

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΑ
ΚΛΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΧΩΜΑΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του

ΙΑΣΟΝΑ Κ. ΜΗΤΣΙΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής

Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Δ.Ι. Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2016

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, στα πλαίσια του μαθήματος «Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα».

Εκφράζω τις ευχαριστίες μου στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου την ευκαιρία να ερευνήσω ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, που αποτέλεσε την παρούσα Δ.Ε. Η μεταδοτικότητα του στα μαθήματα επιλογής του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας μου μεταλαμπάδευσαν την αγάπη και τον ενθουσιασμό του για το συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο.

Ευχαριστώ, επίσης, το διδάκτορα κ. Δημήτριο Καράγγελο, για τη βοήθειά του στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Η άψογη συνεργασία, η πολύτιμη εμπειρία του, η καθοδήγηση και υπομονή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της Δ.Ε. ήταν καταλυτικές.

Τέλος, ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας για την προθυμότητα και το κλίμα συνεργασίας.

Ιάσων Κ. Μήτσιος

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Περίληψη

Η κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων στο χώμα επηρεάζεται από πολλούς και πολύπλοκους παράγοντες, όπως η χημεία του εδάφους και η προέλευση των ραδιενεργών ισοτόπων. Επιπροσθέτως, μπορεί να τροποποιηθεί από διάφορους μηχανισμούς εξαρτώμενους από παραμέτρους όπως είναι ο παράγοντας του νερού, η κλίση του εδάφους, η ένταση του ανέμου καθώς και η βλάστηση.

Σε προηγούμενη έρευνα παρατηρήθηκε ότι μεταβολές στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των ραδιενεργών ισοτόπων υπάρχουν όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών σημείων και βαθών δειγματοληψίας, αλλά και μεταξύ διαφορετικών κοκκομετρικών κλασμάτων μέσα στο ίδιο το δείγμα. Συγκεκριμένα, πολλά ραδιενεργά ισότοπα ανιχνεύθηκαν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στα λεπτόκοκκα σωματίδια του χώματος σε σχέση με τα χονδρόκοκκα.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται περαιτέρω έρευνα με σκοπό την εξέταση και απόκτηση επιπρόσθετων αποτελεσμάτων για τη συγκεκριμένη αυτή τάση, συμπεριλαμβάνοντας στη μελέτη και φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα. Για το σκοπό αυτό, νέα δείγματα χώματος συλλέχθηκαν από μία περιοχή στην Πολυτεχνειούπολη του Ε.Μ.Π. όπου είχε προηγουμένως ανιχνευθεί ρύπανση από ^{241}Am , οφειλόμενη στην αστοχία ενός αλεξικέραυνού που το περιείχε. Τα δείγματα χωρίστηκαν σε κοκκομετρικά κλάσματα με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης, χρησιμοποιώντας μια διάταξη κοσκίνισης με κόσκινα στο εύρος των $45\mu\text{m} - 2\text{mm}$. Τα κλάσματα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας χρησιμοποιώντας έναν Χαμηλών Ενεργειών Ανιχνευτή Γερμανίου (LEGe) με παράθυρο από Be, με σκοπό τον προσδιορισμό των ^{210}Pb , ^{241}Am , ^{234}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^7Be , ^{137}Cs και ^{40}K . Για όλα τα ραδιενεργά ισότοπα βρέθηκε ότι οι συγκεντρώσεις της ραδιενέργειας διέφεραν μεταξύ των διάφορων κοκκομετρικών κλασμάτων, όπως ήταν αναμενόμενο. Το Αμερίκιο-241, το οποίο δεν είχε προηγουμένως αναλυθεί με αυτό τον τρόπο, βρέθηκε ότι συγκεντρώνεται στα λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος, όμοια με το ^{210}Pb και το ^{137}Cs .

Μια μικρή αύξηση στη συγκέντρωση της ραδιενέργειας βρέθηκε στο κλάσμα των 1-2mm. Για τη μελέτη της παρατήρησης αυτής, το συλλεχθέν κλάσμα των 1-2mm για

ένα από τα δύο δείγματα χώματος αναλύθηκε περαιτέρω με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Τα καινούρια κλάσματα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ -φασματοσκοπίας, χρησιμοποιώντας μια ειδικά αναπτυγμένη γεωμετρία μικρού όγκου, και ομοίως βρέθηκαν με μεταβαλλόμενες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι υλικό που συλλέχθηκε από την αρχική ξηρή κοσκίνιση αποτελείται πιθανότατα από συσσωματώματα μικρότερων σωματιδίων παρά από αυτούσια σωματίδια 1-2mm. Τα αποτελέσματα αυτά απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση και πρέπει να λαμβάνοντα υπόψη στο σχεδιασμό και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων από εκστρατείες δειγματοληψίας χώματος για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενεργών ισοτόπων.

Επιπροσθέτως, το υγρό δείγμα, που συλλέχθηκε κατά τη διαδικασία της υγρής κοσκίνισης, περάστηκε από φίλτρα και εξατμίστηκε, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών σωματιδίων που μεταφέρουν μαζί τους ραδιενεργά ισότοπα και μπορούν να περάσουν μέσα από τα φίλτρα. Μετά την εξάτμιση του υγρού δείγματος, το ίζημα που συλλέχθηκε ξηράνθηκε, συσκευάστηκε σε ειδική γεωμετρία μικρού όγκου, και αναλύθηκε με τη μέθοδο της γ -φασματοσκοπίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής έδειξαν ότι το ^{40}K , και με ισχυρές ενδείξεις για το ^{241}Am , πέρασαν μέσα από τα διηθητικά φίλτρα, γεγονός που σημαίνει ότι το υγρό στοιχείο επιδρά σημαντικά στην κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων στα σωματίδια του χώματος, όχι μόνο διαλύοντας τα συσσωματώματα και παρασέρνοντας τα μικρά σε μέγεθος σωματίδια, αλλά ανακατανέμοντας και ραδιενεργά σωματίδια παρασέρνοντάς τα από σωματίδια στα οποία έχουν αρχικά εναποτεθεί.

Abstract

The distribution of radionuclides in soil is determined by many complex factors, such as soil chemistry and radionuclide origin. Furthermore, it can be modified by several mechanisms depending on parameters such as the agent of water, ground inclination, wind intensity and even vegetation.

In previous research it has been observed that variations in the activity concentration of radionuclides exist not only between different sampling points and sampling depths, but also between different particle size fractions within the same sample. In particular, many radionuclides were detected in higher concentrations in the smaller particle size fractions of soil rather than the larger ones.

In the present work, further study is performed to examine and gain additional results on this particular tendency, including in our research both natural and anthropogenic radionuclides. To this end, new soil samples were collected from an area in the NTUA Campus where ^{241}Am contamination, due to a failed lighting ^{241}Am -tipped rod, had been previously detected. The samples were separated into particle size fractions by dry sieving, using a sieving machine equipped with sieves in the range of $45\mu\text{m} - 2\text{mm}$. The fractions collected were analyzed by gamma-ray spectrometry using a Low Energy Germanium detector equipped with a Be window, to determine ^{210}Pb , ^{241}Am , ^{234}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^7Be , ^{137}Cs and ^{40}K . For all radionuclides, activity concentrations were found to differ among the various size fractions, as expected. Americium-241, which has not been previously analyzed in this manner, was found to be concentrated in the smaller size fractions, similar to ^{210}Pb and ^{137}Cs .

A small increase in the activity concentration of almost all nuclides was found in the 1- 2 mm size fraction. To further investigate this observation, the collected material for one soil sample was further analyzed by wet sieving. The new fractions collected were analyzed by gamma spectrometry, using a specially developed low-volume geometry, and were also found to have varying activity concentrations. This indicates that the material collected in the initial dry sieving analysis may consist of agglomerations of smaller particles rather than actual 1-2mm grains. Such effects require further study and should be taken into account in planning and interpreting the

results of soil sampling campaigns for the determination of radionuclide concentrations.

Furthermore, the water sample that was collected during the wet sieving analysis, was filtered and evaporated to identify possible particles carrying radionuclides that can pass through the filters. After the evaporation of the water sample, a sediment was collected, dried, and analyzed, using a low volume geometry, by gamma spectrometry. The results of this analysis showed that ^{40}K , and with strong indications ^{241}Am , passed through the filters, meaning that the agent of water has a strong influence in the distribution of radionuclides, not just by dissolving coarse particles but also by possibly redistributing radionuclides among the soil particles.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
2	Φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα στο επιφανειακό χώμα και εφαρμογές.	4
2.1	Γενικά στοιχεία για το χώμα	4
2.1.1	Ιδιότητες του χώματος	5
2.1.1.1	Οι φυσικές ιδιότητες του χώματος	5
2.1.1.2	Οι χημικές ιδιότητες του χώματος.....	6
2.2	Ραδιενέργεια επιφανειακού χώματος	7
2.2.1	Φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα στο περιβάλλον	8
2.2.2	Ραδιενέργεια των ελληνικών εδαφών	9
2.2.3	Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.....	9
2.2.3.1	Μόλυβδος 210 (^{210}Pb)	10
2.2.3.2	Κάλιο 40 (^{40}K).....	10
2.2.3.3	Θόριο 234 (^{234}Th)	10
2.2.3.4	Θόριο 228 (^{228}Th)	11
2.2.3.5	Ράδιο 228 (^{228}Ra).....	11
2.2.3.6	Ράδιο 226 (^{226}Ra).....	11
2.2.3.7	Βηρύλλιο 7 (^7Be)	12
2.2.3.8	Καίσιο 137 (^{137}Cs)	12
2.2.3.9	Αμερίκιο 241 (^{241}Am).....	13
2.3	Γενικά στοιχεία για το ^{241}Am	13
2.3.1	Παραγωγή του ^{241}Am	15
2.3.2	Χρήσεις του Am-241	15
2.3.2.1	Ραδιογραφία και μετρήσεις πυκνότητας.....	16
2.3.2.2	Παραγωγή νετρονίων	16

2.3.2.3	Παραγωγή άλλων στοιχείων.....	16
2.3.2.4	Εφαρμογή σε ανιχνευτές καπνού	17
2.3.2.5	Πιθανή χρήση σε αντιδραστήρες σχάσης.....	17
2.3.2.6	Εφαρμογή σε αλεξικέραυνα	18
2.3.2.7	Άλλες εφαρμογές.....	18
2.3.3	Το ²⁴¹ Am στο περιβάλλον.....	18
2.3.3.1	Το ατύχημα του Chernobyl	20
2.3.4	Το Am-241 και οι επιπτώσεις του στον ανθρώπινο οργανισμό	22
2.3.5	Το Am-241 στο Ε.Μ.Π.	23
2.3.5.1	Τα αλεξικέραυνα με Am-241	24
2.4	Συλλογή και επεξεργασία δειγμάτων	25
2.4.1	Μέθοδοι δειγματοληψίας χόματος.....	26
2.4.2	Η μέθοδος δειγματοληψίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ	26
2.4.3	Μέθοδοι επεξεργασίας.....	27
2.4.3.1	Ξήρανση δειγμάτων.....	27
2.4.3.2	Διαχωρισμός σε μικρότερα δείγματα	28
2.4.3.3	Κοσκίνισμα δειγμάτων	29
2.4.3.4	Η μέθοδος της ξηρής κοσκίνισης	30
2.4.3.5	Η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης	31
2.4.3.6	Θραύση δειγμάτων	33
2.4.3.7	Συσκευασία και σφράγισμα δειγμάτων	34
2.5	γ-φασματοσκοπική ανάλυση.....	34
2.5.1	Οι ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	35
2.5.2	Κώδικας φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL.....	36
2.6	Η προσομοίωση Monte Carlo για τη βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτικών διατάξεων και ο κώδικας Penelope.....	37
2.7	Η κοκκομετρική κατανομή φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων και η εξάρτηση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας από αυτή.	40

3	Ανάλυση δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης	43
3.1	Η δειγματοληψία του επιφανειακού χώματος.....	43
3.2	Η προετοιμασία των δειγμάτων	46
3.2.1	Η ξήρανση των δειγμάτων.....	47
3.2.2	Συσκευασία και ανάλυση ποιοτικών δειγμάτων.....	48
3.2.3	Ξηρό κοσκίνισμα των δειγμάτων Α και Β και κοκκομετρική τους ανάλυση	51
3.2.4	Σύγκριση της κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος Α και του αντιπροσωπευτικού υποδείγματος, που προέκυψε με τη μέθοδο cone and quartering	58
3.2.5	Θραύση του κλάσματος των >2mm.....	59
3.2.6	Μέτρηση υγρασίας και συσκευασία δειγμάτων	61
3.3	Ανάλυση με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας	65
3.3.1	Συλλογή και ανάλυση φασμάτων	66
3.3.2	Διορθώσεις διάσπασης.....	71
3.3.3	Ανάλυση Αβεβαιοτήτων	72
3.4	Αποτελέσματα-Σχολιασμός	75
4	Ανάλυση δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης	83
4.1	Ανάγκη για υγρή κοσκίνιση	83
4.2	Μεθοδολογία ανάλυσης υγρής κοσκίνισης.....	84
4.3	Ξήρανση των δειγμάτων	88
4.4	Συσκευασία των δειγμάτων.....	90
4.5	Συλλογή και ανάλυση φασμάτων.....	93
4.5.1	Μέθοδος Μεταφοράς Απόδοσης	93
4.5.2	Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων	97
4.6	Προετοιμασία και ανάλυση του υγρού δείγματος.....	99
4.6.1	Προσδιορισμός απόδοσης για τη γεωμετρία του υγρού δείγματος	102
4.6.2	Αποτελέσματα ανάλυσης του υγρού δείγματος.....	104

4.7	Αποτελέσματα –σχολιασμός	107
5	Επίλογος.....	110
5.1	Σύνοψη της εργασίας	110
5.2	Συμπεράσματα	112
5.3	Προτάσεις και μελλοντικά βήματα	114
	Παράρτημα Α: Πιστοποιητικό Ανιχνευτή LEGe.....	116
	Παράρτημα Β: Αρχεία εισόδου PENELOPE	117
B.1	Αρχεία εισόδου “.geo”	117
B.1.1	Αρχείο εισόδου “.geo” για τη γεωμετρία συσκευασίας των συλλεχθέντων κλασμάτων της υγρής κοσκίνισης με όγκο πλήρωσης 18cm ³ ...	118
B.1.2	Αρχείο εισόδου “.geo” για τη γεωμετρία συσκευασίας του ιζήματος του υγρού δείγματος με όγκο πλήρωσης 14.56 cm ³	132
B.2	Γενικά αρχεία εισόδου “.in”	146
B.2.1	Παράδειγμα αρχείου εισόδου για τη γεωμετρία συσκευασίας των δειγμάτων από την υγρή κοσκίνιση και για ενέργεια 59.54 keV	146
B.2.2	Παράδειγμα αρχείου εισόδου για τη γεωμετρία συσκευασίας του ιζήματος του υγρού δείγματος και για ενέργεια 46.52 keV.....	147
	Παράρτημα Γ: Πλύσιμο των κοσκίνων	148
	Παράρτημα Δ: Όρια Ανίχνευσης.....	149
	Βιβλιογραφία	151

1 Εισαγωγή

Η κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος καθορίζεται από πολλούς και πολύπλοκους παράγοντες, όπως είναι η χημεία του εδάφους και η προέλευση του ραδιενεργού ισοτόπου. Επιπροσθέτως, μπορεί να επηρεαστεί από μεγάλο πλήθος μηχανισμών που εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο παράγοντας του νερού, η κλίση του εδάφους, η ένταση του ανέμου καθώς και η βλάστηση.

Σε προηγούμενες έρευνες, που διενεργήθηκαν από το Εργαστήριο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) (Παλαμάρα 2010, Σάκκουλα 2014, Savva 2016), έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν διαφορές στη συγκέντρωση ραδιενέργειας των ραδιενεργών ισοτόπων, όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών σημείων και βάθους δειγματοληψίας, αλλά και μεταξύ διαφορετικού μεγέθους σωματιδίων μέσα στο ίδιο το δείγμα. Συγκεκριμένα, πολλά ραδιενεργά ισότοπα ανιχνεύθηκαν με αυξημένες συγκεντρώσεις στα μικρότερου μεγέθους κλάσματα σωματιδίων σε σύγκριση με τα μεγαλύτερου μεγέθους κλάσματα.

Στις μέχρι τώρα μελέτες έχουν εξεταστεί φυσικά ραδιενεργά ισότοπα και το ανθρωπογενές ^{137}Cs . Στην παρούσα ΔΕ, γίνεται περαιτέρω έρευνα με σκοπό να εξετάσουμε και να αποκτήσουμε επιπρόσθετα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη αυτή τάση, συμπεριλαμβάνοντας φυσικά αλλά και ανθρωπογενή ραδιενεργά ισότοπα. Ειδικότερα, έχει μελετηθεί η συμπεριφορά του ^{241}Am , το οποίο δεν είχε στο παρελθόν μελετηθεί σε κοκκομετρικά κλάσματα χώματος. Η παρούσα ΔΕ είναι οργανωμένη σε πέντε κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου της εισαγωγής, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

Στο 2ο κεφάλαιο δίνονται αρχικά ορισμένα γενικά στοιχεία για το χώμα και τις ιδιότητές του. Παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων και παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τη ραδιενέργεια των ελληνικών εδαφών. Στη συνέχεια, δίνονται βασικά βιβλιογραφικά στοιχεία για τα ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν στην παρούσα ΔΕ. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στο ^{241}Am , καθώς όπως αναφέρθηκε δεν έχουν γίνει μελέτες στο παρελθόν σχετικά με την κοκκομετρική του κατανομή. Στην παρούσα ΔΕ υπήρξε η ευκαιρία να μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά του εν λόγω ραδιενεργού ισοτόπου καθώς αυτό στο

παρελθόν είχε διασπαρεί σε εξωτερικό χώρο του ΕΜΠ λόγω της αστοχίας εγκατεστημένου αλεξικέραυνου, το οποίο χρησιμοποιούσε το συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο. Για το λόγο αυτό, γίνεται και μια σύντομη αναφορά στη δημιουργία, την εγκατάσταση και τελικά την απόσυρση των εν λόγω αλεξικέραυνων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται οι μέθοδοι επεξεργασίας που ακολουθούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και παρατίθενται τα σχετικά με αυτές βιβλιογραφικά στοιχεία και αναφορές. Περιγράφεται η μέθοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης δίνοντας παράλληλα στοιχεία για τους ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ και τον κώδικα επεξεργασίας SPUNAL, και γίνεται σύντομη αναφορά στη προσομοίωση Monte Carlo και τον κώδικα PENELOPE. Στο τέλος του κεφαλαίου σχολιάζεται η κοκκομετρική κατανομή των φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων και η εξάρτηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από αυτή, δίνοντας συνοπτικά στοιχεία από τη βιβλιογραφία.

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ έγινε δειγματοληψία χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ακολούθησε ο διαχωρισμός του σε κοκκομετρικά κλάσματα με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης και η ανάλυσή του με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Στο 3ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης των δειγμάτων που μελετήθηκαν για την παρούσα ΔΕ. Συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής περιγραφή της δειγματοληψίας, της ξήρανσης και της συσκευασίας των συλλεχθέντων δειγμάτων. Περιγράφεται η διαδικασία της ξηρής κοσκίνισης των δειγμάτων εδάφους, ο διαχωρισμός τους σε κλάσματα καθώς και όλες οι περαιτέρω απαραίτητες για τη σωστή επεξεργασία και συσκευασία διαδικασίες. Δίνονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των δειγμάτων αυτών και στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτά.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης των δειγμάτων, κρίθηκε σκόπιμο να επεκταθεί η μελέτη εφαρμόζοντας σε επιλεγμένα δείγματα και τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Σκοπός της ανάλυσης αυτής ήταν ο προσδιορισμός της ύπαρξης ή μη συσσωματωμάτων, καθώς και η κοκκομετρική κατανομή και συγκέντρωση ραδιενέργειας των συσσωματωμάτων αυτών. Στο 4ο κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Λόγω του μικρού όγκου δείγματος που συλλέχθηκε, έγινε η χρήση δύο

μη τυποποιημένων γεωμετριών συσκευασίας δειγμάτων, γεγονός που οδήγησε στη χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης, για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για τις επιλεγμένες γεωμετρίες. Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα όρια ανίχνευσης για μία εκ των δύο νέων αυτών γεωμετριών συσκευασίας δειγμάτων. Τα συλλεχθέντα και συσκευασμένα δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας και τα αποτελέσματα, που εξήχθησαν παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου.

Στο 5ο κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη σύνοψη της παρούσας ΔΕ και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από αυτή, ορισμένες προτάσεις για συνέχιση της συγκεκριμένης εργασίας καθώς και πιθανά μελλοντικά βήματα για σχετικές με την εργασία αυτή μελέτες.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με 4 παραρτήματα στα οποία παρατίθενται το πιστοποιητικό του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε, όλα τα απαραίτητα για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αρχεία, περιγράφεται η διαδικασία πλύσης των κοσκίνων και παρατίθενται και σχολιάζονται συνοπτικά οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των ορίων ανίχνευσης.

2 Φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα στο επιφανειακό χώμα και εφαρμογές

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα γενικά στοιχεία για το χώμα και τα ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ). Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά στον εντοπισμό και αφαίρεση δύο αλεξικέραυνων με κεφαλή που περιείχε ^{241}Am σε κτίριο εργαστηρίου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών στην Πολυτεχνειούπολη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το 2003. Η αστοχία του ενός εκ των δύο αυτών αλεξικέραυνων οδήγησε στη έκλυση και διασπορά του συγκεκριμένου ραδιενεργού ισοτόπου στην οροφή και στον περιβάλλοντα χώρο γύρω από το κτίριο, η οποία αν και δεν παρουσιάζει κανένα κίνδυνο για τους χρήστες του κτιρίου, είναι μετρήσιμη και παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη δοκιμή τεχνικών μέτρησης. Για το λόγο αυτό, δίνεται έμφαση στην παραγωγή, τη χρήση και τις πηγές του ραδιενεργού ισοτόπου ^{241}Am , καθώς και στον κίνδυνο που αποτελεί η έκθεση του ανθρώπου σε αυτό. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε στη συλλογή δειγμάτων επιφανειακού χώματος, στην κοκκομετρική τους ανάλυση με χρήση ξηρού και υγρού κοσκινίσματος και στην ανάλυση των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται σε αυτά, με τη χρήση γ-φασματοσκοπίας. Συγκεκριμένα, μελετάται η κατανομή που παρουσιάζει η συγκέντρωση της ραδιενέργειας τεχνητών και φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων σχετιζόμενη με τη διάμετρο των σωματιδίων του χώματος.

2.1 Γενικά στοιχεία για το χώμα

Το χώμα είναι ένα στρώμα από ανόργανα σωματίδια και οργανικές ουσίες, τα οποία συχνά δημιουργούν συσσωματώματα. Τα κενά μεταξύ των συσσωματωμάτων σχηματίζουν ένα δίκτυο πόρων, οι οποίοι είναι γεμάτοι με υδατοειδή διαλύματα και αέρια.

Το ανόργανο τμήμα συντίθεται από σωματίδια που διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Παναγιωτόπουλος 1984):

- Λίθοι (gravels), μεγέθους από 2000 ως 200 μm

- Άμμος (sand), μεγέθους από 200 ως 20 μm
- Ιλύς (silt), μεγέθους από 20 ως 2 μm
- Άργιλος (clay), μεγέθους μικρότερο από 2 μm

Η άλλη συνιστώσα του χώματος είναι το οργανικό τμήμα, το οποίο αποτελείται από τα προϊόντα της αποσύνθεσης των φυτών και μικροοργανισμούς, όπως είναι τα βακτήρια, οι μύκητες, τα πρωτόζωα και διάφορα είδη της μεσοπανίδας, όπως οι γεοσκώληκες. Σε άνυδρες περιοχές δεν ξεπερνά το 1%, ενώ σε περιοχές με αυξημένα επίπεδα υγρασίας μπορεί να φτάσει το 10% της μάζας του χώματος. Παρόλο που αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας του χώματος, επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητές του και έχει πολύ σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά και την κινητική των ιχνοστοιχείων και ραδιενεργών ισοτόπων μέσα σε αυτό (Παναγιωτόπουλος 1984).

2.1.1 Ιδιότητες του χώματος

Από περιοχή σε περιοχή το είδος του χώματος μπορεί να ποικίλει και να επηρεάζει διαφορετικά κάθε μελέτη και δειγματοληψία ανάλογα με τις ιδιότητές του.

2.1.1.1 Οι φυσικές ιδιότητες του χώματος

Οι κύριες φυσικές του ιδιότητες αναφέρονται παρακάτω (Παλαμάρα 2010):

- Σύσταση: Η αναλογία των συστατικών του εδάφους
- Υφή: Η υφή του χώματος καθορίζεται από την αναλογία των διακριτών σε αυτό στοιχείων και μπορεί να διακριθεί σε 3 βασικές κατηγορίες:
 - Χώμα λεπτής υφής: Η σύσταση του χώματος είναι κατά κύριο λόγο αργιλώδης, δηλαδή τα σωματίδιά του είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκα, με διάμετρο μικρότερη από 0.002 mm. Όταν είναι υγρό το χώμα είναι κολλώδες και εύπλαστο, ενώ στεγνό είναι σκληρό και συμπαγές.
 - Χώμα τραχιάς υφής: Το χώμα αποτελείται κυρίως από άμμο και λίθους, δηλαδή από χονδρόκοκκα σωματίδια μεγέθους από 2 έως 0.02 mm. Η υφή του είναι τραχιά, είναι λιγότερο κολλώδες και κυλάει με μεγάλη ευκολία.
 - Χώμα μέσης υφής: Η αναλογία μεταξύ άμμου, ιζήματος και αργίλου είναι πιο ισορροπημένη. Η συμπεριφορά του χώματος είναι ενδιάμεση ανάλογα και με την ακριβή σύστασή του.

