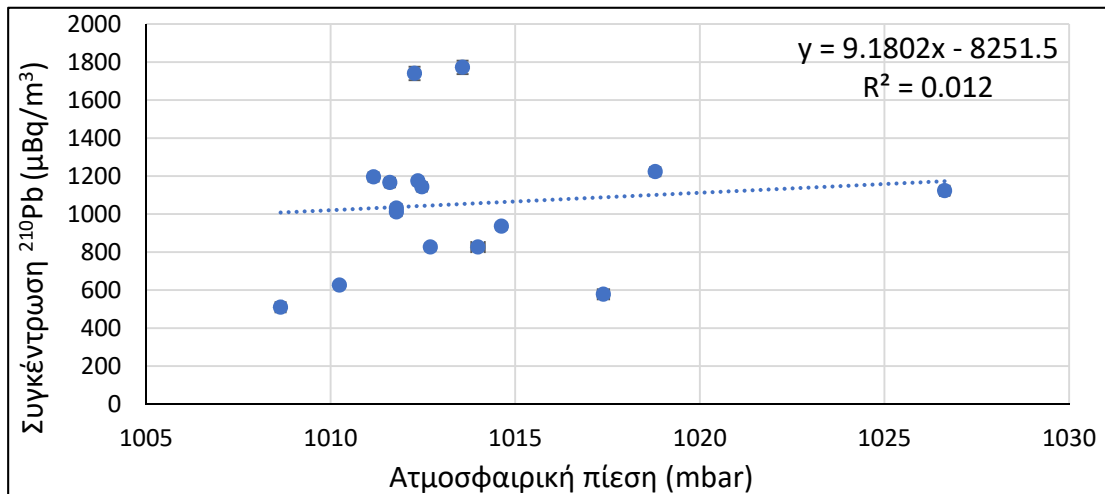
Σχήμα ΙΗ.52 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.



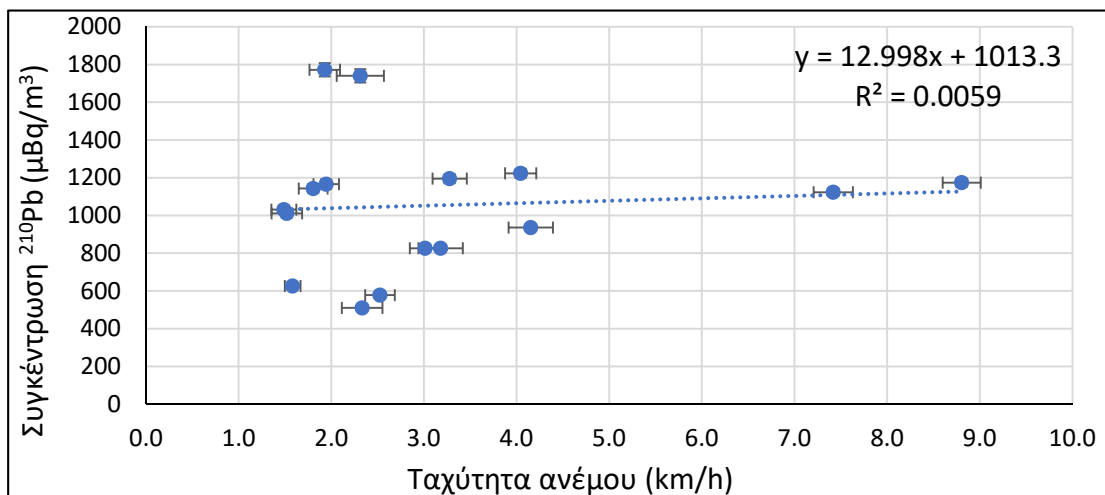
Σχήμα ΙΗ.53 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^{210}\text{Pb}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της θερμοκρασίας.



Σχήμα ΙΗ.54 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της σχετικής υγρασίας.

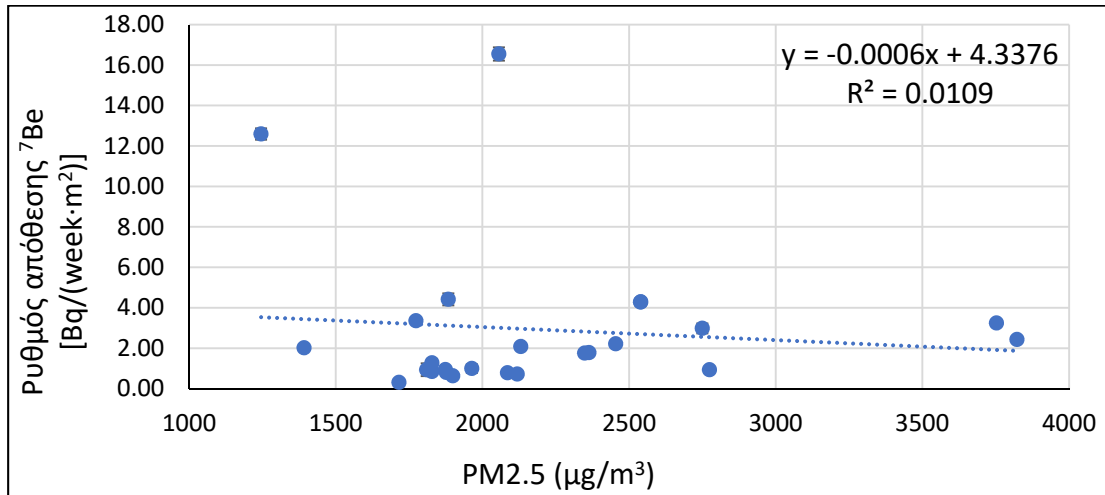


Σχήμα ΙΗ.55 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

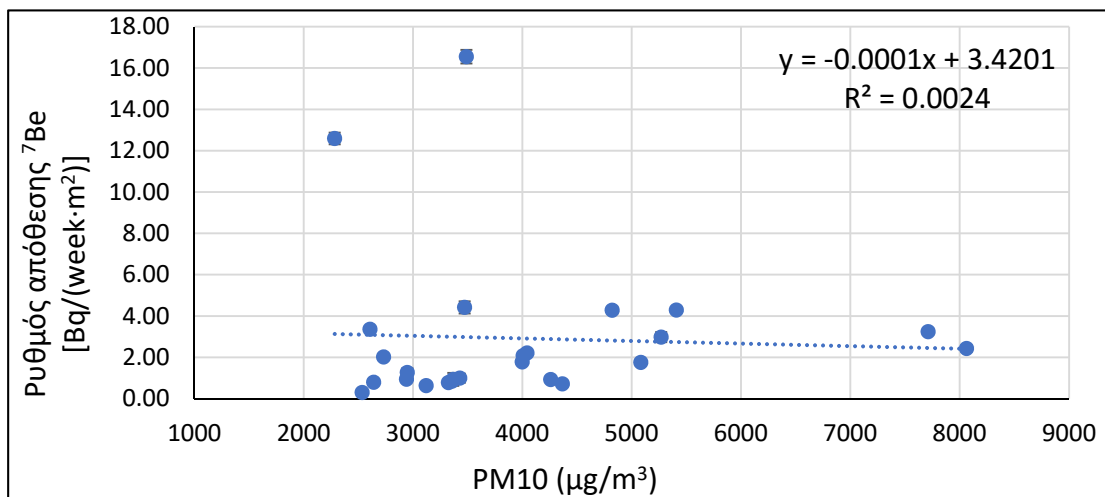


Σχήμα ΙΗ.56 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

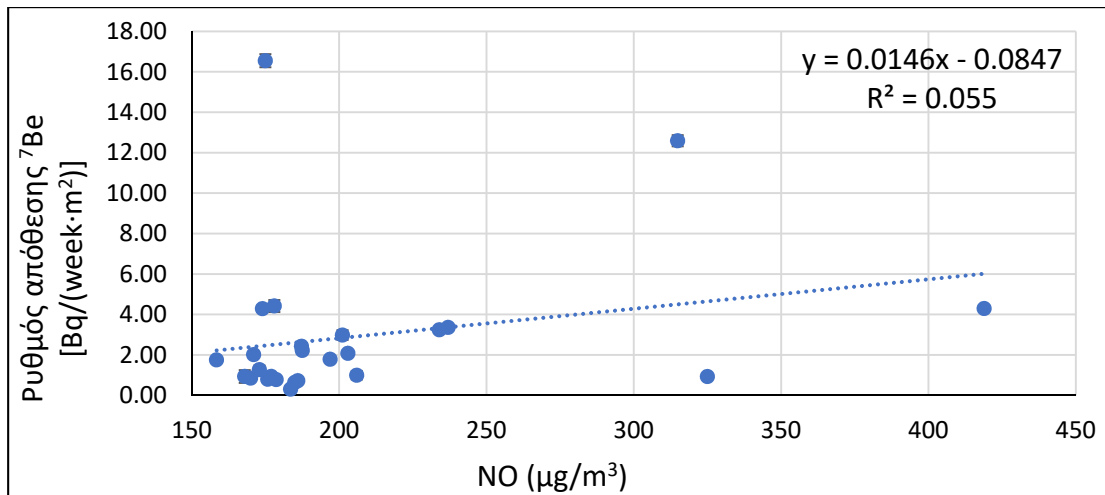
ΙΗ.8 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα



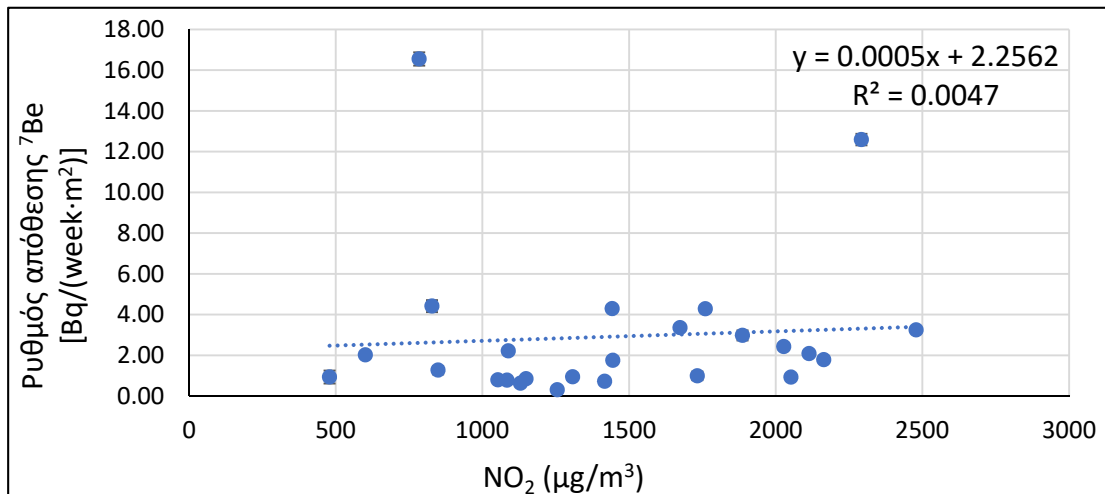
Σχήμα ΙΗ.57 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



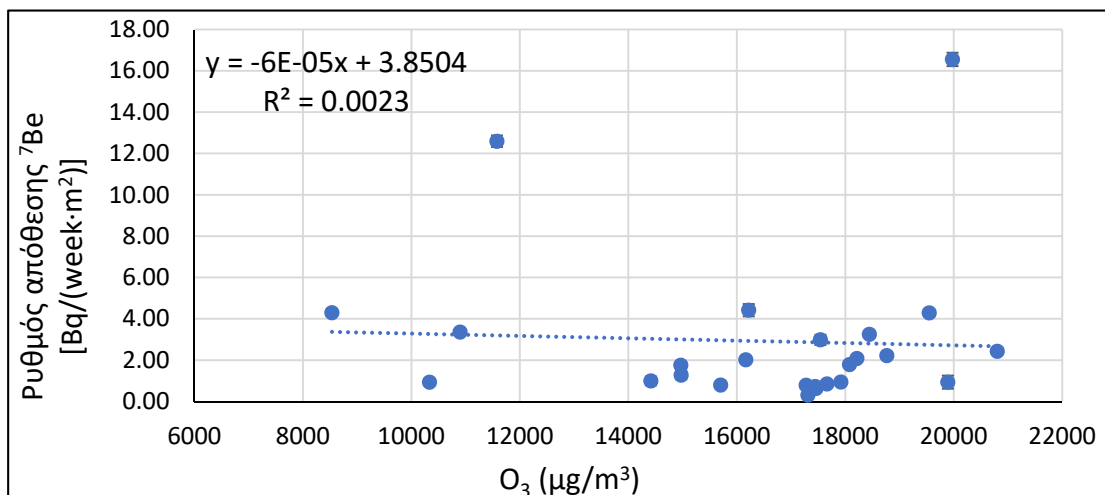
Σχήμα ΙΗ.58 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM10 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



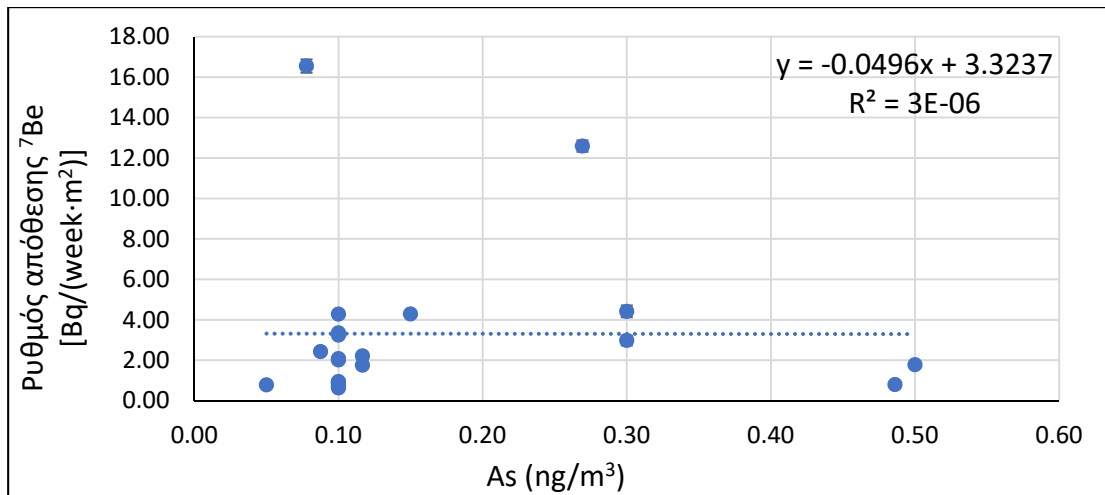
Σχήμα ΙΗ.59 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



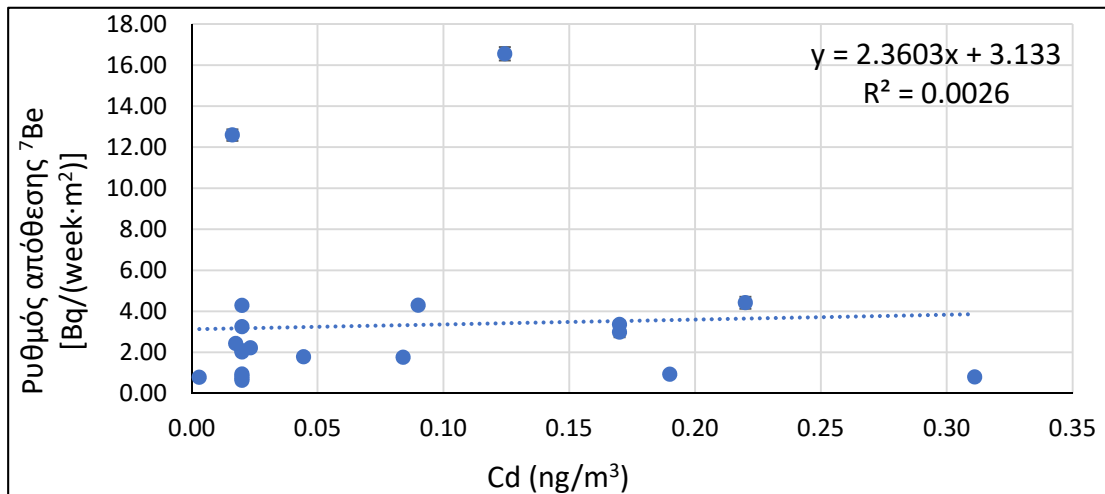
Σχήμα ΙΗ.60 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO₂ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



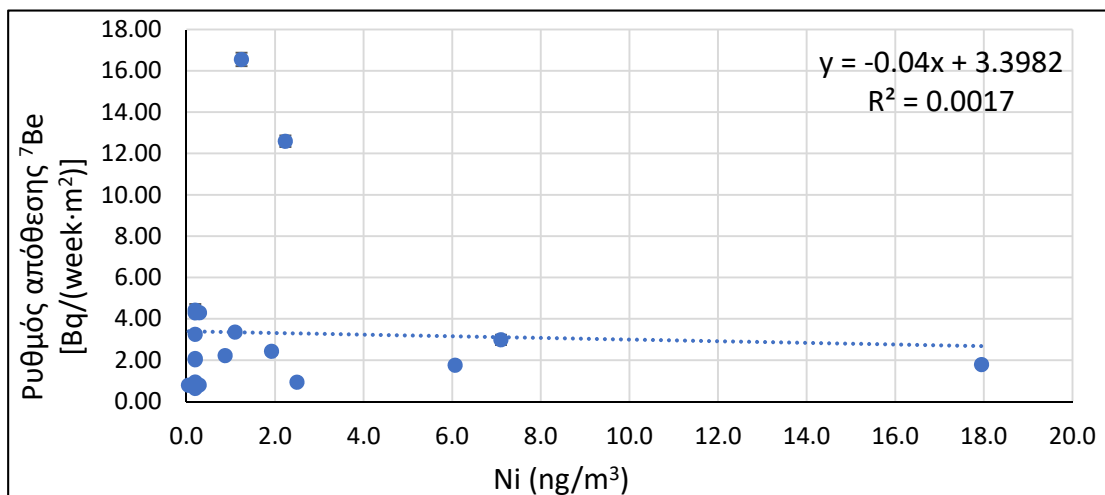
Σχήμα ΙΗ.61 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O₃ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



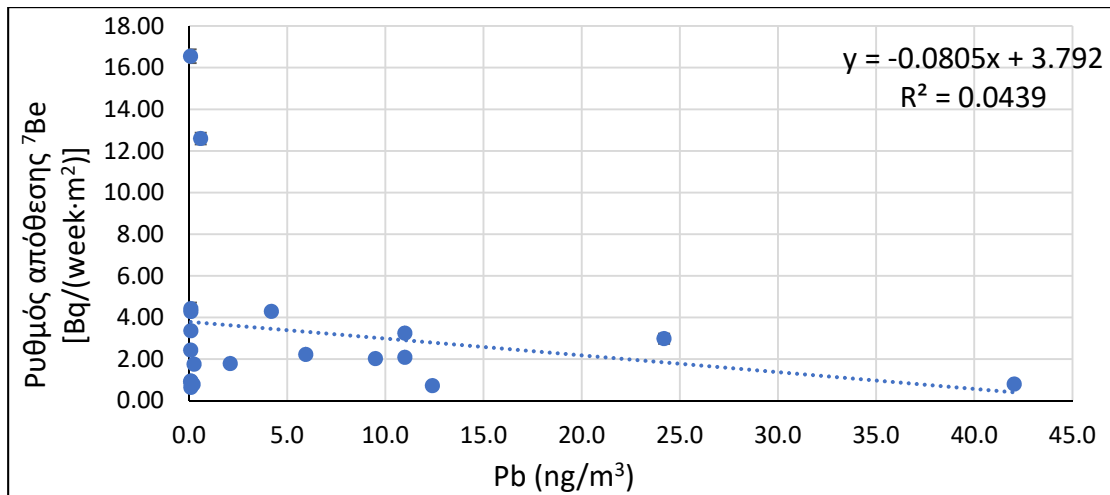
Σχήμα ΙΗ.62 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



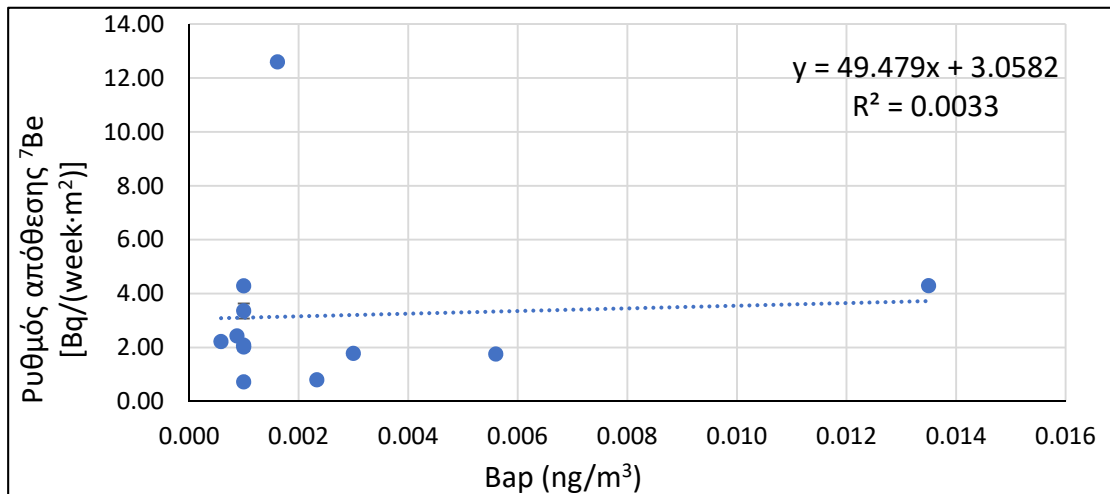
Σχήμα ΙΗ.63 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



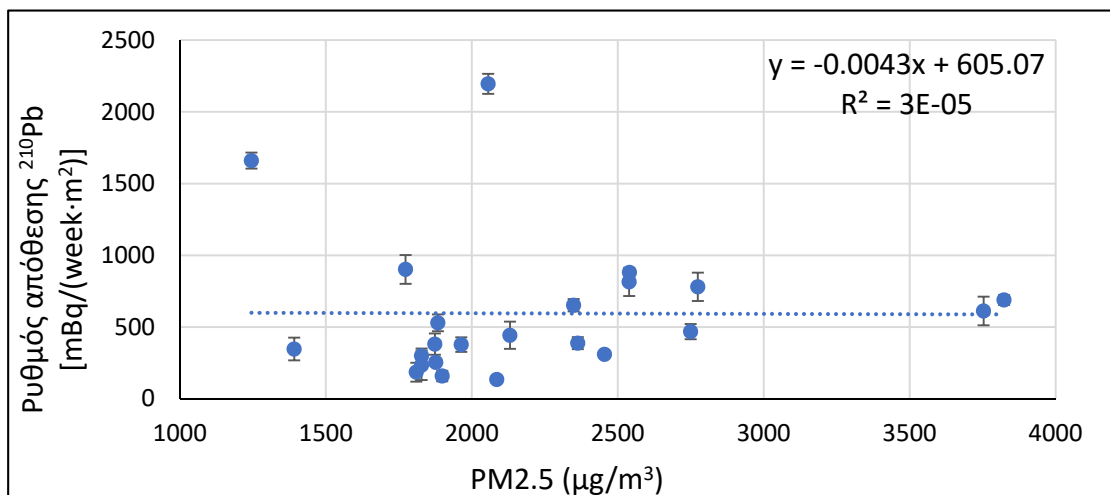
Σχήμα ΙΗ.64 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



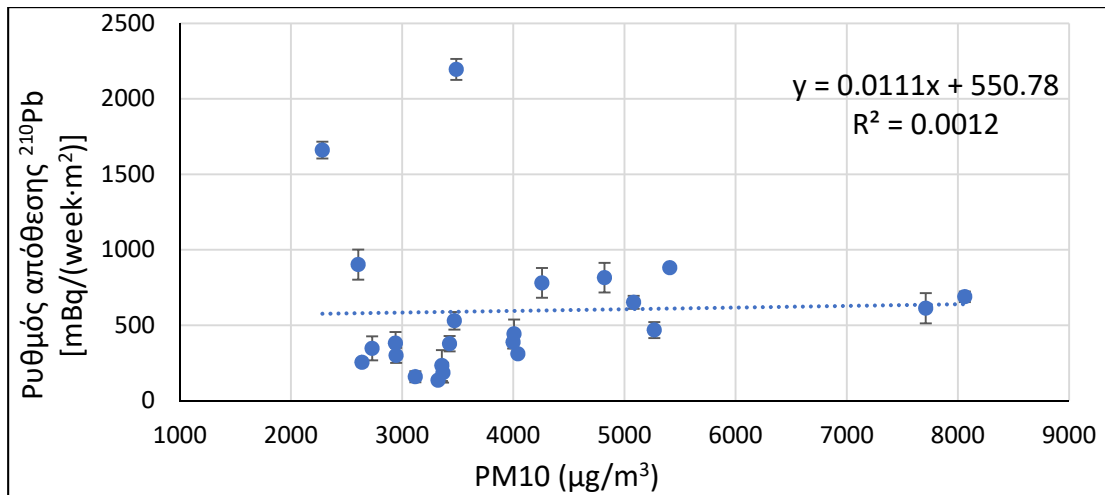
Σχήμα ΙΗ.65 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