- Διαπερατότητα του χώματος (soil permeability): Αποτελεί από τις βασικότερες ιδιότητες του χώματος και σχετίζεται με τη συχνότητα και το μέγεθος των πόρων που σχηματίζονται ανάμεσα από τα σωματίδια και τα συσσωματώματα του χώματος. Πόροι με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 μm είναι συνήθως γεμάτοι με αέρα, ενώ πόροι με διάμετρο μικρότερη από 30 μm τείνουν να συγκρατούν το νερό και άλλα υδάτινα διαλύματα. Η διαπερατότητα του χώματος καθορίζει την ταχύτητα με την οποία τα υγρά διαλύματα απορροφώνται από αυτό και συνεπώς επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά των ρύπων από την επιφάνεια στα πιο βαθιά στρώματα του χώματος.
- Πορώδες και ειδικό βάρος: Το πορώδες βάρος καθορίζεται από τον όγκο που έχουν τα διάκενα του εδάφους. Το ειδικό βάρος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους ενός σώματος προς τον όγκο του.
- Υγροσκοπικότητα: Η υγροσκοπικότητα αναφέρεται στην ικανότητα πρόσληψης και απόδοσης υγρασίας.
- Ειδική θερμότητα: Αφορά στην ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του χώματος κατά 1 °C. Η θερμοκρασία είναι ένας από τους συντελεστές της ανάπτυξης των φυτών και εξαρτάται από τα συστατικά του εδάφους, το χρώμα του, την υγρασία του κ.λ.π.

2.1.1.2 Οι χημικές ιδιότητες του χώματος

Οι βασικές χημικές ιδιότητες του χώματος είναι (Παλαμάρα 2010):

- pH: Αποτελεί μέτρο της οξύτητας μιας ουσίας. Συγκεκριμένα εκφράζει τον αρνητικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου. Είναι από τις σημαντικότερες ιδιότητες του χώματος και επηρεάζει σημαντικά τόσο την ανάπτυξη των φυτών όσο και τη συμπεριφορά των ιόντων του χώματος. Το pH του χώματος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4 και 8.5, αν και σε διάφορα σημεία του κόσμου έχουν παρατηρηθεί ακραίες τιμές μεταξύ 2 και 10.5. Γενικά το χώμα σε περιοχές με έντονη υγρασία έχει τιμή pH 5 – 7, ενώ σε άνυδρες περιοχές 7 – 9.
- Οξειδοαναγωγή: Ο όρος περιγράφει όλες τις χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα άτομα των στοιχείων που συμμετέχουν αλλάζουν αριθμό οξείδωσης. Η διαδικασία της οξειδοαναγωγής μπορεί να γίνεται σχετικά απλά και

γρήγορα όπως η οξείδωση του άνθρακα από το οξυγόνο προς το διοξείδιο του άνθρακα ή μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία όπως η οξείδωση της γλυκόζης στους οργανισμούς, η οποία επιτυγχάνεται μέσω πολύπλοκων διεργασιών μεταφοράς ηλεκτρονίων. Στο χώμα, η οξειδοαναγωγή επηρεάζει κυρίως τη συμπεριφορά στοιχείων όπως τα C, N, O, S, Fe, Mn. Σε μικρότερο βαθμό επηρεάζει και τα στοιχεία: Ag, As, Cr, Cu, Hg, Pb.

- Προσροφητική ικανότητα: Η συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών στο χώμα καθορίζεται από την προσροφητική ικανότητα του χώματος. Όταν ένας ρύπος επικάθεται στην επιφάνεια του χώματος, είτε αλληλεπιδρά με τα επιφανειακά σωματίδια του χώματος, είτε απομακρύνεται με το νερό της βροχής. Οι διαλυτοί ρύποι διαπερνούν το επιφανειακό χώμα και εισέρχονται στο σύστημα των πόρων του χώματος. Αντιθέτως, το αδιάλυτα και υδροφοβικά οργανικά μόρια κολλάνε στα επιφανειακά σωματίδια του χώματος, ή κινούνται με ταχύτητα σε μεγάλο βάθος διαμέσου μεγάλων πόρων και σχισμών του εδάφους.
- Ανταλλαγή ιόντων: Ορίζεται ως η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών.

2.2 Ραδιενέργεια επιφανειακού χώματος

Ραδιενέργεια είναι το φαινόμενο της εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων ισοτόπων, που γι' αυτό το λόγο ονομάζονται ραδιενεργά. Ο πυρήνας που διασπάται ονομάζεται μητρικός ενώ εκείνος που προκύπτει ως αποτέλεσμα της διάσπασης θυγατρικός. Βασικό χαρακτηριστικό των ραδιενεργών ισοτόπων αποτελεί ο χρόνος ημιζωής, ή χρόνος υποδιπλασιασμού, ο χρόνος δηλαδή που χρειάζεται για να διασπαστούν οι μισοί από τους αρχικούς μητρικούς πυρήνες ($t_{1/2}$).

Στο έδαφος ανιχνεύεται ένα μεγάλο πλήθος ραδιενεργών ισοτόπων, η παρουσία των οποίων μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να θεωρηθεί αποτέλεσμα ρύπανσης. Τα ισότοπα που ανιχνεύονται μπορεί να διαχωριστούν σε φυσικά ή τεχνητά ανάλογα με την προέλευσή τους.

2.2.1 Φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα στο περιβάλλον

Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα είναι εκείνα που βρίσκονται στο περιβάλλον λόγω φυσικών διαδικασιών και χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν στη γη, τόσο στο έδαφος όσο και στο υπέδαφος. Ο φλοιός και ο πυρήνας της γης αποτελούν το σημείο προέλευσης των ραδιενεργών ισοτόπων των σειρών ουρανίου (^{238}U), ακτινίου (^{235}U), και θορίου (^{232}Th), καθώς και των ισοτόπων του καλίου (^{40}K) και του ρουβιδίου (^{87}Rb). Καθώς το μάγμα που προέρχεται από τον πυρήνα στερεοποιείται σχηματίζονται τα πυριγενή πετρώματα. Αυτά διαβρώνονται εξαιτίας χημικών και μηχανικών καταπονήσεων και υπό την επίδραση του νερού, καταλήγοντας σε χώμα. Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και το είδος της διάβρωσης, τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα συνήθως εντοπίζονται σε κόκκους μεγάλης πυκνότητας μαζί με τα άλλα ιχνοστοιχεία. Εξαιρέση αποτελούν το κάλιο και το ρουβίδιο, τα οποία συνήθως απομακρύνονται υπό μορφή διαλύματος (Αναγνωστάκης, 2014).
- Τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης (cosmogenic radionuclides). Τα ισότοπα αυτά παράγονται κατά την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, κυρίως μέσω αντιδράσεων κατακερματισμού (spallation) και σύλληψης νετρονίου. Τα σημαντικότερα από τα παραγόμενα ραδιενεργά ισότοπα είναι τα ^3H , ^{14}C , ^7Be και ^{22}Na . Μία μικρή ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων προστίθεται στη γη και μέσω της κοσμικής σκόνης και των μετεωριτών ^{26}Al , ^{46}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , $^{53,54}\text{Mn}$, $^{56,57,58,60}\text{Co}$, ^{59}Ni .

Τα τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα είναι ισότοπα τα οποία παράγονται εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας γι' αυτό ονομάζονται και ανθρωπογενή. Στην παρούσα ΔΕ θα μελετηθούν το ^{137}Cs και το ^{241}Am . Επιπροσθέτως, σημαντικά τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα είναι και τα ισότοπα του Sr, του Pu και του I.

Οι κυριότερες πηγές έκλυσης τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον είναι:

- Τα πυρηνικά εργοστάσια και οι εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας πυρηνικού καυσίμου.
- Η χρήση και οι δοκιμές πυρηνικών όπλων

- Τα πυρηνικά και ραδιολογικά ατυχήματα

2.2.2 Ραδιενέργεια των ελληνικών εδαφών

Στον Ελλαδικό χώρο, έχουν πραγματοποιηθεί εκτενώς έρευνες για τη μέτρηση των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{238}U και ^{40}K που απαντώνται στο έδαφος καθώς επίσης και για τη μέτρηση του τεχνητού ραδιενεργού ισοτόπου ^{137}Cs , που αποτέθηκε στο έδαφος έπειτα από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl (Simopoulos 1989, Anagnostakis et al. 1996, Σάκκουλα 2014, Savva et al. 2015).

Από τα δείγματα που συλλέχθηκαν και μελετήθηκαν, προέκυψαν οι εξής μέσες τιμές για τη συγκέντρωση των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στα ελληνικά εδάφη (Anagnostakis 1996):

$$^{226}\text{Ra} : 25 \pm 19 \text{ Bq/kg}$$

$$^{228}\text{Ra} : 21 \pm 16 \text{ Bq/kg}$$

$$^{40}\text{K} : 355 \pm 220 \text{ Bq/kg}$$

$$^{238}\text{U} : 40 \pm 37 \text{ Bq/kg}$$

$$^{210}\text{Pb} : 83 \pm 60 \text{ Bq/kg}$$

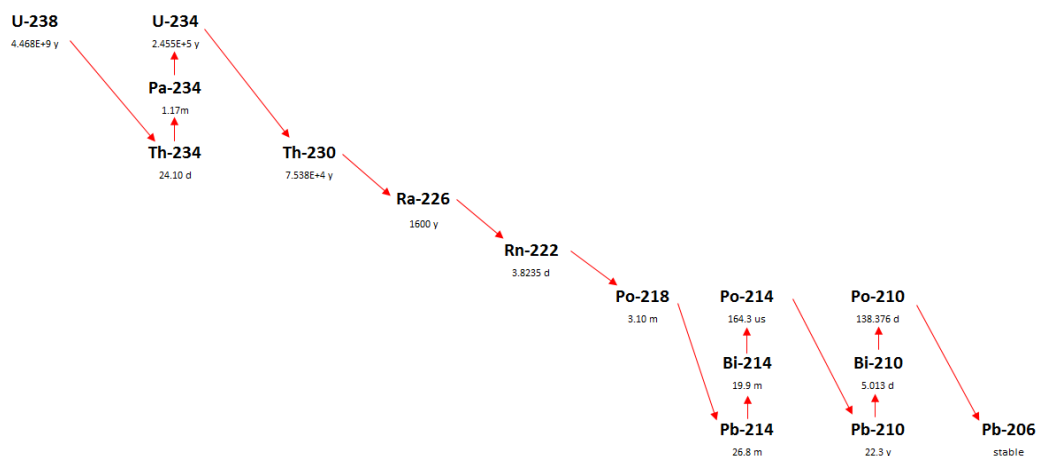
Όσον αφορά στην εναπόθεση ^{137}Cs λόγω του πυρηνικού ατυχήματος στο Chernobyl, εκτιμήθηκε κατά μέσο όρο σε 10 kBq/m^2 , με μέγιστη τιμή 149 kBq/m^2 (Petrooulos et al. 1996).

2.2.3 Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία

Για τη συγκεκριμένη ΔΕ επιλέχθηκαν να μελετηθούν ως προς τη συγκέντρωση της ραδιενέργειάς τους φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια γ και μπορούν να ανιχνευθούν σε τυπικά δείγματα εδάφους. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά βασικά στοιχεία για κάθε ένα από τα ισότοπα που μελετήθηκαν.

2.2.3.1 Μόλυβδος 210 (^{210}Pb)

Ο ^{210}Pb είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 22.3 y, θυγατρικό της σειράς του ^{238}U . Παράγεται τόσο μέσα στο έδαφος όσο και στον αέρα, κατά τη διάσπαση των θυγατρικών του ραδιενεργού αερίου ραδονίου (^{222}Rn) το οποίο μπορεί να διαφύγει από το έδαφος. Η συγκέντρωση του ^{210}Pb μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, από τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας 46.52 keV που εκπέμπει κατά τη β-διάσπασή του. Ο ρυθμός εναπόθεσης του ^{210}Pb στο έδαφος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώματος κάθε περιοχής, τα καιρικά φαινόμενα και την εποχιακή αλλαγή ιδιοτήτων του χώματος που επηρεάζουν την εκροή του ^{222}Rn , όπως η υγρασία (Χαβιαράς 2015).



Σχήμα 2-1: Αλυσίδα ραδιενεργού διάσπασης του ^{238}U

2.2.3.2 Κάλιο 40 (^{40}K)

Το ^{40}K είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής $1.277 \cdot 10^9$ χρόνια και αποτελεί το 0.0117% του συνολικού K που απαντάται στο φυσικό περιβάλλον. Αποτελεί χαρακτηριστικό των οργανικών συστατικών του χώματος και ανιχνεύεται με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας μέσω της χαρακτηριστικής ενέργειας των 1460.83 keV που εκπέμπει κατά τη β-διάσπασή του.

2.2.3.3 Θόριο 234 (^{234}Th)

Το ^{234}Th είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του Th με χρόνο ημιζωής 24.1 d. Ανιχνεύεται βάσει της χαρακτηριστικής ενέργειας των 63.29 keV που εκπέμπει κατά τη β-διάσπασή του. Ο μικρός χρόνος ημιζωής του επιτρέπει την επίτευξη ραδιενεργού

ισορροπίας με το πατρικό του ^{238}U , γεγονός που καθιστά την ανάλυσή του ιδιαίτερα χρήσιμη.

2.2.3.4 Θόριο 228 (^{228}Th)

Το ^{228}Th είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του Th με χρόνο ημιζωής 1.9116 y. Ανιχνεύεται με χρήση γ-φασματοσκοπίας μέσω των χαρακτηριστικών ενεργειών φωτονίων που εκπέμπουν δύο θυγατρικά του, το ^{212}Pb (238.63 keV) και το ^{208}Tl (583.14 keV), τα οποία λόγω των σχετικά μικρών χρόνων ημιζωής τους (10.64 h αρχικά το ^{212}Pb και 3.053 min εν συνεχεία το ^{208}Tl), είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι έχουν έρθει σε ραδιενεργό ισορροπία με το μητρικό τους ^{228}Th .

2.2.3.5 Ράδιο 228 (^{228}Ra)

Το ^{228}Ra είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του Ra με χρόνο ημιζωής 5.75 y. Ανιχνεύεται με χρήση γ-φασματοσκοπίας μέσω των χαρακτηριστικών ενεργειών φωτονίων που εκπέμπει το θυγατρικό του ^{228}Ac (338.40 keV, 911.07 keV), το οποίο με χρόνο ημιζωής 6.15 h είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι έχει έρθει σε ραδιενεργό ισορροπία με το μητρικό του ^{228}Ra μέσα στο χρόνο που τυπικά απαιτείται για την προετοιμασία ενός δείγματος εδάφους.

2.2.3.6 Ράδιο 226 (^{226}Ra)

Το ^{226}Ra είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του Ra με χρόνο ημιζωής 1600 y. Ανιχνεύεται με χρήση γ-φασματοσκοπίας μέσω των χαρακτηριστικών ενεργειών φωτονίων που εκπέμπουν δύο από τα θυγατρικά του, το ^{214}Pb (295.22 keV, 351.99 keV) και το ^{214}Bi (609.32 keV, 1120.28 keV, 1764.51 keV). Προκειμένου να εκτιμηθεί η ραδιενέργεια του ^{226}Ra μέσω του ^{214}Pb και του ^{214}Bi , πρέπει να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του πατρικού και των θυγατρικών του. Επειδή το ^{226}Ra διασπάται σε ^{222}Rn το οποίο είναι αέριο, για να επιτευχθεί η ζητούμενη ραδιενεργός ισορροπία πρέπει το υπό ανάλυση δείγμα να σφραγιστεί ώστε να εγκλωβιστεί μέσα σε αυτό το ^{222}Rn . Αν αναλυθεί το δείγμα μετά από χρονικό διάστημα 24 μερών από το σφράγισμά του είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι το ^{226}Ra βρίσκεται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του, καθώς ο χρόνος ημιζωής του ^{222}Rn είναι 3.8 d και οι χρόνοι ημιζωής των ^{214}Pb και ^{214}Bi είναι 26.8 min και 19.9 min αντίστοιχα.

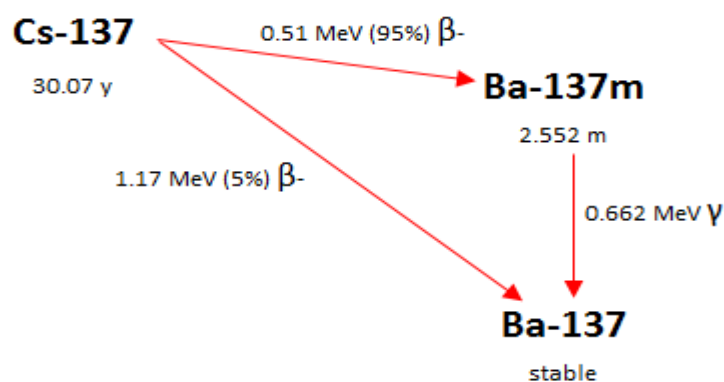
2.2.3.7 Βηρύλλιο 7 (^7Be)

Το ^7Be αποτελεί ισότοπο κοσμικής προέλευσης με χρόνο ημιζωής 53.44 d, παραγόμενο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, λόγω των αλληλεπιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας με αυτή. Η μεταφορά του στο έδαφος γίνεται μέσω της βαρύτητας και των υγρών κατακρημνίσεων, και έχει ενδιαφέρον για τη μελέτη ατμοσφαιρικών μετακινήσεων. Για την ανίχνευση και το ποσοτικό προσδιορισμό του ^7Be χρησιμοποιούνται τα φωτόνια 477.6 keV που εκπέμπει (Αναγνωστάκης 2014).

Για τη συγκεκριμένη ΔΕ επιλέχθηκαν να μελετηθούν ως προς τη συγκέντρωση της ραδιενέργειάς τους τα παρακάτω τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα:

2.2.3.8 Καίσιο 137 (^{137}Cs)

Το ^{137}Cs είναι ένα τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο και ένα από τα πιο κοινά προϊόντα σχάσης ως αποτέλεσμα της πυρηνικής σχάσης του ^{235}U και άλλων σχάσιμων ισωτόπων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και πυρηνικά όπλα. Οι βασικές του πηγές στο περιβάλλον είναι οι δοκιμές πυρηνικών όπλων και διαρροές από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Έχει χρόνο ημιζωής 30.07 y και αποτελεί ένα από τα πιο προβληματικά προϊόντα σχάσης καθώς κινείται και εξαπλώνεται εύκολα στο περιβάλλον λόγω της υψηλής διαλυτότητας στο νερό των συνηθέστερων χημικών του ενώσεων, οι οποίες είναι άλατα. Στα ιζήματα, το ^{137}Cs ενσωματώνεται στην κρυσταλλική δομή των ορυκτών. Ανιχνεύεται με χρήση γ-φασματοσκοπίας μέσω της χαρακτηριστικής ενέργειας των 661.62 keV που εκπέμπεται μετά τη β-διάσπασης του κύριου θυγατρικού που είναι το $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (Ashraf et al. 2014, Ray 2013).



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα ραδιενεργού διάσπασης του ^{137}Cs (Ashraf et al. 2014)

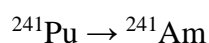
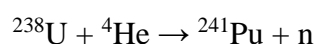
2.2.3.9 Αμερίκιο 241 (^{241}Am)

Το ^{241}Am είναι ένα τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 432.2y. Ανιχνεύεται με χρήση α-φασματοσκοπίας μέσω των α-σωματιδίων ενέργειας 5485.56 keV και 5442.80 keV που εκπέμπονται κατά τη διάσπασή του, ή με χρήση γ-φασματοσκοπίας μέσω του φωτονίου ενέργειας των 59.54 keV που ακολουθεί την α-διάσπασή του (Schulz 1976).

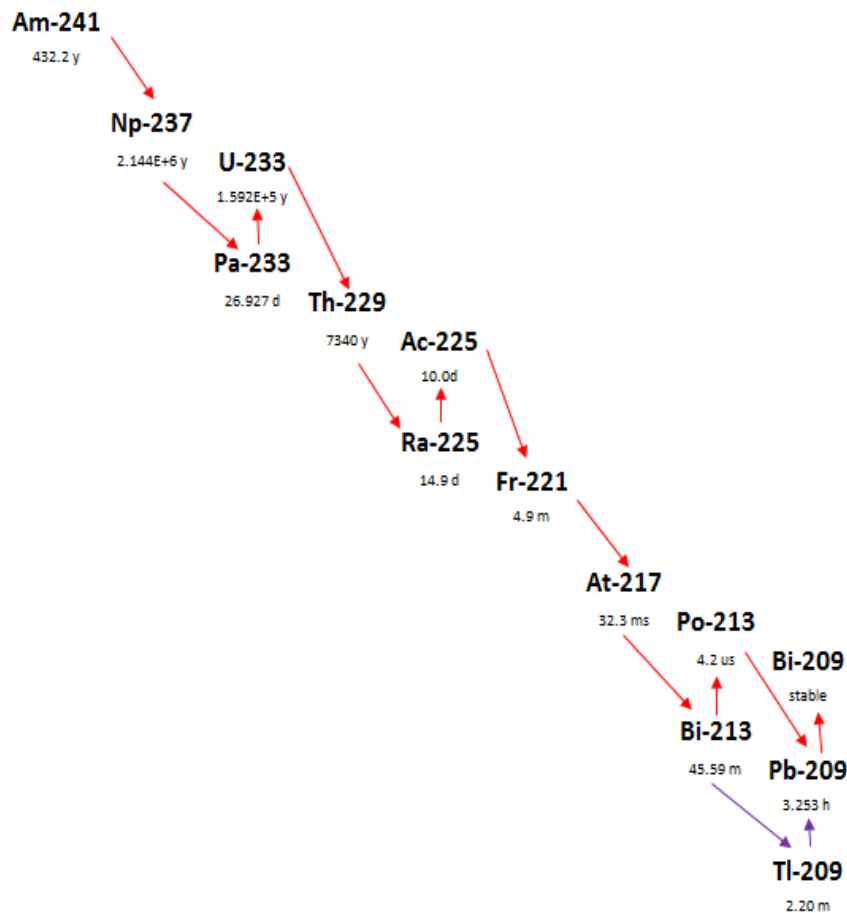
Η ανίχνευση του ^{241}Am στο έδαφος, και ιδιαίτερα με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους, δεν αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία λόγω των εξαιρετικά χαμηλών ποσοτήτων που εκλύονται από το εν λόγω ισότοπο από πυρηνικά ατυχήματα και δοκιμές. Ωστόσο, στην παρούσα ΔΕ αυτό ήταν δυνατό λόγω της εναπόθεσής μετρήσιμων ποσοτήτων του στο έδαφος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Για το λόγο αυτό θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο ^{241}Am στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.3 Γενικά στοιχεία για το ^{241}Am

Το τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο ^{241}Am ανακαλύφθηκε το 1944 από τον Seaborg από βομβαρδισμό ^{238}U με ιόντα ηλίου (He), σύμφωνα με την παρακάτω αλυσίδα αντιδράσεων (Strain and Leddicotte 1962):



όπου το ^{241}Pu διασπάται μέσω β-διάσπασης σε ^{241}Am , με χρόνο ημιζωής 14.35y . Το ^{241}Am διασπάται εν συνεχεία στο ^{237}Np και καταλήγει στο ^{209}Bi όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Αλυσίδα διάσπασης του ^{241}Am

Λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής του ($T_{1/2} = 432.2 \text{ y}$) όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχει μεγάλη διάρκεια «χρήσιμης» ζωής για ερευνητικούς σκοπούς. Η μεγάλη διάρκεια «χρήσιμης» ζωής σε συνδυασμό με την υψηλή ειδική του ραδιενέργεια (3.17 Ci/g) αποτελεί ιδανικό ραδιενεργό ισότοπο για την προετοιμασία άλφα, γάμμα και νετρονικών πηγών (σε συνδυασμό με το ^9Be), οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος τεχνικών ανάλυσης.

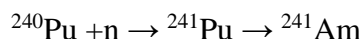
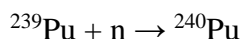
Επιπροσθέτως, παρουσιάζει χημικές ιδιότητες παρόμοιες με στοιχεία σπάνιων γαιών, εμφανίζοντας όμοιες τυπικές αντιδράσεις με αυτά, καθώς έχει μόνη σταθερή κατάσταση σθένους σε υδατικό διάλυμα την τρισθενή (Am^{3+}), και για το λόγο αυτό δημιουργεί αδιάλυτα ιζήματα $\text{Am}(\text{OH})_3$, AmF_3 και $\text{Am}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$.

Η τετρασθενής του κατάσταση παρατηρείται κυρίως στη μορφή στερεού οξειδίου AmO_2 , προϊόν της πυρολυτικής αποσύνθεσης είτε του $\text{Am}(\text{NO}_3)_3$ ή του $\text{Am}(\text{C}_2\text{O}_4)_3$. Οι πεντασθενείς και εξασθενείς καταστάσεις του (Am^{5+} , Am^{6+}) δημιουργούνται οξειδώνοντας το Am^{3+} με NaClO σε ένα διάλυμα $2\text{M Na}_2\text{CO}_3$ στους 90°C . Τα Am^{5+} , Am^{6+} γρήγορα διαλύονται σε υδατικό διάλυμα από τα προϊόντα ραδιολυτικής αποσύνθεσης που δημιουργούνται μέσα στο ίδιο το διάλυμα, ως αποτέλεσμα του ιονισμού που προκαλείται από την εκπομπή των α -σωματιδίων του ^{241}Am .

2.3.1 Παραγωγή του ^{241}Am

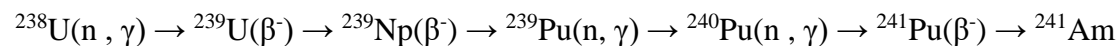
Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, το ^{241}Am αποτελεί προϊόν με ζήτηση, τόσο λόγω της χρήσης του σε διάφορες εφαρμογές όσο και για ερευνητικούς σκοπούς.

Σήμερα, το ^{241}Am παράγεται κατά κύριο λόγο σε υψηλής ροής πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε ποσότητες πολλών γραμμαρίων, μέσω διαδοχικών συλλήψεων νετρονίων στο ^{239}Pu , σύμφωνα με την παρακάτω αλυσίδα αντιδράσεων:



Το ^{241}Pu καταλήγει στο ^{241}Am με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.3 (Strain and Leddicotte 1962).

Ακόμα, μπορεί να συλλεχθεί από τα πυρηνικά απόβλητα πυρηνικών αντιδραστήρων, μέσω ειδικών διαδικασιών επανεπεξεργασίας τους, αφού παράγεται με διαδοχικές συλλήψεις νετρονίων, ξεκινώντας από το ^{238}U (Hou and Roos 2008):



2.3.2 Χρήσεις του Am-241

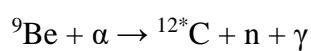
Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, το ^{241}Am βρίσκει χρήση σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.3.2.1 Ραδιογραφία και μετρήσεις πυκνότητας

Οι χαμηλής ενέργειας ακτίνες γ (59.54 keV) που συνοδεύουν την α -διάσπαση του ^{241}Am είναι ιδανικές για ραδιογραφικές μετρήσεις ή μετρήσεις πυκνότητας είτε σε ανθρώπους είτε σε αντικείμενα και είναι ταυτόχρονα τόσο χαμηλής ενέργειας που μπορούν να θωρακιστούν με σχετικά απλό τρόπο. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό στοιχείων υψηλού ατομικού αριθμού όπως είναι το πλουτώνιο (Pu) και το ουράνιο (U) μέσω μετρήσεων απορρόφησης (Strain and Leddicotte 1962).

2.3.2.2 Παραγωγή νετρονίων

Η ενέργεια των 5485.56 keV των άλφα σωματιδίων είναι ιδανική ως πηγή ενέργειας ενεργοποίησης σε αντιδράσεις (α, n), για την παραγωγή νετρονίων. Συγκεκριμένα, οξείδια του ^{241}Am με Be δημιουργούν ιδιαίτερα αποτελεσματικές πηγές νετρονίων, στις οποίες το ^{241}Am δρα ως πηγή α -σωματιδίων και το Be παράγει νετρόνια λόγω της μεγάλης ενεργής διατομής του για την (α, n) πυρηνική αντίδραση:

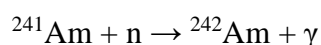


${}^{12*}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ (stable) όπου το ${}^{12*}\text{C}$ αποδιεγείρεται εκπέμποντας γ -ακτινοβολία με ενέργειες 3.2, 3.6 και 4.5 MeV.

Η ίδια αντίδραση των άλφα σωματιδίων με το Be βρίσκει εφαρμογή, εκτός από την παραγωγή νετρονίων, και στην ανίχνευση αιωρούμενων σωματιδίων Be στην ατμόσφαιρα από υψηλής ευαισθησίας, ασφαλείς και συνεχώς σε λειτουργία διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούν πηγές α -σωματιδίων υψηλής ειδικής ραδιενέργειας από ^{241}Am (Strain and Leddicotte 1962).

2.3.2.3 Παραγωγή άλλων στοιχείων

Το ^{241}Am μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων υπερουράνιων στοιχείων και μετακτινιδών. Για παράδειγμα, ο βομβαρδισμός του ^{241}Am με νετρόνια δίνει ^{242}Am :



Το ^{242}Am με τη σειρά του διασπάται σε ποσοστό 82.7% σε ^{242}Cm (Κιούριο) και σε ποσοστό 17.3% σε ^{242}Pu . Ακόμα, μέσα σε πυρηνικό αντιδραστήρα, μέσω σύλληψης νετρονίου, το ^{242}Am μετατρέπεται σε ^{243}Am , το οποίο ακολουθώντας τον ίδιο μηχανισμό μετατρέπεται σε ^{244}Am , το οποίο διασπάται μέσω β-διάσπασης σε ^{244}Cm . Επιπλέον, ο βομβαρδισμός του ^{241}Am με ιόντα ^{12}C ή ^{22}Ne παράγει το ισότοπο ^{247}Es (Αϊνστάινιο) ή το ^{260}Db (Ντούμπνιο) αντίστοιχα (Binder 1999).

2.3.2.4 Εφαρμογή σε ανιχνευτές καπνού

Για πολλά χρόνια γίνεται χρήση ανιχνευτών καπνού βασισμένων στη λογική θαλάμων ιονισμού. Οι περισσότεροι από αυτούς τους ανιχνευτές περιέχουν μια μικρή ποσότητα ^{241}Am (περίπου 0.25μg) στη μορφή διοξειδίου του Αμερικίου (AmO_2). Αυτή η μικρή ποσότητα ^{241}Am αντιστοιχεί σε 30 kBq ραδιενεργού υλικού. Η α-ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ^{241}Am ιονίζει το οξυγόνο και το άζωτο του αέρα στο θάλαμο ανίχνευσης. Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας μπαταρίας δημιουργεί μια μικρή ροή ρεύματος. Τα σωματίδια του καπνού (ή αεροζόλ ή υδρατμοί από το λουτρό) που εισέρχονται στο θάλαμο απορροφούν τα α-σωματίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ιονισμού του αέρα και επομένως τη μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος στο θάλαμο. Η μείωση αυτή του ηλεκτρικού ρεύματος ανιχνεύεται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και ο συναγερμός ενεργοποιείται. Το σύνολο των α-σωματιδίων που εκπέμπονται από το ^{241}Am απορροφούνται μέσα στο θάλαμο ανίχνευσης, ενώ η χαμηλής ενέργειας γ-ακτινοβολία διαφεύγει (Canadian Nuclear Society 2016).

2.3.2.5 Πιθανή χρήση σε αντιδραστήρες σχάσης

Εξετάζεται η πιθανή χρήση του ^{242}Am , το οποίο παράγεται μέσω αντίδρασης σύλληψης νετρονίου από το ^{241}Am , για τη δημιουργία ενός αντιδραστήρα σχάσης με πυρήνα αερίου. Λόγω της μεγάλης του ενεργού διατομής δίνει τη δυνατότητα επίτευξης της κάθε φορά ζητούμενης ισχύς με μικρότερων διαστάσεων αντιδραστήρα σε σύγκριση με αντιδραστήρα που χρησιμοποιεί ουράνιο. Ο σκοπός δημιουργίας του συγκεκριμένου πυρηνικού αντιδραστήρα είναι να χρησιμοποιηθεί σε διαστημικό όχημα το οποίο πιθανόν θα χρησιμοποιηθεί στις επερχόμενες φιλόδοξες αποστολές εξερεύνησης του πλανήτη Άρη (Kammash et. al. 1993).

Επιπροσθέτως, έρευνες δείχνουν πως εκτός από χρήση σε διαστημική πρόωση, το διοξείδιο του αμερικίου (AmO_2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο σε αντιδραστήρες νέας γενιάς, γι' αυτό ενθαρρύνεται η εξαγωγή του από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα (Lu et.al. 2012).

2.3.2.6 Εφαρμογή σε αλεξικέραυνα

Προς τα τέλη του 20ου αιώνα υπήρξε σημαντική πώληση ραδιενεργών αλεξικέραυνων τα οποία είχαν στην κεφαλή τους μία ή περισσότερες πηγές ^{241}Am οι οποίες ιόνιζαν τον αέρα γύρω τους, αυξάνοντας την έλξη των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων. Η συνεισφορά τους όμως στην απόδοση του αλεξικέραυνου ήταν συζητήσιμη και σε συνδυασμό με το διαρκή φόβο για διάβρωση και διασποράς του ^{241}Am στο περιβάλλοντα χώρο έχουν αποσυρθεί από τη χρήση (Potiens Jr. et.al. 2013).

2.3.2.7 Άλλες εφαρμογές

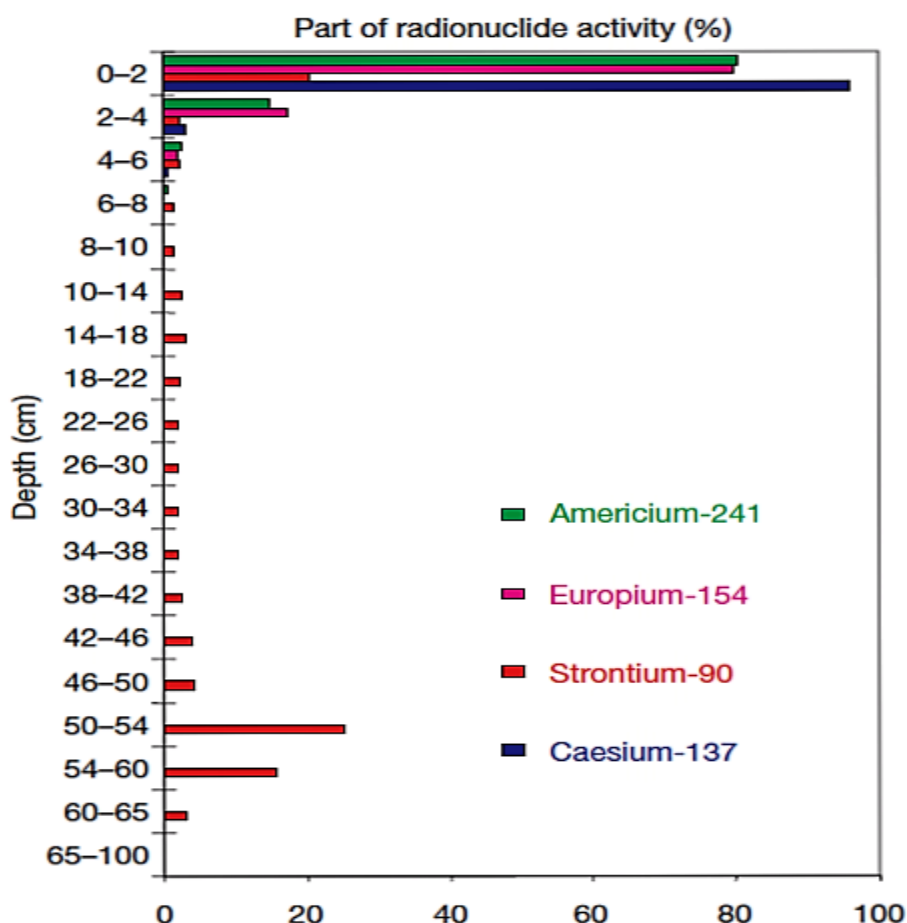
Το ^{241}Am βρίσκει επίσης εφαρμογές ως ιχνηλάτης σε ωκεανογραφικές και περιβαλλοντικές μελέτες, σε μελέτες παρακολούθησης των περιβαλλοντικών αλλαγών και σε μελέτες ιζηματογένεσης (Hou and Roos 2008). Επιπροσθέτως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αν ξεφύγει από την εποπτεία των οργανισμών που ευθύνονται για τη φύλαξη και προστασία του, για την κατασκευή βρώμικων βομβών (EPA 2012).

2.3.3 Το ^{241}Am στο περιβάλλον

Δεδομένου ότι το ^{241}Am είναι ένα τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο, στο περιβάλλον μπορεί να βρεθεί μόνο ως αποτέλεσμα πυρηνικών ή ραδιολογικών ατυχημάτων, εκκενώσεων πυρηνικών εγκαταστάσεων αλλά και λόγω πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα (Ristic et al. 2000). Η ανίχνευσή του μπορεί να γίνει μέσω άλφα ή γάμμα φασματοσκοπίας, με χρήση ραδιοχημείας ή χωρίς, ανάλογα με τις δυνατότητες και τον εξοπλισμό του κάθε εργαστηρίου, την ποσότητα του δείγματος και την ακρίβεια που χρειάζεται να επιτευχθεί (Byrne and Komosa 1993).

Καθώς η μόνη σταθερή κατάσταση οξειδωσης του Am στο περιβάλλον είναι η Am^{3+} , δεν θεωρείται ένα ενεργά οξειδοαναγωγικό ραδιενεργό ισότοπο. Σε διάλυμα, η υψηλή

πυκνότητα φορτίου του Am^{3+} προκαλεί την υδρόλυση του νερού δημιουργώντας ένα ίζημα ($\text{Am}(\text{OH})_3$), με αποτέλεσμα να μειώνει την κινητικότητά του σε υδάτινα περιβάλλοντα (Ray 2013). Η ιδιότητα του αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι από τη στιγμή της εναπόθεσής του στο επιφανειακό χώμα, αν δεν έρθει αντιμέτωπο με ακραίες για την περιοχή καιρικές συνθήκες ή γεωλογικές αλλαγές, δε θα παρουσιάσει ιδιαίτερη μεταβολή στη συγκέντρωσή του με το χρόνο, με εξαίρεση φυσικά τη ραδιενεργό του διάσπαση. Επιπλέον, δεν θα παρουσιάσει ιδιαίτερη κινητικότητα κατά βάθος του χώματος, ούτε θα έχει έντονο μεταναστευτικό χαρακτήρα. Στο Σχήμα 2-4 δίνονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας στην κατά βάθος κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl όπου φαίνεται ότι το κύριο μέρος του ^{241}Am που εναποτέθηκε παραμένει στο επιφανειακό στρώμα του χώματος (ΙΑΕΑ 2006).



Σχήμα 2-4: Κατά βάθος κατανομή ραδιενεργών ισοτόπων από το Chernobyl, στην περιοχή Gomel της Λευκορωσίας, όπως αυτή μετρήθηκε το 1996

2.3.3.1 Το ατύχημα του Chernobyl

Στις 26 Απριλίου του 1986, έλαβε χώρα έκρηξη σε έναν από τους αντιδραστήρες της πυρηνικής εγκατάστασης του Chernobyl, που απέχει 100 χιλιόμετρα από το Κίεβο της Ουκρανίας. Την έκρηξη ακολούθησε πυρκαγιά στον πυρηνικό αντιδραστήρα που κράτησε 10 ημέρες, με αποτέλεσμα την έκλυση τεράστιων ποσοτήτων ραδιενεργού υλικού στην ατμόσφαιρα με βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες συνέπειες στους ανθρώπους και στο περιβάλλον.

Η συνολική έκλυση ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον ήταν περίπου 14 EBq ($1\text{EBq} = 10^{18}\text{Bq}$), στα οποία περιλαμβάνονται 1.8 EBq από ^{131}I , 0.085 EBq από ^{137}Cs και άλλα ραδιενεργά ισότοπα του καισίου, 0.01 EBq από ^{90}Sr και 0.003 EBq από ραδιενεργά ισότοπα του πλουτωνίου εκ των οποίων το ^{241}Pu είναι το μητρικό του ^{241}Am . Αναλυτικά, η συνολική έκλυση ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον φαίνεται στον Πίνακα 2-1.

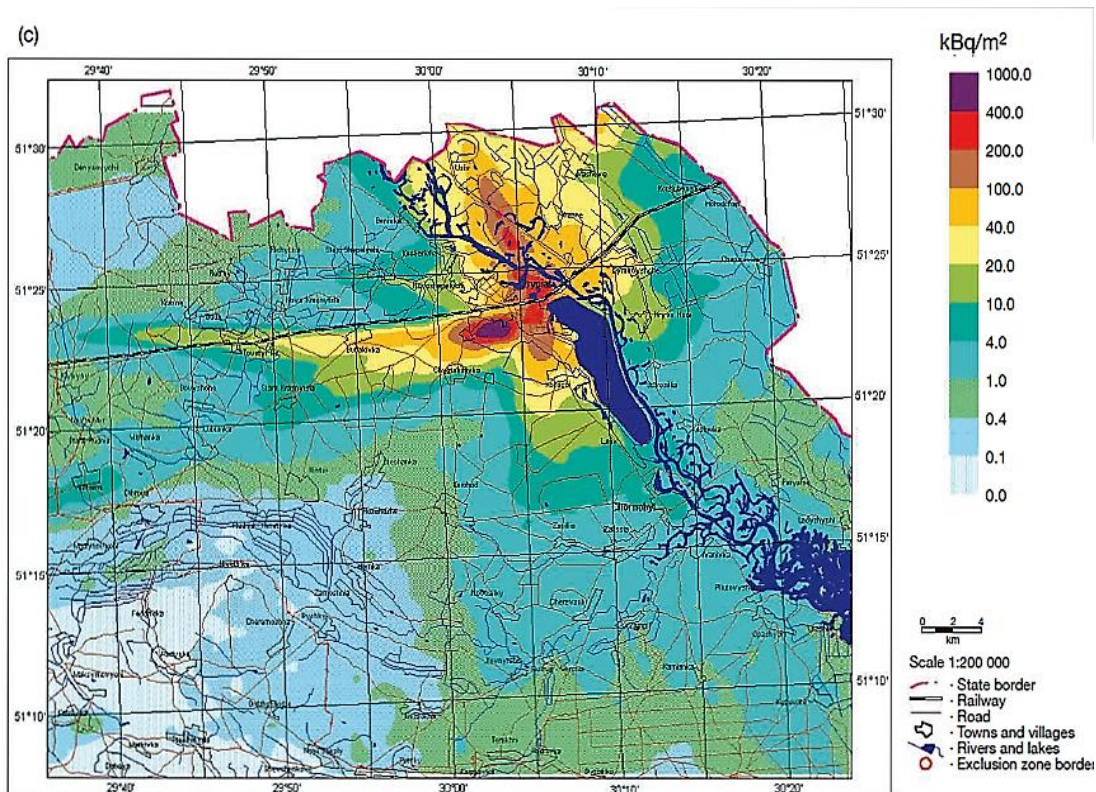
Μετά την αρχική περίοδο του ατυχήματος, το ραδιενεργό ισότοπο με τη μεγαλύτερη ραδιολογική σημασία κατέστη το ^{137}Cs , με το ^{90}Sr να είναι λιγότερο σημαντικό. Για τα πρώτα χρόνια ήταν επίσης σημαντικό και το ^{134}Cs . Με το πέρασμα όμως του χρόνου (εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρόνια μετά το ατύχημα), τα μόνα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία θα είναι σημαντικά θα είναι τα ισότοπα του πλουτωνίου και το ^{241}Am (IAEA, 2006). Συγκεκριμένα για το ^{241}Am η συγκέντρωσή του στο περιβάλλον θα συνεχίσει να αυξάνεται σταδιακά λόγω της παραγωγής του από τη διάσπαση του ^{241}Pu , φτάνοντας τη μέγιστη ενεργότητά του στα μέσα του 21^{ου} αιώνα (περί το 2060) η οποία θα είναι περίπου 40 φορές μεγαλύτερη από την ποσότητα καθαρού ^{241}Am που εκλύθηκε από το ατύχημα. (Hou and Roos 2008, Ivanov et.al. 1994).

Ακολουθώντας το νέφος ραδιενεργής σκόνης που εκλύθηκε από τον αντιδραστήρα του Chernobyl, μαζί με τα υπόλοιπα ραδιενεργά ισότοπα, το ^{241}Am εναποτέθηκε σε διάφορες χώρες εκτός της Ουκρανίας, όπως η Πολωνία (Mietelski and Was 1997), η Φιλανδία (Aarkrog 1987), η Λευκορωσία (Veen J. et al. 1986), η Αγγλία (H.M. Stationery Office 1986), και η Ελλάδα (Σιμόπουλος 1987, Simopoulos and Angelopoulos 1991) και ανιχνεύθηκε, αν και σε μικρές ποσότητες και σε τρόφιμα αλλά και σε αεροπλάνα που έτυχε να πετάξουν εκείνη την περίοδο κοντά στο νέφος.

Σε αντίθεση με τα ισότοπα του καυσίου και το στρόντιο, τα επίπεδα εναπόθεσης του ^{241}Am στο χώμα ήταν πολύ μικρά και δεν ήταν διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά και τις καλλιέργειες, οπότε δεν αποτέλεσαν ιδιαίτερο πρόβλημα στη γεωργία. Επιπλέον, η συνεισφορά του ^{241}Am , που εκλύθηκε στο περιβάλλον ως αποτέλεσμα της καταστροφής του αντιδραστήρα, στη δόση που λαμβάνει ο άνθρωπος θεωρείται αμελητέα (ΙΑΕΑ 2006). Στο Σχήμα 2-5 δίνεται η διασπορά του ^{241}Am στο χώμα στη ζώνη αποκλεισμού του Chernobyl.

	Χρόνος Ημιζωής	Ραδιενέργεια (PBq)
<i>Αδρανή Αέρια</i>		
Κρυπτό-85	10.72 a	33
Ξένο-133	5.25 d	6500
<i>Πτητικά Στοιχεία</i>		
Τελούριο-129m	33.6 d	240
Τελούριο-132	3.26 d	~1150
Ιώδιο-131	8.04 d	~1760
Ιώδιο-133	20.8 h	910
Καίσιο-134	2.06 a	~47 ^b
Καίσιο-136	13.1 d	36
Καίσιο-137	30.0 a	~85
<i>Στοιχεία Μέτριας Πτητικότητας</i>		
Στρόντιο-89	50.5 d	~115
Στρόντιο-90	29.12 a	~10
Ρουθήνιο-103	39.3 d	>168
Ρουθήνιο-106	368 d	>73
Βάριο-140	12.7 d	240
<i>Πυρίμαχα Στοιχεία (συμπεριλαμβανομένων σωματιδίων καυσίμου)</i>		
Ζιρκόνιο-95	64.0 d	84
Μολυβδένιο-99	2.75 d	>72
Δημήτριο-141	32.5 d	84
Δημήτριο-144	284 d	~50
Ποσειδώνιο-239	2.35 d	400
Πλουτώνιο-238	87.74 a	0.015
Πλουτώνιο-239	24065 a	0.013
Πλουτώνιο -240	6537 a	0.018
Πλουτώνιο -241	14.4 a	~2.6
Πλουτώνιο -242	376000 a	0.00004
Κιούριο-242	18.1 a	~0.4

Πίνακας 2-1 : Αναθεωρημένη εκτίμηση των κυρίαρχων ραδιενεργών ισωτόπων που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια του ατυχήματος του Chernobyl (ΙΑΕΑ 2006)



Σχήμα 2-5 : Το ^{241}Am στα εδάφη της ζώνης αποκλεισμού του Chernobyl (IAEA 2006)

2.3.4 Το Am-241 και οι επιπτώσεις του στον ανθρώπινο οργανισμό

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.3.3, η συνεισφορά της δόσης στον ανθρώπινο οργανισμό από το ^{241}Am που εκλύθηκε στο περιβάλλον λόγω του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ θεωρείται αμελητέα. Παρ' όλα αυτά, από τη στιγμή που το συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητα, μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για τον άνθρωπο αν εκλυθεί σε ικανή ποσότητα εξαιτίας κάποιου ραδιολογικού ατυχήματος.

Η ενέργεια των φωτονίων που εκλύονται κατά τη διάσπαση του ^{241}Am (59.54 keV) είναι πολύ μικρή για να αποτελέσει κίνδυνο για τον άνθρωπο, όμως η ενέργεια των ασωματιδίων είναι πολύ υψηλή (5485.56 keV και 5442.80 keV) και σε συνδυασμό με την υψηλή του ραδιοτοξικότητα αποτελεί κίνδυνο για τον άνθρωπο σε περίπτωση που εισέλθει μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό, το οποίο μπορεί να συμβεί κυρίως μέσω της αναπνευστικής οδού. Από τη στιγμή που εισέλθει έχει την τάση να εναποτίθεται στην επιφάνεια των οστών και να ακτινοβολεί τα οστεοκύτταρα και τον ερυθρό

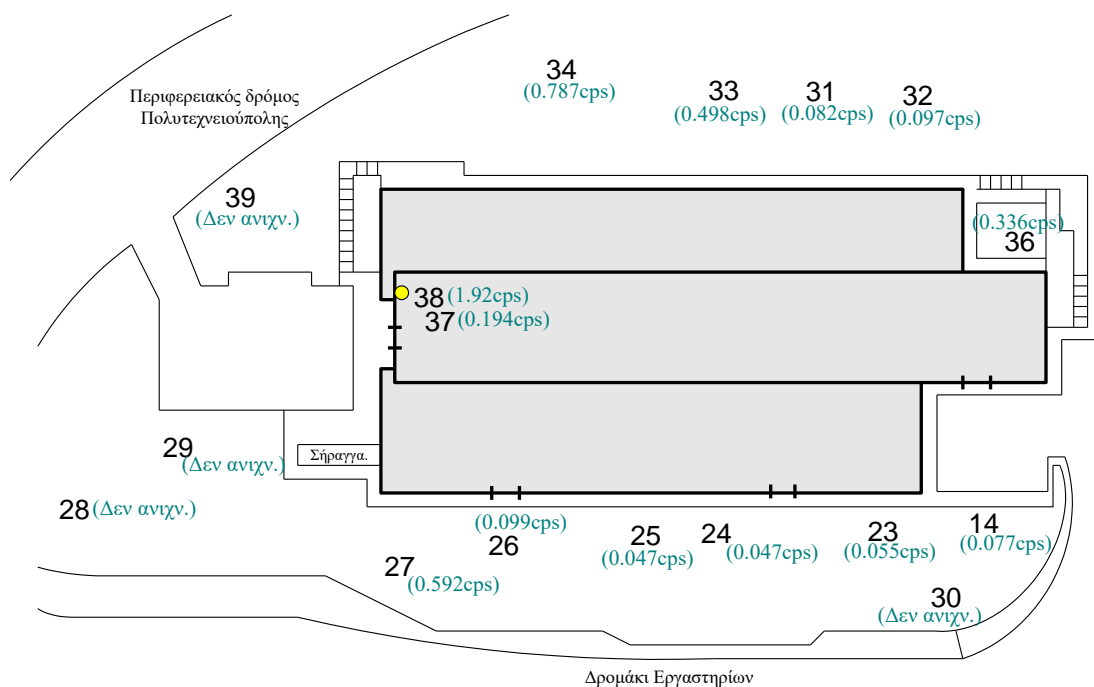
μυελό των οστών. Η ανίχνευσή του στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται με την τεχνική Partial Body Counting κυρίως στο κρανίο και στα γόνατα, λόγω της λεπτής επιφάνειας ιστού που τα περιβάλλει ώστε να μειωθεί ο παράγοντας απορρόφησης για τα φωτόνια των 59.54 keV (Nogueira et al. 2015).