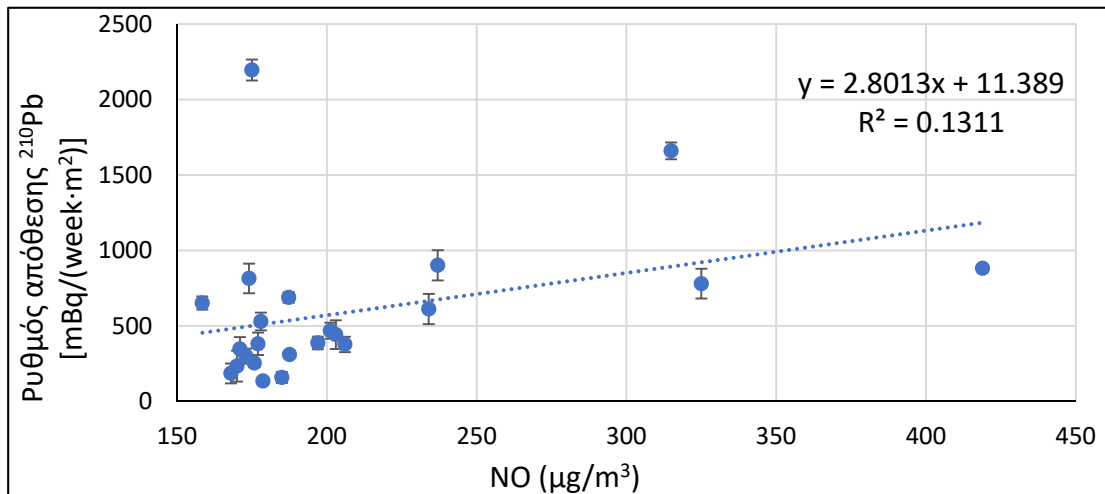
Σχήμα ΙΗ.66 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



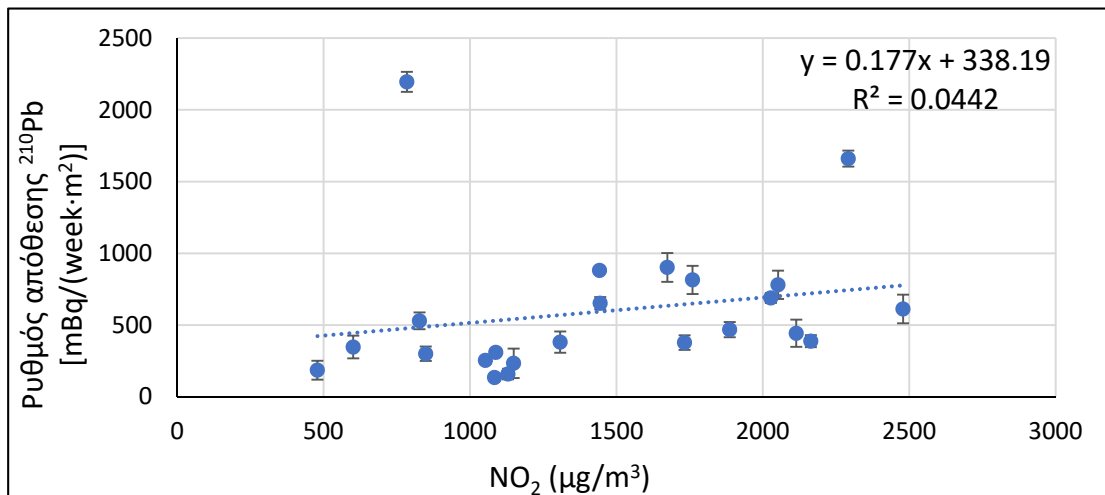
Σχήμα ΙΗ.67 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}$ στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



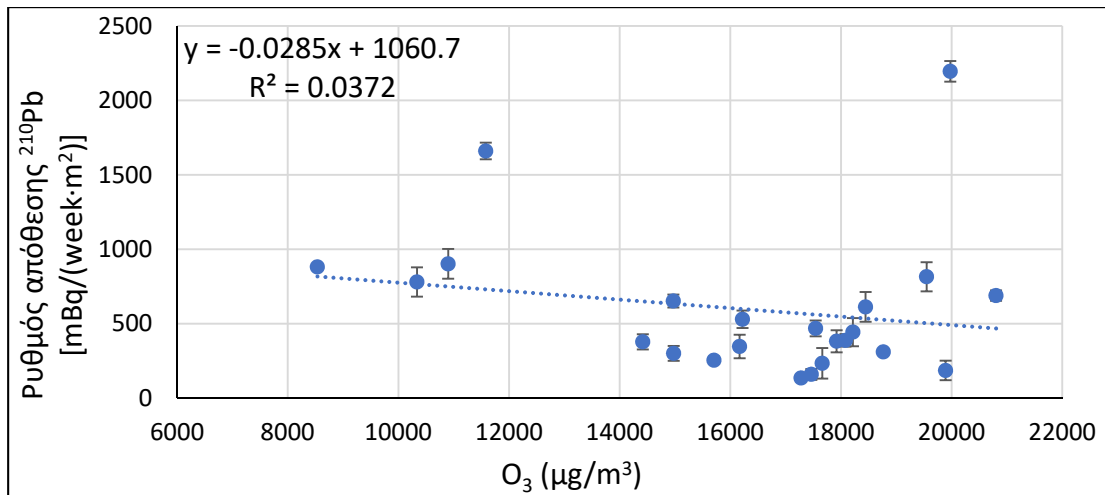
Σχήμα ΙΗ.68 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM_{10} στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



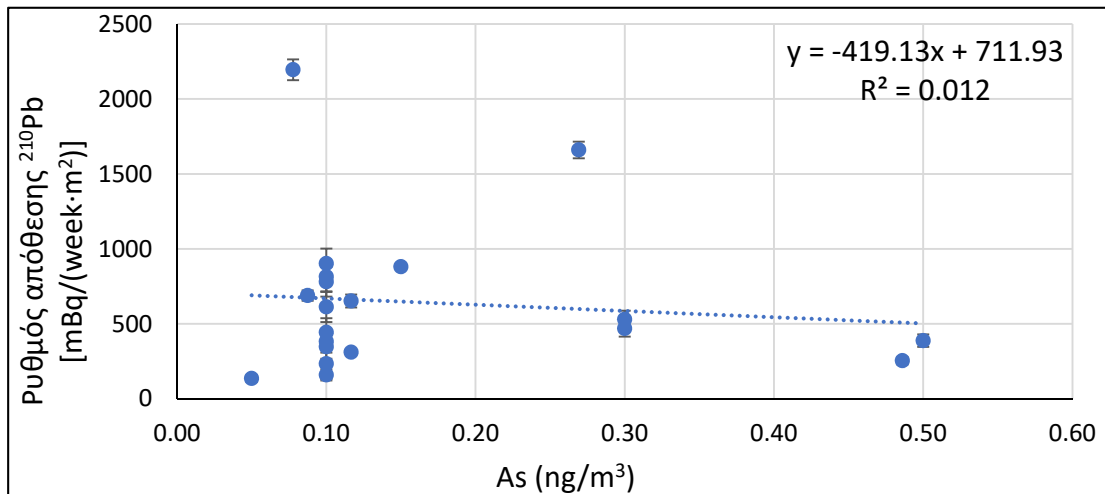
Σχήμα ΙΗ.69 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



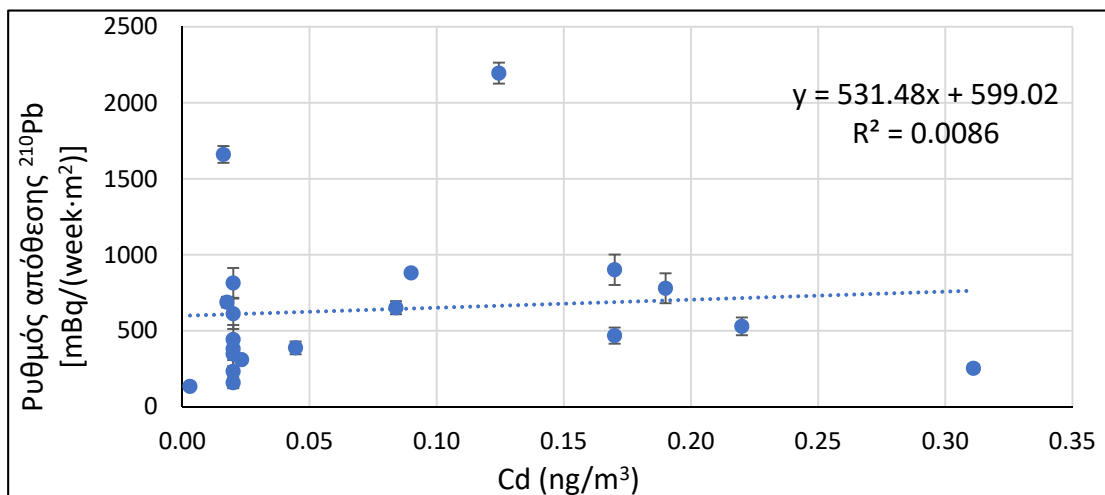
Σχήμα ΙΗ.70 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



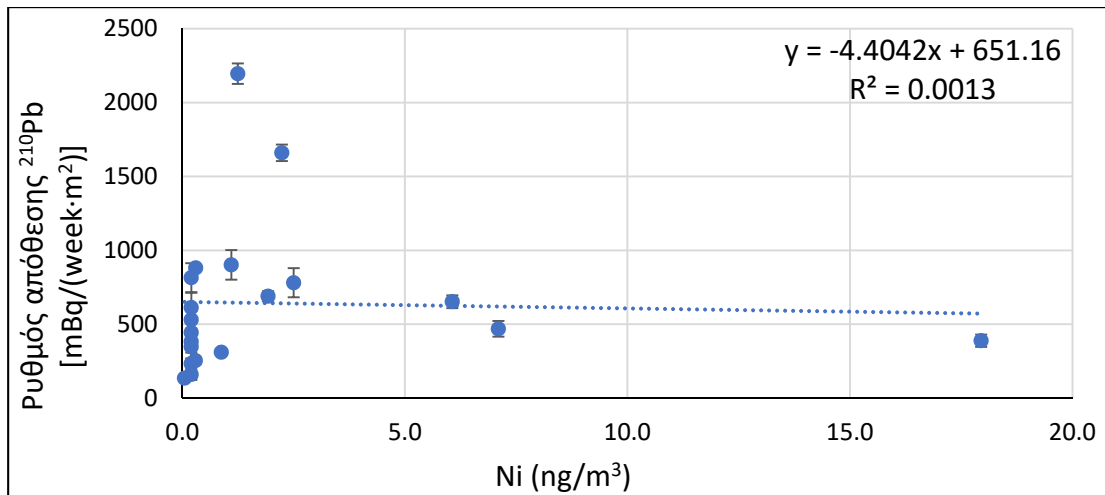
Σχήμα ΙΗ.71 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



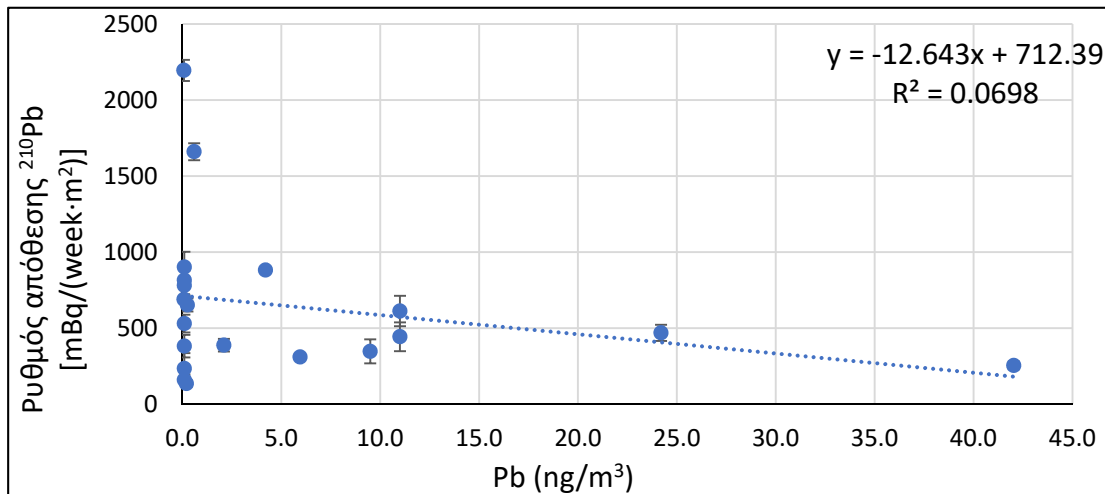
Σχήμα ΙΗ.72 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



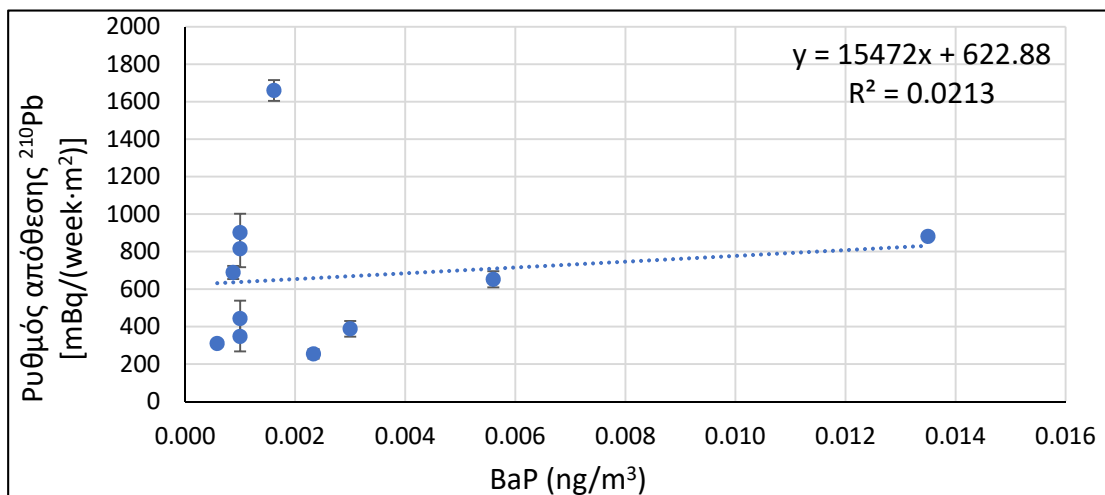
Σχήμα ΙΗ.73 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



Σχήμα ΙΗ.74 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

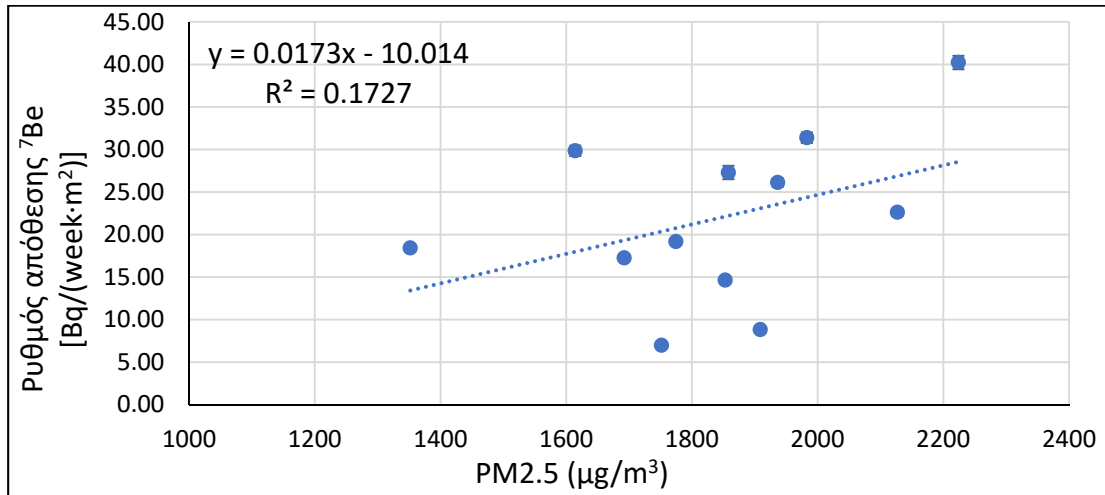


Σχήμα ΙΗ.75 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

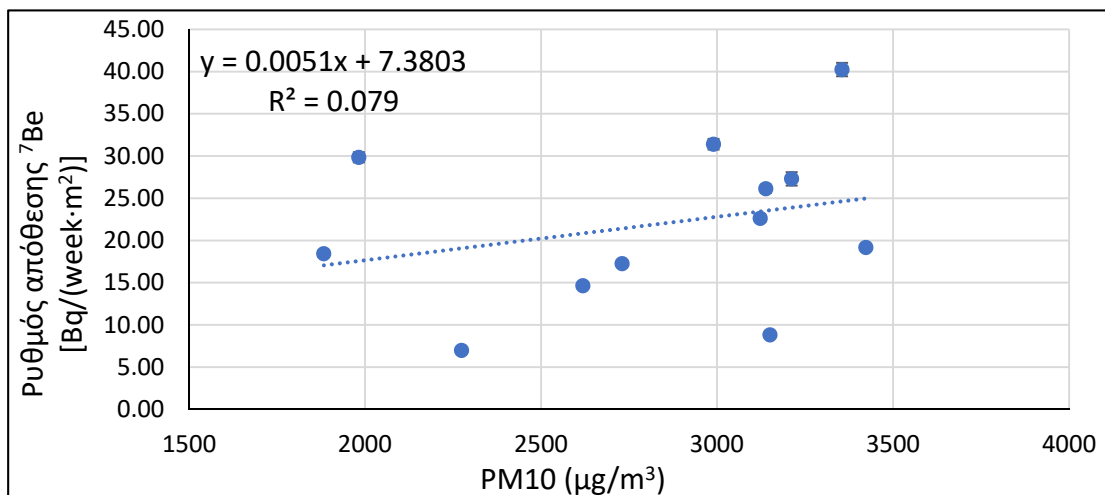


Σχήμα ΙΗ.76 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ξηρών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

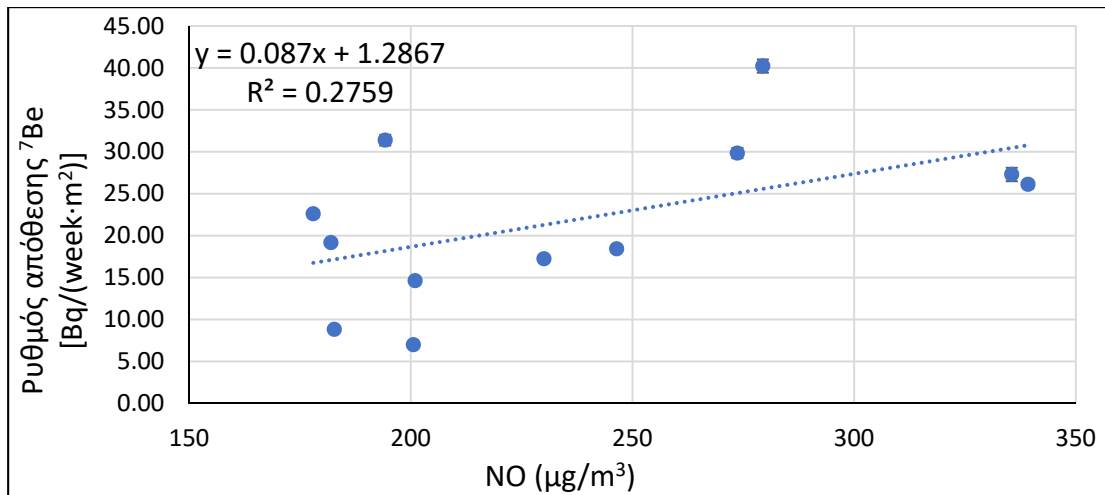
ΙΗ.9 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα



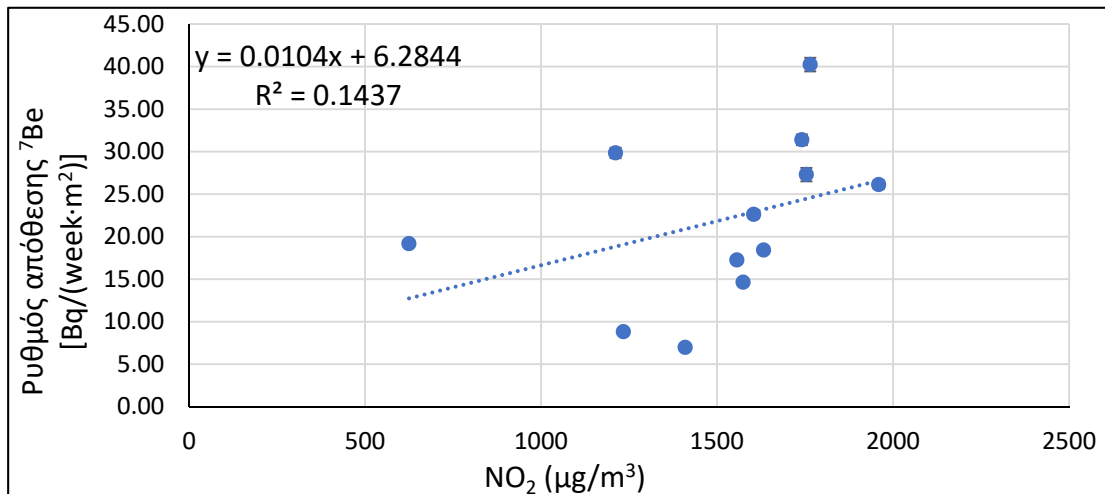
Σχήμα ΙΗ.77 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



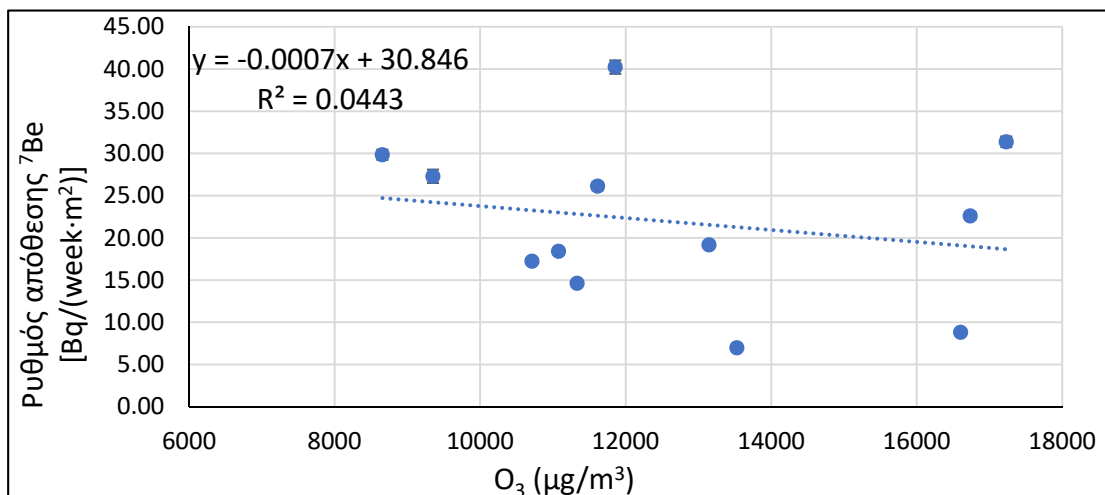
Σχήμα ΙΗ.78 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM10 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



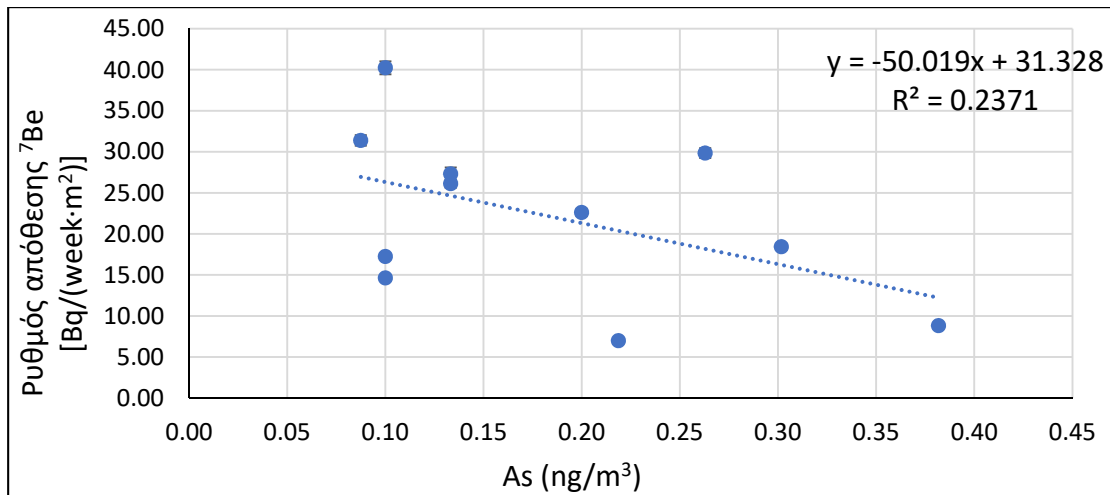
Σχήμα ΙΗ.79 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