Σχήμα 2-6 : Σύστημα Partial Body Counting (Nogueira et al. 2015)

2.3.5 Το Am-241 στο Ε.Μ.Π.

Κατά τη διάρκεια μιας σειράς μετρήσεων ρουτίνας που έγιναν από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας το έτος 2003 στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, διαπιστώθηκε τυχαία επιφανειακή ρύπανση του εδάφους από ^{241}Am . Η ρύπανση αυτή εντοπίστηκε συγκεκριμένα στον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου ANYM της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.. Λεπτομερέστερη έρευνα προσδιόρισε την πηγή της ρύπανσης στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου, όπου δύο αλεξικέραυνα με ^{241}Am στην κορυφή τους είχαν διαβρωθεί με αποτέλεσμα το ^{241}Am να διαρρέει από αυτά στο έδαφος.



Σχήμα 2-7: Χάρτης των σημείων μετρήσεων και δειγματοληψίας γύρω από το κτίριο ANYM (Karforoulou et al. 2004)

Η διαρροή είχε εξαπλωθεί στην οροφή του κτιρίου και μέσω του συστήματος αποστράγγισης ομβρίων κατέληγε στο έδαφος γύρω από το κτίριο. Τα αλεξικέρανα αφαιρέθηκαν από την οροφή του κτιρίου, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην οροφή του κτιρίου και στο έδαφος έδειξαν ότι η συγκεκριμένη ρύπανση δεν αποτελεί κίνδυνο για την υγεία των εργαζομένων και του κοινού (Karforoulou et al. 2004).

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ επελέγη να γίνει δειγματοληψία εδάφους σε δύο γειτονικά σημεία του περιβάλλοντος χώρου του κτηρίου ANYM προκειμένου να μελετηθεί η κινητική του ^{241}Am στο έδαφος.

2.3.5.1 Τα αλεξικέρανα με Am-241

Η χρήση του ^{241}Am στην κεφαλή των αλεξικέρανων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης τους ήταν μία από τις εφαρμογές του συγκεκριμένου ραδιενεργού ισότοπου, η οποία όμως εγκαταλείφθηκε στην πορεία, με την κατασκευή και εγκατάσταση αυτού του είδους αλεξικέρανων να σταματά περί τα μέσα της

δεκαετίας του 1980 και στη συνέχεια να ξεκινά η διαδικασία απομάκρυνσής τους και αφαίρεσης του ^{241}Am από αυτά. Η διαδικασία αφαίρεσης του ^{241}Am γίνεται κυρίως με τη χρήση laser, καθώς η χημική απομάκρυνση δεν είναι αποδοτική και παράγει μεγάλη ποσότητα ραδιενεργών αποβλήτων (Potiens Jr et al. 2013). Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα αλεξικέραυνα απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες ^{241}Am στην περίπτωση διάβρωσής τους, εκτιμάται ότι ακόμα και αν απορριφθούν ως κοινά απορρίμματα ο κίνδυνος για ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρός (Marumo et al. 2008).

Πρέπει να αναφερθεί ότι, όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής τους, οι πηγές ^{241}Am παράγονταν με απόθεση ενός λεπτού στρώματος από οξείδιο του αμερικίου (με μέση ραδιενέργεια $^{241}\text{Am} \sim 7 \text{ MBq}$) πάνω σε έλασμα από ανοξείδωτο ατσάλι το οποίο καλύπτεται από μια λεπτή στρώση κράματος χρυσού ώστε να αποφευχθεί η διασπορά του. Η στρώση αυτή ήταν αρκετά λεπτή ώστε να επιτρέπει τη διέλευση των ασωματιδίων αλλά και από ευγενές μέταλλο ανθεκτικό στη διάβρωση προκαλούμενη από το περιβάλλον (Potiens Jr. et al. 2013). Με την πάροδο του χρόνου και τη φθορά της επικάλυψης υπό την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών υπήρχε η πιθανότητα το ραδιενεργό υλικό που περιείχαν να διασπαρεί στο περιβάλλον, γεγονός που αποτέλεσε την κύρια αιτία της απόσυρσής τους.

2.4 Συλλογή και επεξεργασία δειγμάτων

Για τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του εδάφους σε μια περιοχή απαιτείται η λήψη δειγμάτων χώματος. Τα σημεία από τα οποία γίνεται η λήψη καθώς και η ποσότητα του κάθε δείγματος επιλέγονται κατάλληλα, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του πειράματος, ώστε μετά από την επεξεργασία του να προσφέρει ικανή ποσότητα υλικού για ανάλυση. Ακόμα, η διαδικασία της δειγματοληψίας πρέπει να είναι κατά το δυνατό τυποποιημένη για λόγους επαναληψιμότητας του πειράματος και για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που εισάγεται στη μέτρηση.

2.4.1 Μέθοδοι δειγματοληψίας χρώματος

Οι μέθοδοι δειγματοληψίας εδάφους είναι αρκετές και ποικίλουν ανάλογα με το αριθμό των δειγμάτων που πρέπει να συλλεχθούν, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε πεδίου δειγματοληψίας και τις απαιτήσεις του κάθε πειράματος. Οι βασικότερες μέθοδοι δειγματοληψίας είναι (Παλαμάρα 2010):

- *Απλή τυχαία δειγματοληψία (Simple random sampling)*: Λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από τυχαίες θέσεις του πεδίου δειγματοληψίας, θεωρώντας ότι το πεδίο είναι σε όλη την έκτασή του ομοιόμορφο.
- *Στρωματοποιημένη δειγματοληψία (Stratified random sampling)*: Το πεδίο δειγματοληψίας χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες που έχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Από κάθε ζώνη λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από θέσεις που επιλέγονται κατά τυχαίο τρόπο.
- *Συστηματική δειγματοληψία (Systematic sampling)*: Το πεδίο δειγματοληψίας χωρίζεται σε πλέγμα ορισμένων διαστάσεων και συλλέγεται ένα δείγμα από κάθε τμήμα του πλέγματος.
- *Γενική χωρική δειγματοληψία (General spatial sampling)*: Θεωρούνται δύο νοητοί κάθετοι μεταξύ τους άξονες στο πεδίο δειγματοληψίας. Λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δειγμάτων από θέσεις που βρίσκονται πάνω στους νοητούς άξονες κατά ισαπέχοντα διαστήματα.

Μελέτες δείχνουν ότι οι διάφορες μέθοδοι δειγματοληψίας, ακόμα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση επηρεάζει σημαντικά την αβεβαιότητα της μέτρησης (Παλαμάρα 2010).

2.4.2 Η μέθοδος δειγματοληψίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Για τη συλλογή δειγμάτων επιφανειακού χρώματος στα πλαίσια της ΔΕ ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- επιλογή του σημείου ή των σημείων δειγματοληψίας
- με μικρή τσουγκράνα ή και σκαλιστήρι απομακρύνεται προσεκτικά η επιφανειακή βλάστηση και οι μεγάλες πέτρες χωρίς να διαταραχθεί το επιφανειακό στρώμα χρώματος.

- με τη χρήση φτυαριού αφαιρούνται τα πρώτα 1 έως 2 cm του χώματος και συσκευάζονται προσωρινά σε σακούλες για τη μεταφορά τους στο εργαστήριο

2.4.3 Μέθοδοι επεξεργασίας

Από τη στιγμή που τα δείγματα συλλεχθούν και μεταφερθούν στο εργαστήριο ξεκινά η διαδικασία της επεξεργασίας τους. Τα βασικότερα βήματα αυτής της επεξεργασίας δίνονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.4.3.1 Ξήρανση δειγμάτων

Η διαδικασία της ξήρανσης θεωρείται απαραίτητη, ως πρώτο βήμα επεξεργασίας δειγμάτων χώματος που πρόκειται να υποστούν γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων κάθε ισότοπου γίνεται εν τέλει ανά μονάδα μάζας ξηρού υλικού, ώστε τα δείγματα που συλλέγονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας, αλλά κατά διαφορετικά χρονικά διαστήματα, να μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμα. Επιπροσθέτως, μέσω της ξήρανσης επιτυγχάνεται η δημιουργία δειγμάτων με υψηλότερη συγκέντρωση ραδιενέργεια ανά μονάδα μάζας υλικού (επειδή έχει εξατμιστεί μέρος της υγρασίας), διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τη φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας.

Επίσης, η διαδικασία της ξήρανσης θεωρείται αναγκαία, λόγω συγκεκριμένων φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και ειδικότερα αυτό της ανταπορρόφησης, τα οποία επηρεάζονται από τη χημική σύσταση του δείγματος και από το ποσοστό υγρασίας που περιέχει. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τους συντελεστές διόρθωσης της ανταπορρόφησης που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, αυτοί είναι υπολογισμένοι για ένα ποσοστό υγρασίας που δεν υπερβαίνει το 5% και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για δείγματα με πολύ υψηλότερες τιμές της υγρασίας.

Η ξήρανση δειγμάτων χώματος πραγματοποιείται κυρίως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί όμως να υλοποιηθεί και με θέρμανση σε φούρνο. Επομένως, οι θερμοκρασίες θέρμανσης κυμαίνονται από 25 ως 120°C, όπως αναλόγως ποικίλλει και η διάρκεια της θέρμανσης, από μία ώρα ως και μία ολόκληρη ημέρα. Ενδεικτικά (Παλαμάρα 2010):

- Στον οδηγό των Eurachem/EUROLAB/CITAC/Nordtest/AMC προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60°C, για όλη τη νύχτα (Ramsey 2007).
- Στο εγχειρίδιο MARLAP, το οποίο εκδίδεται από την Environmental Protection Agency των ΗΠΑ, προτείνεται η θέρμανση σε φούρνο στους 60-110°C (EPA 2004).
- Στο εγχειρίδιο HASL-300, το οποίο εκδίδεται από το Department of Energy των ΗΠΑ, προτείνεται θέρμανση σε φούρνο στους 100°C, για όλη τη νύχτα (DOE 1997).
- Η ΙΑΕΑ προτείνει τη θέρμανση σε φούρνο στους 50-105°C (ΙΑΕΑ 1989).
- Τέλος, στο πρότυπο ASTM C999-05 αναφέρεται η θέρμανση σε φούρνο στους 110°C για 24 hr ή περισσότερο (ASTM 2009).

2.4.3.2 Διαχωρισμός σε μικρότερα δείγματα

Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ανάλυση ενός υλικού που διατίθεται σε μεγάλη ποσότητα για τον προσδιορισμό των φυσικών ή/και των χημικών ιδιοτήτων του. Η ανάλυση τέτοιων μεγάλων ποσοτήτων υλικού μπορεί να μην είναι πρακτικά δυνατή, ή να απαιτεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και τεράστιο κόστος. Για το λόγο αυτό λαμβάνονται από τη συνολική ποσότητα πολύ μικρότερα δείγματα, συνήθως της τάξης των κιλών ή γραμμαρίων, ακολουθώντας τυποποιημένες διαδικασίες, έτσι ώστε αυτά να είναι αντιπροσωπευτικά της αρχικής ποσότητας. Επίσης, αρκετές φορές απαιτείται η υποδιαίρεση των δειγμάτων που λαμβάνει ένα εργαστήριο για να γίνουν μετρήσεις επαναληψιμότητας ή ελέγχου της ομοιογένειας του δείγματος. Συνοπτικά τέσσερις από τις κυριότερες μεθόδους υποδιαίρεσης ενός εργαστηριακού δείγματος είναι (Πέππας 2008):

- Μέθοδος φτυαρίσματος (scoop sampling)
- Μέθοδος του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα (cone and quartering)
- Μέθοδος του κεκλιμένου αγωγού ανάμιξης (Chute Riffing)
- Μέθοδος του περιστροφικού διαχωρισμού (Rotary sampling)

Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κώνου και της υποδιαίρεσης (cone and quartering) η οποία και θα αναλυθεί περαιτέρω.

Η μέθοδος του κώνου και της υποδιαίρεσης στα τέσσερα είναι απλή στην υλοποίηση της, οικονομική αλλά με μικρή ακρίβεια σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τα εργαλεία που απαιτούνται για την υλοποίηση της μεθόδου είναι τα παρακάτω:

- Φύλλα από αδιαπέραστο υλικό όπως για παράδειγμα στιλβωμένο ατσάλι ή στιλβωμένο χαρτί. Το υλικό που θα επιλεγεί δεν πρέπει να αντιδρά με το δείγμα (π.χ. να μην προσβάλλεται από υγρασία).
- Επίπεδης βάσης φτυάρια με κάθετες πλευρές και γωνίες διαφόρων μεγεθών, κατασκευασμένα από κατάλληλο υλικό όπως για παράδειγμα ανοξείδωτο ατσάλι ή κατάλληλο πλαστικό με μια αιχμηρή άκρη.
- Συσκευή διαχωρισμού στα τέσσερα: Ένα λεπτός μεταλλικός ή ξύλινος σταυρός, ο οποίος αποτελείται από 4 λεπίδες, προσαρμοσμένες στο κέντρο σε ορθές γωνίες. Οι λεπίδες πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο βαθιές όσο το μέγιστο ύψος του κώνου από σκόνη. Ανάλογα με την ποσότητα που διαχωρίζεται μπορεί να απαιτείται η κατασκευή διαφορετικού μεγέθους σταυρών.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η τοποθέτηση του δείγματος σε σχήμα κώνου πάνω στα φύλλα από αδιαπέραστο υλικό είτε με χρήση φτυαριών είτε με σταδιακή έγχυσή του από δοχείο ή σακούλα και στη συνέχεια η πίεση, επί της κορυφής του κώνου που έχει σχηματιστεί, του μεταλλικού ή ξύλινου σταυρού έως ότου ακουμπήσει στην κάτω επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι 4 δείγματα που είναι όσο το δυνατόν ομογενή μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί σε κάθε ένα από τα δείγματα που προκύπτουν ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος δείγματος.

2.4.3.3 Κοσκίνισμα δειγμάτων

Η διαδικασία του κοσκίνισματος αποτελεί μία από τις πλέον συνηθισμένες μεθόδους επεξεργασίας του χώματος, ενώ η εφαρμογή της γίνεται για πολλούς και διαφορετικούς λόγους. Ο σημαντικότερος λόγος είναι ότι τα χονδρόκοκκα κλάσματα, που πιθανότατα να αποτελούνται από πέτρες και άλλα ξένα υλικά, αναμένεται να έχουν πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση ραδιενέργειας από τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα του χώματος, αλλοιώνοντας το αποτέλεσμα της μέτρησης.

2.4.3.4 Η μέθοδος της ξηρής κοσκίνισης

Η διαδικασία του κοσκινίσματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, γίνεται μέσω της συσκευής κοκκομετρικής ανάλυσης AS-200 Control, η οποία αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Συσκευή δόνησης με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά για όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις.
- Δύο μεταλλικές ράβδοι στήριξης των κόσκινων.
- Κόσκινα με διαφορετικά μεγέθη οπών, που κυμαίνονται από 45 μm έως 2 mm.
- Συλλέκτη βάσης που τοποθετείται στο κάτω μέρος της στοίβας των κόσκινων.
- Καπάκι που τοποθετείται στο κόσκινο κορυφής για να αποφευχθεί η απώλεια σκόνης.
- Δύο ασφάλειες για την ακινητοποίηση των κόσκινων και την ασφαλή λειτουργία της συσκευής.
- Βοηθητικές αλυσίδες που τοποθετούνται στο κόσκινο κορυφής με σκοπό τον καλύτερο διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος και το σπάσιμο πιθανών συσσωματωμάτων που έχουν δημιουργηθεί.

Η διαδικασία λειτουργίας της συσκευής γίνεται ως εξής (Πέππας 2008):

- Επιλέγονται τα κόσκινα που θα χρησιμοποιηθούν για το κοσκίνισμα.
- Τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο πάνω στη βάση δόνησης με φθίνουσα σειρά μεγέθους. Τροφοδοτείται η σκόνη στο κόσκινο κορυφής.
- Το καπάκι κατεβαίνει και ασφαλίζει. Στο σημείο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε το καπάκι να ασφαλίσει σωστά. Σε διαφορετική περίπτωση συσκευή δονείται έντονα, κάνοντας υπερβολικό θόρυβο και καταπονείται υπερβολικά δημιουργώντας αυλακώσεις στις μεταλλικές ράβδους στήριξης των κόσκινων. Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος βλάβης της συσκευής ή απώλειας του δείγματος.
- Επιλέγονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις για το κοσκίνισμα, είτε απευθείας από τον πίνακα ελέγχου είτε από τον υπολογιστή.
- Ξεκινάει η διαδικασία κοσκινίσματος.

- Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία συνιστάται αναμονή λίγων λεπτών ώστε να κατακαθίσει όλη η σκόνη και να μην υπάρχουν απώλειες κατά το άνοιγμα.
- Το καπάκι ασφαλείας απασφαλίζει και ανεβαίνει με αργές κινήσεις ώστε να μην προκληθεί φθορά στις ράβδους στήριξης.
- Στο τέλος της διαδικασίας κάθε κόσκινο αναποδογυρίζεται προσεκτικά σε ένα λεπτό χαρτί. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που έχουν προσκολληθεί στο κόσκινο αφαιρούνται με ένα μαλακό πινέλο και προστίθενται στην υπόλοιπη ποσότητα.

2.4.3.5 Η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης

Όταν η μέθοδος της ξηρής κοσκίνισης δεν μπορεί να παράγει ικανοποιητικού βαθμού διαχωρισμό του δείγματος τότε πρέπει να χρησιμοποιείται η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης. Κατά την υγρή κοσκίνιση, το δείγμα αναμειγνύεται με νερό (ή άλλο διαλύτη) πριν τοποθετηθεί στο κόσκινο, και τροφοδοτείται συνεχώς με νερό κατά τη διάρκεια της κοσκίνισης. Το νερό βοηθά στη διάσπαση συσσωματωμάτων που πιθανώς δημιουργούνται, αλλά και διευκολύνει την κίνηση των μικρής διαμέτρου σωματιδίων.

Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά και η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης, με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση ενός κλάσματος χώματος που παρουσίαζε απόκλιση από τις προβλεπόμενες τιμές συγκέντρωσης ραδιενέργειας.

Η διαφορά μεταξύ των διατάξεων υγρής και ξηρής κοσκίνισης εντοπίζεται:

- *στο καπάκι που τοποθετείται πάνω από το κόσκινο κορυφής, το οποίο στο κέντρο του έχει ενσωματωμένη διάταξη μέσω της οποίας δίνεται η δυνατότητα παροχής υγρού σε μορφή σταγόνων κατά τη διάρκεια της κοσκίνισης πάνω στο δείγμα που τοποθετήθηκε στο κόσκινο κορυφής. Η σύνδεση της παροχής υγρού γίνεται προσαρμόζοντας σε ειδική υποδοχή του καπακιού πλαστικό σωλήνα ή λάστιχο και είτε μηχανικά είτε χειροκίνητα κατευθύνοντας σε αυτό την επιθυμητή παροχή υγρού.*
- *στη βάση των κοσκίνων, η οποία έχει εσωτερικό ανισόπεδο πάτο με κλίση, με σκοπό την απομάκρυνση του υγρού δείγματος από τη διάταξη μέσω κατάλληλα τοποθετημένης οπής. Στην έξοδο της οπής προσαρμόζεται λάστιχο*

για καλύτερο χειρισμό και κατεύθυνση του υγρού δείγματος που συλλέγεται σε ογκομετρικούς σωλήνες.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (Retsch 2005):

- Το δείγμα προς κοσκίνιση αναμιγνύεται με νερό μέχρι να μη δημιουργούνται ιζήματα, και προαιρετικά μπορεί να προστεθεί επιφανειοδραστική ουσία ώστε να μειωθεί η επιφανειακή τάση και να υποβοηθηθεί το πέρασμα του δείγματος από τα κόσκινα
- Ύγρανση των κοσκίνων με νερό ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία κηλίδων δείγματος στα τοιχώματα των κοσκίνων και να υποβοηθηθεί η απορροή του δείγματος, και τοποθέτησή τους πάνω στη διάταξη κοσκινίσματος βάζοντας ανάμεσά τους ειδικούς μεταλλικούς δακτυλίους για την εκτόνωση της πίεσης, η αύξηση της οποίας μπορεί να προκαλέσει το κλείσιμο των οπών των κοσκίνων, κυρίως αυτών με οπές <100μm.
- Έγχυση του υγρού δείγματος στο κόσκινο κορυφής, προσεκτικά ώστε να μην υπάρξουν απώλειες.
- Προσεκτική τοποθέτηση του καπακιού για τους ίδιους λόγους με την ξηρή κοσκίνιση.
- Επιλογή των επιθυμητών ρυθμίσεων για το κοσκίνισμα.
- Έναρξη της διαδικασίας κοσκινίσματος.
- Έναρξη της παροχής του νερού.
- Παρατήρηση της διαδικασίας κοσκίνισης και τερματισμός της όταν το υγρό εξόδου από τη βάση της διάταξης είναι καθαρό.
- Κλείσιμο της παροχής νερού και της διάταξης κοσκινίσματος.
- Συλλογή των κλασμάτων από κάθε κόσκινο, τοποθέτησή τους σε ειδικό διηθητικό χαρτί και ξήρανσή τους σε φούρνο στους 105°C.
- Συλλογή και ξήρανση του μικρότερου κλάσματος από τους ογκομετρικούς σωλήνες όπου κατέληγε το υγρό από κόσκινο βάσης.

Επιπροσθέτως, σε περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοσίας σταθερής παροχής νερού, προτείνεται βάσει βιβλιογραφίας μια παροχή των 200ml/min ώστε να αποφεύγεται η απόφραξη των κοσκίνων (Wanogho et al. 1987). Για την παρούσα ΔΕ,

η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην παραπάνω διαδικασία που υποδεικνύεται από τη βιβλιογραφία, αλλά προσαρμόστηκε κατάλληλα στις συνθήκες και το διαθέσιμο εξοπλισμό του εργαστηρίου. Η αναλυτική διαδικασία που έλαβε χώρα παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.

2.4.3.6 Θραύση δειγμάτων

Πολλές φορές ένα δείγμα μπορεί να περιέχει μικρές πέτρες ή/και συσσωματώματα από μικρότερα σωματίδια. Για να διευκολύνεται λοιπόν η συσκευασία κυρίως των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων προηγείται η θραύση τους χρησιμοποιώντας ειδική συσκευή. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ η συσκευή που χρησιμοποιείται είναι η Retsch BB51, η οποία μπορεί να τεμαχίσει οποιοδήποτε σκληρό υλικό, με σκληρότητα μεγαλύτερη από 3 στην κλίμακα Mohs. Σε περίπτωση που το υλικό προς θραύση έχει σκληρότητα <3, υπάρχει περίπτωση δημιουργίας συσσωματωμάτων με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η λειτουργία της συσκευής. (Σάκκουλα 2014). Στην παρούσα ΔΕ η συσκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε για το σπάσιμο του χονδρόκοκκου κλάσματος των >2mm.

Οι συνιστώσες που αποτελούν τη συσκευή είναι:

- Χώρος άλεσης, υπό μορφή χοάνης, ο οποίος πλησιάζοντας το άκρο εξόδου στενεύει. Ο χώρος άλεσης, περιβάλλεται από ένα σταθερό μεταλλικό κέλυφος.
- Δύο βραχίονες θραύσης, ένας σταθερός και ένας κινητός, πάνω στους οποίους βρίσκονται τοποθετημένες σιαγόνες θραύσης που πραγματοποιούν τη σύνθλιψη του υλικού.
- Συρταρωτό δοχείο, χωρητικότητας περίπου 1000ml, στο οποίο συγκεντρώνεται το επεξεργασμένο υλικό.
- Οθόνη ένδειξης του ρυθμιζόμενου πλάτους σχισμής.

Για τη λειτουργία της συσκευής θραύσης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Απομακρύνονται οι σιαγόνες του σπαστήρα, γυρνώντας αριστερόστροφα, κατά δύο περιστροφές το χειροτροχό.
- Ξεκινά η συσκευή πατώντας το πλήκτρο Start.

- Εν συνεχεία, περιστρέφεται ο χειροτροχός προς τα δεξιά μέχρις ότου οι σιαγόνες έλθουν σε επαφή.
- Ρυθμίζεται το μέγιστο επιθυμητό πλάτος διακένου.
- Τροφοδοτείται το δείγμα χειροκίνητα σε διακριτές μικρές ποσότητες, προσεκτικά και ώστε κάθε νέα ποσότητα να χορηγείται μόνο μετά το πέρας θραύσης της προηγούμενης ώστε να αποφευχθεί το φράξιμο του μηχανήματος.
- Η λειτουργία της συσκευής τερματίζεται πατώντας το πλήκτρο Stop, καθώς και το πλήκτρο μηδενισμού της ένδειξης της οθόνης, έτσι ώστε η ένδειξη της οθόνης να ταυτίζεται με το άνοιγμα των σιαγόνων του σπαστήρα.

2.4.3.7 Συσκευασία και σφράγισμα δειγμάτων

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία του κοσκινίσματος, το δείγμα χώματος, όντας πλέον χωρισμένο σε κλάσματα, συσκευάζεται σε ειδικά πλαστικά κυλινδρικά δοχεία, συγκεκριμένων διαστάσεων ανάλογα με την επιθυμητή γεωμετρία δείγματος. Στη συνέχεια, τα δείγματα σφραγίζονται αεροστεγώς, ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή των αερίων ισοτόπων του ραδονίου και να αποκατασταθεί ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra και των βραχύβιων θυγατρικών του. Τα δείγματα αφήνονται για ένα χρονικό διάστημα περίπου 30 ημερών και στη συνέχεια αναλύονται με τη χρήση γ-φασματοσκοπίας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σφράγισμα των δειγμάτων περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

2.5 γ-φασματοσκοπική ανάλυση

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, η οποία τελικά οδηγεί σε εκτίμηση της ραδιενέργειας 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 η α-φασματοσκοπία:

- Η πλειοψηφία των ραδιενεργών ισότοπων 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.