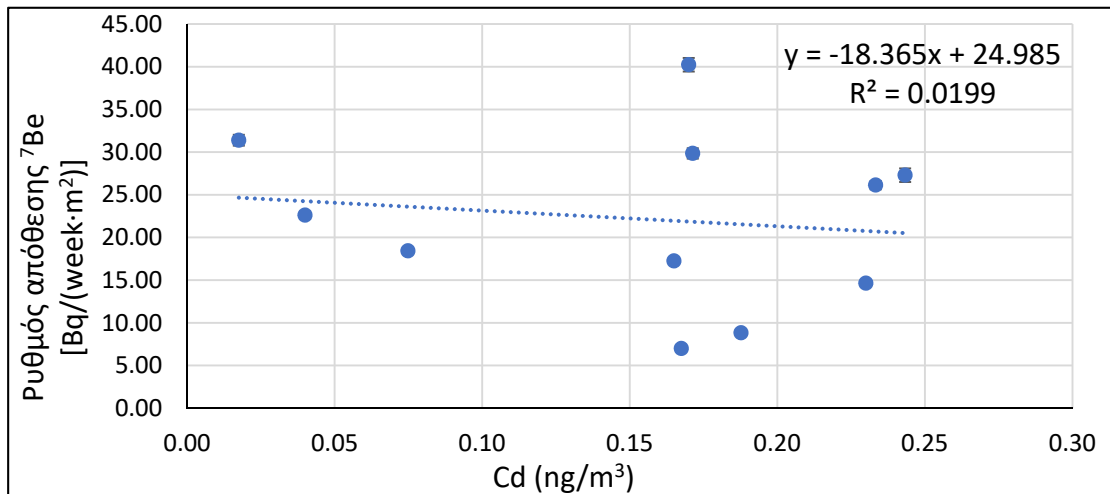
Σχήμα ΙΗ.80 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



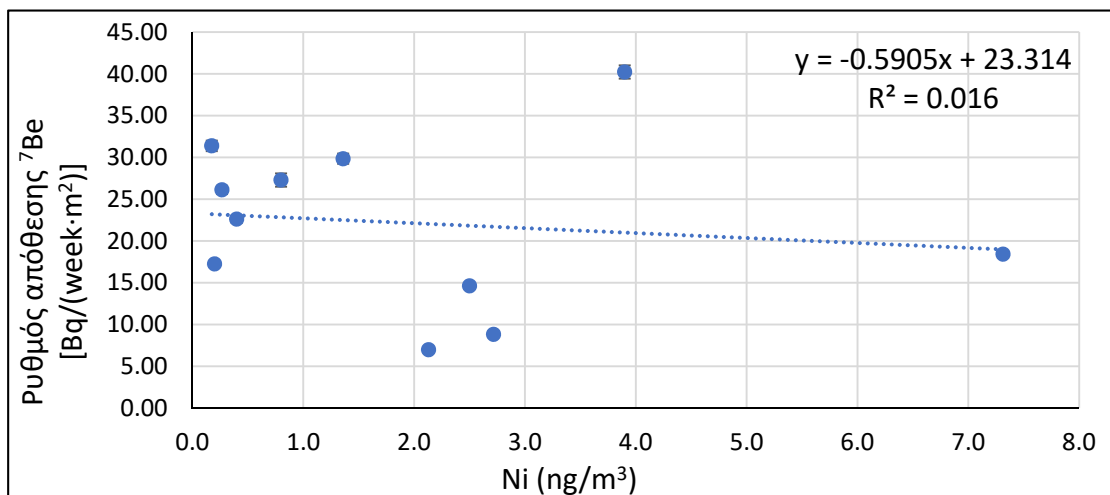
Σχήμα ΙΗ.81 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



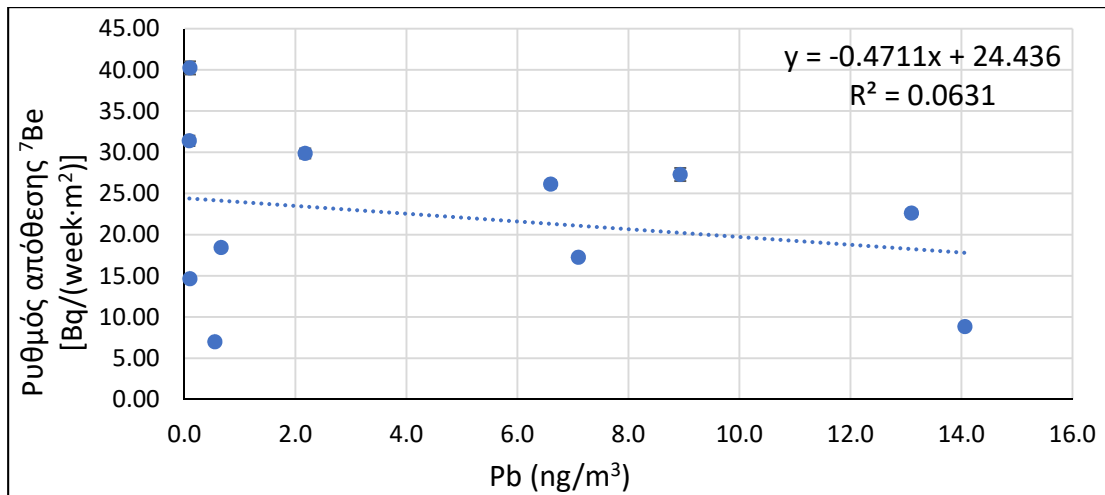
Σχήμα ΙΗ.82 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



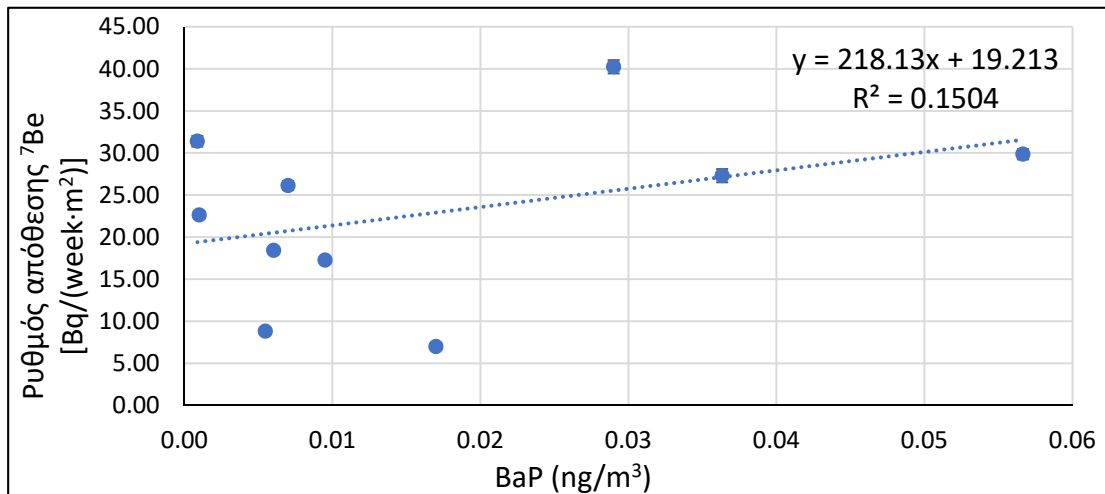
Σχήμα ΙΗ.83 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



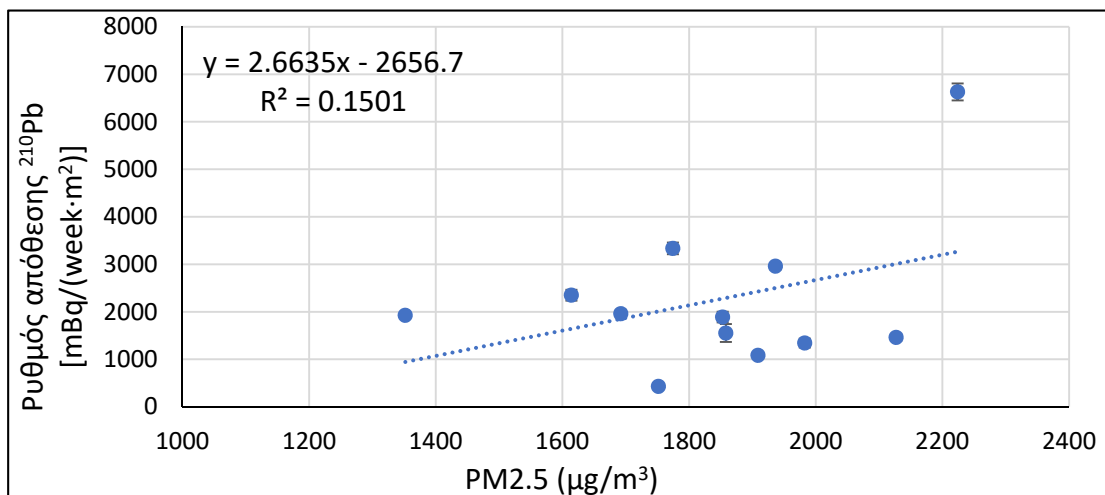
Σχήμα ΙΗ.84 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



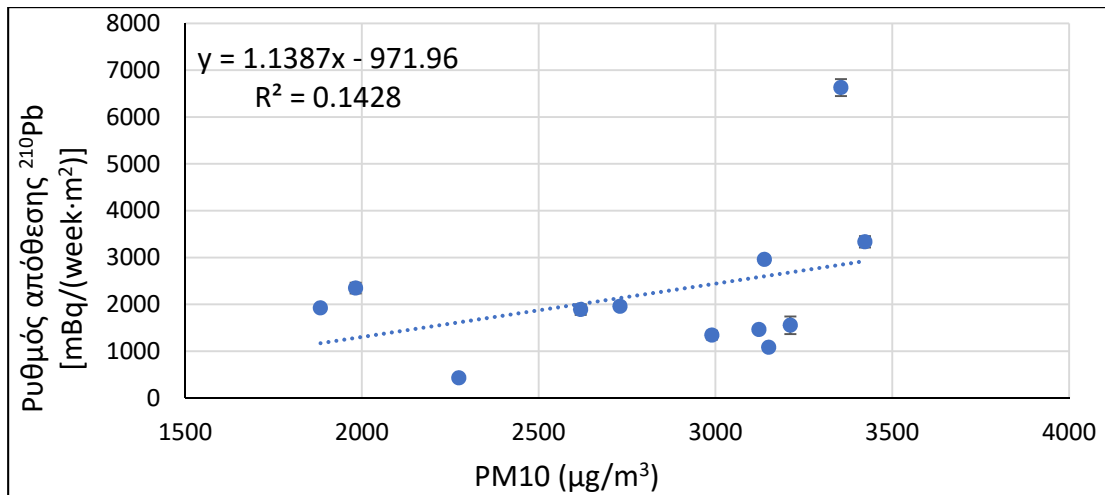
Σχήμα 1H.85 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ⁷Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



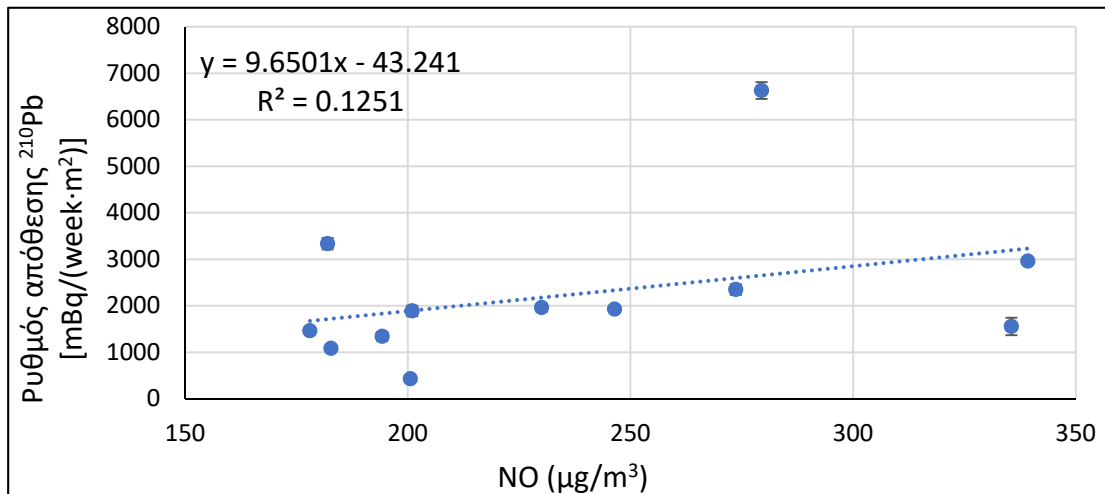
Σχήμα 1H.86 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ⁷Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



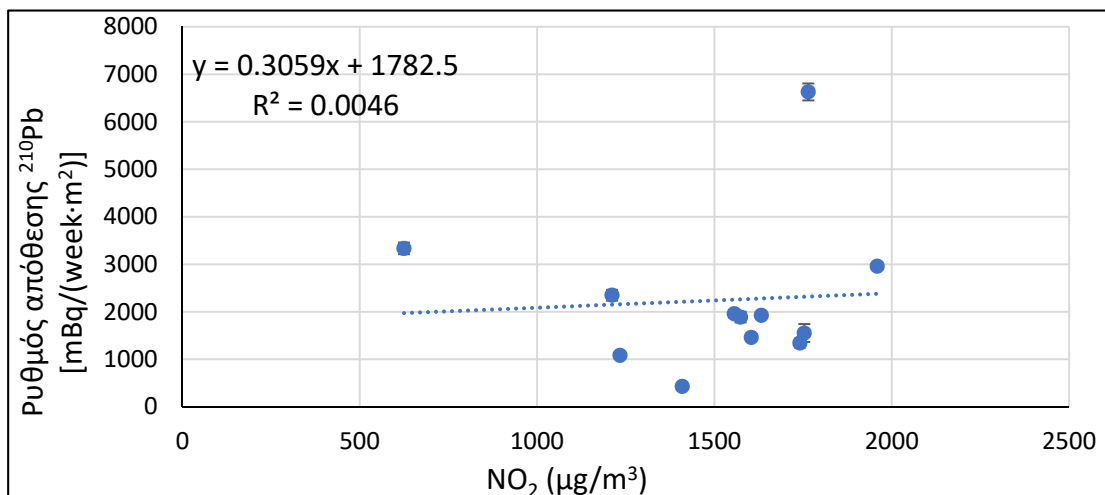
Σχήμα 1H.87 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



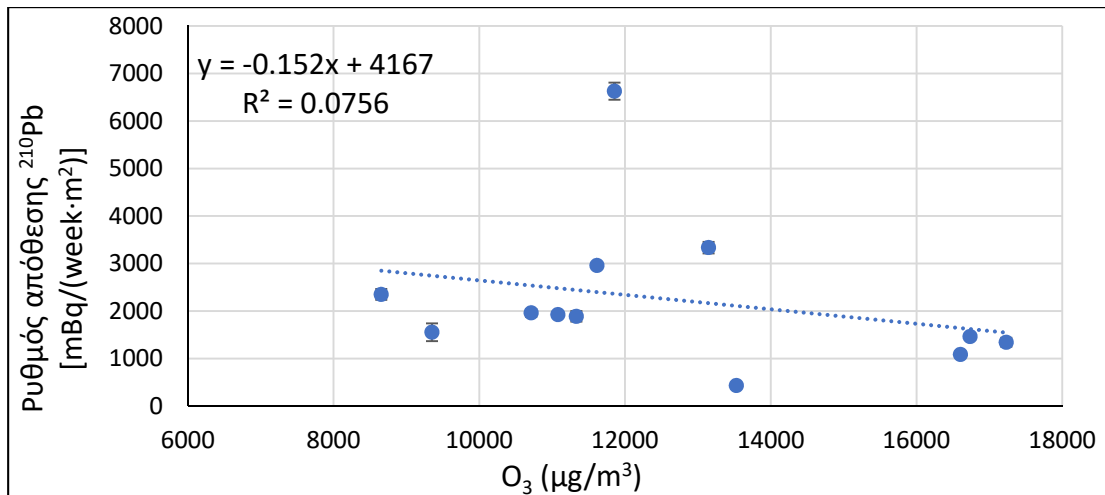
Σχήμα ΙΗ.88 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM10 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



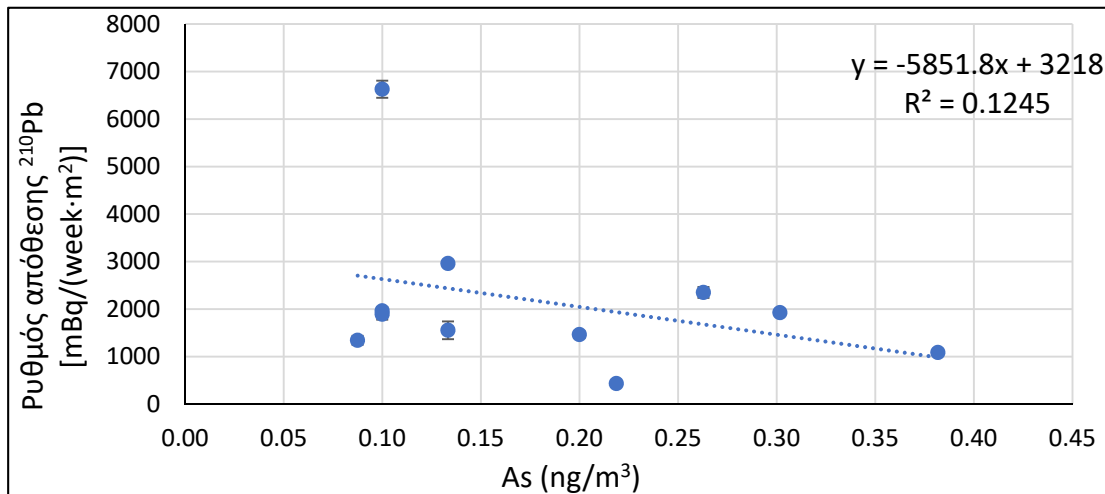
Σχήμα ΙΗ.89 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



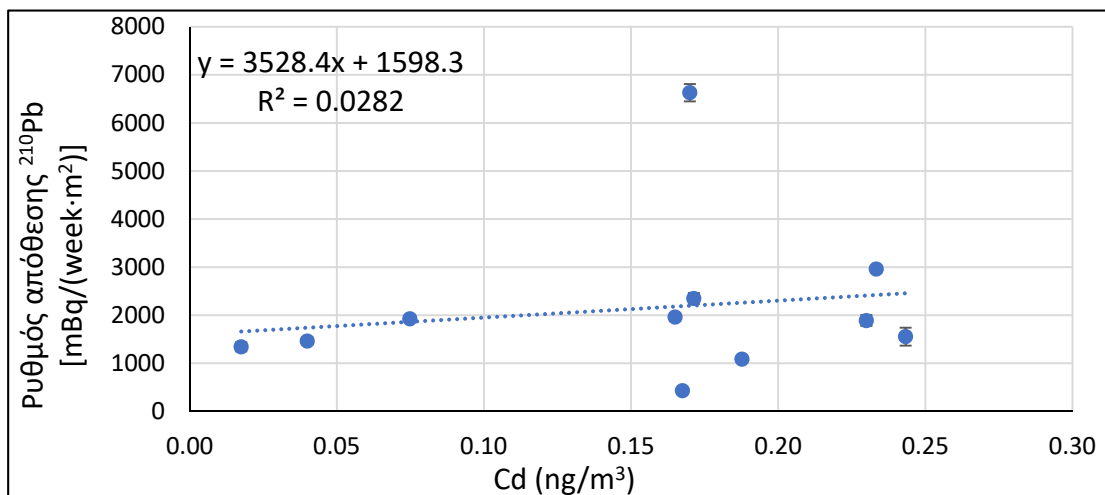
Σχήμα ΙΗ.90 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO₂ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



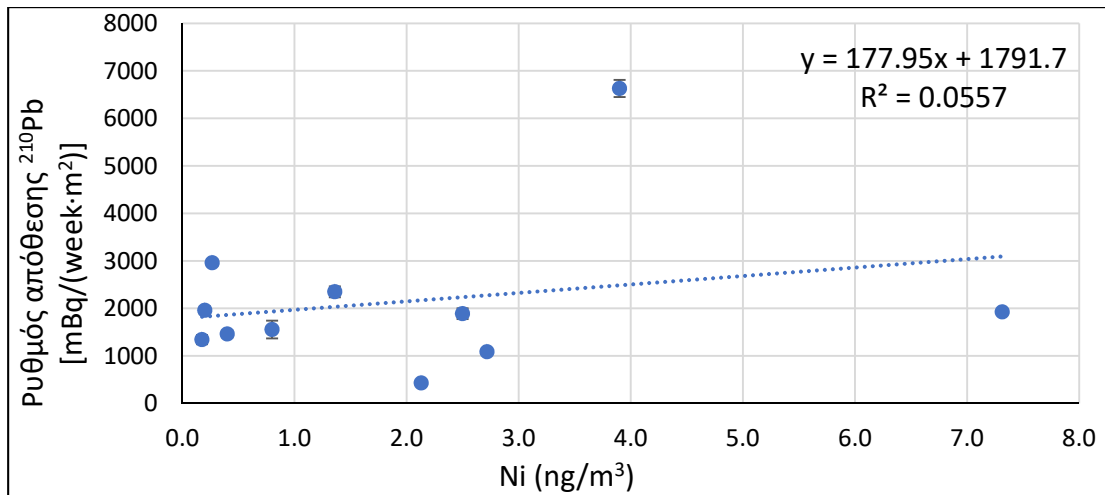
Σχήμα ΙΗ.91 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



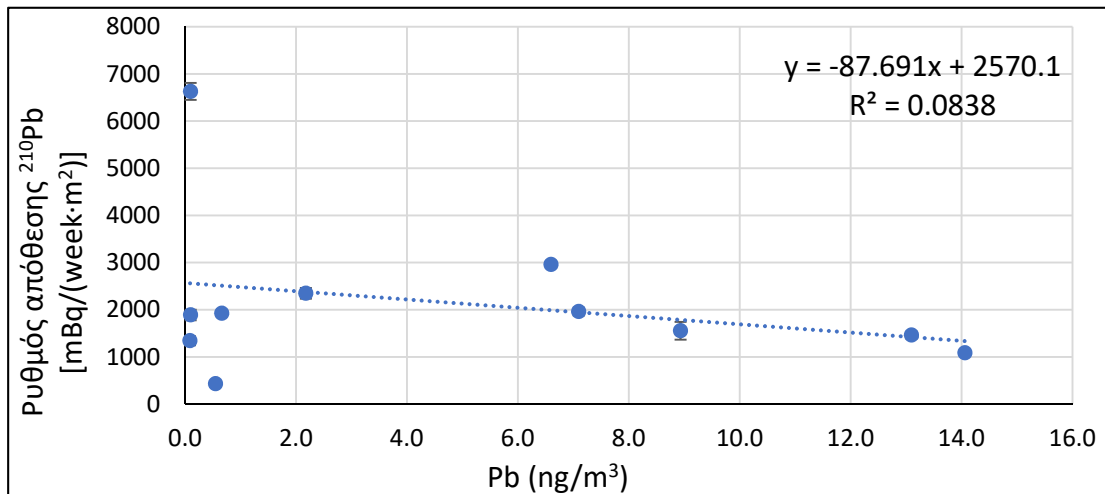
Σχήμα ΙΗ.92 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



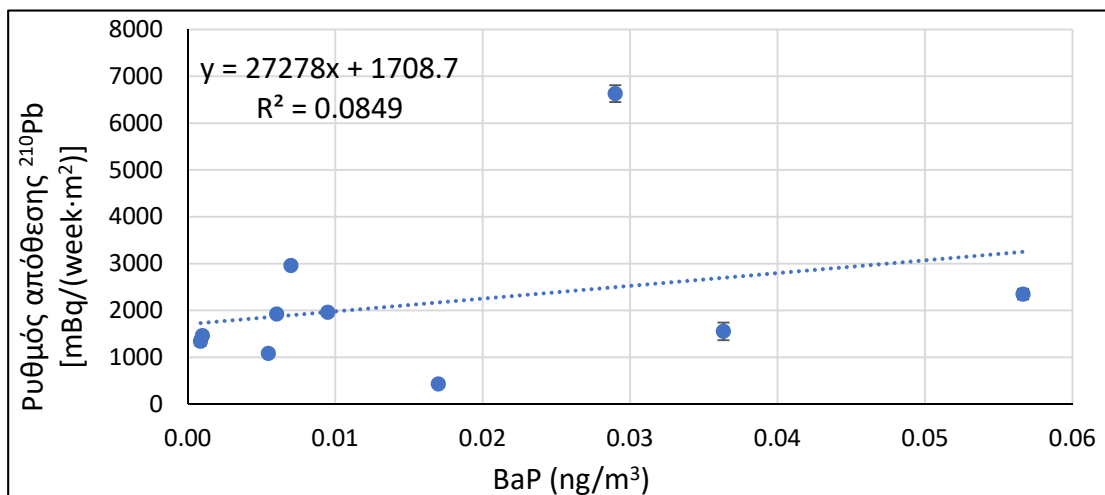
Σχήμα ΙΗ.93 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



Σχήμα ΙΗ.94 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

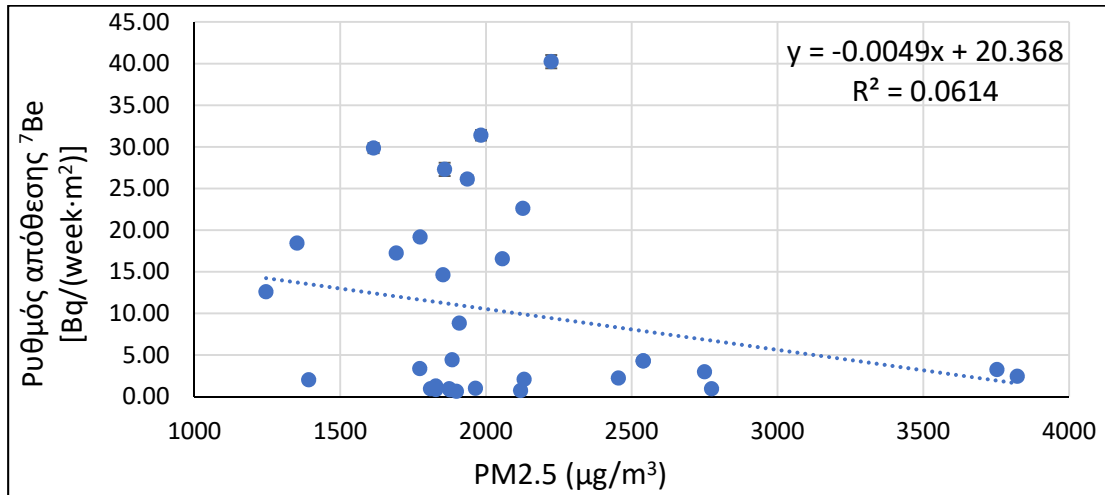


Σχήμα ΙΗ.95 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

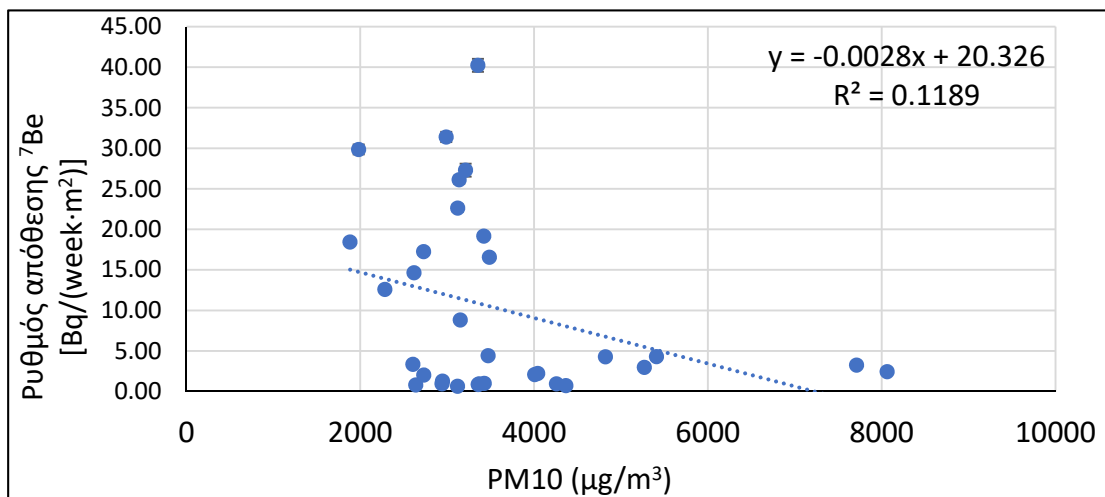


Σχήμα ΙΗ.96 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ²¹⁰Pb στα δείγματα ολικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

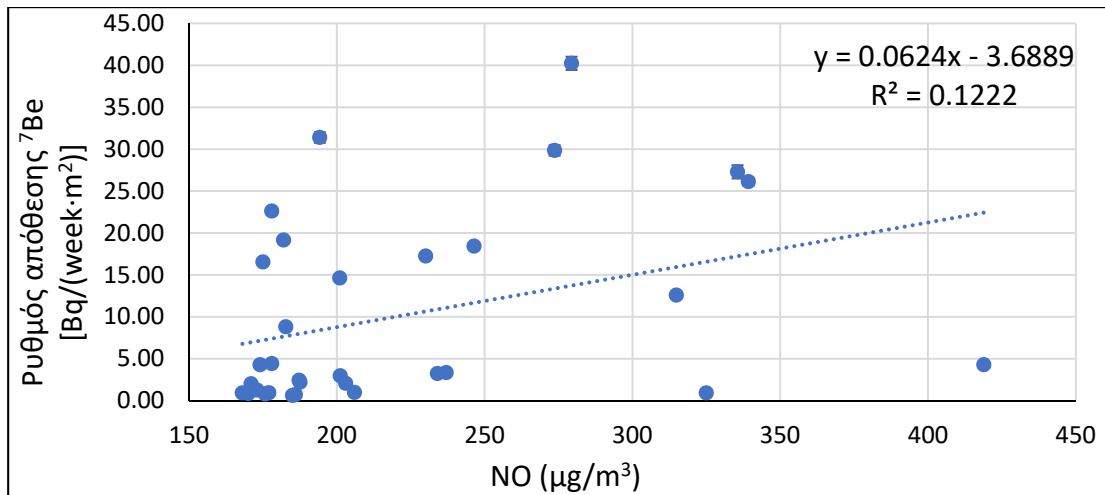
ΠΗ.10 Διαγράμματα συσχέτισης ρυθμών απόθεσης ^7Be και ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα



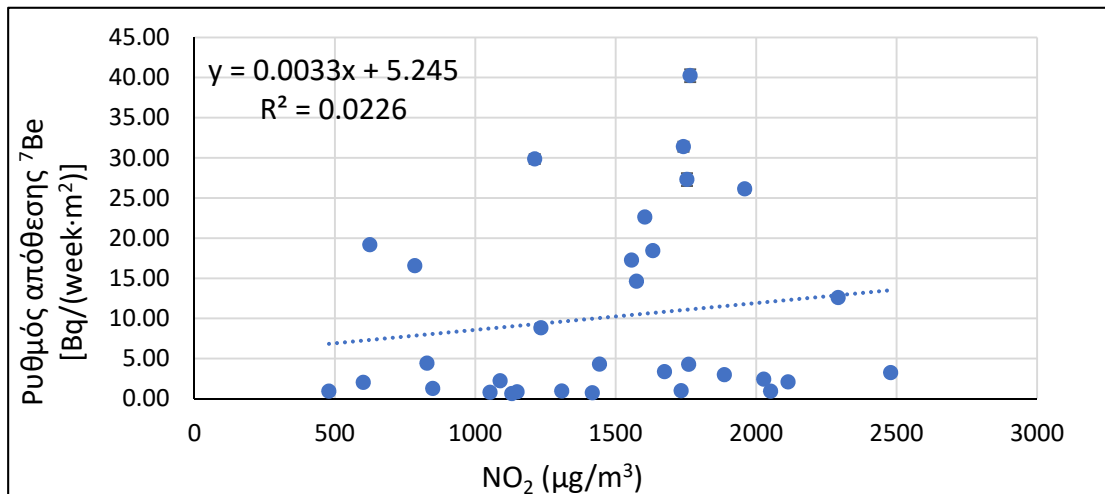
Σχήμα ΠΗ.97 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



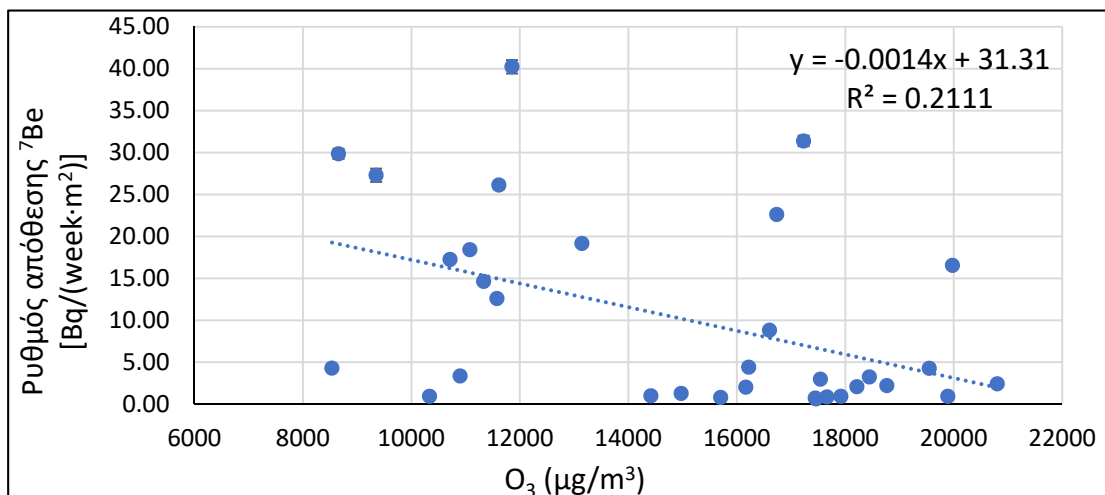
Σχήμα ΠΗ.98 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM10 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



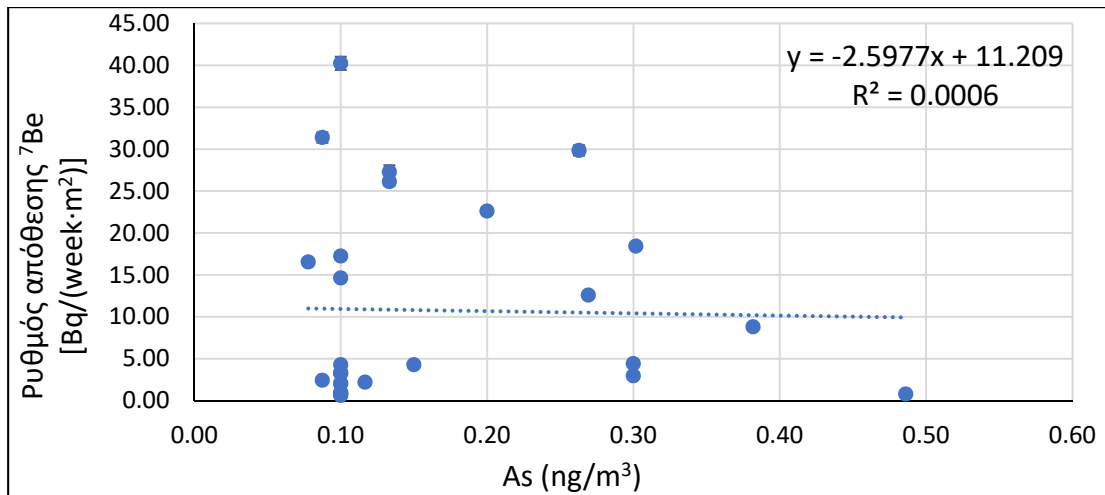
Σχήμα ΙΗ.99 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



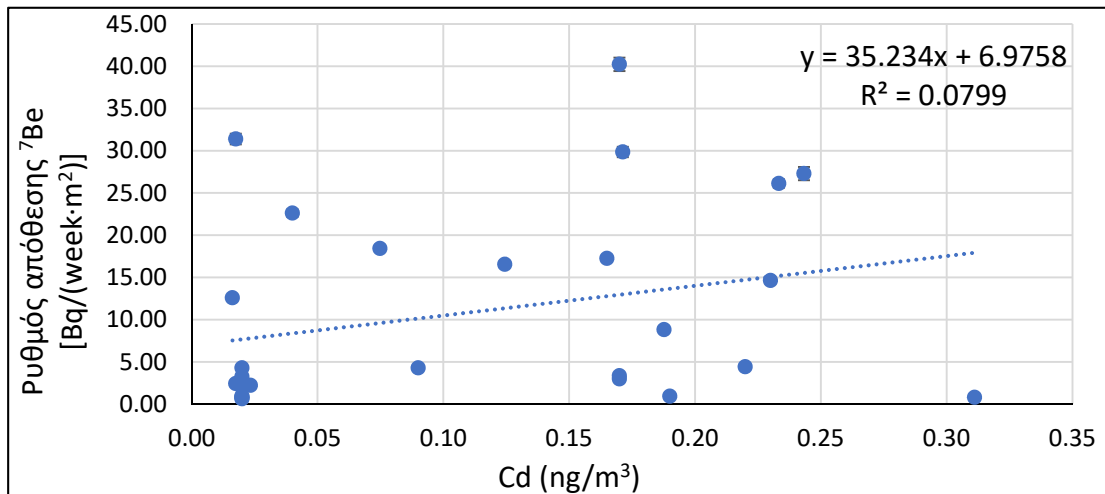
Σχήμα ΙΗ.100 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



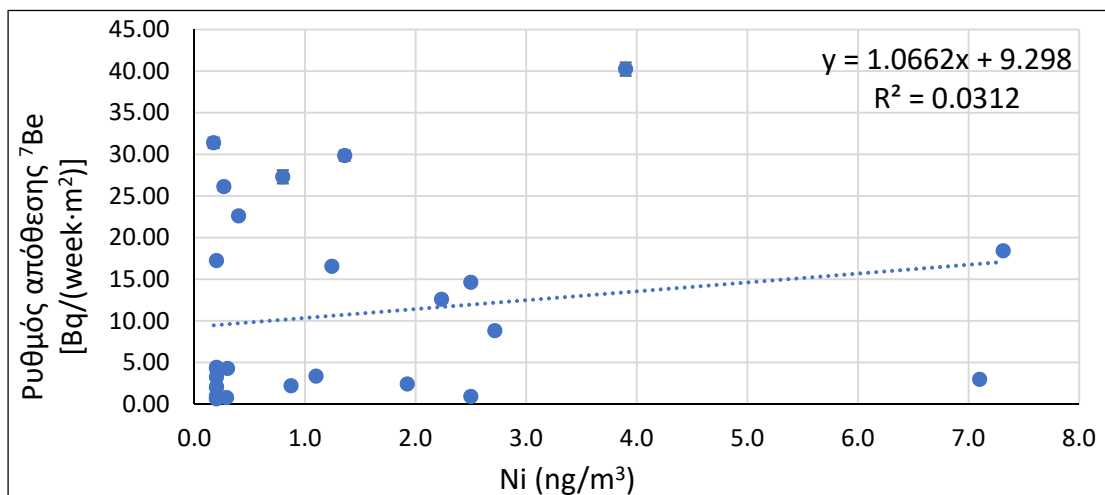
Σχήμα ΙΗ.101 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



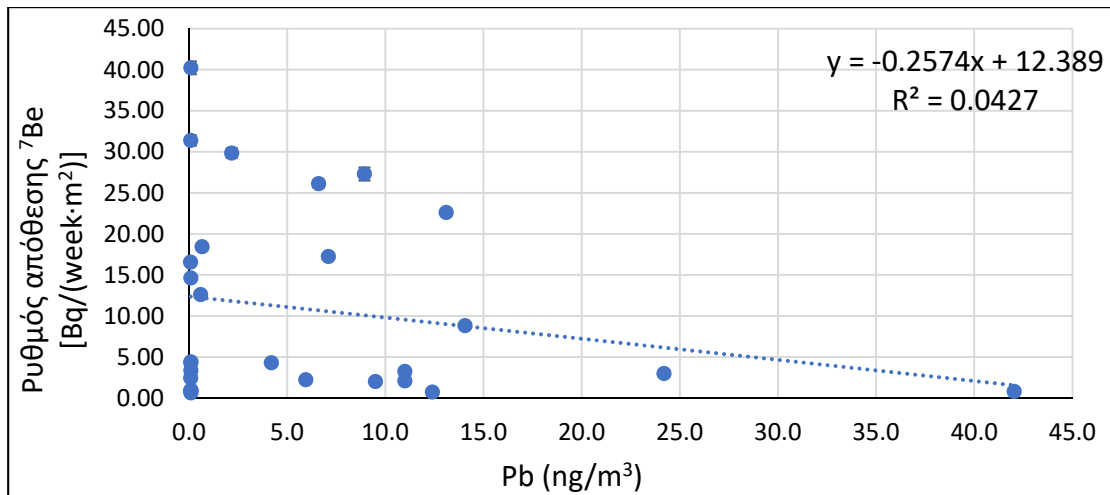
Σχήμα ΙΗ.102 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



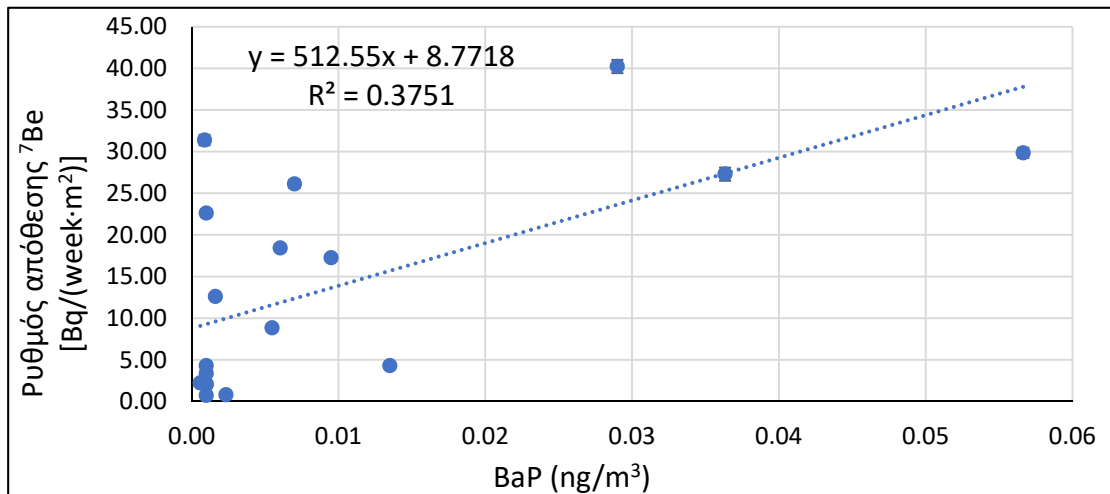
Σχήμα ΙΗ.103 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



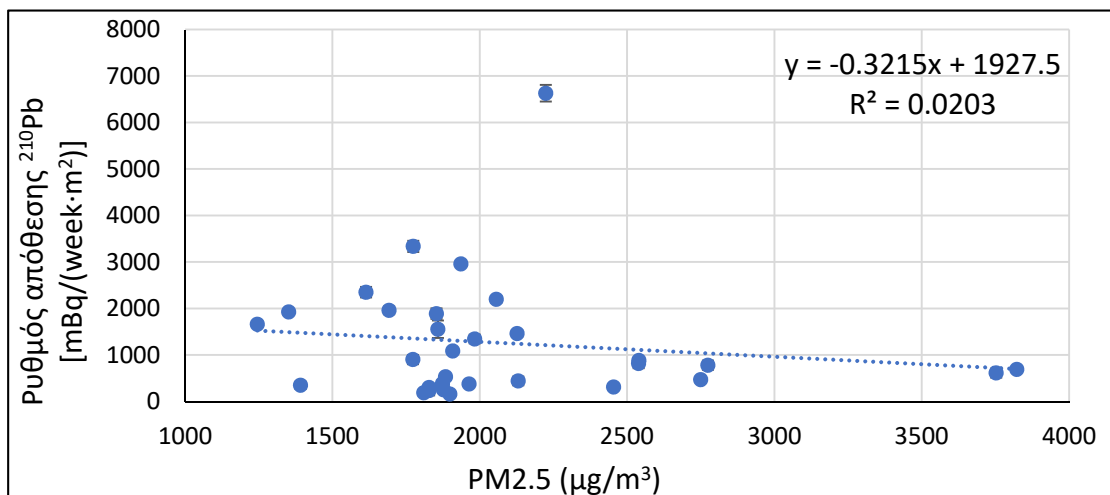
Σχήμα ΙΗ.104 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



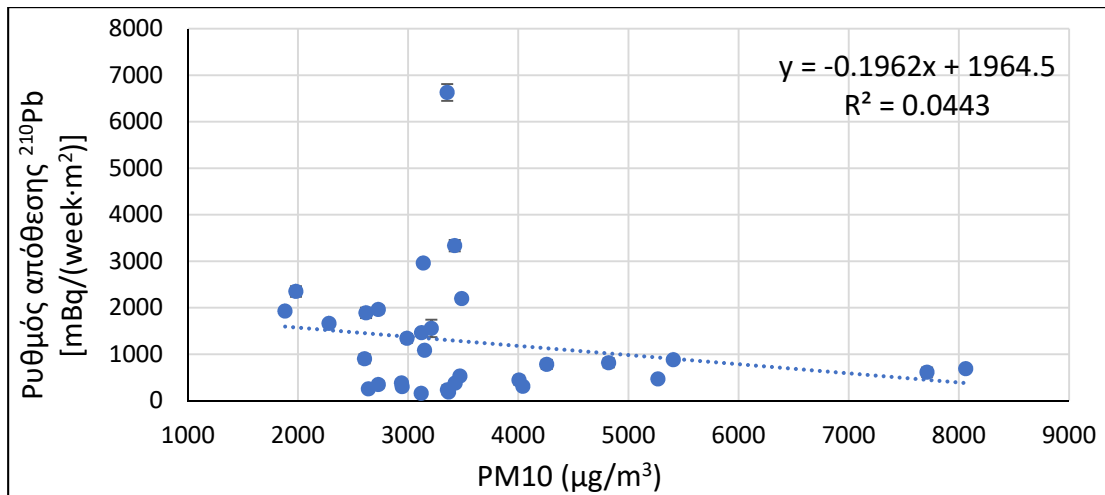
Σχήμα ΙΗ.105 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



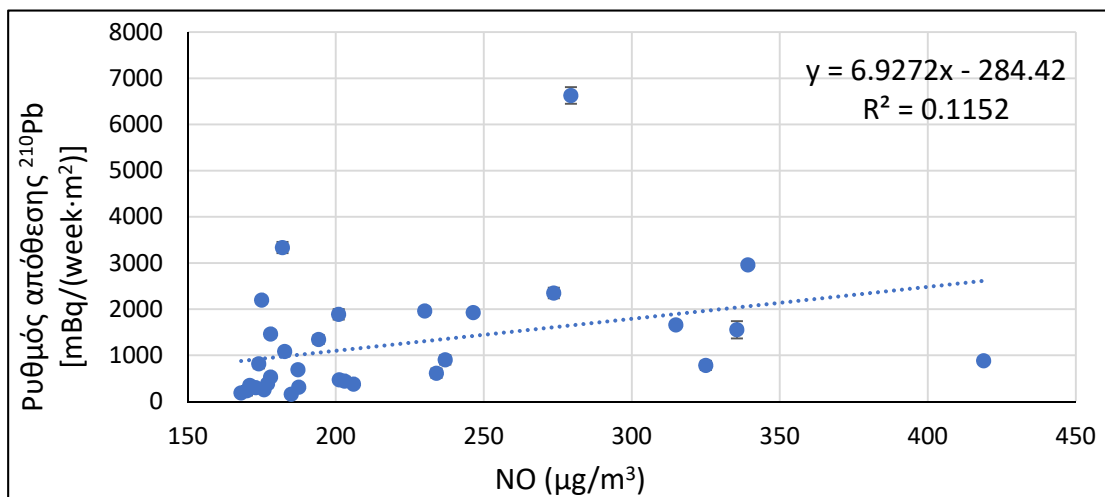
Σχήμα ΙΗ.106 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