2.5.1 Οι ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χώματος το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει στον εξοπλισμό τους ανιχνευτές HPGe, LEGe και XtRa οι οποίοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υπό μελέτη κάθε φορά ισότοπα. Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε ανιχνευτή. Για την παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής LEGe.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ανιχνευτών δίνονται παρακάτω, και στο παράρτημα Α παρατίθεται το πιστοποιητικό του ανιχνευτή LEGe.:

- *HPGe (High Purity Germanium detector)* ο οποίος είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ανιχνευτής Ge που τέθηκε σε λειτουργία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ το 1983. Ο ανιχνευτής έχει διάμετρο 55.3mm, ύψος 65mm και η σχετική απόδοσή του για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 33.8%. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρυοστάτη από Al και για το λόγο αυτό η απόδοσή του για φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι χαμηλή. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, όπως εκφράζεται από το FWHM είναι 0.85 keV για φωτόνια ενέργειας 122.06 keV, και 1.78keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV. Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 66.5:1.
- *LEGe (Low Energy Germanium detector)* ο οποίος είναι εγκατεστημένος και λειτουργεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ από το 1988. Πρόκειται για επίπεδο ανιχνευτή από υπερκάθαρο γερμάνιο (High purity Ge, HPGe) τύπου n, κυλινδρικού

σχήματος, διαμέτρου 50.5mm (επιφάνειας 2000mm²) και ύψους 20mm. Το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5mm, με συνέπεια η εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών να είναι πολύ μικρή. Λόγω του μικρού πάχους αλλά και της ύπαρξης κενού μέσα στον κρυστάτη, το παράθυρο του Be είναι εξαιρετικά ευαίσθητο. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους FWHM είναι 341eV για ενέργεια φωτονίων 5.9 keV και 530 eV (FWHM), 996 eV (FW.1M) για ενέργεια φωτονίων 122 keV

- *XtRa (Extended Range Germanium detector)* με διακριτική ικανότητα, της τάξεως του 1.03keV για φωτόνια ενέργειας 122.06keV και 2.04keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV. Έχει σχετική απόδοση 104.5% για τα φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV ενώ ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια της ίδιας ενέργειας είναι 82.2:1. Είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ημιαγωγός ανιχνευτής γερμανίου με παράθυρο από ανθρακονήματα, τύπου GX10021 της εταιρείας Canberra Industries.

2.5.2 Κώδικας φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL

Η ανάλυση των 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. Συνοπτικά, ο κώδικας SPUNAL εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

- Παρέχει δυνατότητες επικοινωνίας πολυκαναλικών αναλυτών με Η/Υ και προγράμματα μεταφοράς φασμάτων σε αρχεία Η/Υ και αντίστροφα.
- Διαθέτει προγράμματα κατάλληλα για όλων των ειδών τις βαθμονομήσεις που είναι απαραίτητες σε διατάξεις με ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας.
- Διαθέτει προγράμματα για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φασμάτων που έχουν αποθηκευτεί σε αρχεία Η/Υ. Η ανάλυση συνίσταται στον εντοπισμό απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών, προσδιορισμό της επιφάνειας και του κεντροειδούς τους, ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων και δημιουργία λιστών τελικών αποτελεσμάτων ανάλογα με την εφαρμογή.

- Ενημερώνει αυτόματα βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εν συνεχεία στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, την ανάλυση με τη μέθοδο των fractals και τη χαρτογράφηση με ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών DBGIS (Data Base / Geographical Information System), το οποίο επίσης έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

2.6 Η προσομοίωση Monte Carlo για τη βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτικών διατάξεων και ο κώδικας Penelope

Ο συνήθης τρόπος πειραματικού προσδιορισμού της απόδοσης μιας γ-ανιχνευτικής διάταξης, στηρίζεται στην εκμετάλλευση των στοιχείων που προκύπτουν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση πρότυπου δείγματος, γνωστής ραδιενέργειας. Στην περίπτωση όμως που δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα γιατί είναι πολύ δύσκολο ή και αδύνατο να γίνουν πειράματα, ή τα πειραματικά δεδομένα δεν είναι αξιόπιστα (για παράδειγμα μη ομοιογενής ή μη πιστοποιημένη πηγή βαθμονόμησης), υπάρχει η δυνατότητα αντιμετώπισης του προβλήματος της βαθμονόμησης με τη βοήθεια κωδίκων προσομοίωσης. Η τεχνική Monte-Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη επανάληψη μιας στατιστικής διαδικασίας, όπως είναι η αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη, και είναι χρήσιμη ιδιαίτερα για σύνθετα προβλήματα που δεν μπορούν να περιγραφούν με υπολογιστικούς κώδικες, οι οποίοι κάνουν χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων και αναλυτικών σχέσεων. Η τεχνική είναι ιδανική για την επίλυση πολύπλοκων, τρισδιάστατων προβλημάτων και χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων σε πολλά πεδία της έρευνας και της τεχνολογίας, όπως για υπολογισμούς θωρακίσεων και ανιχνευτικών συστημάτων, δοσιμετρικούς υπολογισμούς κλπ (Σάββα 2009).

Η λογική ενός κώδικα Monte Carlo, στην περίπτωση της μελέτης φαινομένων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, στηρίζεται στην παρακολούθηση ενός σωματιδίου ή φωτονίου από τη στιγμή που θα εκπεμφθεί από την πηγή μέχρι να αποθέσει πλήρως την ενέργειά του ή βγει εκτός των ορίων του συστήματος. Η πορεία αυτή του σωματιδίου, η οποία αναφέρεται και ως ιστορία του σωματιδίου, αποτελείται από διάφορες μικρότερες πορείες οι οποίες τερματίζουν όταν το σωματίδιο αλληλεπιδράσει με την ύλη, αλλάζοντας κατεύθυνση κίνησης ή χάνοντας

μέρος της ενέργειάς του. Η προσομοίωση της πορείας του σωματιδίου γίνεται με βάση τις πιθανότητες το σωματίδιο να αλληλεπιδράσει με την ύλη, με συγκεκριμένο φαινόμενο (φωτοηλεκτρικό, σκεδάσεις, απορρόφηση, δίδυμη γένεση). Τα χαρακτηριστικά του σωματιδίου ή του φωτονίου επιλέγονται τυχαία με τη βοήθεια γεννητριών τυχαίων αριθμών, σύμφωνα με τις προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας. Κάθε φορά που ο κώδικας περατώνει μία ιστορία, επιστρέφει στην αρχή παρακολουθώντας ένα νέο σωματίδιο ή φωτόνιο. Όσο αυξάνεται το πλήθος των ιστοριών τις οποίες παρακολουθεί ο κώδικας, τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, δηλαδή τα μεγέθη προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια. Η προσομοίωση, συγκρινόμενη με το πείραμα, παρακολουθεί την κίνηση των σωματιδίων ή φωτονίων χωρίς να επηρεάζεται από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος ή άλλα φαινόμενα που συμβαίνουν στη φύση και τα οποία οδηγούν στην αλλοίωση του φάσματος, εισάγοντας συστηματικά σφάλματα. Με την προσομοίωση μπορούν να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ δεν χρειάζονται ειδικά βαθμονομημένες ραδιενεργές πηγές για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Λογική συνέπεια των παραπάνω είναι ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν περιγράφουν πάντα με ακρίβεια τα όσα συμβαίνουν στην πραγματικότητα.

Ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την αντιμετώπιση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo είναι ο κώδικας PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons). Για την παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του έτους 2011. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και αρχικά ήταν σχεδιασμένος να προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές από ποικίλα υλικά. Η δυνατότητα προσομοίωσης και φωτονίων προστέθηκε αργότερα και για αυτό δεν περιέχεται στο όνομα του κώδικα. Ο κώδικας PENELOPE αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων, οι οποίες εμπεριέχουν τους μηχανισμούς οι οποίοι διέπουν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης. Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης σημειακών πηγών β^+ , β^- ή γ -ακτινοβολίας (ενέργειας από 50eV έως 1GeV). Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης συγκεκριμένου προβλήματος, αρχικά απαιτείται η περιγραφή του, η οποία εισάγεται μέσω των αρχείων δεδομένων εισόδου. Για τον πλήρη έλεγχο της

προσομοίωσης και την επικοινωνία μεταξύ των αρχείων εισόδου και των υπορουτίνων είναι απαραίτητη η σύνταξη κώδικα, ο οποίος είναι γνωστός ως κώδικας χρήστη ή κυρίως πρόγραμμα. Το κυρίως πρόγραμμα παρακολουθεί την εξέλιξη της τροχιάς του κάθε σωματιδίου, με άλλα λόγια την εξέλιξη κάθε ιστορίας, καταγράφοντας σε κατάλληλα αρχεία δεδομένων, αρχεία εξόδου, μεγέθη που ενδιαφέρουν το χρήστη, όπως για παράδειγμα η αποτιθέμενη ενέργεια ή η δόση σε συγκεκριμένες περιοχές. Για τον προσδιορισμό των τιμών των μεγεθών αυτών χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαμορφωμένοι εικονικοί ανιχνευτές.

Τα κυρίως προγράμματα του κώδικα Penelope που είναι ήδη εγκατεστημένα είναι τρία, με ονομασίες PENSLAB, PENCYL και PENMAIN. Το PENSLAB και το PENCYL εφαρμόζονται για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα PENSLAB χρησιμοποιείται για την προσομοίωση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με επίπεδη πλάκα. Αντίστοιχα, το πρόγραμμα PENCYL χρησιμοποιείται για προβλήματα με σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές. Τέλος, το πρόγραμμα PENMAIN εφαρμόζεται στην περίπτωση πιο σύνθετων προβλημάτων.

Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιείται το πρόγραμμα PENMAIN, το οποίο είναι πιο γενικής μορφής σε σχέση με τα άλλα προγράμματα του κώδικα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πολλών πρακτικών προβλημάτων καθώς δεν περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Στο πρόγραμμα PENMAIN η γεωμετρία της κατασκευής περιγράφεται σε κατάλληλο, ξεχωριστό αρχείο εισόδου που ονομάζεται αρχείο γεωμετρίας. Αυτή η διαφορά είναι που επιτρέπει στο PENMAIN να προσομοιώνει πολύπλοκες κατασκευές και γεωμετρίες, δίνοντάς του πλεονέκτημα έναντι των άλλων δύο έτοιμων προγραμμάτων. Ο κώδικας χρήστη PENMAIN είναι διαθέσιμος σε source μορφή και μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία ενός κώδικα πιο κοντά στις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη.

Τα αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ΔΕ δίνονται στο παράρτημα Β και αναλυτικότερη αναφορά στη δημιουργία τους δίνεται στο κεφάλαιο 4.

2.7 Η κοκκομετρική κατανομή φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων και η εξάρτηση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας από αυτή.

Ο σκοπός της παρούσας ΔΕ ήταν να ερευνηθεί περαιτέρω την τάση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων να συσσωρεύονται στα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια σε διάφορα υλικά όπως το χώμα, φαινόμενο που είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενη έρευνα που είχε διεξαχθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Savva et al. 2015).

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των ραδιενεργών ισοτόπων, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι η προέλευσή τους, οι καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, η ανθρώπινη δραστηριότητα και διάφορες γεωχημικές διαδικασίες όπως η προσρόφηση, η συγκαθίζηση, η διάλυση, η συμπλοκοποίηση, οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και ο σχηματισμός κolloειδούς (Ray 2013). Σημαντικό ρόλο έχουν επίσης και οι μέθοδοι συλλογής και επεξεργασίας των δειγμάτων καθώς σε ένα βαθμό μπορούν να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα (Frindik and Vollmer 1999).

Αναλυτικότερα, όπως αναφέρεται και στην αρχή του κεφαλαίου, το χώμα είναι ένα πολυσύνθετο σύστημα με στερεές (οργανικά και ανόργανα συστατικά), υγρές και αέριες ουσίες, μαζί με ζωντανούς οργανισμούς. Η αύξηση στο περιεχόμενο της διαλυτής οργανικής ύλης ευνοεί τα υψηλότερα αποθεματικά μορφών κινητών ραδιενεργών ισοτόπων στο χώμα και προωθεί τη μεταφορά των ραδιενεργών ισοτόπων στα φυτά. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τη μετρούμενη συνολική ραδιενέργεια, καθώς παρότι το επιφανειακό χώμα αρχικά καθαρίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα από την οργανική ύλη πριν συλλεχθεί, όποια οργανική ύλη καταλήγει στο δείγμα μας συγκρατείται, ως επί το πλείστον στα χονδρόκοκκα κλάσματα, αυξάνοντας τη μετρούμενη ραδιενέργεια του δείγματος (Sokolik et al. 2004, McCabe et al. 1991).

Σε αντίστοιχες έρευνες που έχουν γίνει στο παρελθόν, επιβεβαιώνεται ότι όσο μικραίνει το μέγεθος του κόκκου τόσο αυξάνεται η συγκέντρωση της ραδιενέργειας, με τη μέγιστη συγκέντρωση της ραδιενέργειας να βρίσκεται στα μικρότερης

διαμέτρου κλάσματα, με καθαρές ενδείξεις για τα στοιχεία ^{235}U , ^{234}Th , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po και ^{40}K (Baeza et al. 1994, Roeck et al. 1987).

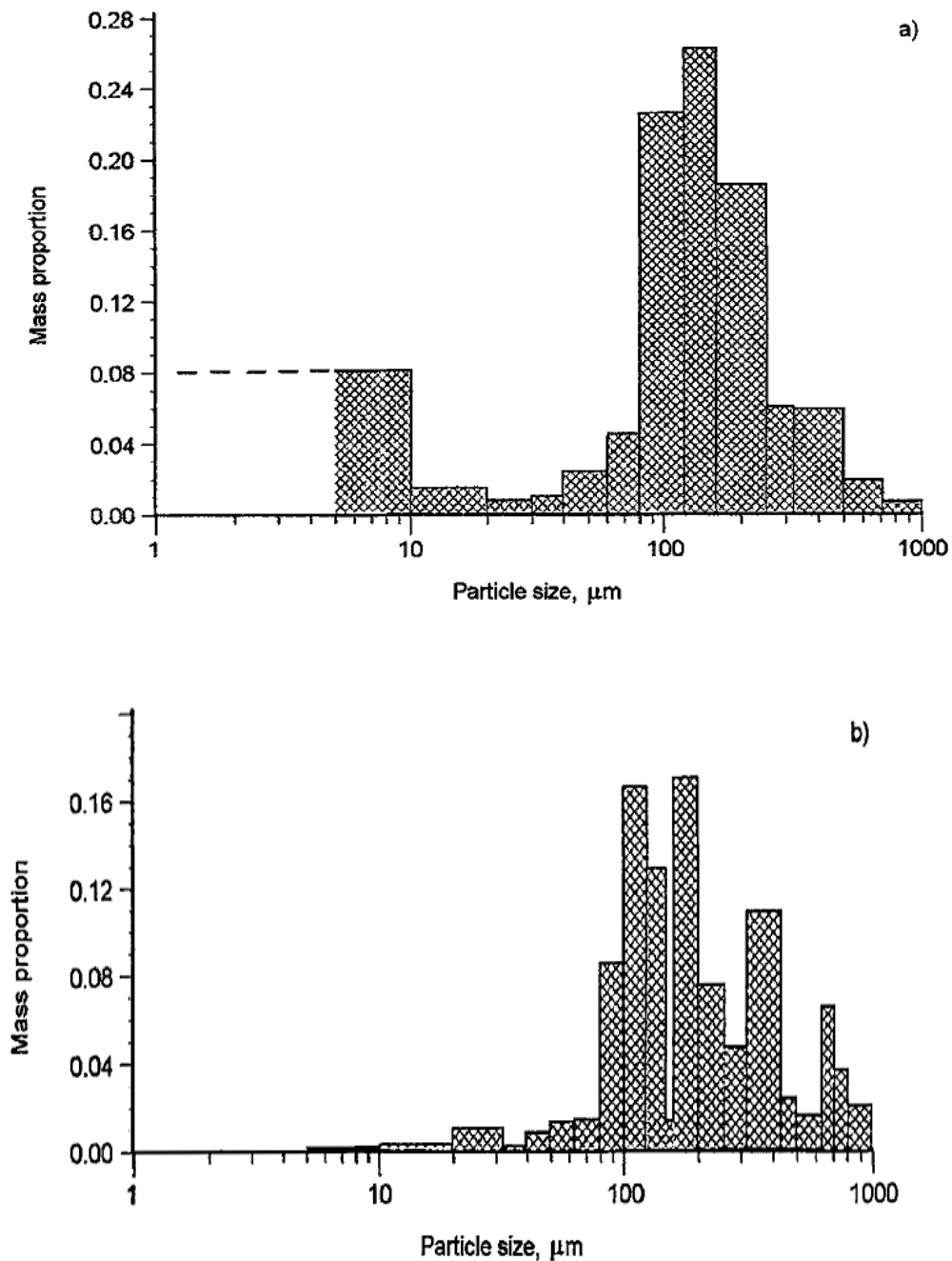
Βέβαια, τα αποτελέσματα της συσχέτισης της κοκκομετρικής κατανομής με τη συγκέντρωση της ραδιενέργειας μπορεί κάποιες φορές να περιέχουν αβεβαιότητα λόγω της ύπαρξης συσσωματωμάτων στο δείγμα, τα οποία παρ' όλη την επεξεργασία που έχουν υποστεί να μην έχουν σπάσει και να οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Στη δημιουργία και σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων αυτών συμβάλει η οργανική ύλη μέσω των χουμικών και φουλβικών οξέων καθώς και των πολυσακχαριτών, αλλά και τα ανόργανα υλικά όπως τα οξείδια του αλουμινίου και σιδήρου, το ανθρακικό ασβέστιο και το διοξείδιο του πυριτίου. Επιπλέον, η ξήρανση του χώματος σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί επίσης να συμβάλει στη δημιουργία συσσωματωμάτων.

Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg dry weight) σε σχέση με το μέγεθος σωματιδίων για ένα δείγμα γρανιτικού εδάφους				
Grain size, μm	^{226}Ra	^{232}Th	^{235}U	^{40}K
1250-850	26.8 ± 1.2	57.1 ± 1.7	2.1 ± 1.0	921 ± 8
850-425	28.0 ± 1.0	56.9 ± 1.1	1.9 ± 0.6	976 ± 5
425-210	42.2 ± 1.1	75.7 ± 1.2	3.3 ± 0.8	1201 ± 5
210-105	63.5 ± 1.7	121 ± 3	5.8 ± 1.0	1274 ± 7
105-53	145 ± 3	354 ± 4	12.4 ± 1.9	1317 ± 13
53-0	284 ± 6	707 ± 8	25 ± 5	1470 ± 40

Πίνακας 2-2: Συσχέτιση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας σε Bq/kg με τη διάμετρο των σωματιδίων του δείγματος, για ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα (Baeza et al. 1994)

Για την αντιμετώπιση λοιπόν των συσσωματωμάτων αυτών, γίνεται η χρήση του υγρού κοσκίνισματος (wet sieving), όπως έγινε και στην παρούσα ΔΕ. Αποτελέσματα από προηγούμενες έρευνες δείχνουν ότι η κοκκομετρική κατανομή που προκύπτει με την εφαρμογή υγρού κοσκίνισματος, σε σύγκριση με το ξηρό κοσκίνισμα, παρουσιάζει μεγαλύτερη ομογένεια αφαιρώντας ουσιαστικά ποσοστό της μάζας από τα χονδρόκοκκα κλάσματα και μεταφέροντάς τα στα λεπτόκοκκα. Επομένως το προφίλ της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας είναι σαφέστερο με υγρό παρά με ξηρό κοσκίνισμα. Αυτό φυσικά οδηγεί στο ερώτημα αν κάποιες φορές το ξηρό κοσκίνισμα δίνει ως αποτέλεσμα μια τεχνητή και όχι πραγματική κοκκομετρική κατανομή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν πριν την εξαγωγή συμπερασμάτων

αν η ύπαρξη ή/όχι συσσωματωμάτων καθώς και η ποσότητά τους σε κάθε είδος χρώματος μπορεί να αποτελεί μια ιδιότητα του συγκεκριμένου χρώματος αποτελώντας στην ουσία πληροφορία και όχι πρόβλημα προς επίλυση (Robertson et al. 1984, Frindik and Vollmer 1999).



Σχήμα 2-8: Αποτελέσματα κοκκομετρικής κατανομής στο ίδιο δείγμα χρώματος ύστερα από εφαρμογή: a) υγρού κοσκινίσματος, b) ξηρού κοσκινίσματος (Frindik and Vollmer 1999)

3 Ανάλυση δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης

Η μέθοδος της ξηρής κοσκίνισης για την κοκκομετρική ανάλυση δειγμάτων χώματος είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος και χρησιμοποιείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ εφαρμόστηκε σε δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου για τον προσδιορισμό φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των δειγμάτων χώματος, από τη συλλογή, την προετοιμασία, τη δειγματοληψία έως και τη φασματοσκοπική ανάλυσή τους.

3.1 Η δειγματοληψία του επιφανειακού χώματος

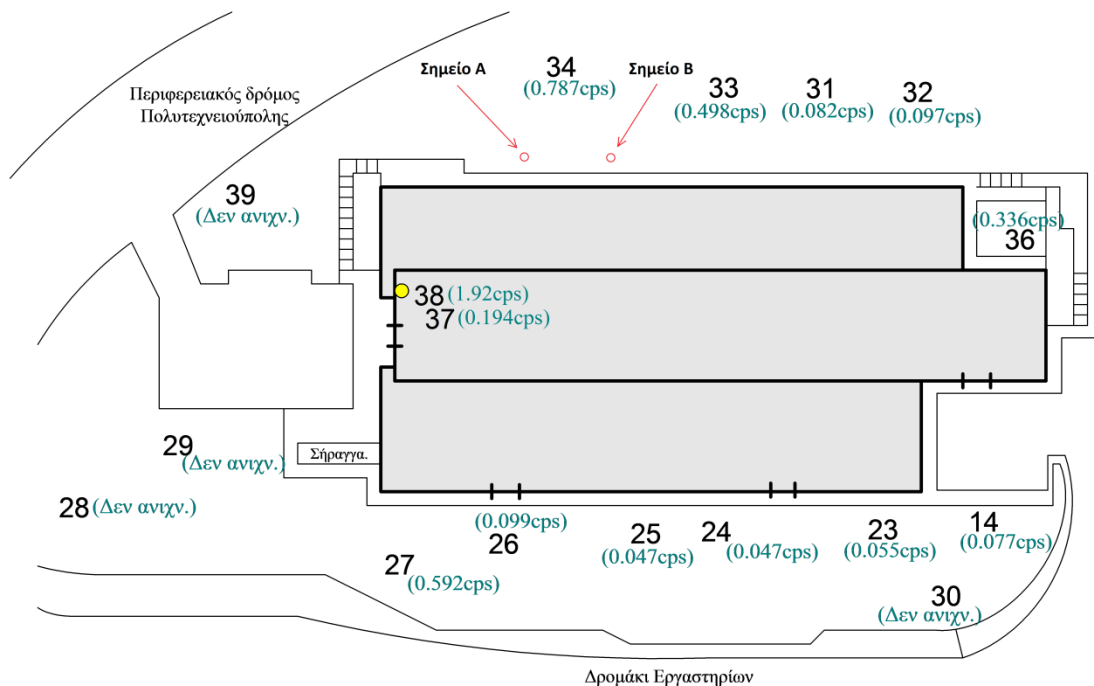
Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τη δειγματοληψία χώματος, είτε επιφανειακού είτε κατά βάθος και ποικίλουν ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης που θα ακολουθήσει και τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν οι κύριες μέθοδοι δειγματοληψίας καθώς και η μέθοδος που χρησιμοποιείται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη δειγματοληψία επιφανειακού χώματος. Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται αναλυτικά η επιλογή του σημείου δειγματοληψίας και η διαδικασία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ.

Η δειγματοληψία σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε στα μέσα Νοεμβρίου του 2015 σε μία περίοδο όπου είχε αρκετές ημέρες να βρέξει, καθώς είναι σημαντικό – εφόσον είναι εφικτό – το χώμα που συλλέγεται να μην είναι υγρό ή λασπώδες ώστε, αφενός μεν να διευκολυνθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας και αφετέρου το δείγμα χώματος να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη αρχική υγρασία.

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε για τη δειγματοληψία βρίσκεται πίσω από το κτίριο του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής (ANYM) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Στη συγκεκριμένη περιοχή είχε ανιχνευθεί σε προηγούμενη έρευνα ρύπανση από ²⁴¹Am. Το συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο είχε διασπαρεί στην οροφή του κτιρίου και στη

γύρω περιοχή λόγω αστοχίας αλεξικέραυνου από την οροφή του κτιρίου στο παρελθόν. Οι μετρήσεις που έγιναν το 2003 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Karforoulou et al. 2004) εντόπισαν τη μέγιστη συγκέντρωση της ραδιενέργειας του ^{241}Am στο πίσω μέρος του κτιρίου όπου βρίσκονται οι απολήξεις του συστήματος αποστράγγισης της οροφής. Παρόλο που τα αλεξικέραυνα έχουν αφαιρεθεί από την οροφή ήδη από το 2004, υπολείμματα ^{241}Am στην οροφή, στην υδρορροή, στον τοίχο και στο έδαφος συνεχίζουν να υπάρχουν, καθώς το ^{241}Am έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής. Επιπλέον, μικροποσότητες του συγκεκριμένου ισότοπου είναι πιθανό να συνεχίζουν να μεταφέρονται στο έδαφος μέσω του συστήματος αποστράγγισης από την οροφή του κτιρίου.