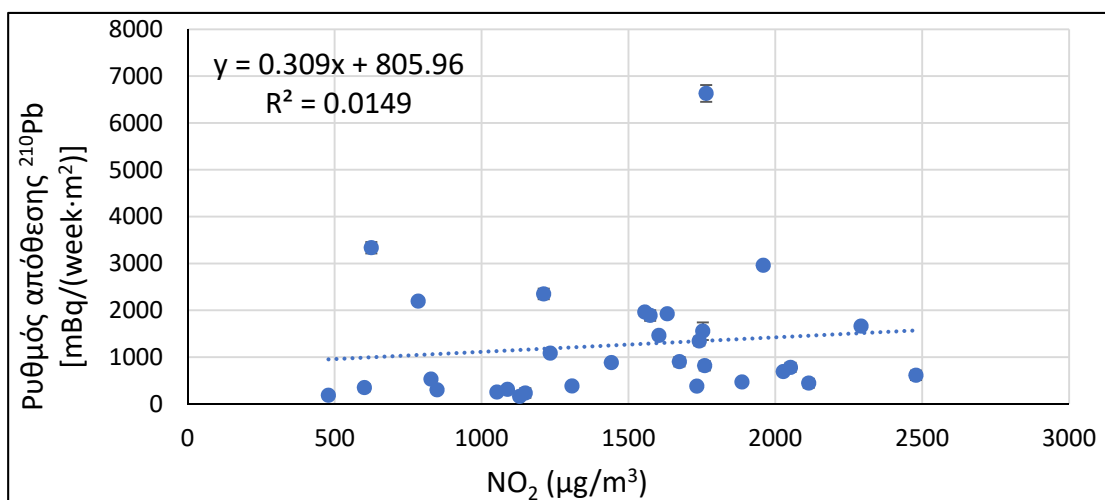
Σχήμα ΙΗ.107 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}$ στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM2.5 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



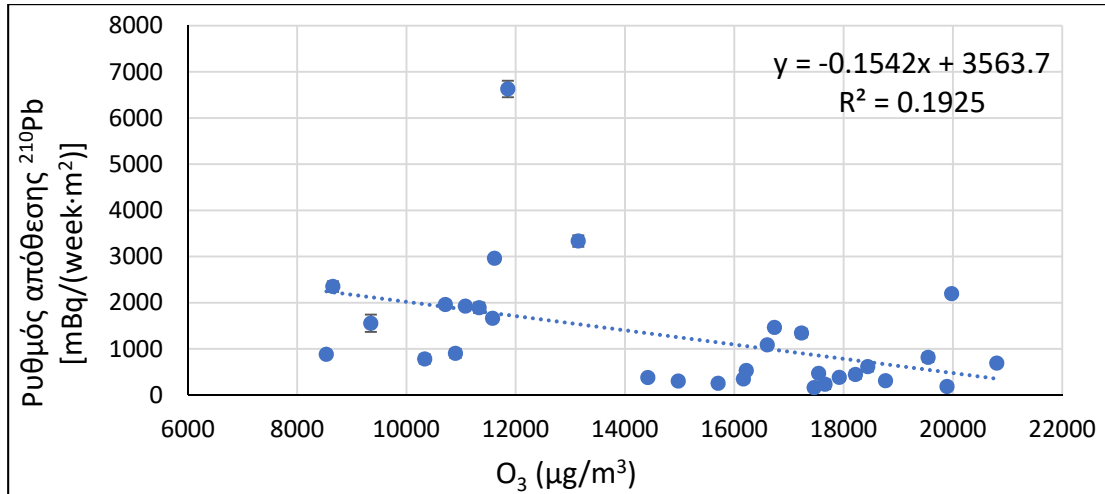
Σχήμα ΙΗ.108 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του PM_{10} στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



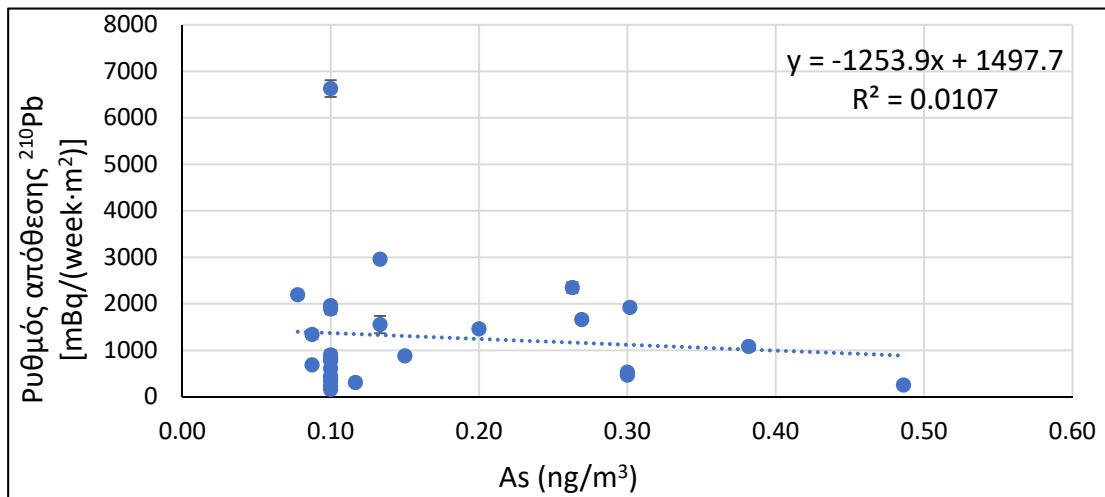
Σχήμα ΙΗ.109 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



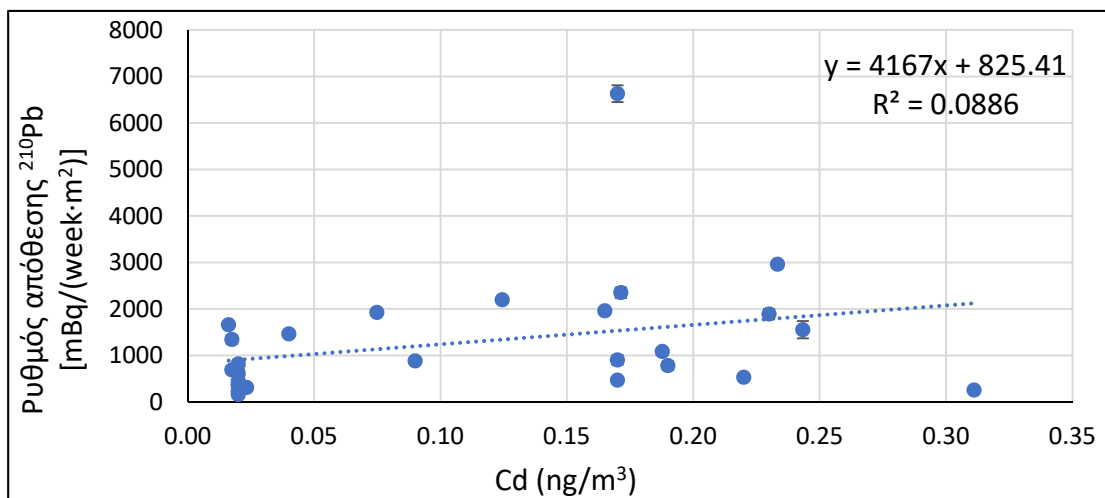
Σχήμα ΙΗ.110 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



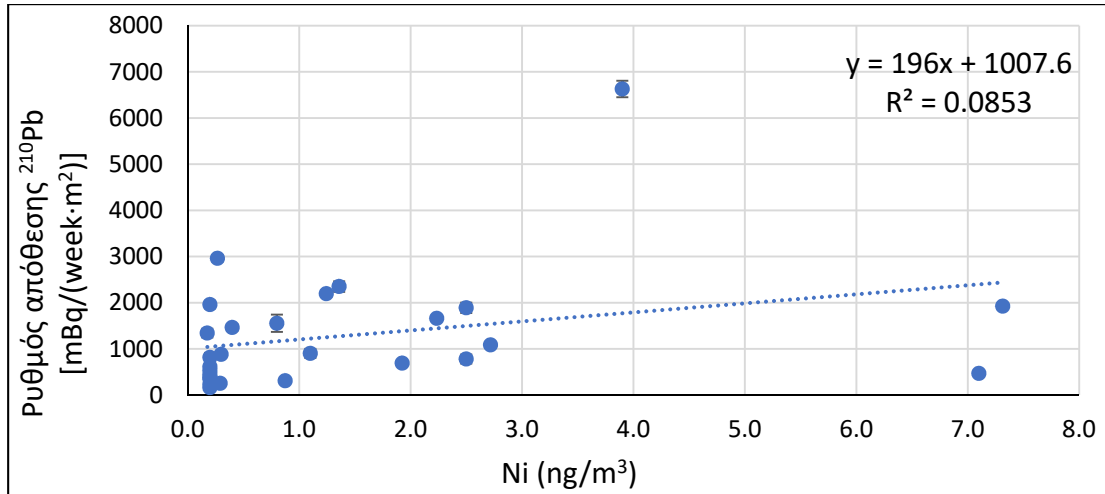
Σχήμα ΙΗ.111 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



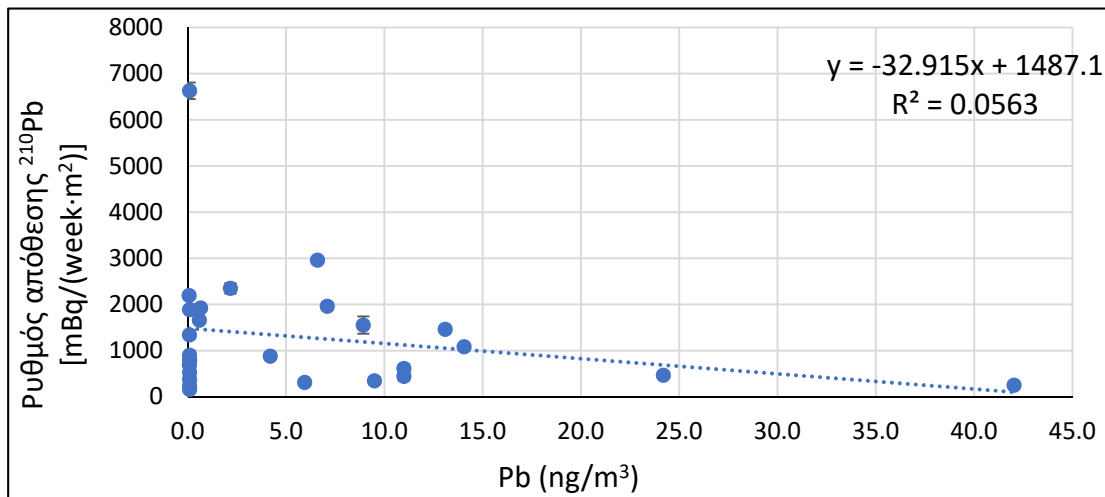
Σχήμα ΙΗ.112 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



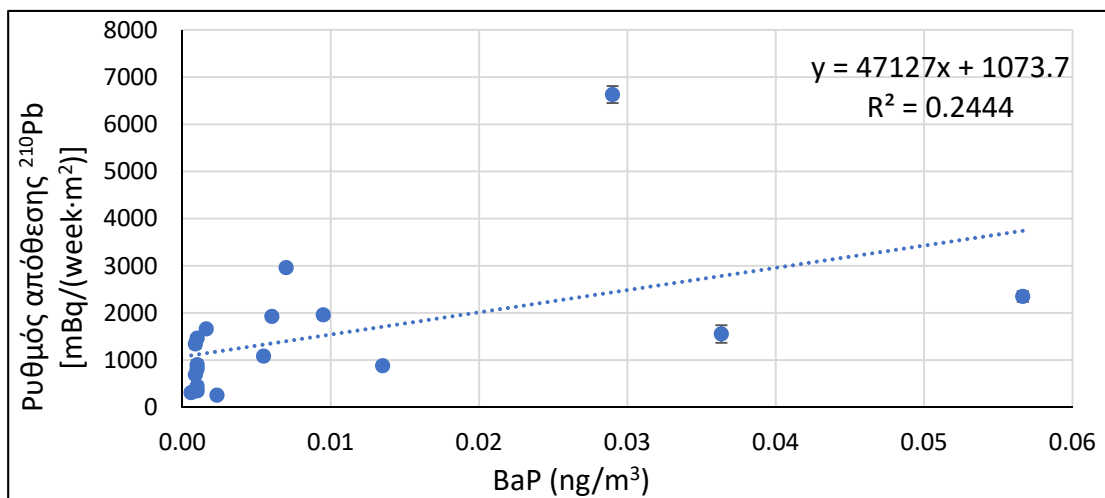
Σχήμα ΙΗ.113 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



Σχήμα ΙΗ.114 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

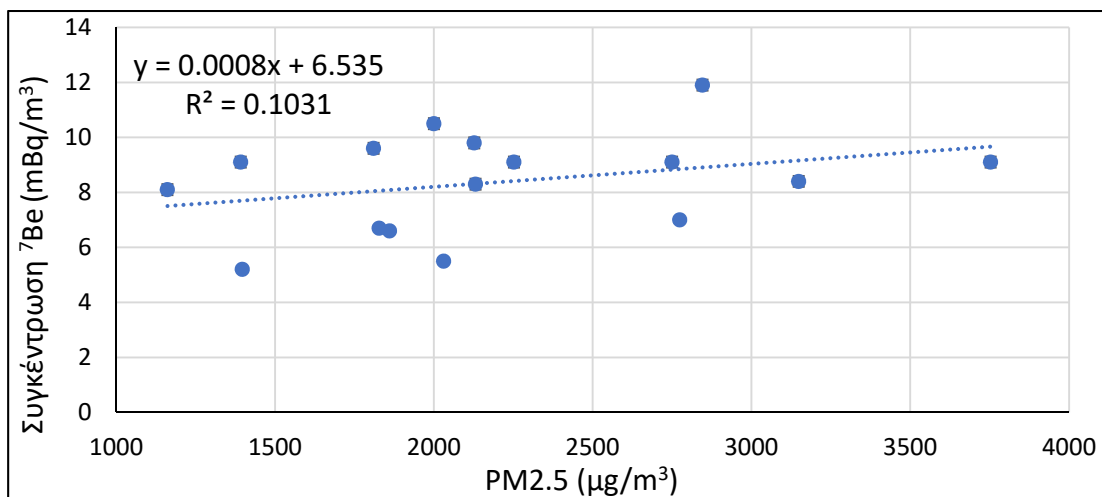


Σχήμα ΙΗ.115 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

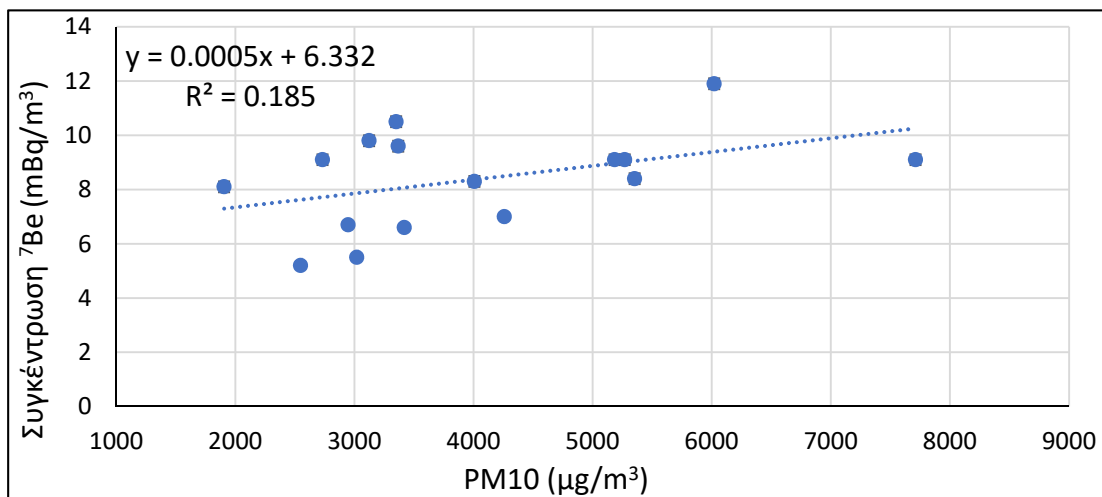


Σχήμα ΙΗ.116 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^{210}Pb στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

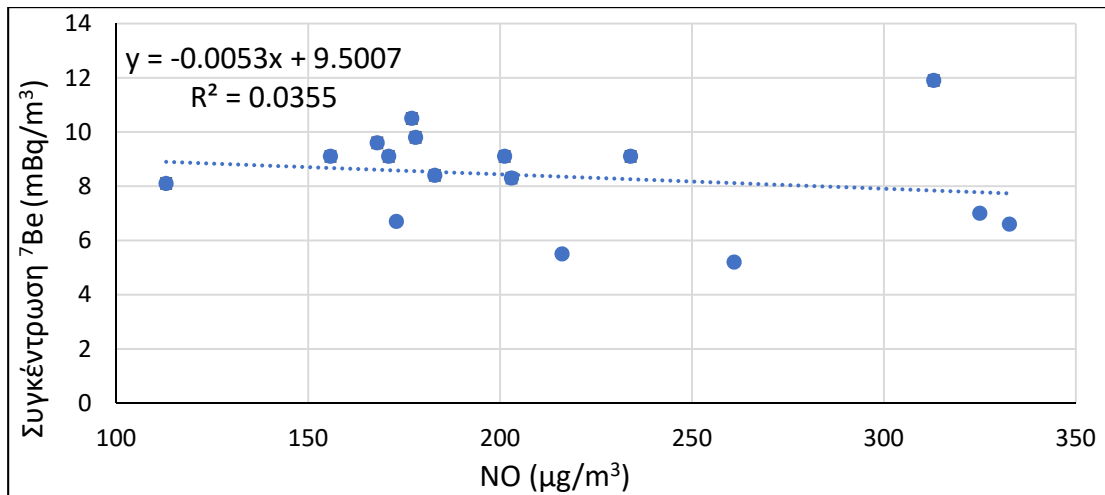
ΙΗ.11 Διαγράμματα συσχέτισης συγκεντρώσεων ενεργότητας ^7Be και ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα ως προς τυπικούς ατμοσφαιρικούς ρυπαντές στην ατμόσφαιρα



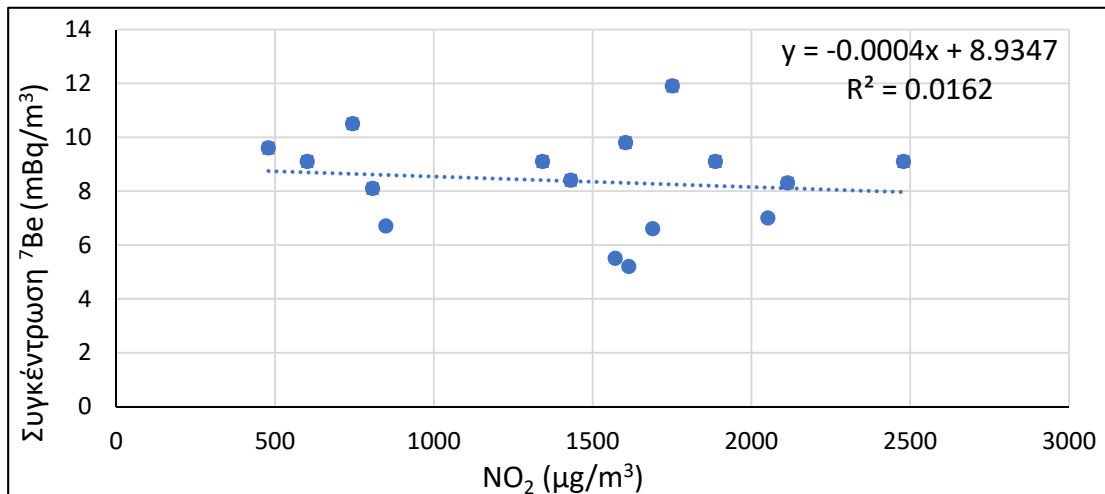
Σχήμα ΙΗ.117 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του $\text{PM}_{2.5}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



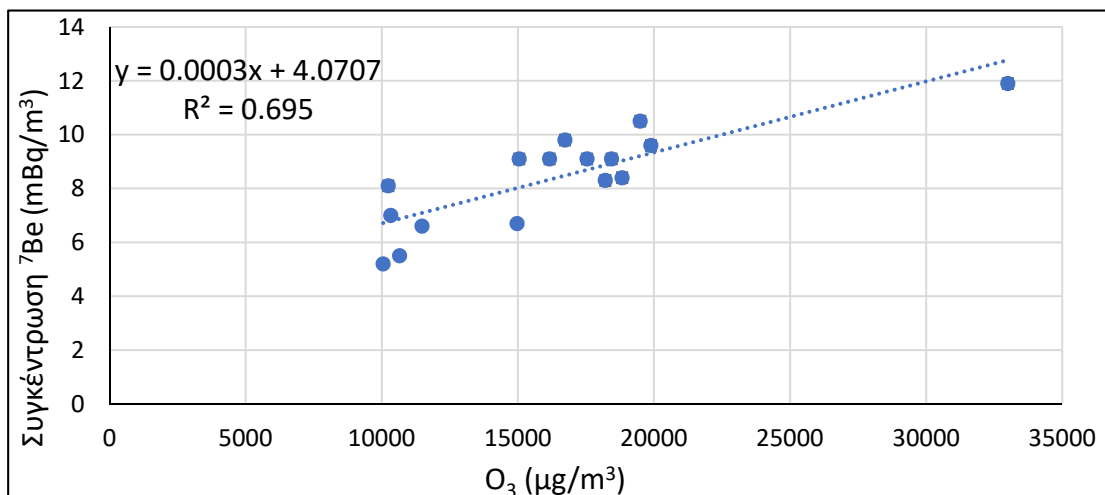
Σχήμα ΙΗ.118 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του PM_{10} στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



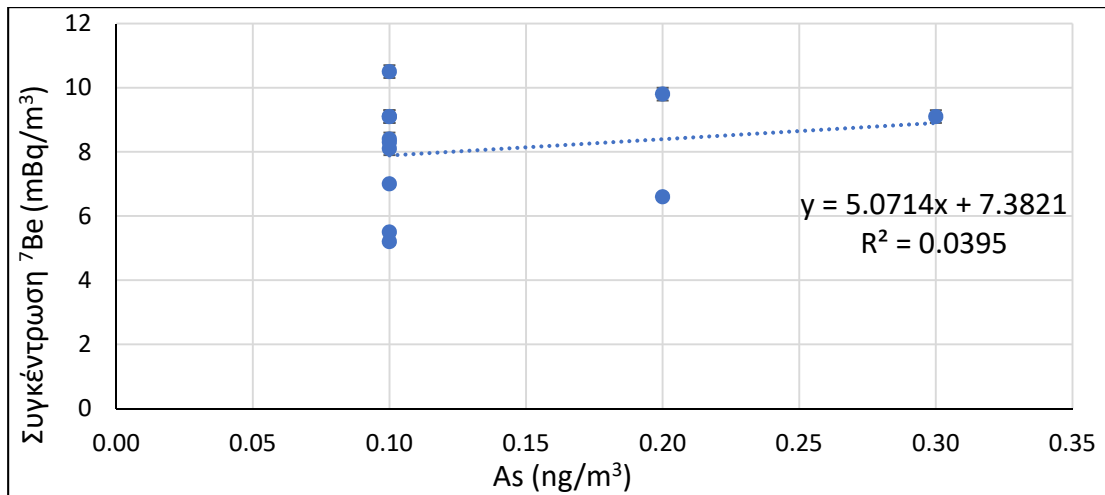
Σχήμα ΙΗ.119 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



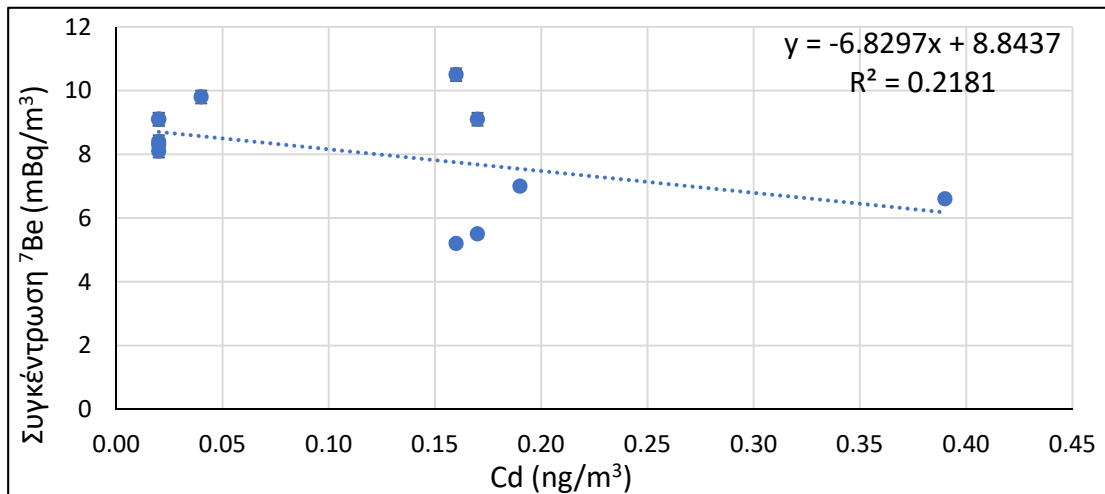
Σχήμα ΙΗ.120 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



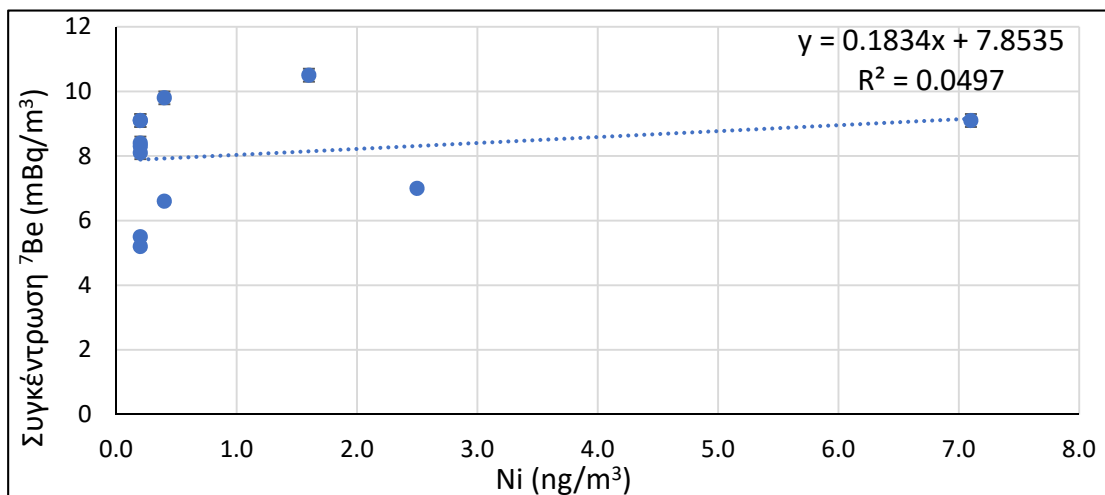
Σχήμα ΙΗ.121 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



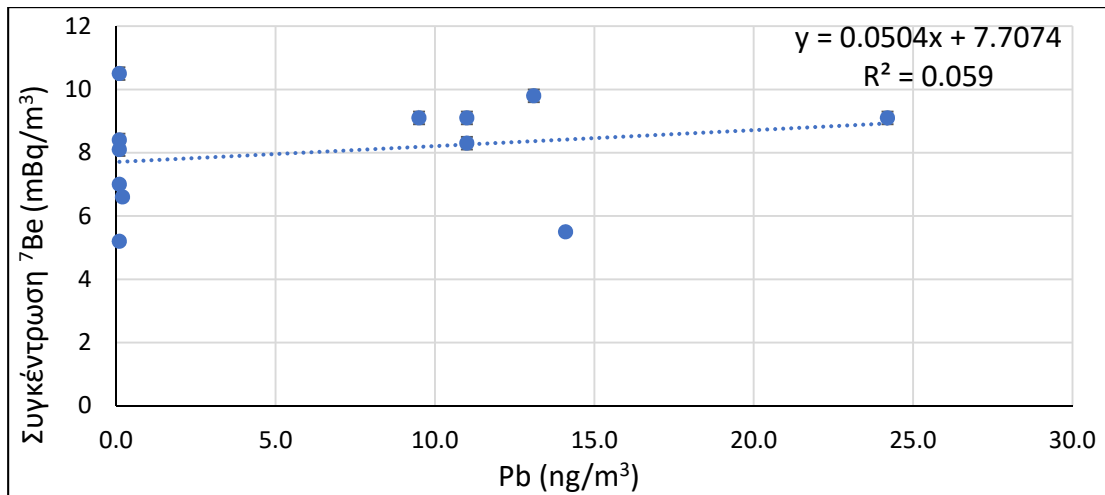
Σχήμα ΙΙΙ.122 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



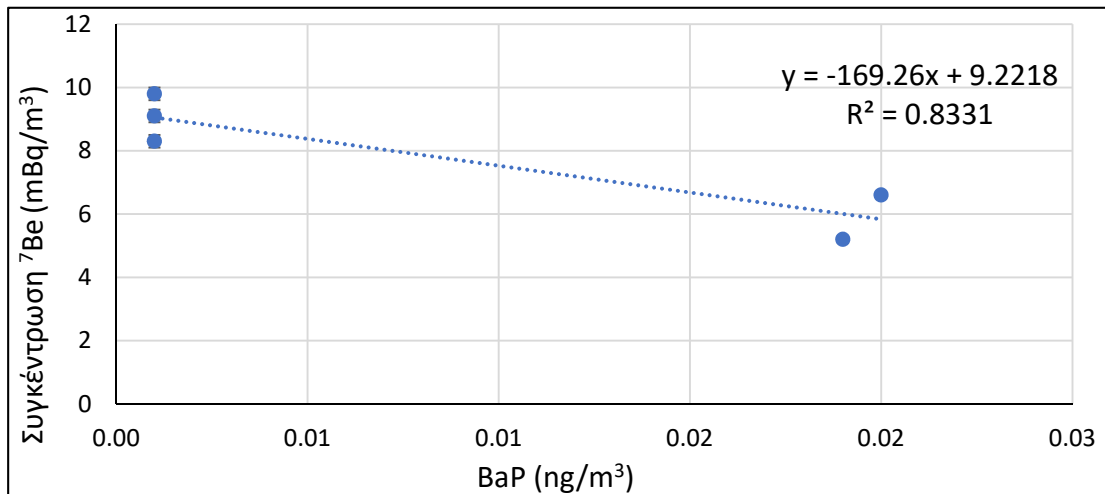
Σχήμα ΙΙΙ.123 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



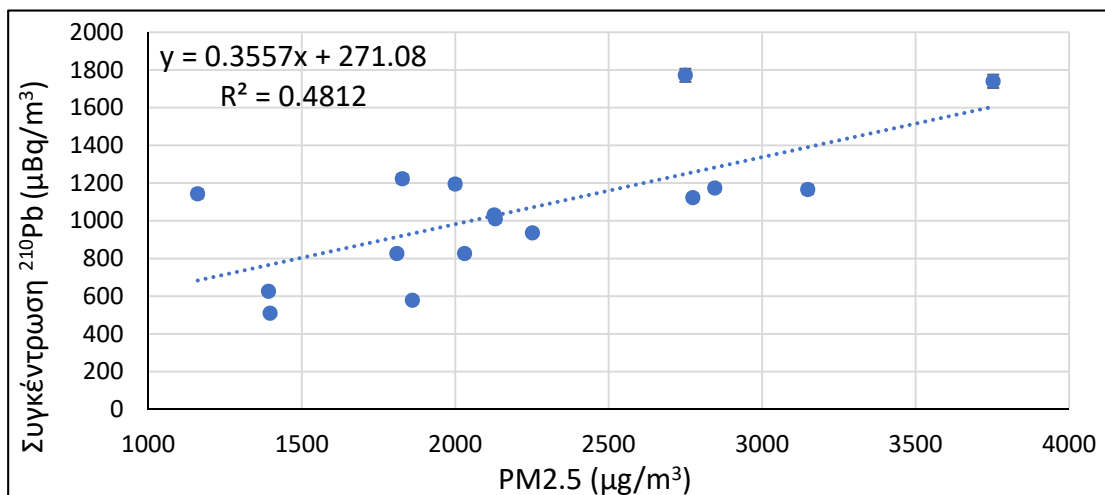
Σχήμα ΙΙΙ.124 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



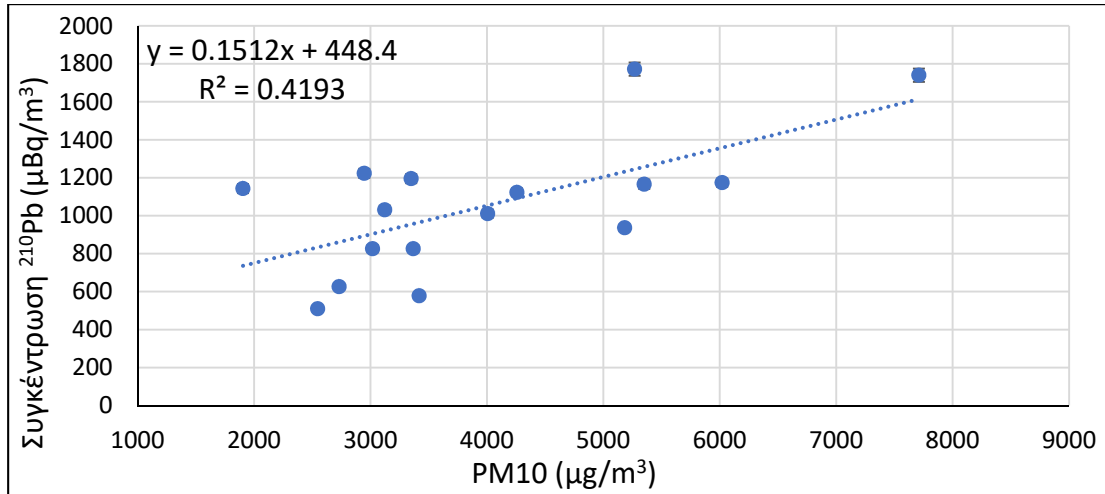
Σχήμα ΙΗ.125 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



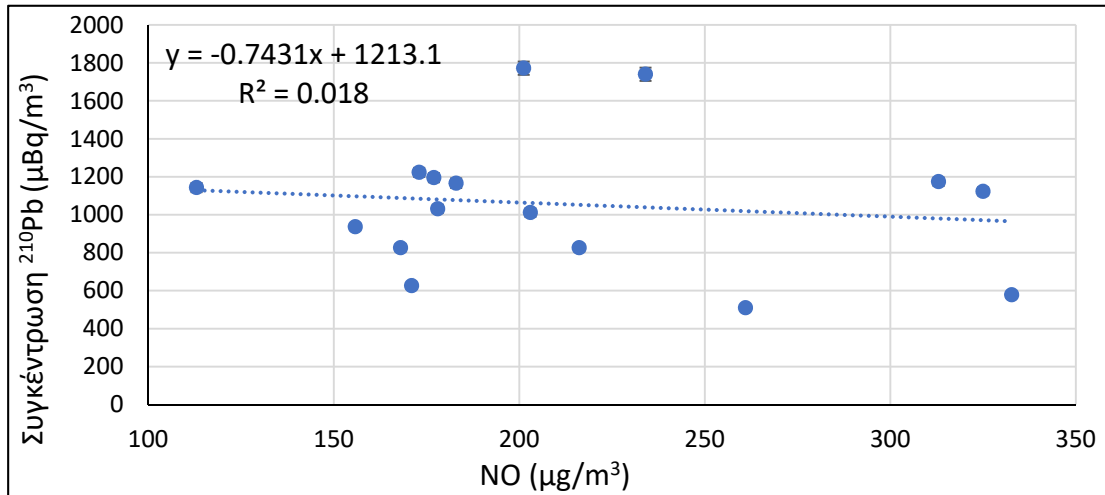
Σχήμα ΙΗ.126 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



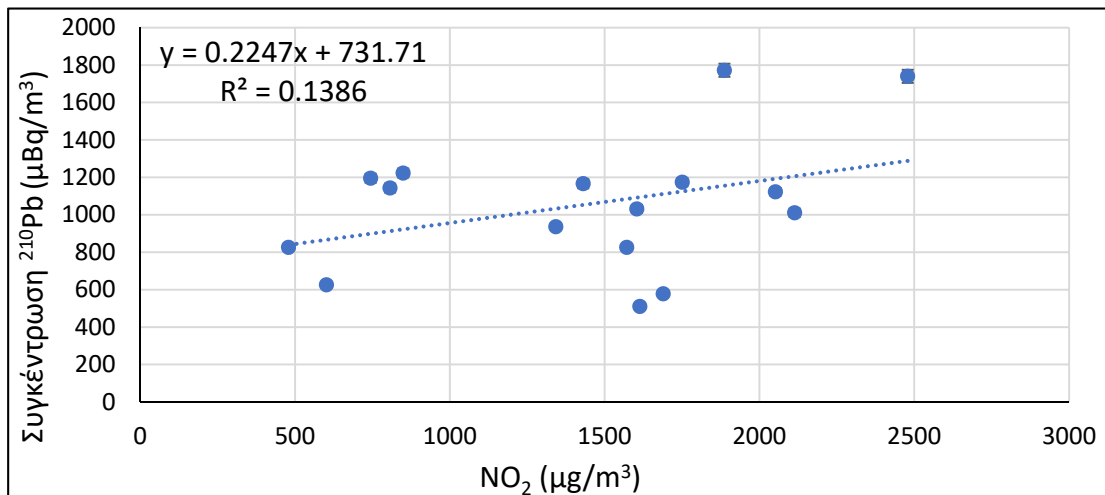
Σχήμα ΙΗ.127 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ${}^{210}\text{Pb}$ στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του PM_{2.5} στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



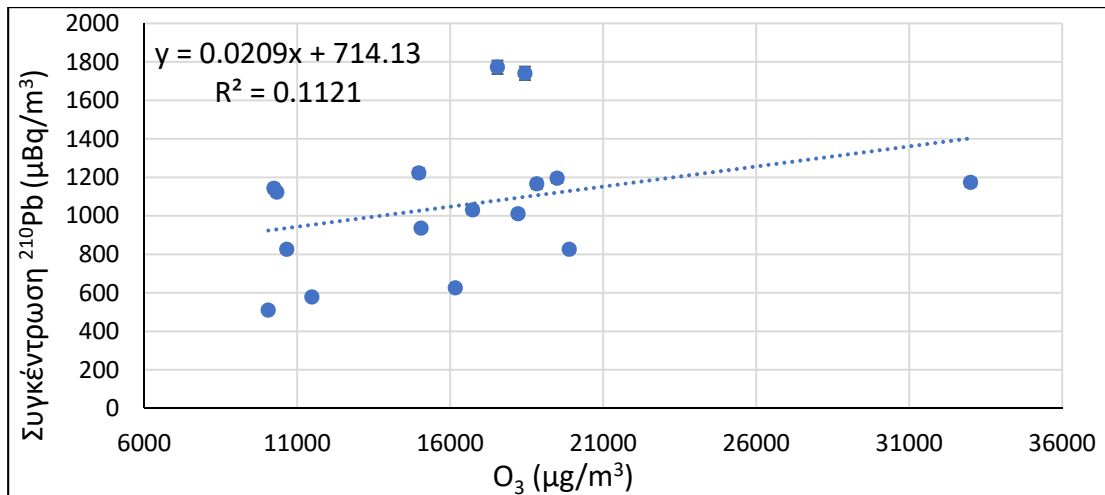
Σχήμα ΙΗ.128 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του PM10 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



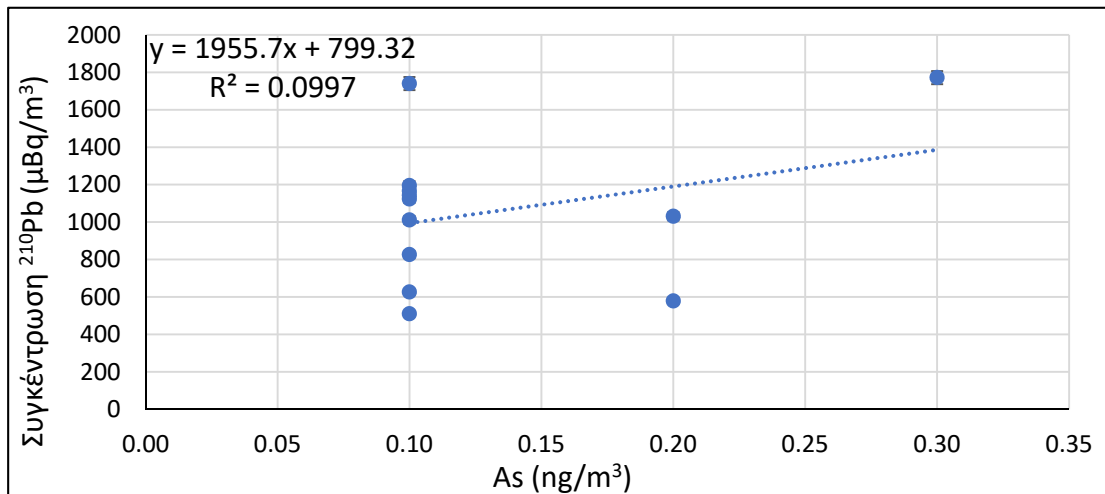
Σχήμα ΙΗ.129 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του NO στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



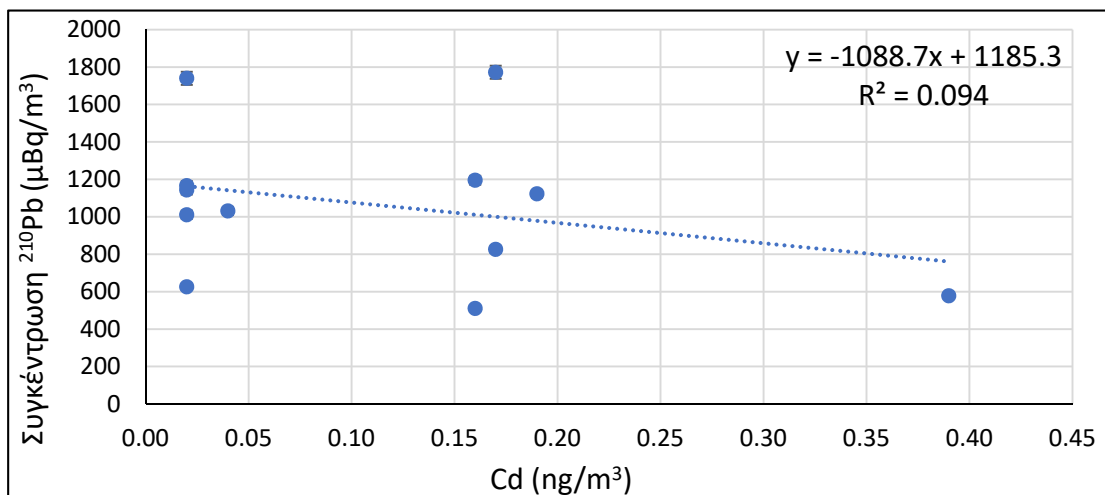
Σχήμα ΙΗ.130 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του NO_2 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



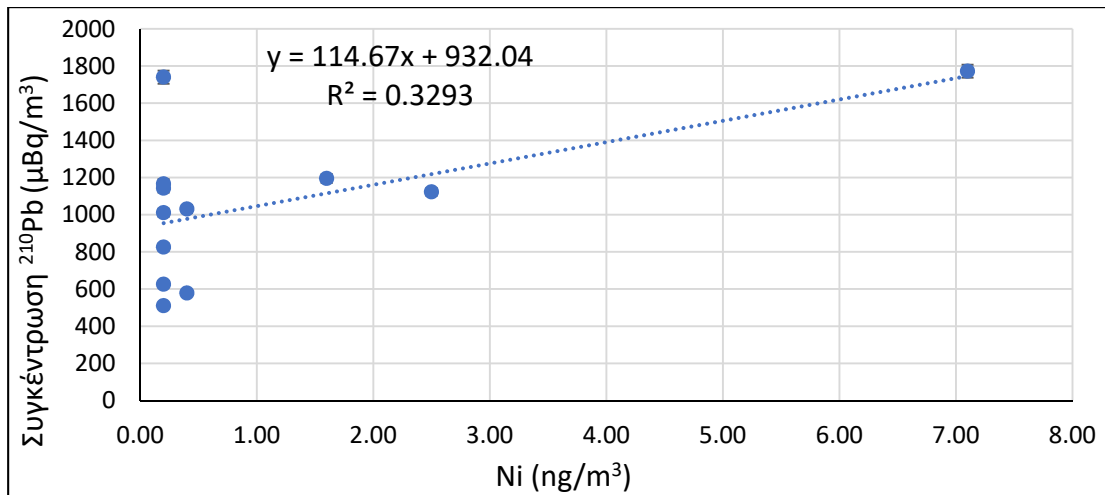
Σχήμα ΙΗ.131 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του O_3 στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



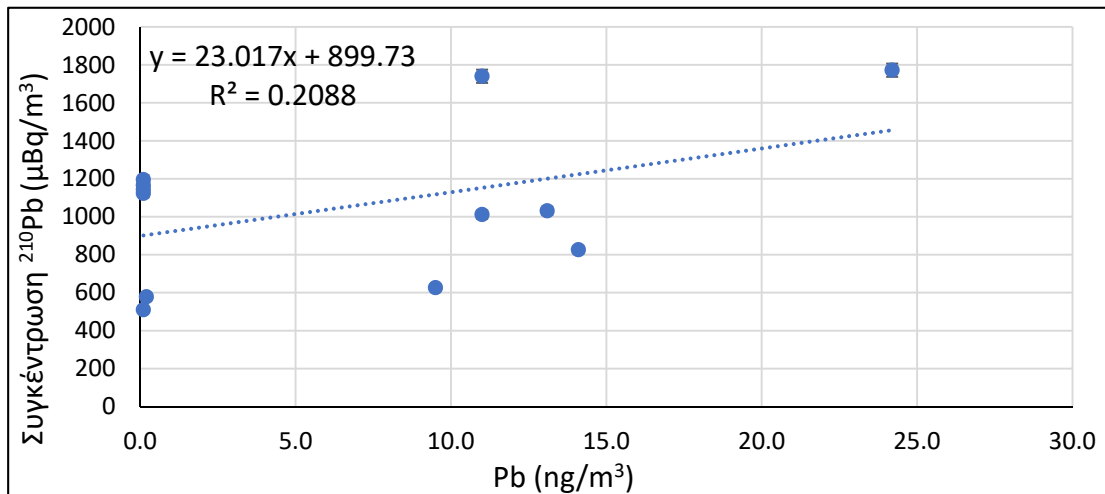
Σχήμα ΙΗ.132 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του As στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



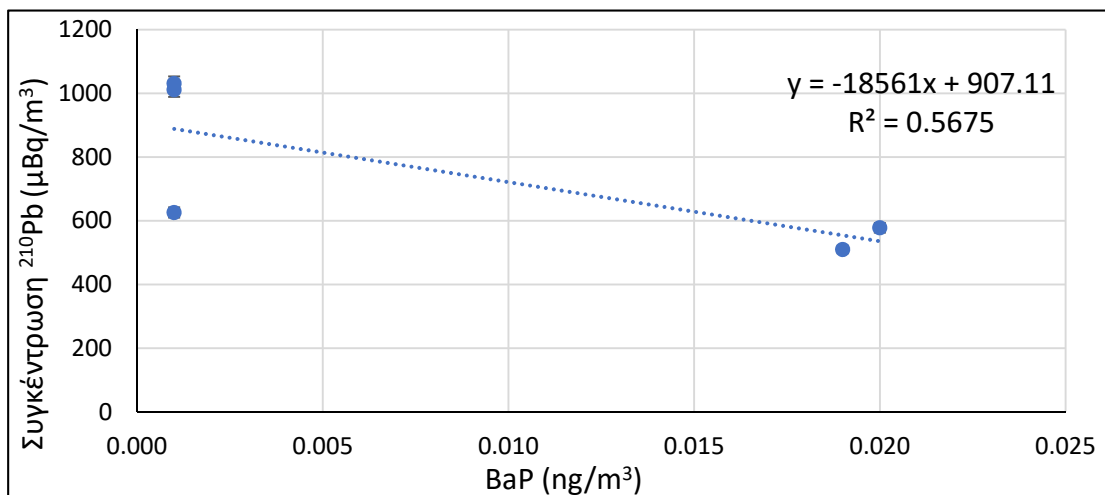
Σχήμα ΙΗ.133 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{210}Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Cd στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



Σχήμα ΙΗ.134 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Ni στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



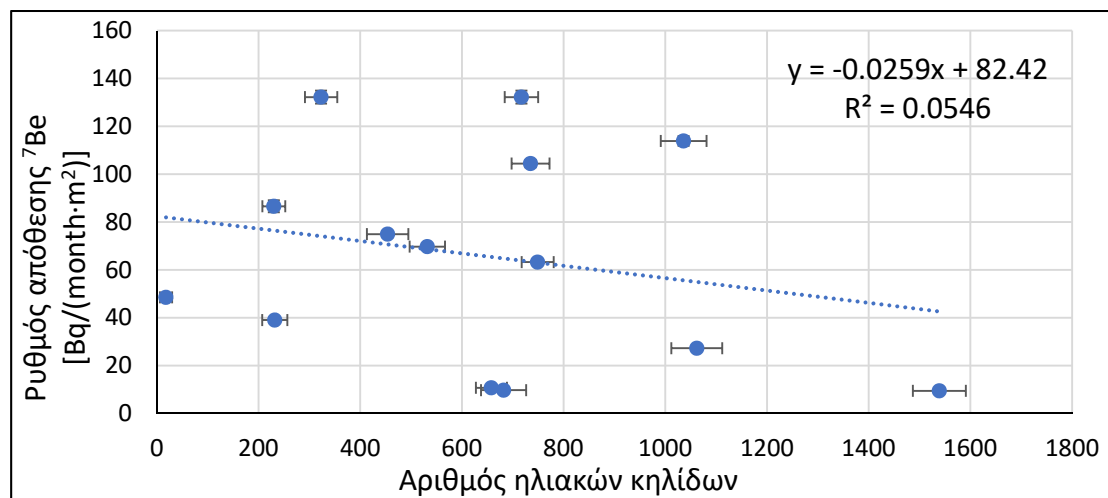
Σχήμα ΙΗ.135 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.