Βάσει λοιπόν αυτών των αρχικών μετρήσεων επιλέχθηκαν δύο σημεία δειγματοληψίας στην περιοχή με τη μέγιστη ραδιενέργεια ^{241}Am και με απόσταση 10 μέτρα περίπου μεταξύ τους. Τα σημεία δειγματοληψίας φαίνονται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Χάρτης του εργαστηρίου αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, με τα δύο σημεία δειγματοληψίας (A και B)

Στα Σχήματα 3-2 και 3-3 φαίνονται τα δύο σημεία από τα οποία έγινε η δειγματοληψία.



Σχήμα 3-2: Σημείο Α, δειγματοληψία επιφανειακού χώματος



Σχήμα 3-3: Σημείο Β, δειγματοληψία επιφανειακού χώματος

Αφού επιλέχθηκαν τα σημεία δειγματοληψίας, με χρήση εργαλείων σκαλίσματος καθαρίστηκαν αρχικά οι δύο περιοχές ενδιαφέροντος από πέτρες, βλάστηση και πευκοβελόνες. Στη συνέχεια, με τα ίδια εργαλεία αφαιρέθηκε επιφανειακά το χώμα προσεγγιστικά σε βάθος 1-2cm. Συνολικά συλλέχθηκαν περίπου 5kg χώματος από κάθε σημείο. Τα δύο δείγματα συσκευάστηκαν σε πλαστικές σακούλες και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για επεξεργασία και ανάλυση.



Σχήμα 3-4: Το δείγμα από το σημείο Α αμέσως μετά τη δειγματοληψία του

Για ευκολία, στα παρακάτω κεφάλαια θα αναφέρονται τα δείγματα ως δείγμα Α και δείγμα Β αντικαθιστώντας την έκφραση δείγμα από το σημείο Α ή το σημείο Β.

3.2 Η προετοιμασία των δειγμάτων

Η προετοιμασία των δειγμάτων είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει πολλά στάδια. Μία σύντομη περιγραφή των κύριων βημάτων αυτής της διαδικασίας δόθηκε στο κεφάλαιο 2. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία προετοιμασίας που ακολουθήθηκε για την παρούσα ΔΕ.

3.2.1 Η ξήρανση των δειγμάτων

Η ξήρανση των δειγμάτων, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία που πρέπει πάντα να λαμβάνει χώρα σε κάθε επεξεργασία. Η υγρασία μέσα στο δείγμα επηρεάζει σημαντικά τα φαινόμενα αυταπορρόφησης μέσα στο δείγμα, επηρεάζει την τελική αναγωγή της μετρούμενης ραδιενέργειας ανά μονάδα μάζας και δυσχεραίνει το χειρισμό του δείγματος. Οι παραπάνω λόγοι δικαιολογούν ότι η μερική ή και ολική αφαίρεση της υγρασίας είναι αναγκαία.

Για την παρούσα ΔΕ, τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τα δύο σημεία (Α και Β), απλώθηκαν προσεκτικά σε καθαρό χαρτί, σε προστατευόμενο χώρο με συνεχή αερισμό και σε θερμοκρασία δωματίου.

Μετά την παρέλευση 4 ημερών τα δείγματά είχαν ξηρανθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, καθώς η αρχική τους υγρασία ήταν σχετικά χαμηλή.



Σχήμα 3-5: Ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος του δείγματος από το σημείο Α



Σχήμα 3-6: Ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος του δείγματος από το σημείο B

3.2.2 Συσκευασία και ανάλυση ποιοτικών δειγμάτων

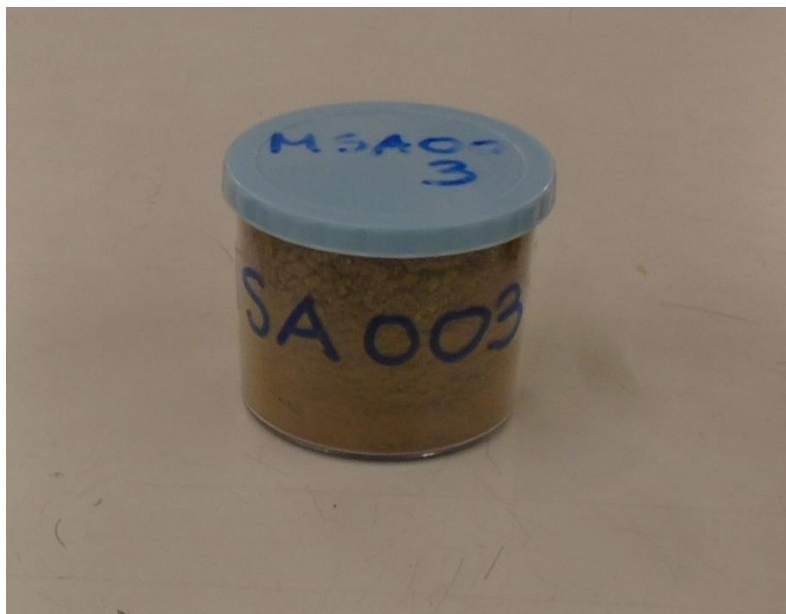
Με σκοπό τον προσδιορισμό του πλουσιότερου εκ των δύο δειγμάτων σε ^{241}Am , στο σημείο αυτό ελήφθησαν δύο αρχικά δείγματα από κάθε δείγμα χώματος, με κωδικούς MSA001 και MSA002 για το δείγμα A, και MSA003 και MSA004 για το δείγμα B, προσέχοντας να μη συμπεριληφθούν μεγάλα συσσωματώματα, πετραδάκια και βλάστηση που δεν μπόρεσε να αφαιρεθεί κατά τη δειγματοληψία¹.

Τα αρχικά αυτά δείγματα χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση μεταξύ της ραδιενέργειας του συνόλου του δείγματος και των κλασμάτων του. Η γεωμετρία στην οποία συσκευάστηκαν τα αρχικά δείγματα είναι κυλινδρική σε δοχείο διαμέτρου 72mm και ύψους 69mm, χωρητικότητας 282cm³, επομένως το χρησιμοποιούμενο δοχείο συσκευάζεται πλήρως. Η συγκεκριμένη γεωμετρία συσκευασίας δείγματος προς ανάλυση ορίζεται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ ως «γεωμετρία 2».

Στη διαδικασία της συσκευασίας των δειγμάτων δεν περιλήφθηκε στο στάδιο αυτό το εξωτερικό σφράγισμα για τη δημιουργία ισορροπίας μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του, διότι ο στόχος ήταν μία αρχική και σύντομη ανάλυση και

¹ Ουσιαστικά δηλαδή ακολουθήθηκε η πάγια διαδικασία που συνήθως ακολουθείται κατά τη δειγματοληψία δειγμάτων χώματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Τα δείγματα αυτά ελήφθησαν προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων δειγμάτων που λαμβάνονται από το ίδιο σημείο και τα οποία υπόκεινται ή όχι σε περαιτέρω επεξεργασία (κοκκομετρική ανάλυση κλπ).

προσδιορισμός του ^{241}Am για να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τα περαιτέρω βήματα.



Σχήμα 3-7: Τυποποιημένο κυλινδρικό δοχείο δείγματος γεωμετρίας 2

Μετά τη συσκευασία έγινε ζύγιση κάθε δείγματος σε ζυγό ακριβείας. Στη συνέχεια κάθε δείγμα τοποθετήθηκε διαδοχικά για γ-φασματοσκοπική ανάλυση στον ανιχνευτή χαμηλών ενεργειών LEGe, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρονται στο 2^ο κεφάλαιο.

Η πρώτη ανάλυση των δειγμάτων έγινε για μικρό χρονικό διάστημα και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν υποβοηθητικά των διαδικασιών που επρόκειτο να ακολουθήσουν. Στην πορεία των πειραμάτων, ολοκληρώθηκε η διαδικασία της συσκευασίας και σφράγισης των αρχικών δειγμάτων και έγινε μεγάλης διάρκειας γ-φασματοσκοπική ανάλυση για την απόκτηση δεδομένων μεγαλύτερης ακρίβειας.

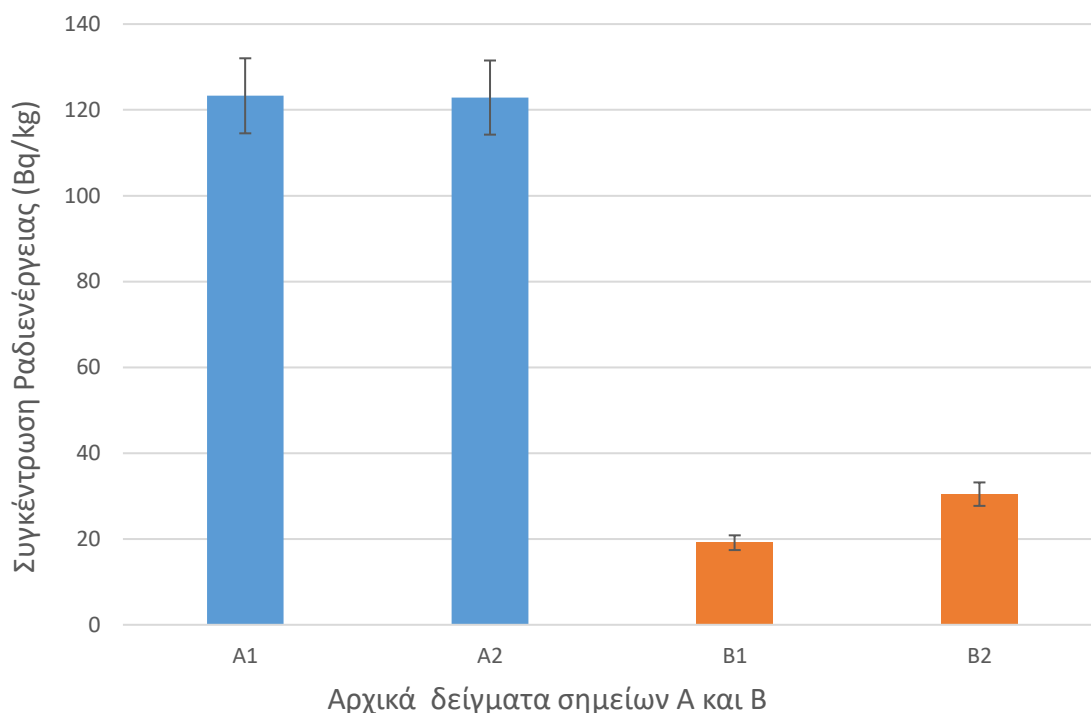


Σχήμα 3-8: Ο ζυγός ακριβείας του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκε για τη ζύγιση των δειγμάτων στην παρούσα ΔΕ



Σχήμα 3-9: Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Τα πρώιμα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τα τέσσερα ποιοτικά δείγματα δίνονται στο Σχήμα 3-10, όπου φαίνεται καθαρά πως το δείγμα A είναι σαφώς πλουσιότερο σε ^{241}Am , παρά τη μικρή απόσταση μεταξύ των δύο σημείων δειγματοληψίας.



Σχήμα 3-10: Τα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση ραδιενέργειας του ^{241}Am της σύντομης ανάλυσης των τεσσάρων αρχικών δειγμάτων από τα σημεία A και B

3.2.3 Ξηρό κοσκίνισμα των δειγμάτων A και B και κοκκομετρική τους ανάλυση

Βασιζόμενοι στα σύντομα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τα αρχικά δείγματα αποφασίστηκε να ξεκινήσει η διαδικασία κοσκίνισματος με το δείγμα A. Καθώς διαπιστώθηκε ότι στο δείγμα περιέχονταν συσσωματώματα χώματος διαστάσεων 2-3cm, χρησιμοποιώντας ένα μικρό σφυρί έσπασαν τα μεγάλα σε όγκο συσσωματώματα χώματος για διευκόλυνση της διαδικασίας κοκκομετρικού διαχωρισμού.

Μετά από μία προσπάθεια ομογενοποίησης του δείγματος, για την τυχαία επιλογή ενός πρότυπου υπο-δείγματος προκειμένου να γίνει αρχική ανάλυση της

κοκκομετρίας εφαρμόστηκε η μέθοδος «cone and quartering» για την οποία έγινε εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο 2. Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο διαχωρισμού δύο φορές, ελήφθη για αρχική ανάλυση το 1/16 του συνολικού δείγματος Α. Στη συνέχεια, έγινε κοκκομετρική ανάλυση, τόσο του υπό-δείγματος του δείγματος Α, όσο και όλης της υπόλοιπης ποσότητας του δείγματος Α, προκειμένου να διαπιστωθεί το κατά πόσον η τεχνική «cone and quartering», όπως εφαρμόστηκε δίνει πράγματι αντιπροσωπευτικό δείγμα.



Σχήμα 3-11: Η μέθοδος «cone and quartering» στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

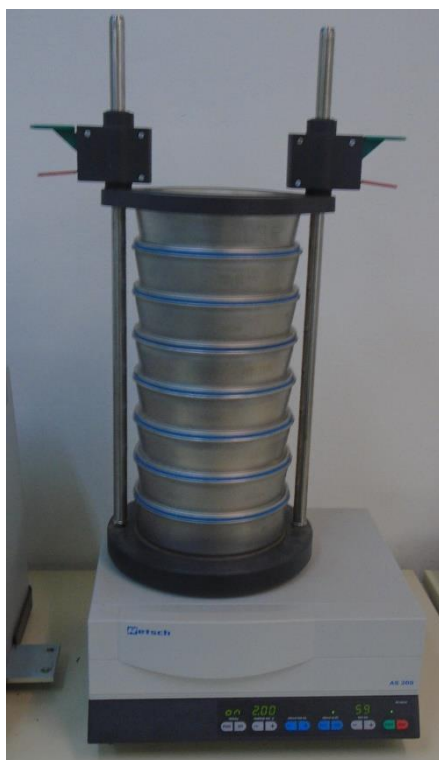
Ακολουθώντας τα βήματα για τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, επιλέχθηκαν για την ανάλυσή τα κόσκινα των 45 μ m, 63 μ m, 125 μ m, 250 μ m, 500 μ m, 1mm και 2mm. Τοποθετήθηκε η βάση των κοσκίνων κάτω από το τελευταίο κόσκινο των 45 μ m, και το δείγμα προς ανάλυση στο κόσκινο κορυφής, δηλαδή σε αυτό των 2mm. Επιπροσθέτως, τοποθετήθηκε και η βοηθητική αλυσίδα μέσα στο κόσκινο κορυφής για τη διευκόλυνση του σπασίματος των συσσωματωμάτων.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε προσεκτικά η στήλη των κοσκίνων επί της μηχανής κοσκίνιματος, ασφαλίστηκε, και ρυθμίστηκε η συσκευή κοκκομετρικής ανάλυσης AS-200 Control να ταλαντώνεται για 60 λεπτά με πλάτος ταλάντωσης 2mm. Μετά την ολοκλήρωση του κοσκίνιματος, αφαιρέθηκε η στήλη των κοσκίνων από τη συσκευή κοσκίνιματος. Με τη χρήση ενός πινέλου αφαιρέθηκε το δείγμα από τα κόσκινα και συλλέχθηκε κάθε κλάσμα χόματος σε ξεχωριστό πλαστικό σακουλάκι πάνω στο οποίο σημειώθηκε η θέση δειγματοληψίας, η ημερομηνία συλλογής του

δείγματος καθώς και το εύρος διαμέτρου των σωματιδίων του κλάσματος. Στη συνέχεια προσδιορίστηκε η καθαρή μάζα κάθε κλάσματος χόματος. Με διαθέσιμες πλέον τις μάζες των διαφορετικών κλασμάτων που προήλθαν από το αντιπροσωπευτικό δείγμα κατασκευάστηκε ένα αρχικό αντιπροσωπευτικό διάγραμμα κατανομής της κοκκομετρίας για το δείγμα Α.



Σχήμα 3-12 : Στα αριστερά φαίνεται η στήλη των κοσκίων μαζί με τη βάση της που χρησιμοποιείται για την κοσκίνιση των δειγμάτων, και στα δεξιά φαίνεται η βοηθητική αλυσίδα τοποθετημένη στο κόσκινο κορυφής



Σχήμα 3-13: Η συσκευή κοσκίνισματος AS-200 Control με τοποθετημένη και ασφαλισμένη πάνω της τη στήλη των κοσκίνων.

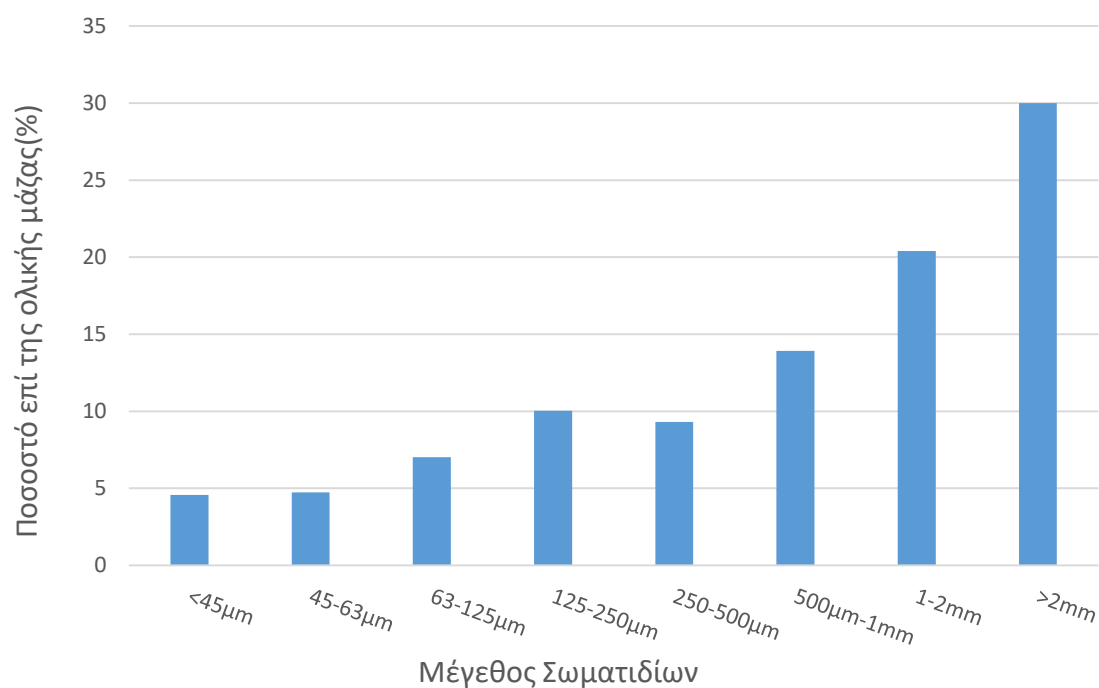


Σχήμα 3-14: Ηλεκτρονική ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε για το ζύγισμα των κλασμάτων χόματος.



Σχήμα 3-15: Τα διαφορετικά κλάσματα χόματος του αντιπροσωπευτικού δείγματος από το δείγμα Α

Στο Σχήμα 3-16 δίνεται η κατανομή κοκκομετρίας του δείγματος Α που προέκυψε από το κοσκίνισμα του αντιπροσωπευτικού του δείγματος.

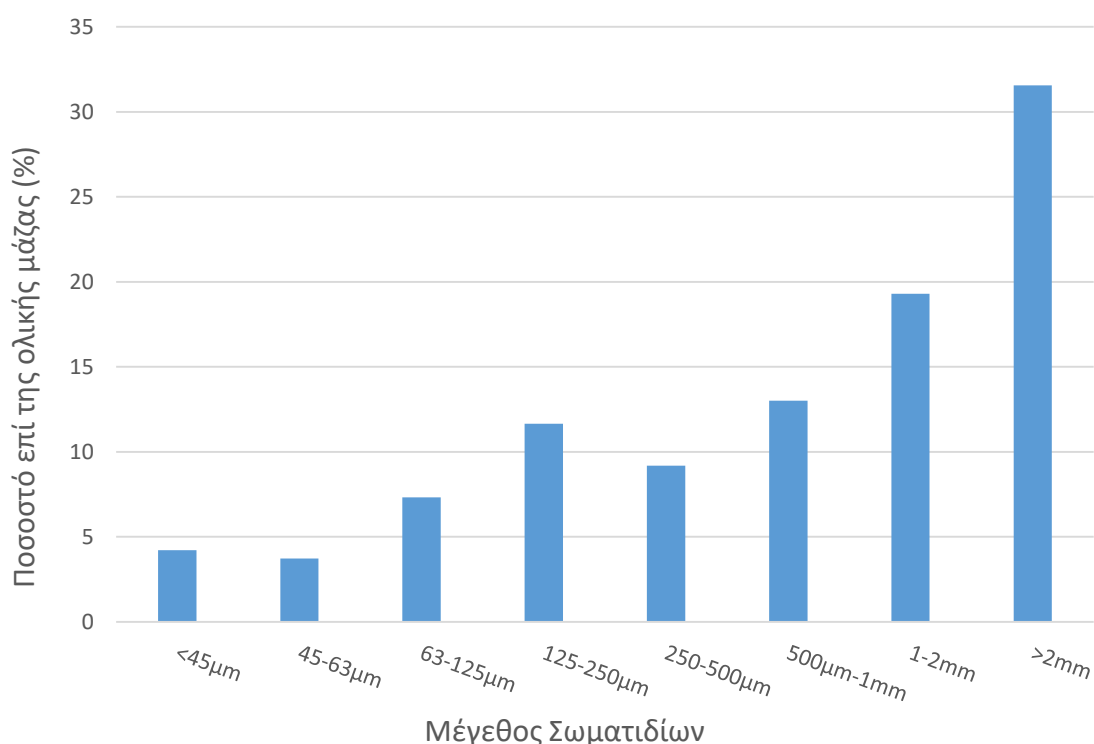


Σχήμα 3-16: Η κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος Α όπως προέκυψε από το αντιπροσωπευτικό του δείγμα

Κατά τη διαδικασία του κοσκινίσματος παρατηρήσαμε ότι ανά δύο διαδοχικά κοσκινίσματα τα κόσκινα (ιδιαίτερα αυτά με οπές μικρότερης διαμέτρου) ξεκινούσαν να φράζουν. Για το λόγο αυτό παρεμβάλλαμε στη διαδικασία κοσκινίσματος την πλύση των κοσκίνων σε ειδικό λουτρό υπερήχων, το οποίο καθαρίζει εκτενέστερα τα κόσκινα και αποφράζει τις οπές των πλεγμάτων των κοσκίνων, ώστε να συνεχιστεί με την ίδια απόδοση η διαδικασία του κοσκινίσματος. Η διαδικασία πλύσης των κοσκίνων περιγράφεται στο Παράρτημα Γ.

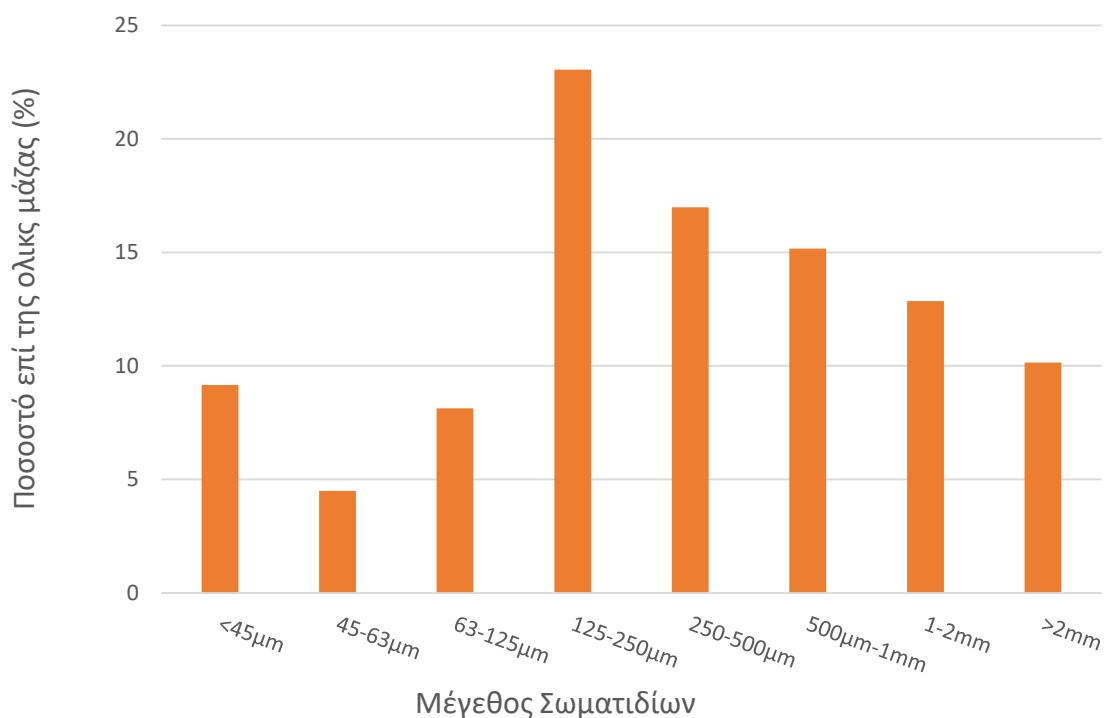
Κατά τη μετακίνηση και καθάρισμα των κοσκίνων αλλά και κατά το άδειασμα του κάθε κλάσματος χώματος πρώτα σε ένα χαρτί και στη συνέχεια στο αντίστοιχο σακουλάκι του, κάποια ποσότητα χώματος χάθηκε από το δείγμα μας (ακόμα και σε μορφή σκόνης), η οποία όμως δεν αποτελεί θέμα ενδιαφέροντος καθώς θεωρείται αμελητέα και έχουμε πέραν του δέοντος ποσότητα δείγματος για τις αναλύσεις μας.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το δείγμα Α, χωρίς αυτή τη φορά να κοσκινίσουμε και αντιπροσωπευτικό δείγμα, έγινε η κοκκομετρική ανάλυση και του δείγματος Β. Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των δύο δειγμάτων δίνονται στα Σχήματα 3-17 και 3-18.