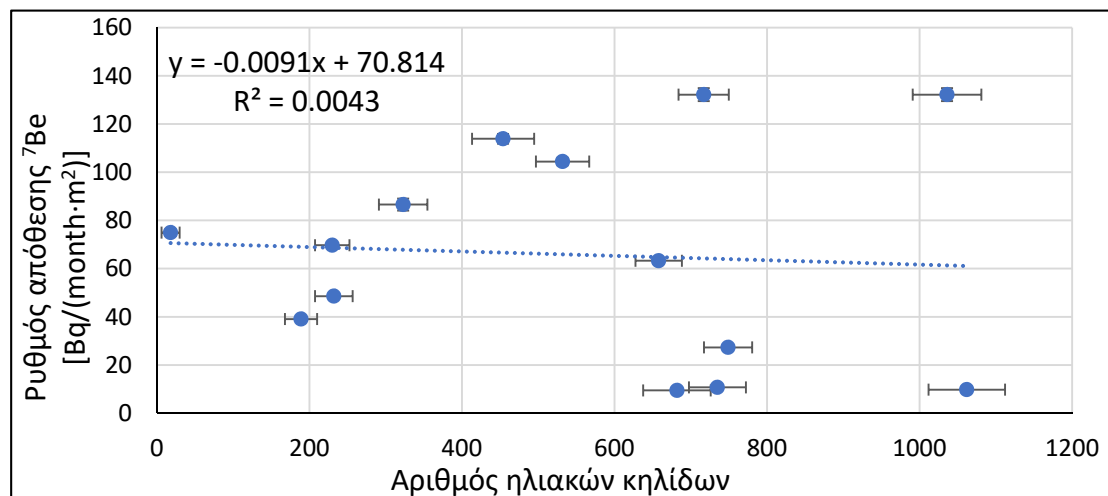
Σχήμα ΙΗ.136 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ²¹⁰Pb στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και της συγκέντρωσης του BaP στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

ΠΗ.12 Διαγράμματα συσχέτισης των μηνιαίων ρυθμών απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο πλήθος ηλιακών κηλίδων

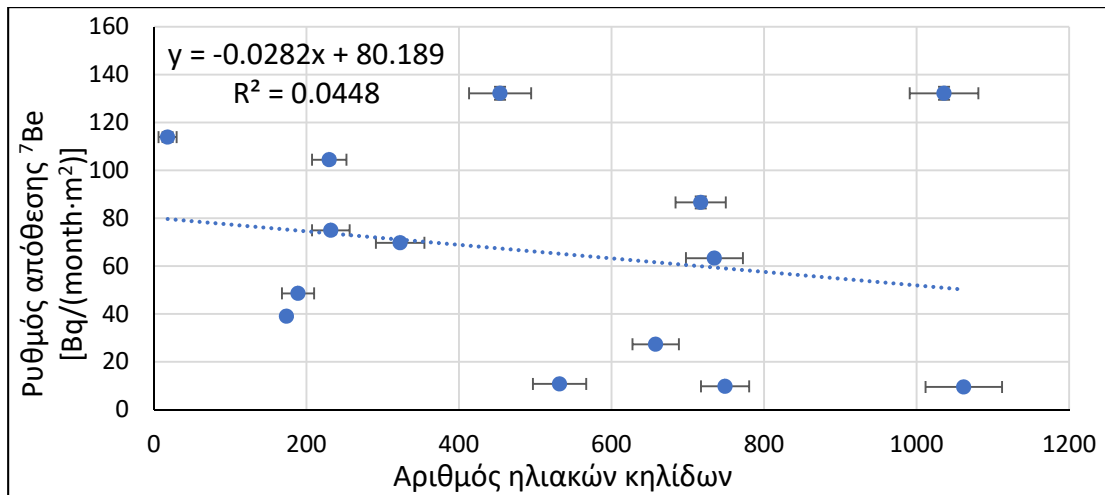
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η καθυστερημένη επίδραση του μηνιαίου πλήθους των ηλιακών κηλίδων στο μηνιαίο ρυθμό απόθεσης του ^7Be όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.



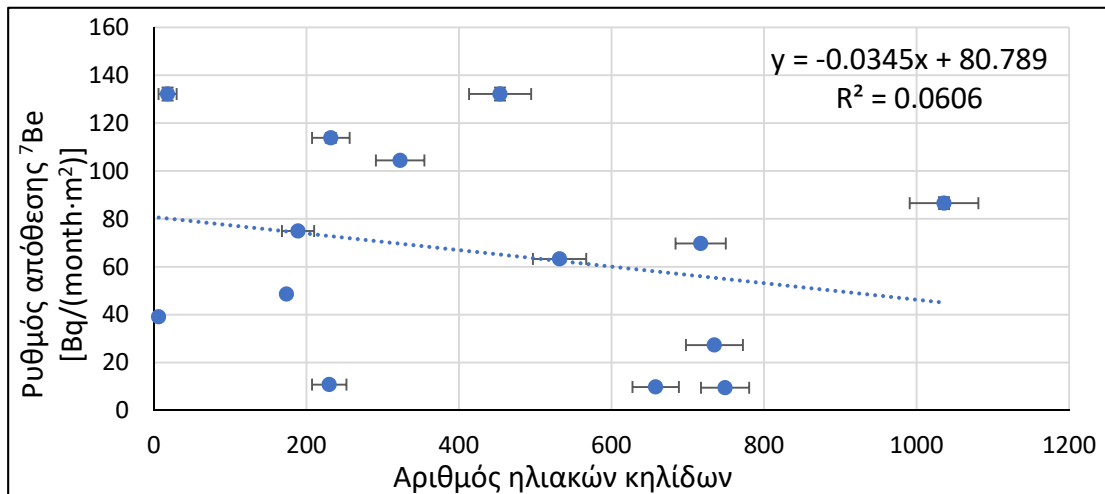
Σχήμα ΠΗ.137 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 0 μηνών.



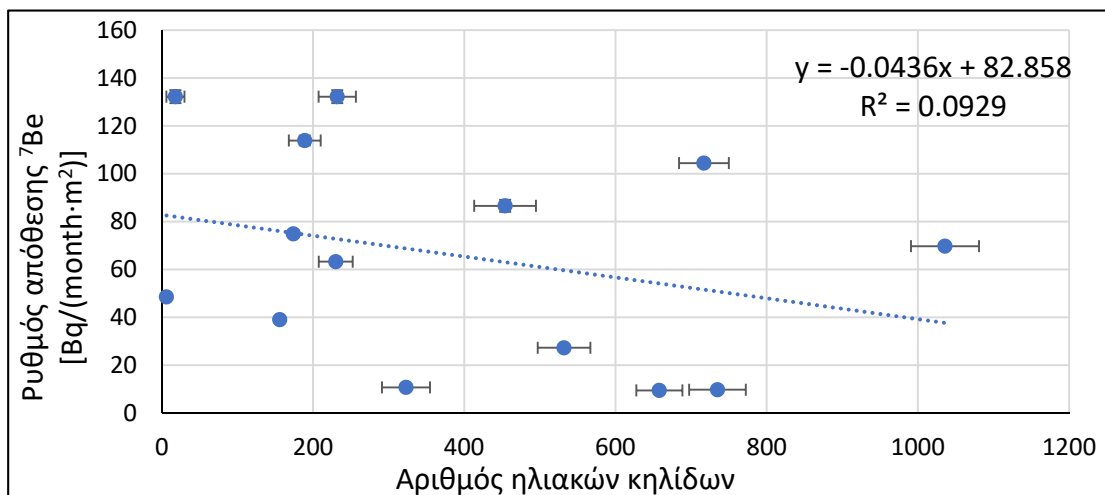
Σχήμα ΠΗ.138 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 1 μηνών.



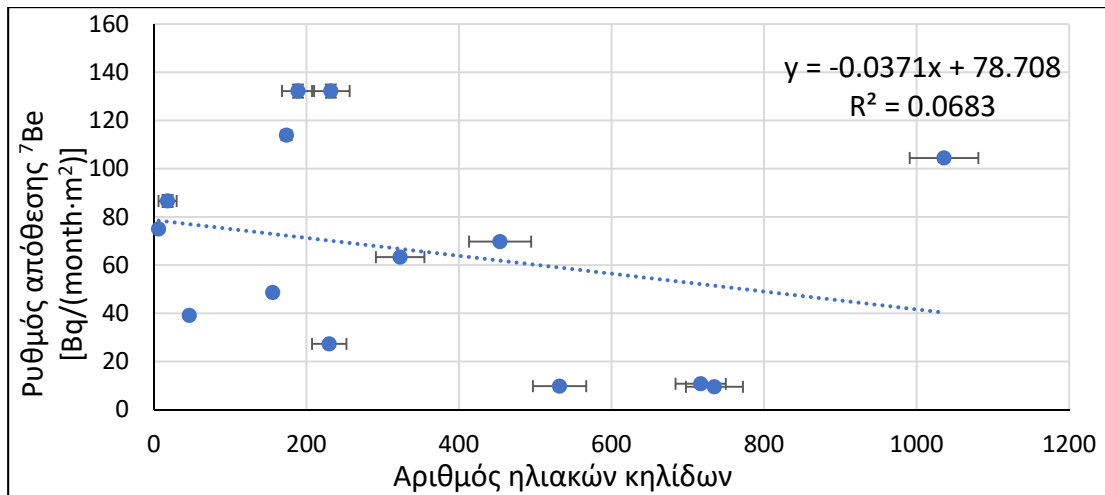
Σχήμα ΙΗ.139 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 2 μηνών.



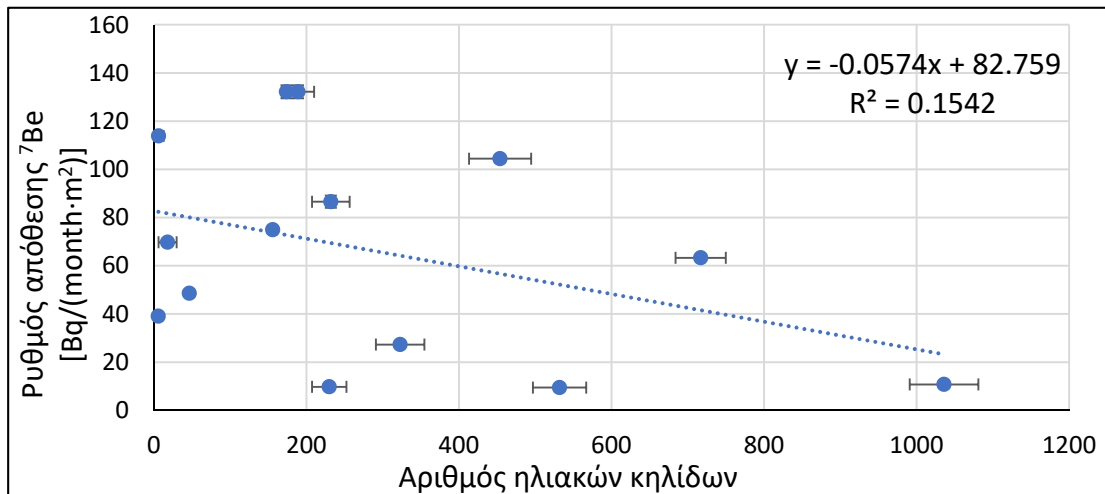
Σχήμα ΙΗ.140 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 3 μηνών.



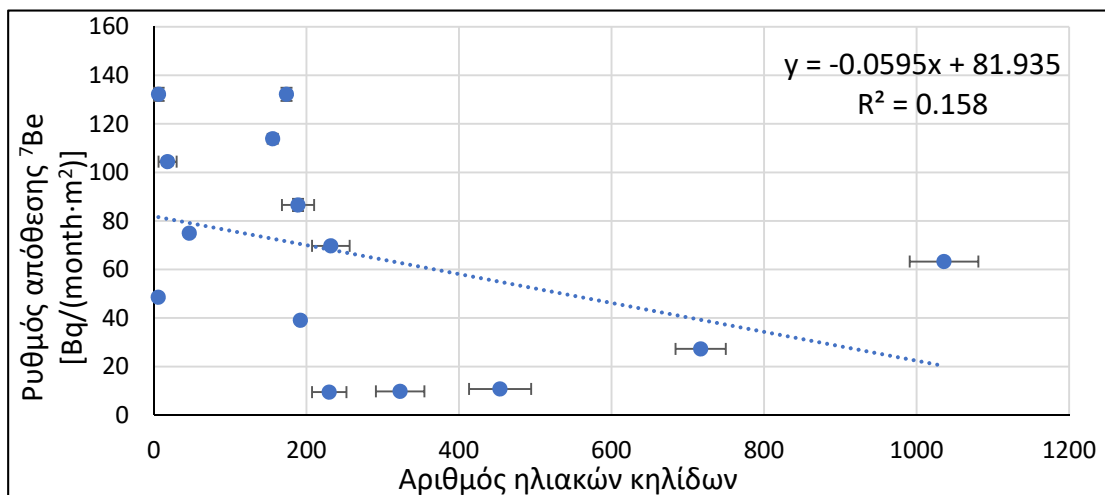
Σχήμα ΙΗ.141 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 4 μηνών.



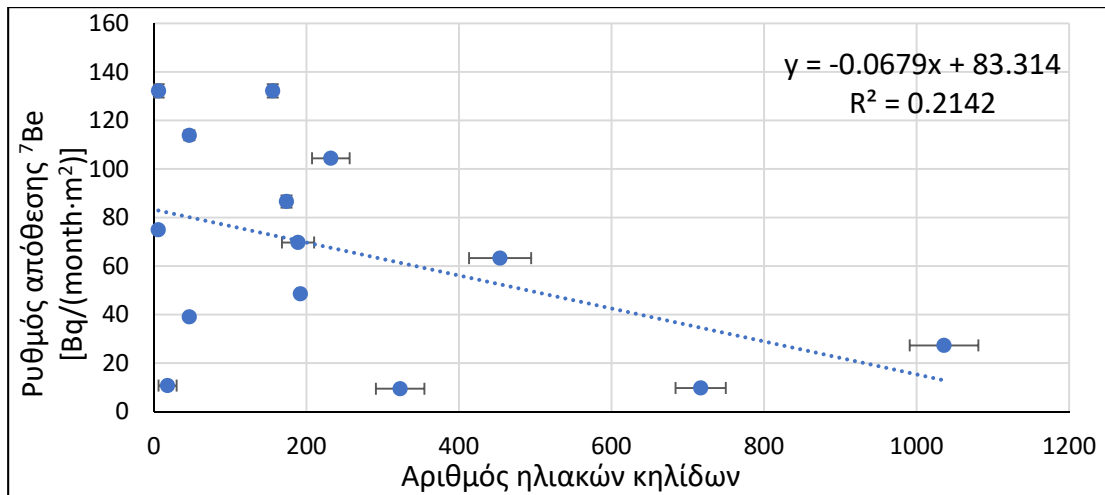
Σχήμα ΙΗ.142 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 5 μηνών.



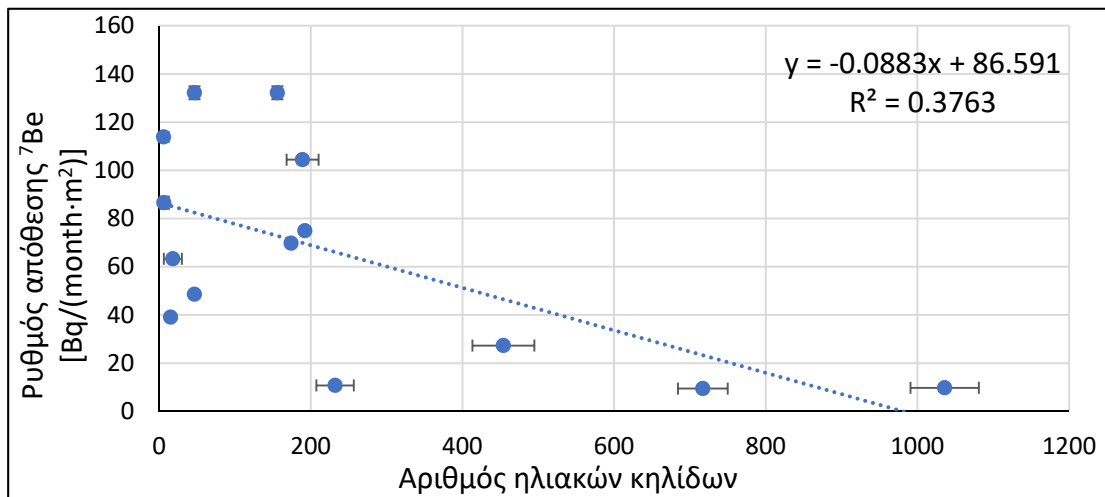
Σχήμα ΙΗ.143 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 6 μηνών.



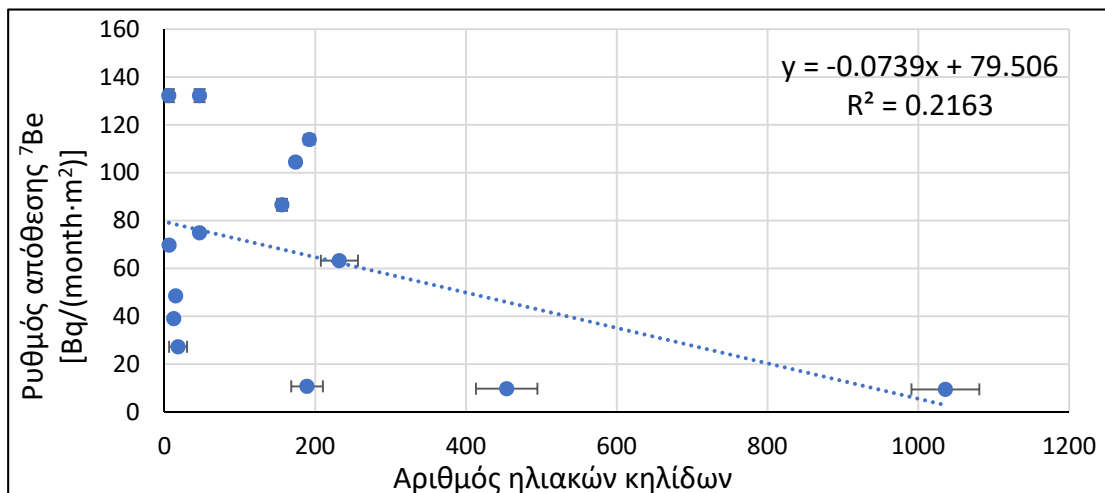
Σχήμα ΙΗ.144 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 7 μηνών.



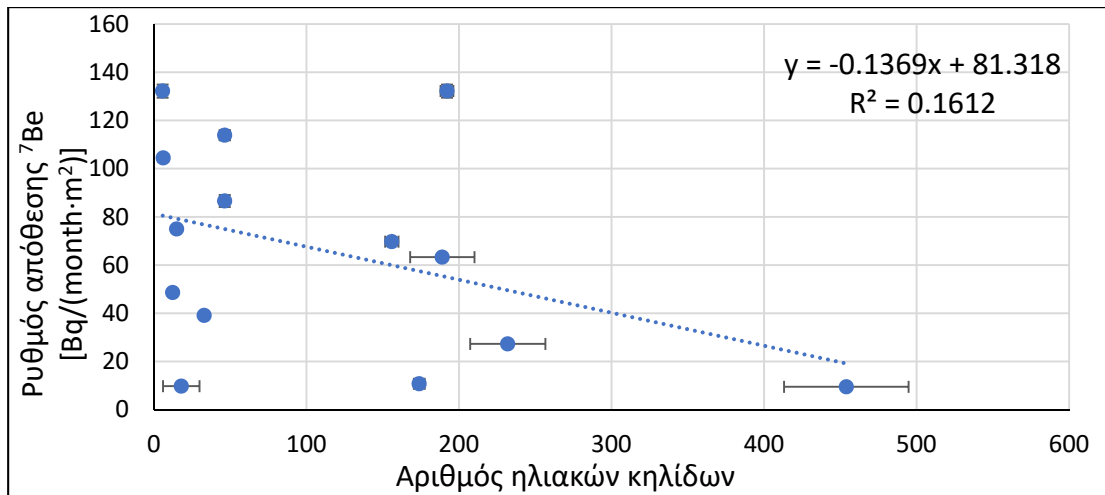
Σχήμα ΙΗ.145 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κελιών για καθυστερημένη επίδραση 8 μηνών.



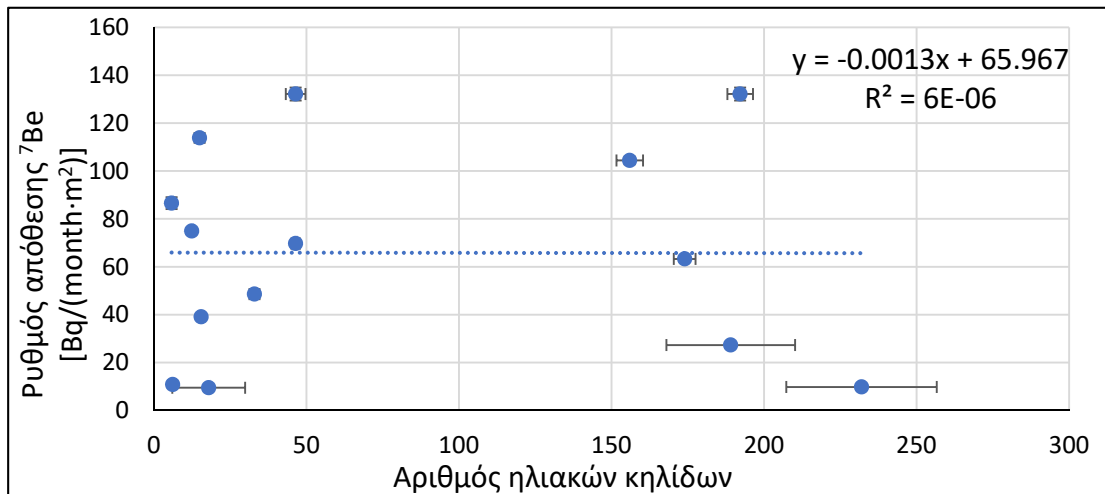
Σχήμα ΙΗ.146 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κελιών για καθυστερημένη επίδραση 9 μηνών.



Σχήμα ΙΗ.147 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ^7Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κελιών για καθυστερημένη επίδραση 10 μηνών.

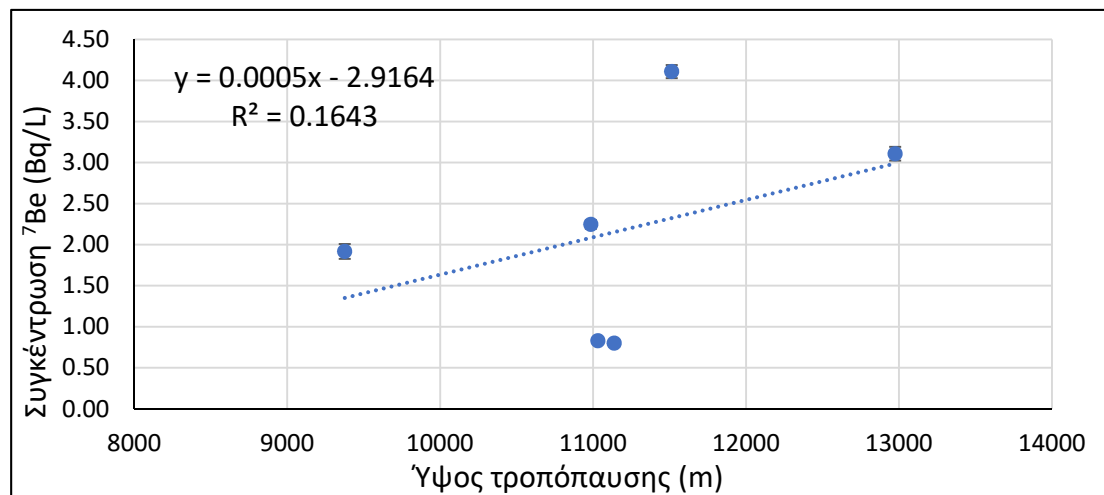


Σχήμα ΙΗ.148 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ⁷Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 11 μηνών.

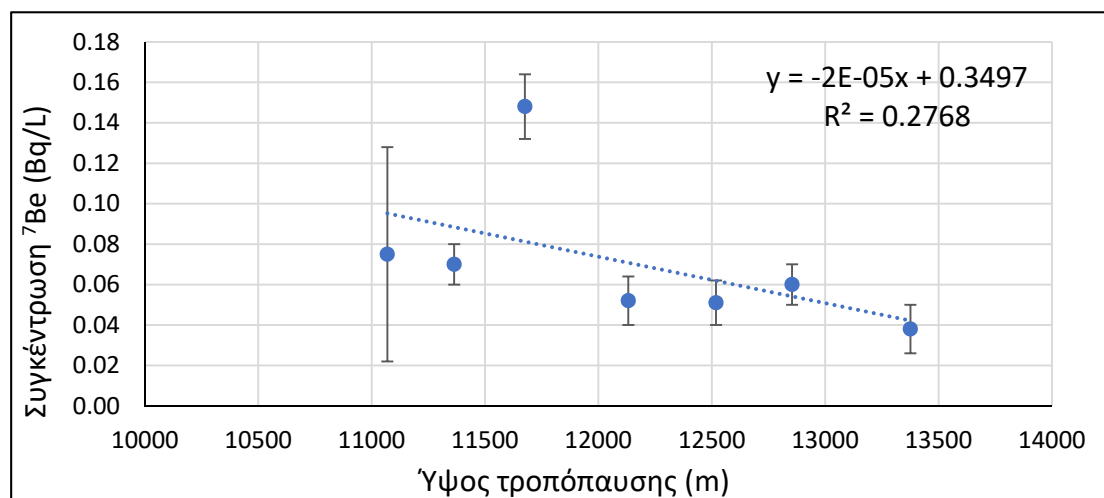


Σχήμα ΙΗ.149 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ⁷Be ως προς το μηνιαίο αριθμό ηλιακών κηλίδων για καθυστερημένη επίδραση 12 μηνών.

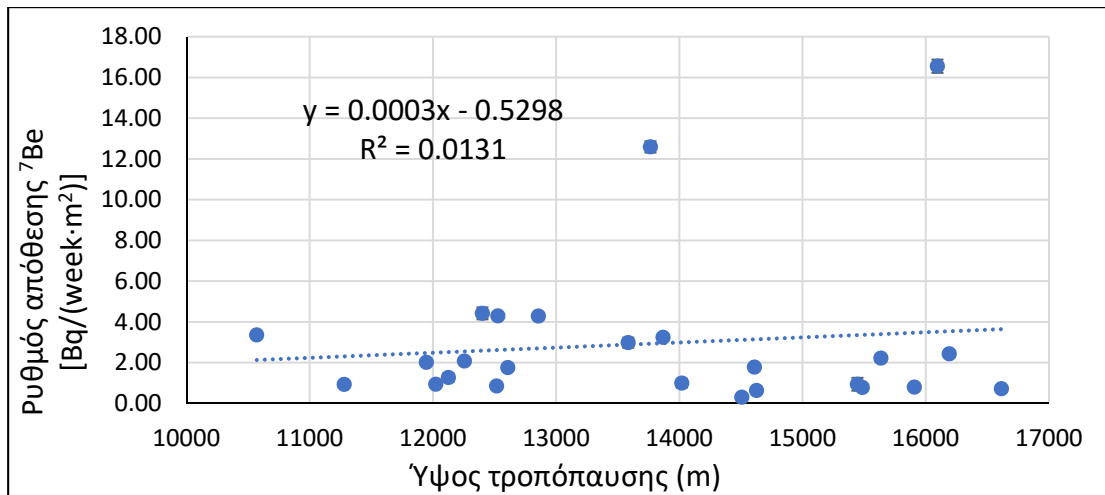
ΙΗ.13 Διαγράμματα συσχέτισης των συγκεντρώσεων ενεργότητας και των ρυθμών απόθεσης του ^7Be ως προς το ύψος της τροπόπαυσης



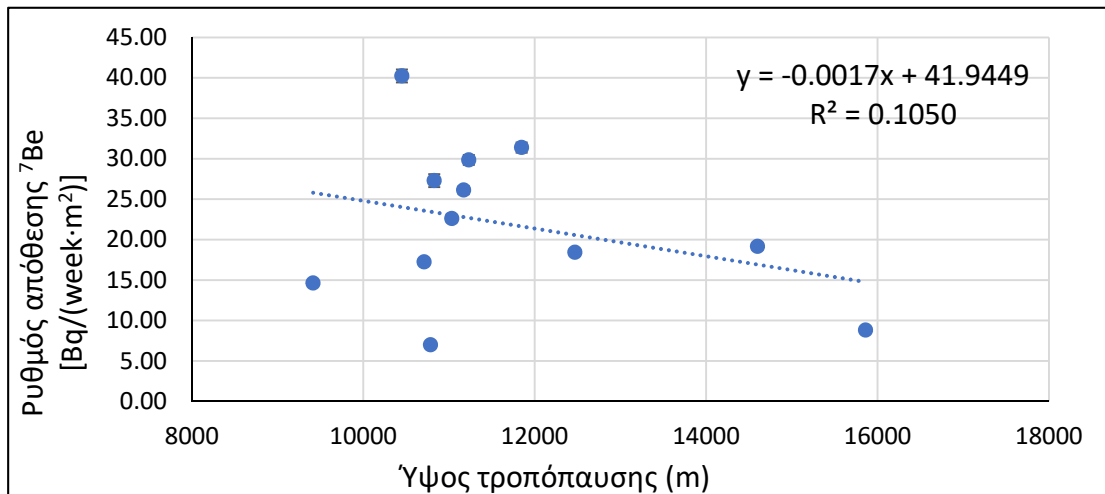
Σχήμα ΙΗ.150 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στα δείγματα βροχής ως προς το ύψος της τροπόπαυσης.



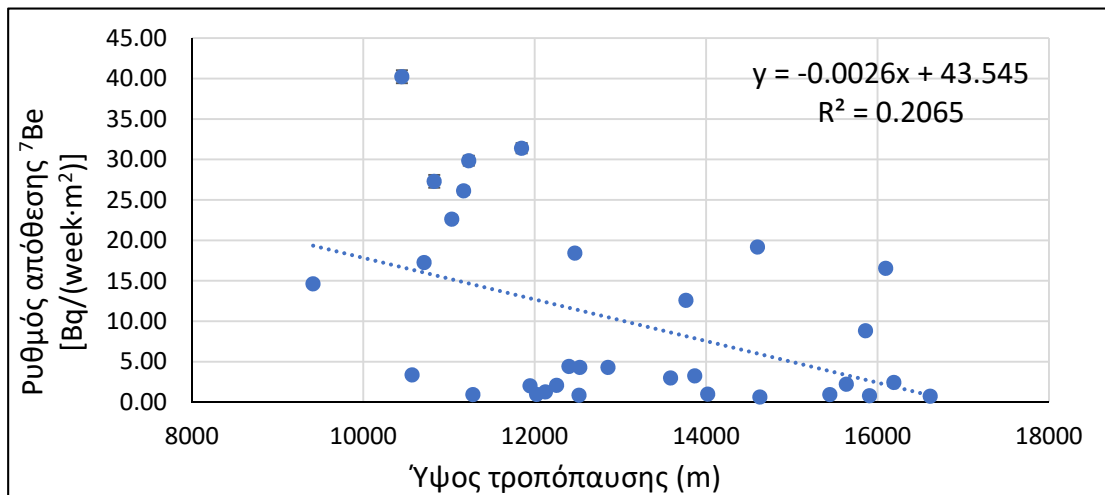
Σχήμα ΙΗ.151 : Συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^7Be στα δείγματα υγρασίας ως προς το ύψος της τροπόπαυσης.



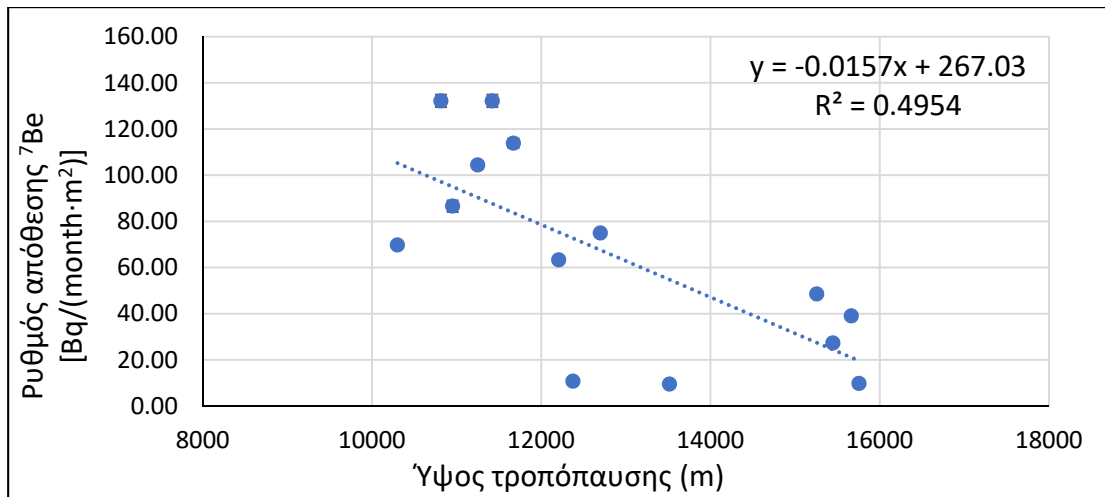
Σχήμα ΙΗ.152 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ξηρών αποθέσεων ως προς το ύψος της τροπόπαυσης.



Σχήμα ΙΗ.153 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα ολικών αποθέσεων ως προς το ύψος της τροπόπαυσης.

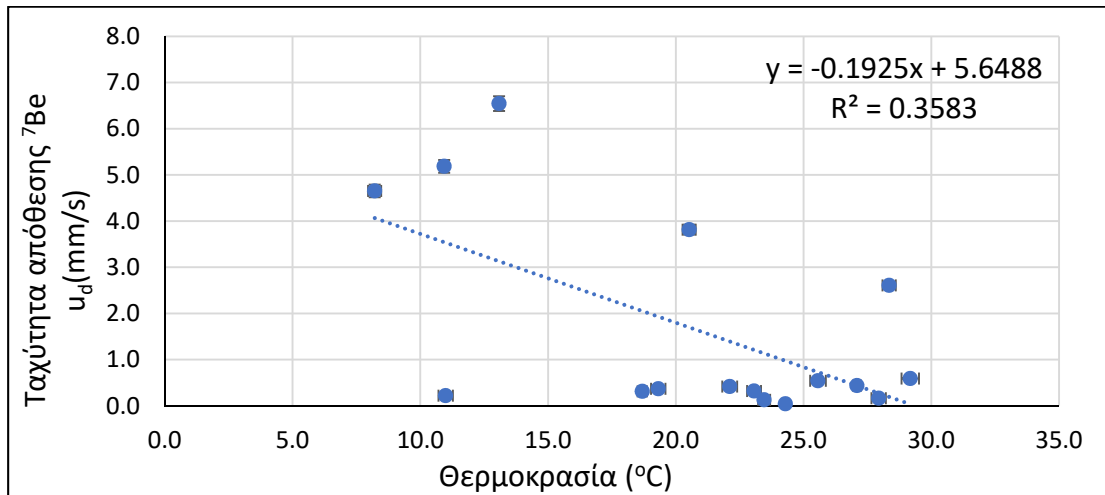


Σχήμα ΙΗ.154 : Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού απόθεσης του ^7Be στα δείγματα συνεχόμενων ατμοσφαιρικών αποθέσεων ως προς το ύψος της τροπόπαυσης.

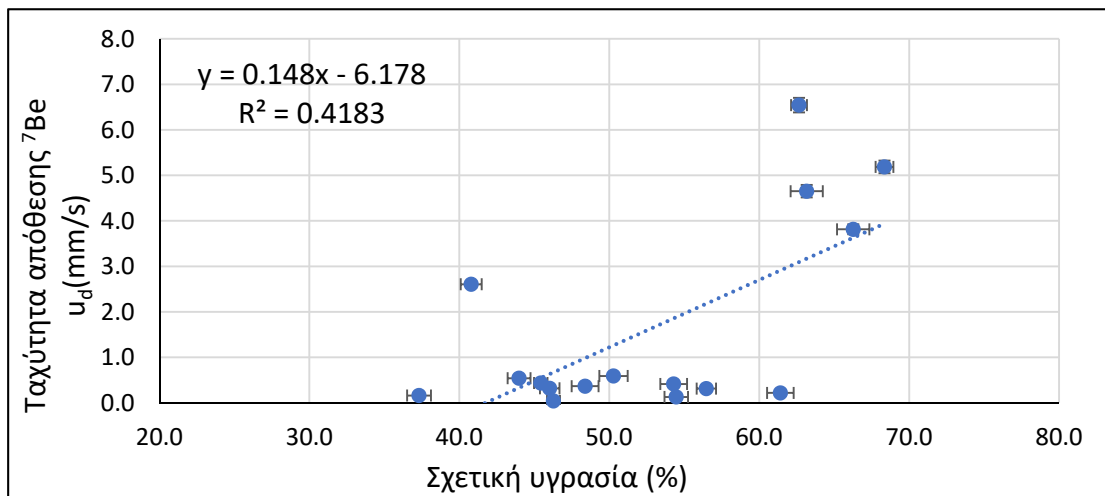


Σχήμα ΙΗ.155 : Συσχέτιση μεταξύ του μηνιαίου ρυθμού απόθεσης του ⁷Be ως προς το ύψος της τροπόπαισης.

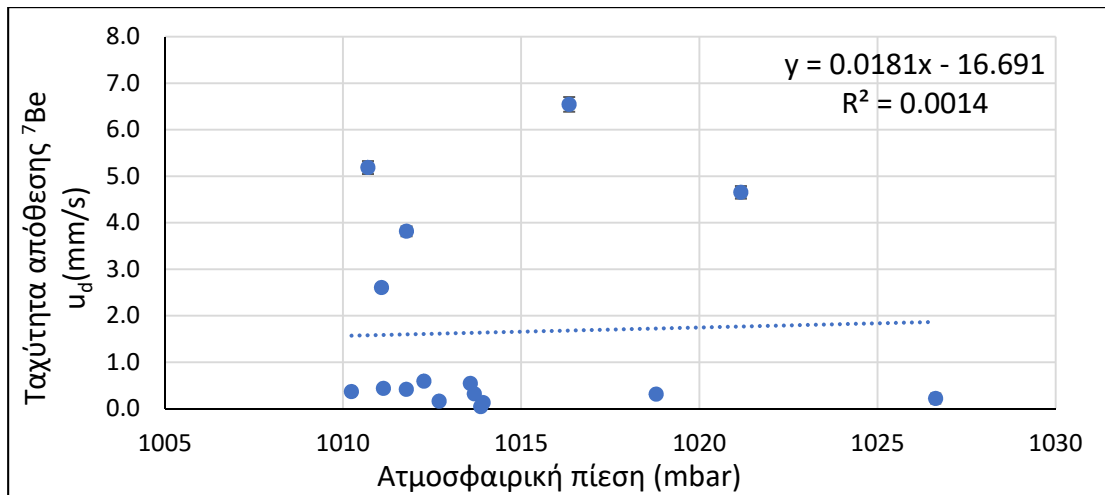
ΙΗ.14 Διαγράμματα συσχέτισης των μέσων ταχυτήτων απόθεσης του ^7Be και του ^{210}Pb ως προς τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους



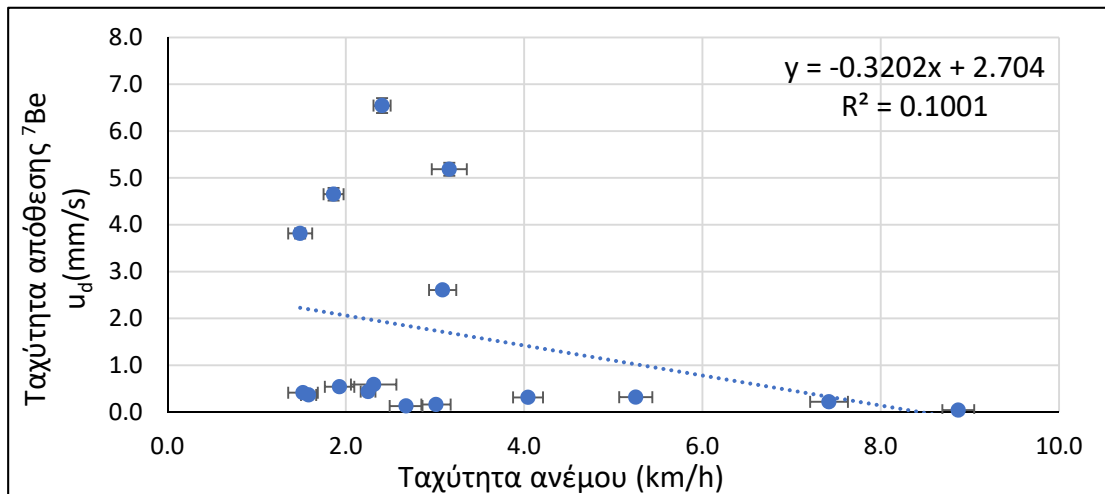
Σχήμα ΙΗ.156 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^7Be και της θερμοκρασίας.



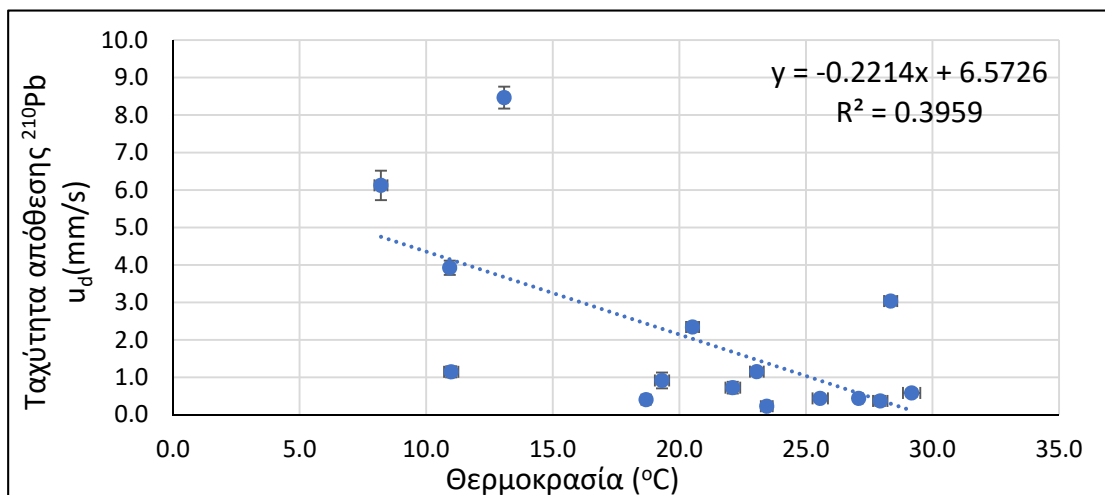
Σχήμα ΙΗ.157 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^7Be και της σχετικής υγρασίας.



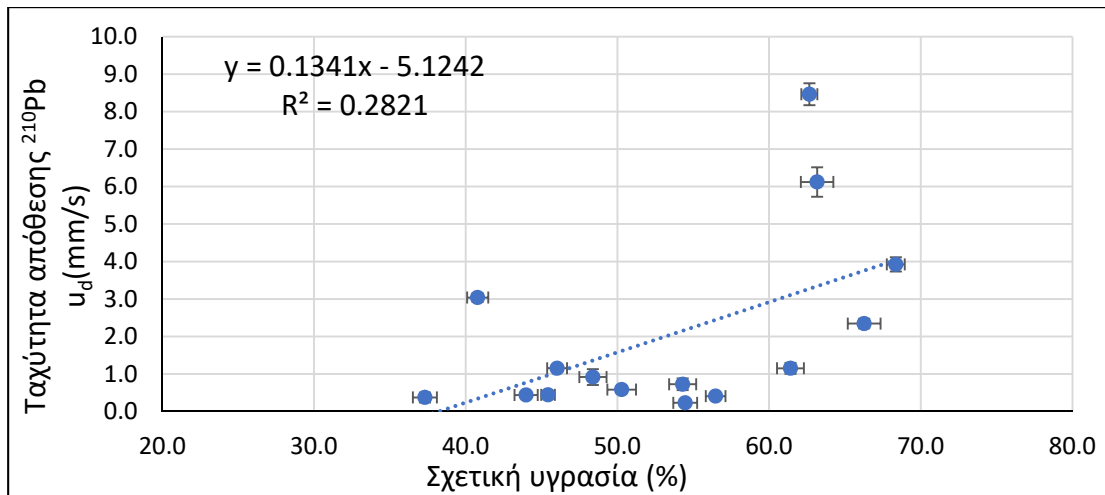
Σχήμα ΙΗ.158 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



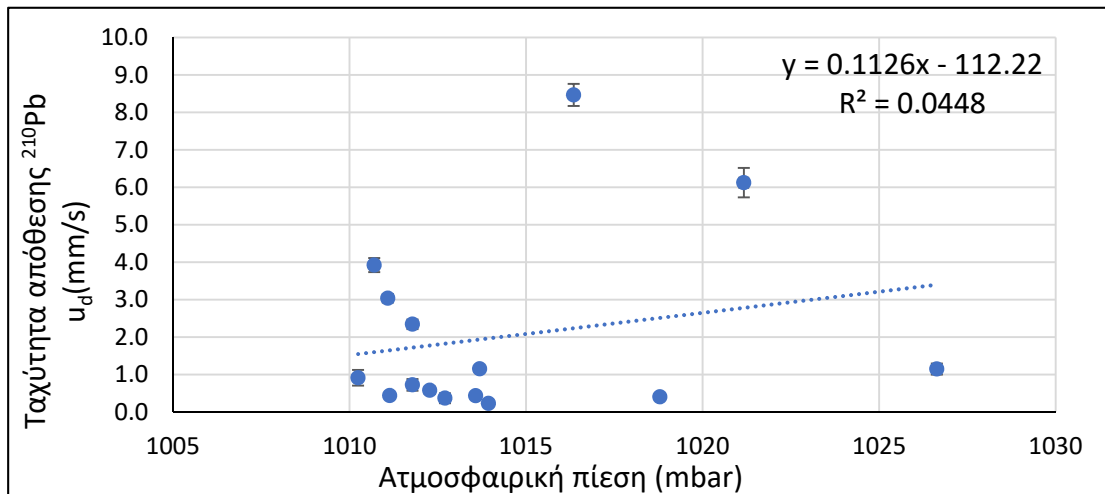
Σχήμα ΙΗ.159 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ${}^7\text{Be}$ και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.



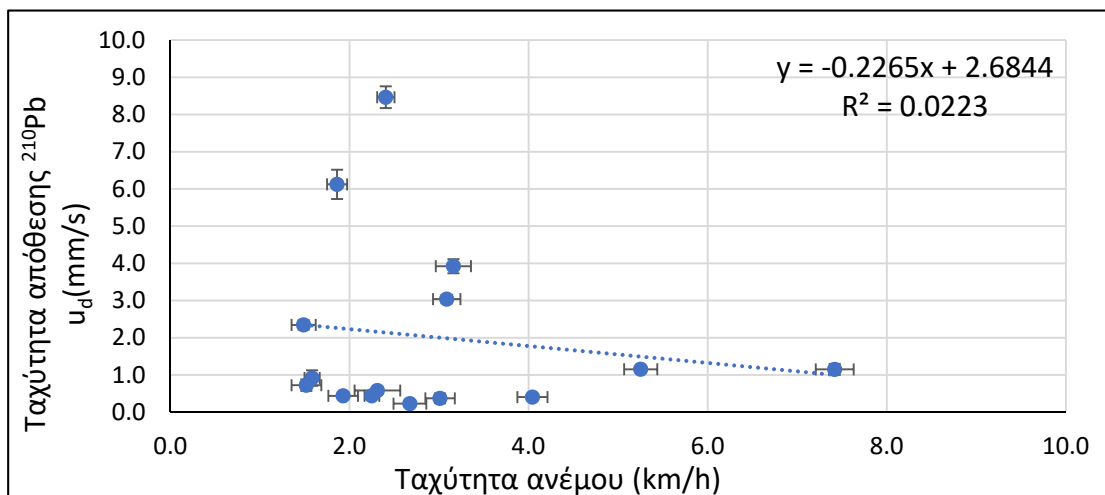
Σχήμα ΙΗ.160 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ${}^{210}\text{Pb}$ και της θερμοκρασίας.



Σχήμα ΙΗ.161: Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^{210}Pb και της σχετικής υγρασίας.



Σχήμα ΙΗ.162 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^{210}Pb και της ατμοσφαιρικής πίεσης.



Σχήμα ΙΗ.163 : Συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας απόθεσης του ^{210}Pb και της μέσης ταχύτητας του ανέμου.