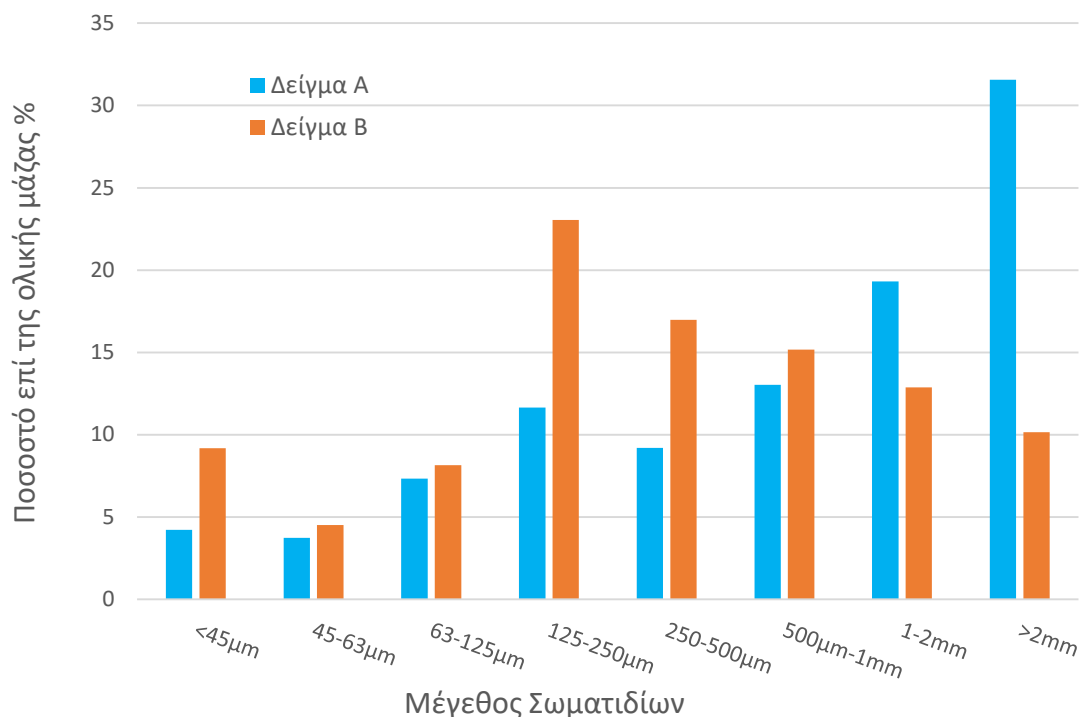
Σχήμα 3-17: Ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος Α

Από το διάγραμμα του σχήματος 3-17 παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του δείγματος Α ανήκει στα χονδρόκοκκα κλάσματα χώματος, και όσο μικραίνει η διάμετρος των σωματιδίων τόσο μικραίνει και το ποσοστό συμμετοχής τους στη συνολική μάζα του δείγματος, Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το κλάσμα με σωματίδια διαμέτρου 125-250μm, γεγονός που μπορεί να αποτελεί χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου χώματος.



Σχήμα 3-18: Ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος Β

Από το διάγραμμα του σχήματος 3-18 παρατηρούμε ότι παρά το γεγονός ότι τα δείγματα Α και Β απέχουν μεταξύ τους μόνο 10m περίπου, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Στο δείγμα Β το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του απαντάται στο κλάσμα των 125-250μm. Ομοίως με το δείγμα Α, το κύριο μέρος της μάζας του δείγματος Β βρίσκεται στα χονδρόκοκκα κλάσματα, αλλά με διαφορετική μεταξύ τους κατανομή. Στο διάγραμμα του σχήματος 3-19 παρουσιάζονται συγκριτικά οι δύο κοκκομετρικές κατανομές των δειγμάτων Α και Β, για καλύτερη εποπτεία.



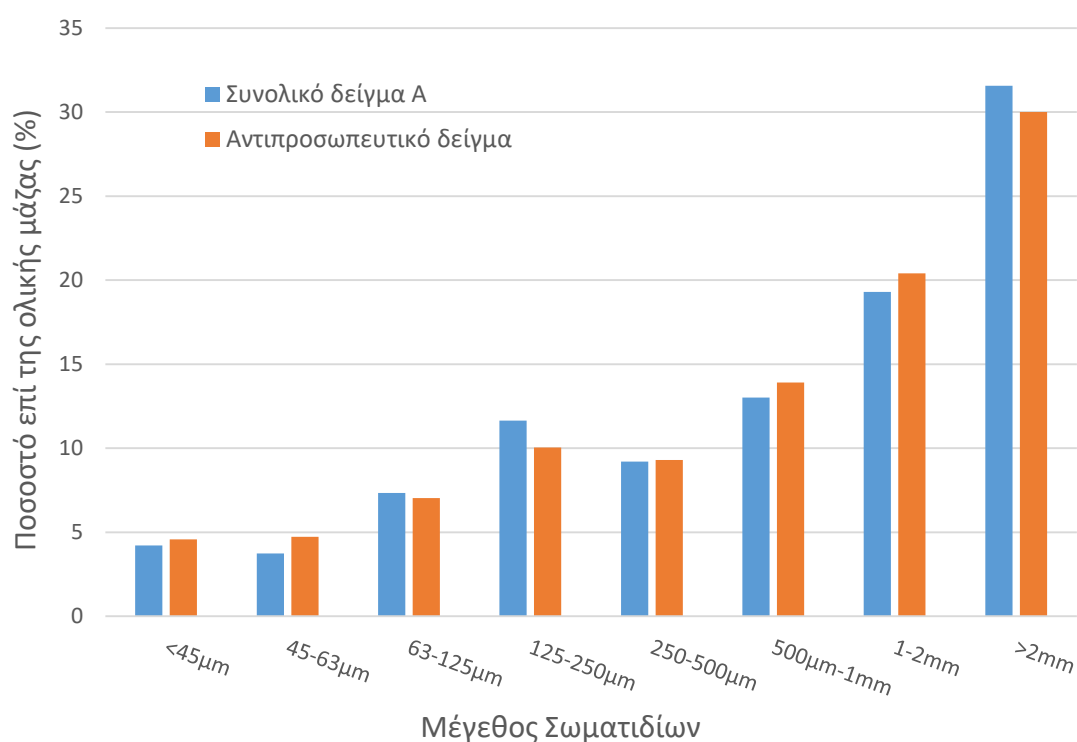
Σχήμα 3-19: Σύγκριση των κοκκομετρικών κατανομών των δειγμάτων Α και Β

3.2.4 Σύγκριση της κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος Α και του αντιπροσωπευτικού υποδείγματος, που προέκυψε με τη μέθοδο cone and quartering

Σε μεγάλο πλήθος πειραμάτων, ο όγκος των δειγμάτων προς μελέτη μπορεί να είναι απαγορευτικός για την ανάλυση του συνόλου του κάθε δείγματος. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος, η ανάλυση του οποίου θα είναι ικανή να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα, που θα αντιπροσωπεύουν με ικανοποιητική ακρίβεια το σύνολο του δείγματος.

Για την παρούσα ΔΕ η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του αντιπροσωπευτικού δείγματος ήταν αυτή του «cone and quartering», βάσει της οποίας προσδιορίστηκε μια αντιπροσωπευτική κατανομή κοκκομετρίας για το Δείγμα Α. Στο σχήμα 3-20 παρατίθενται για σύγκριση τα ιστογράμματα της κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος Α και του αντιπροσωπευτικού του υποδείγματος. Από την παραπάνω σύγκριση παρατηρείται ότι η κοκκομετρική κατανομή που προέκυψε ως αποτέλεσμα της ανάλυσης του αντιπροσωπευτικού δείγματος είναι παραπλήσια με

την κοκκομετρική κατανομή που προέκυψε από την ανάλυση του συνολικού δείγματος.

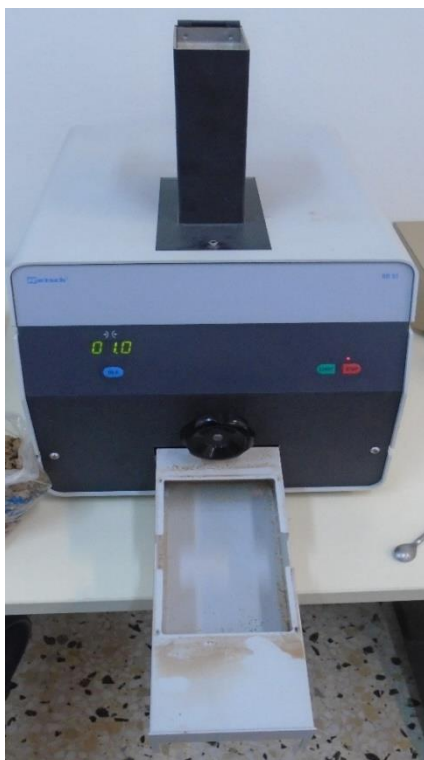


Σχήμα 3-20: Ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος A και η σύγκριση της με την κατανομή του αντιπροσωπευτικού δείγματος

Η σημαντική ομοιότητα των δύο κατανομών επιβεβαιώνει πως η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος με τη μέθοδο «cone and quartering», όπως υλοποιήθηκε, είναι αξιόπιστη.

3.2.5 Θραύση του κλάσματος των >2mm

Για διευκόλυνση της συσκευασίας των δειγμάτων των χονδρόκοκκων κλασμάτων, είναι απαραίτητο το σπάσιμο των σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου, είτε χρησιμοποιώντας κάποιο εργαλείο είτε ειδικό σπαστήρα. Στην παρούσα ΔΕ για τη θραύση του κλάσματος >2mm, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Retsch BB51, τα λειτουργικά μέρη της οποίας περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.



Σχήμα 3-21: Στα αριστερά φαίνεται η συσκευή Retsch BB51 και στα δεξιά η είσοδος του υλικού προς θραύση

Για το σπάσιμο του κλάσματος $>2\text{mm}$ αρχικά μηδενίστηκε η συσκευή. Το μηδέν της συσκευής, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, είναι το σημείο όπου οι δύο σιαγόνες θραύσης έρχονται σε επαφή. Επειδή μετά από κάθε χρήση του σπαστήρα το σημείο μηδέν μπορεί να μετακινηθεί όσον αφορά την ηλεκτρονική του ένδειξη, είναι απαραίτητο, ενώ ο σπαστήρας είναι σε λειτουργία, να περιστρέψετε ο χειροτροχός της μηχανής προς τα δεξιά έως ότου επιβεβαιωθεί ακουστικά ότι οι σιαγόνες έρχονται μεταξύ τους σε επαφή. Οι σιαγόνες θραύσης πάλλονται δημιουργώντας ένα συγκεκριμένο διάκενο μεταξύ τους και σπάνε το εισερχόμενο σε αυτές δείγμα σε κομμάτια των οποίων η διάσταση που περνά ανάμεσα τους είναι τόση όσο το μέγεθος του διακένου που ορίστηκε.

Αφού ρυθμίστηκε το σημείο μηδέν, ορίζεται στη συνέχεια το μέγεθος του διακένου στο 1mm . Στη συνέχεια τροφοδοτήθηκε στη συσκευή το χόμα του κλάσματος των $>2\text{mm}$, αφαιρώντας οτιδήποτε ξένα υλικά είχαν συλλεχθεί μαζί το κλάσμα αυτό, προσέχοντας να μην υπερχειλίσει ο συλλέκτης της συσκευής από το σπασμένο πλέον κλάσμα. Η διαδικασία αυτή επανελήφθη αρκετές φορές, σπάζοντας και συλλέγοντας τη μισή περίπου ποσότητα του κλάσματος των $>2\text{mm}$ από το δείγμα Α και όλο το κλάσμα των $>2\text{mm}$ από το δείγμα Β.



Σχήμα 3-22: Των κλάσμα των >2mm του δείγματος A πριν και μετά τη θραύση του στη συσκευή Retsch BB51

3.2.6 Μέτρηση υγρασίας και συσκευασία δειγμάτων

Η μέτρηση της υγρασίας των δειγμάτων πριν τη συσκευασία τους είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα, καθώς η γνώση της επιτρέπει την αναγωγή της μετρούμενης ραδιενέργειας στο δείγμα σε Bq/kg ξηρού δείγματος. Στις μετρήσεις και στα διαγράμματα της παρούσας ΔΕ, η συγκέντρωση ραδιενέργειας αφορά πάντα τη μάζα επί ξηρού.

Μετά από την ολοκλήρωση του κοσκινίσματος και της θραύσης των δειγμάτων, συλλέχθηκαν τα πλαστικά σακουλάκια με εννέα κλάσματα, για το δείγμα A (<45 μ m, 45-63 μ m, 63-125 μ m, 125-250 μ m, 250-500 μ m, 500 μ m-1mm, 1-2mm, >2mm και >2mm(crushed)) και οχτώ για το δείγμα B (<45 μ m, 45-63 μ m, 63-125 μ m, 125-250 μ m, 250-500 μ m, 500 μ m-1mm, 1-2mm και >2mm(crushed)). Για τη μέτρηση της υγρασίας των κλασμάτων χώματος ελήφθη από κάθε κλάσμα μια ποσότητα μάζας 10.0gr, και τοποθετήθηκε σε ειδικό δίσκο από αλουμίνιο και στη συνέχεια σε ζυγό προσδιορισμού υγρασίας. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί ειδικό λαμπτήρα ο οποίος προκαλεί θέρμανση του υλικού και εξάτμιση της υγρασίας του. Για την παρούσα ΔΕ ρυθμίστηκε η ισχύς της λάμπας στα 5Watt και για χρονικό διάστημα 5 λεπτών. Μετά

την πάροδο του επιλεγμένου χρονικού διαστήματος ο ζυγός δείχνει την ελάττωση του βάρους του δείγματος των 10.0gr και επιτρέπει τον προσδιορισμό του ποσοστού της αρχικής υγρασίας του.



Σχήμα 3-23 : Αλουμινένιος δίσκος για την τοποθέτηση των 10.0gr δείγματος προς προσδιορισμό υγρασίας



Σχήμα 3-24 : Συσκευή προσδιορισμού υγρασίας

Παράλληλα με τη μέτρηση της υγρασίας των δειγμάτων λάμβανε χώρα και η συσκευασία τους. Η συσκευασία των δειγμάτων για την παρούσα ΔΕ διεξήχθη σε δύο φάσεις. Μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης φάσης, καθώς και μετά το πέρας της δεύτερης φάσης έγινε γ-φασματοσκοπική ανάλυση όλων των δειγμάτων γεγονός που θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενες παραγράφους. Ωστόσο, για λόγους συνολικής παρουσίασης της διαδικασίας συσκευασίας θα αναλυθούν και οι δύο φάσεις της μαζί.

Για την πρώτη φάση της διαδικασίας συσκευασίας τα δείγματα τοποθετήθηκαν μέσα στα τυποποιημένα πλαστικά κυλινδρικά δοχεία γεωμετρίας «2» που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, μέχρις ύψους 22mm. Η γεωμετρία αυτή έχει την κωδική ονομασία γεωμετρία «5» και όγκο 90cm³. Η διαδικασία πλήρωσης των δοχείων πρέπει να γίνεται προσεκτικά ώστε το δείγμα να μην έχει κενά και να είναι όσο το δυνατόν ομογενές. Για την πλήρωση της συγκεκριμένης γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε ειδικό βοήθημα κατασκευασμένο από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 3.25. Η χρησιμοποίηση γεωμετρίας μικρότερου όγκου από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για τη συσκευασία των αρχικών δειγμάτων ήταν απαραίτητη καθώς δεν ήταν διαθέσιμη επαρκής ποσότητα χόματος για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Μετά την επιτυχή πλήρωση των κυλινδρικών δοχείων, αυτά κλείνονται με βιδωτό καπάκι και πάνω τους αναγράφεται με ανεξίτηλο μαρκαδόρο ο κωδικός που τους έχει δοθεί, ο οποίος είναι μοναδικός για κάθε δείγμα και αποτελεί το χαρακτηριστικό για την επεξεργασία και αναγνώρισή του (σχήμα 3.26). Με την πλήρωση, το κλείσιμο, την κωδικοποίηση και το τελικό ζύγισμα όλων των δειγμάτων ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση της συσκευασίας.



Σχήμα 3-25: Βοήθημα πλήρωσης των κυλινδρικών δοχείων σε γεωμετρία «5»



Σχήμα 3-26: Συσκευασμένα δείγματα γεωμετρίας 5 (πρώτης φάσης συσκευασίας)

Η δεύτερη φάση της συσκευασίας είναι απαραίτητη αν απαιτείται ο προσδιορισμός του ^{226}Ra μέσω των θυγατρικών του σε ισορροπία και περιλαμβάνει σφράγισμα και στεγανοποίηση των δειγμάτων, προκειμένου να μην επιτρέπεται η διαφυγή των αέριων ισotόπων του ραδονίου (^{222}Rn και ^{220}Rn) και να είναι δυνατή η επίτευξη ραδιενεργού ισορροπίας.

Για τη δεύτερη φάση συσκευασίας, κόπηκαν κυκλικοί δίσκοι διαμέτρου 72mm από PET (πολυαιθυλένιο) πάχους 1mm, οι οποίοι τοποθετήθηκαν εντός του δείγματος σε επαφή με το περιεχόμενο χώμα. Οι δίσκοι σταθεροποιήθηκαν στη θέση τους με σιλικόνη και ακολούθησε η στεγανοποίηση των δειγμάτων με ένα μείγμα βερνικιού-σκληρυντικού. Τα δείγματα εν συνεχεία παρέμειναν για διάστημα τριών εβδομάδων προκειμένου να αποκατασταθεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του.

Στο σύνολό τους τα δείγματα που συσκευάστηκαν, για την ανάλυση του χώματος με τη διαδικασία της ξηρής κοσκίνισης, δίνονται στον πίνακα 3-1.

Κοκκομετρία	Δείγμα A (κωδικοί)	Δείγμα B (κωδικοί)
Ποιοτικά δείγματα	MSA001	MSA003
	MSA002	MSA004
>2mm	MSA013	-
>2mm (crushed)	MSA005	MSA014
1-2mm	MSA006	MSA015
500μm-1mm	MSA007	MSA016
250-500μm	MSA008	MSA017
125-250μm	MSA009	MSA018
63-125μm	MSA010	MSA019
45-63μm	MSA011	MSA020
<45μm	MSA012	MSA021

Πίνακας 3-1 : Τα δείγματα που συσκευάστηκαν για την ανάλυση του χόματος με τη διαδικασία της ξηρής κοσκίνισης

3.3 Ανάλυση με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, η γ-φασματοσκοπία είναι μια μη καταστροφική μέθοδος προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων. Τα δείγματα των οποίων η κοκκομετρική τους ανάλυση έγινε με ξηρή κοσκίνιση πέρασαν από δύο στάδια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Στο πρώτο στάδιο, το οποίο έλαβε χώρα στο ενδιάμεσο των δύο φάσεων της συσκευασίας τους (πριν την επίτευξη ραδιενεργού ισορροπίας) που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.5, αναλύθηκαν όλα τα δείγματα στον ανιχνευτή LEGe με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας όλων των ζητούμενων προς ανάλυση ισοτόπων². Στη δεύτερη φάση της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, μετά δηλαδή από το πέρας της δεύτερης φάσης της συσκευασίας τους, τα δείγματα αναλύθηκαν με σκοπό τον ακριβέστερο προσδιορισμό του ²²⁶Ra. Στο σημείο αυτό καλό θα ήταν να επισημανθεί ότι τα

² Οι τιμές της ραδιενέργειας ²²⁶Ra που προσδιορίζονται κατ' αυτή τη φάση θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη, καθώς δεν είναι εγγυημένη η ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ ²²⁶Ra και των βραχύβιων θυγατρικών του.

δείγματα πριν την τοποθέτησή τους στον ανιχνευτή καλύπτονταν με πλαστικά σακουλάκια προς αποφυγή τυχόν διασποράς χόματος μέσα στον ανιχνευτή και ρύπανσή του.

3.3.1 Συλλογή και ανάλυση φασμάτων

Η συλλογή και ανάλυση των φασμάτων έγινε χρησιμοποιώντας τον κώδικα SPUNAL για τον οποίο έχει γίνει αναφορά στο κεφάλαιο 2. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τον κώδικα SPUNAL περιέχουν τη συγκέντρωση της ραδιενέργειας των ισοτόπων που ανιχνεύθηκαν σε Bq/kg και την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο 90% (1.65σ). Τα φάσματα που συλλέχθηκαν από τα κλάσματα των δειγμάτων Α και Β δίνονται στους πίνακες 3.2 – 3.11 που ακολουθούν. Οι αβεβαιότητες που παρουσιάζονται στους πίνακες αυτούς είναι σε επίπεδο 1σ και έχουν εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο την αβεβαιότητα φωτοκορυφής στο φάσμα και στο υπόστρωμα του ανιχνευτή.

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
Ra-226	18.9	0.3	14.9	0.5
Pb-210	236.1	3.1	94.2	4.5
Am-241	133.7	0.4	19.5	0.5
Th-234	20.9	2.3	16.7	3.8
Th-228	34.5	0.7	24.4	1.0
Be-7	-	-	-	-
Cs-137	8.8	0.4	9.1	0.6
Ra-228	33.4	0.8	25.3	1.4
K-40	407.4	6.2	314.8	9.9

Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα της συγκέντρωσης ραδιενέργειας των ζητούμενων ραδιενεργών ισοτόπων όπως προέκυψαν από τα μη κοσκινισμένα ποιοτικά δείγματα των σημείων Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	177.9	1.9	33.8	0.5
45-63 μm	153.2	1.6	29.4	0.5
63-125 μm	118.0	1.5	22.5	0.4
125-250 μm	99.3	1.1	19.6	0.6
250-500μm	97.5	1.2	15.3	0.7
500μm-1mm	103.8	1.3	16.7	0.5
1-2mm	130.9	1.5	18.2	0.4
>2mm (crushed)	105.4	1.2	1.6	0.1
>2mm	109.8	1.4	-	-

Πίνακας 3-3: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ²⁴¹Am βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	359.0	6.1	168.0	2.5
45-63 μm	319.1	3.9	153.8	2.6
63-125 μm	254.2	4.8	127.6	2.3
125-250 μm	208.9	2.9	107.9	3.6
250-500μm	207.3	3.8	91.4	4.3
500μm-1mm	246.6	3.9	91.7	3.6
1-2mm	263.4	4.3	87.6	2.5
>2mm (crushed)	270.7	3.8	13.7	1.6
>2mm	279.6	5.1	-	-

Πίνακας 3-4: Αποτελέσματα κατανομής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ²¹⁰Pb βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	32.5	14.1	29.7	2.7
45-63 μm	31.0	12.1	24.0	2.7
63-125 μm	30.0	10.5	18.4	2.0
125-250 μm	21.7	8.9	16.6	3.2
250-500μm	23.7	8.8	20.6	4.3
500μm-1mm	24.2	9.2	15.8	2.9
1-2mm	25.4	11.0	16.6	2.6
>2mm (crushed)	19.7	8.9	8.6	2.5
>2mm	24.0	9.3	-	-

Πίνακας 3-5: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{234}Th βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	14.7	0.8	17.8	0.4
45-63 μm	12.2	0.5	14.3	0.4
63-125 μm	9.2	0.6	10.4	0.4
125-250 μm	7.6	0.4	9.1	0.5
250-500μm	7.9	0.5	7.8	0.7
500μm-1mm	9.5	0.6	9.6	0.6
1-2mm	10.5	0.6	8.4	0.5
>2mm (crushed)	6.8	0.4	1.8	0.2
>2mm	7.9	0.7	-	-

Πίνακας 3-6: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{137}Cs βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	46.4	1.4	36.2	0.8
45-63 μm	39.4	1.0	29.5	0.8
63-125 μm	31.8	1.0	23.1	0.7
125-250 μm	24.9	0.7	21.4	0.8
250-500μm	26.4	0.9	20.0	1.0
500μm-1mm	30.8	1.1	22.2	0.9
1-2mm	31.9	1.1	21.4	0.8
>2mm (crushed)	23.4	0.8	10.3	0.4
>2mm	28.7	1.0	-	-

Πίνακας 3-7: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{228}Th βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	31.4	5.0	18.5	10.0
45-63 μm	22.1	4.0	16.0	4.5
63-125 μm	14.8	4.8	9.0	3.4
125-250 μm	12.2	2.6	8.1	5.7
250-500μm	17.0	3.2	15.1	6.8
500μm-1mm	20.7	3.9	11.0	6.0
1-2mm	13.7	3.9	12.2	3.7
>2mm (crushed)	0.0	0.0	0.0	0.0
>2mm	0.0	0.0	-	-

Πίνακας 3-8: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^7Be βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β³

³ Για το ^7Be έγιναν κατάλληλες διορθώσεις λόγω decay και αναγωγή της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του στην ημέρα συλλογής των δειγμάτων.

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	30.1	0.8	29.3	1.0
45-63 μm	22.9	0.8	15.8	0.9
63-125 μm	19.9	0.5	13.4	0.8
125-250 μm	16.5	0.3	14.9	0.6
250-500μm	16.3	0.5	13.1	0.8
500μm-1mm	19.1	0.7	12.5	0.5
1-2mm	19.6	0.5	12.8	0.6
>2mm (crushed)	14.4	0.5	8.5	0.3
>2mm	19.1	0.6	-	-

Πίνακας 3-9: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{226}Ra βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Δείγμα Α		Δείγμα Β	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	575.4	13.9	532.6	7.7
45-63 μm	510.3	9.0	439.1	7.5
63-125 μm	398.8	10.4	331.7	5.8
125-250 μm	329.7	6.4	301.0	9.1
250-500μm	359.6	8.9	272.5	11.7
500μm-1mm	421.7	10.2	324.4	10.8
1-2mm	455.2	10.8	309.0	7.5
>2mm (crushed)	309.3	7.7	134.9	3.9
>2mm	364.1	11.9	-	-

Πίνακας 3-10: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{40}K βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα Α και Β

	Σημείο A		Σημείο B	
	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ	Συγκέντρωση Ραδιενέργειας (Bq/kg)	1σ
<45μm	46.9	1.9	39.9	1.1
45-63 μm	44.6	1.2	33.3	0.9
63-125 μm	35.0	1.5	25.6	0.8
125-250 μm	28.2	0.9	22.3	1.2
250-500μm	29.3	1.2	22.1	1.7
500μm-1mm	36.5	1.4	24.9	1.5
1-2mm	39.1	1.5	24.8	1.0
>2mm (crushed)	26.0	1.0	11.3	0.5
>2mm	31.9	1.6	-	-

Πίνακας 3-11: Αποτελέσματα κατανομής της ραδιενέργειας του ^{228}Ra βάσει κοκκομετρίας, για τα δείγματα A και B

3.3.2 Διορθώσεις διάσπασης

Πολλές φορές σε πειράματα μπορεί να περάσει μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι τα συλλεχθέντα δείγματα να αναλυθούν. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε χρονοβόρες διαδικασίες συσκευασίας, σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων καθώς και σε διαθεσιμότητα ανιχνευτών. Κάποια όμως από τα ραδιενεργά ισότοπα προς ανάλυση είναι πιθανό να έχουν χρόνους ημιζωής συγκριτικά μικρούς σε σχέση με το χρονικό διάστημα από τη συλλογή μέχρι την ανάλυση τους. Στις περιπτώσεις αυτές, για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του δείγματος τη στιγμή της συλλογής, πρέπει να γίνει αναγωγή της τελικής μετρούμενης ραδιενέργειας στη ραδιενέργεια του δείγματος τη στιγμή της συλλογής του. Η διαδικασία αυτής της αναγωγής αποτελεί τη διαδικασία των διορθώσεων διάσπασης.

Για να γίνουν διορθώσεις διάσπασης απαιτείται:

- η συγκέντρωση ραδιενέργειας του ραδιενεργού ισότοπου ενδιαφέροντος που προκύπτει ως αποτέλεσμα της μέτρησης του δείγματος (R)

- το χρονικό διάστημα που πέρασε από τη συλλογή του δείγματος μέχρι την ανάλυσή του (t)
- και το χρόνο ημιζωής του ζητούμενου ραδιενεργού ισότοπου ($T_{1/2}$)

Για τον προσδιορισμό λοιπόν της ραδιενέργειας που το δείγμα είχε τη χρονική στιγμή της συλλογής του (R_0) εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:

$$R_0 = \frac{R}{e^{(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} * t)}} \quad (3-1)$$

Στα πλαίσια της ΔΕ, επειδή αρκετά δείγματα αναλύθηκαν αρκετά καιρό (αρκετούς μήνες) μετά τη συλλογή τους και με δεδομένο ότι το ^7Be έχει χρόνο ημιζωής 53.12 ημέρες, σε ορισμένες περιπτώσεις δειγμάτων δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευσή του, αν και αυτό κατά πάσαν πιθανότητα υπήρχε στο δείγμα κατά την ημέρα συλλογής του.

3.3.3 Ανάλυση Αβεβαιοτήτων

Η αβεβαιότητα μπορεί να οριστεί ως μια παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης και η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσαν εύλογα να αποδοθούν στη μετρήσιμη ποσότητα. Η ολική αβεβαιότητα της μέτρησης συνήθως οφείλεται σε πολλές διαφορετικές πηγές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητα ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι αβεβαιότητες που εισάγονται από κάθε πηγή μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες (JCGM 2008):

- Αβεβαιότητα τύπου A: Σε αυτήν την περίπτωση η εκτίμηση της αβεβαιότητας μπορεί να γίνει με στατιστική ανάλυση μιας ομάδας δεδομένων που έχουν προκύψει από επανάληψη του ίδιου πειράματος. Συνήθως, η καλύτερη εκτίμηση της αβεβαιότητας δίνεται από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των πειραματικών δεδομένων. Η αβεβαιότητα τύπου A συχνά αναφέρεται και ως τυχαίο σφάλμα.
- Αβεβαιότητα τύπου B: Σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της αβεβαιότητας με στατιστική ανάλυση μιας ομάδας πειραματικών δεδομένων. Η αβεβαιότητα τύπου B συχνά αναφέρεται και ως συστηματικό σφάλμα. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας γίνεται με αξιολόγηση όλων των

δυνατών σχετικών επιστημονικών δεδομένων, τα οποία ανάλογα με το πείραμα μπορεί να είναι:

- Δεδομένα που έχουν προκύψει από παλαιότερη εκτέλεση του πειράματος.
- Εμπειρική ή θεωρητική γνώση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών και του εξοπλισμού του πειράματος.
- Επεξηγηματικές πληροφορίες που παρέχονται από τον κατασκευαστή συσκευών που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του πειράματος.
- Δεδομένα που έχουν προκύψει από τη διαδικασία της βαθμονόμησης.
- Τιμές αβεβαιότητας για υλικά αναφοράς που παρέχονται σε εγχειρίδια, πιστοποιητικά κλπ.

Κατά την πειραματική εκτίμηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας ισotόπων σε δείγματα χώματος με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας, τρεις είναι οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας:

- *Η διαδικασία της δειγματοληψίας.* Η αβεβαιότητα που εισάγεται από τη δειγματοληψία σχετίζεται με ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι (Παλαμαρά 2010):
 - Η χωρική ετερογένεια του χώματος.
 - Η επιλογή συγκεκριμένης μεθόδου δειγματοληψίας.
 - Η επίδραση της διαδικασίας δειγματοληψίας στη σύνθεση του δείγματος.
 - Η μεταφορά και συντήρηση του δείγματος μέχρι την τελική επεξεργασία του.
- *Η προετοιμασία του δείγματος.* Κάθε τεχνική που εφαρμόζεται για την επεξεργασία του δείγματος μπορεί να εισαγάγει αβεβαιότητα στη μέτρηση, καθώς μπορεί να προκληθεί απώλεια ή αλλοίωση του αρχικού δείγματος. Επίσης, η χρήση οποιασδήποτε μηχανής ή άλλου εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του δείγματος, λόγω ανεπαρκούς καθαρισμού από προγενέστερη χρήση. Πιο αναλυτικά, η αβεβαιότητα που εισάγεται από την προετοιμασία σχετίζεται με τις ακόλουθες διαδικασίες (Παλαμαρά 2010):
 - Ομογενοποίηση
 - Διαχωρισμός σε υπο-δείγματα
 - Ξήρανση

- Λειοτριβισή
 - Φαινόμενα Cross-contamination
- *Η ανάλυση του δείγματος.* Η αβεβαιότητα που εισάγεται από την ανάλυση μπορεί να εκτιμηθεί για δεδομένο ανιχνευτή και φωτοκορυφή. Η ολική αβεβαιότητα ανάλυσης μπορεί να διαχωριστεί στις ακόλουθες συνιστώσες (Πέππας 2008):
- Αβεβαιότητα προσδιορισμού επιφάνειας της φωτοκορυφής. Υπολογίζεται απευθείας από το λογισμικό και φαίνεται στα φάσματα που προκύπτουν από κάθε ανάλυση (για την παρούσα ΔΕ σε επίπεδο 1.65σ).
 - Αβεβαιότητα λόγω αφαίρεσης υποστρώματος.
 - Αβεβαιότητα λόγω προσαρμογής της συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης.
 - Αβεβαιότητα λόγω του προτύπου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση απόδοσης. Προκύπτει από το πιστοποιητικό που συνοδεύει το πρότυπο.
 - Αβεβαιότητα λόγω διορθώσεων αυταπορρόφησης, η οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο για ενέργειες φωτονίων μικρότερες των 200 keV.
 - Αβεβαιότητα λόγω διορθώσεων για τα φαινόμενα true-coincidence και random-summing.

Στην παρούσα ΔΕ, για την εκτίμηση της αβεβαιότητας ανάλυσης λήφθηκε υπόψη η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής καθώς και η αβεβαιότητα αφαίρεσης υποστρώματος, οι οποίες υπολογίζονται από το λογισμικό SPUNAL του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Δεδομένου ότι στην παρούσα μελέτη όλες οι στατιστικές συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν δείγματα ίδιας γεωμετρίας που αναλύθηκαν φασματοσκοπικά στον ίδιο ανιχνευτή, και υπέστησαν την ίδια διαδικασία δειγματοληψίας, επεξεργασίας και συσκευασίας δεν λήφθηκαν υπόψη οι αντίστοιχες αβεβαιότητες καθώς είναι συσχετισμένες.

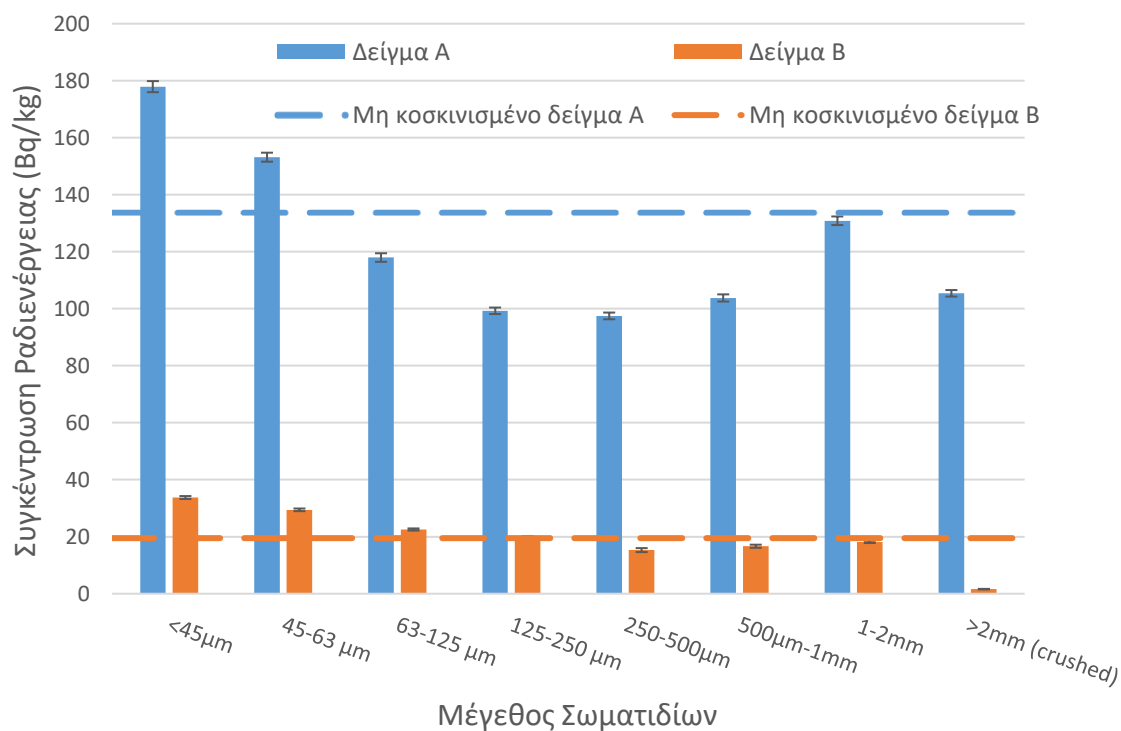
Καθώς το ζητούμενο αυτής της σειράς πειραμάτων ήταν να μελετηθεί η κύμανση της ραδιενέργειας στο διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του χώματος, η χρήση αβεβαιοτήτων λόγω της καμπύλης βαθμονόμησης, της πηγής βαθμονόμησης κλπ, οι οποίες υπεισέρχονται με τον ίδιο τρόπο για όλα τα δείγματα, θα οδηγούσε σε

υψηλότερη συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης κάτι που ενδεχομένως δεν θα επέτρεπε να αποκαλυφθούν τάσεις συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.

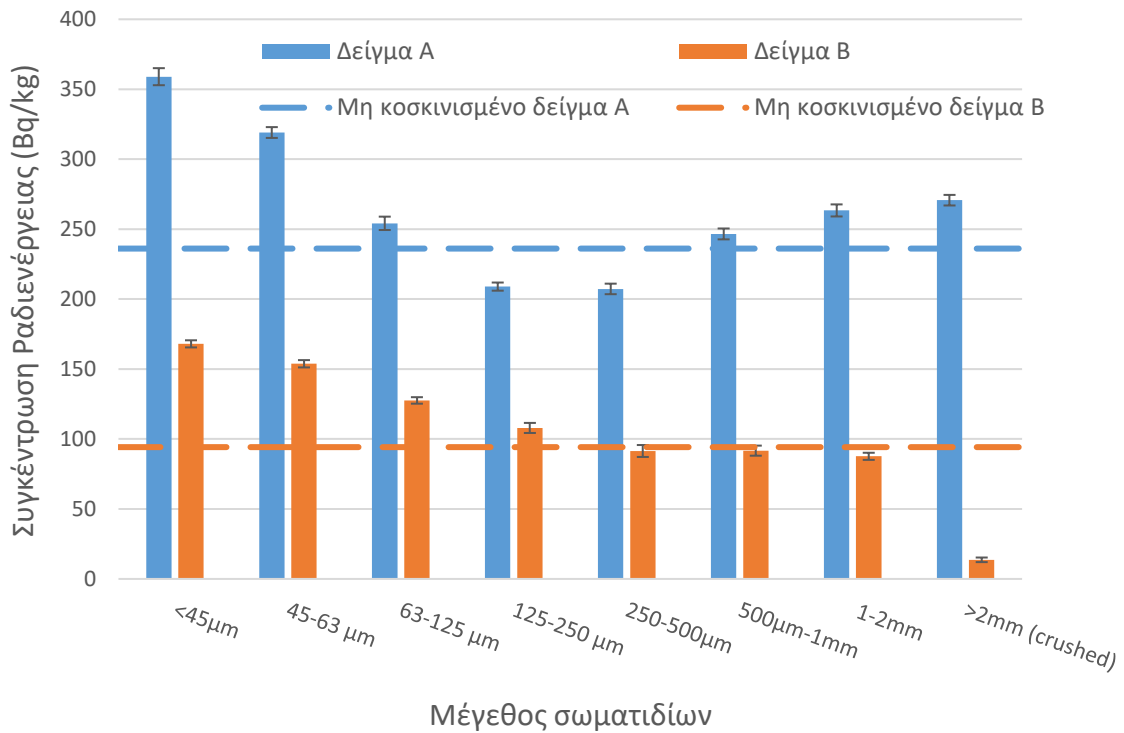
Συνεπώς, όπου αναφέρεται αβεβαιότητα ανάλυσης εννοείται αποκλειστικά η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής και της αφαίρεσης του υποστρώματος.

3.4 Αποτελέσματα-Σχολιασμός

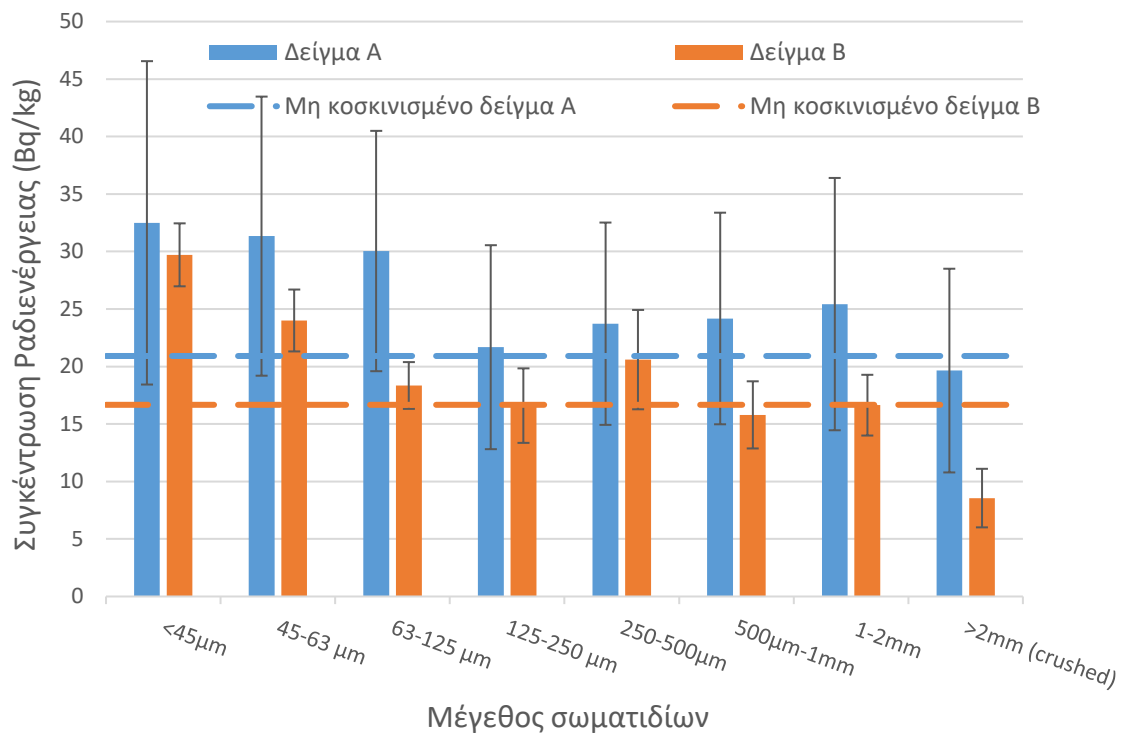
Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από την ανάλυση των δειγμάτων και παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3.1 δίνονται παρακάτω σε μορφή διαγραμμάτων για καλύτερη σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων Α και Β.



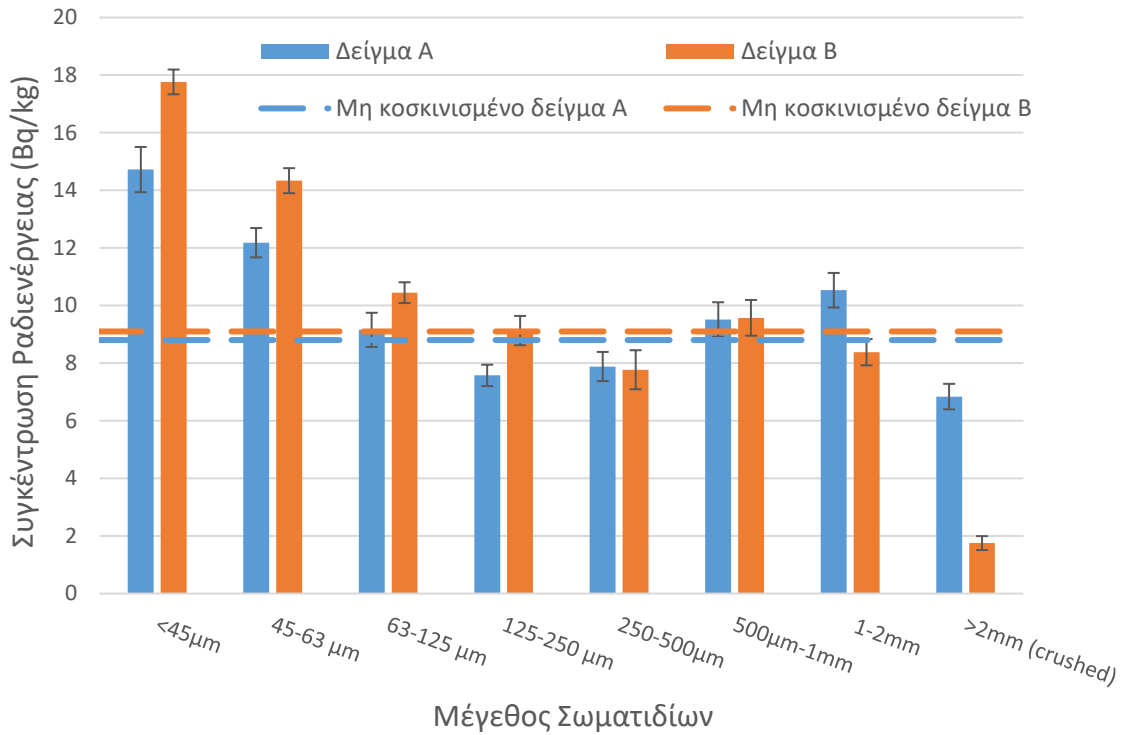
Σχήμα 3-27: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{241}Am βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων Α και Β



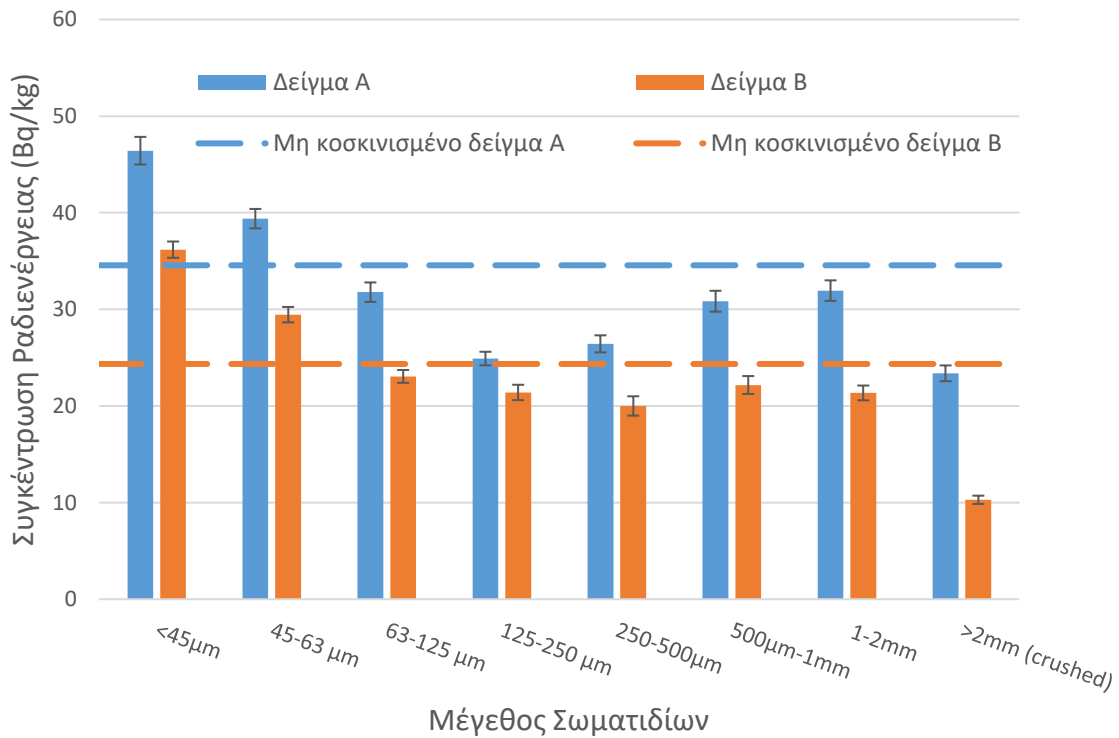
Σχήμα 3-28: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{210}Pb βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B



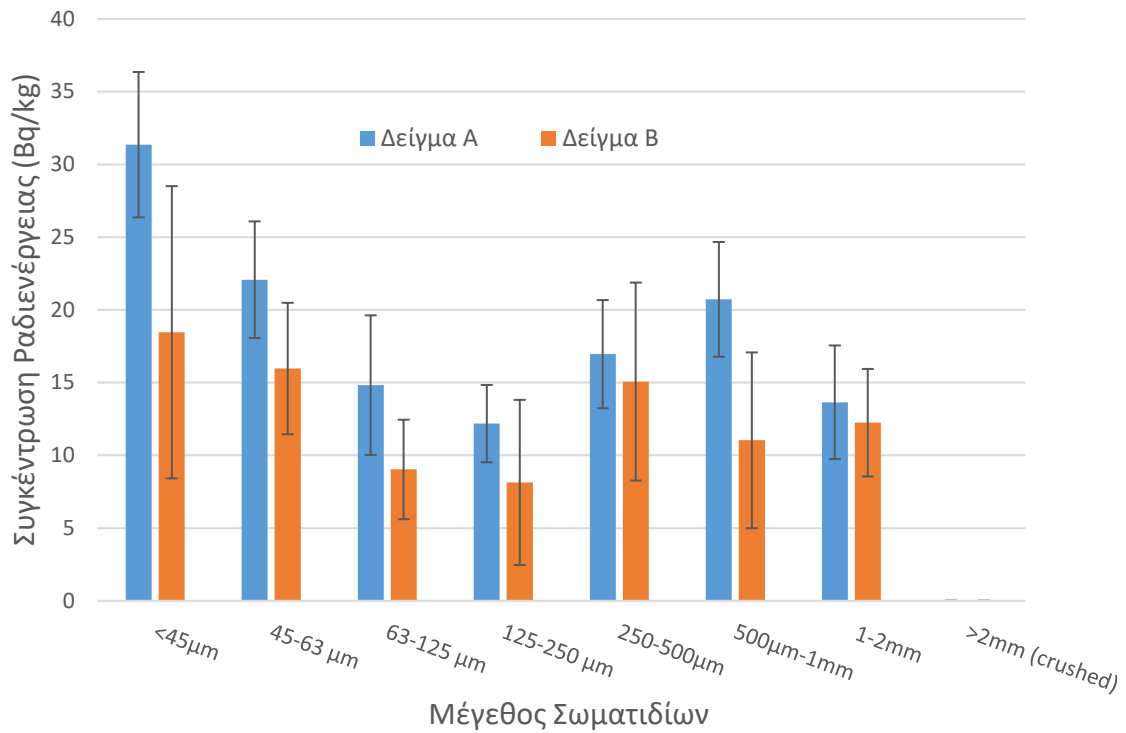
Σχήμα 3-29: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{234}Th βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B



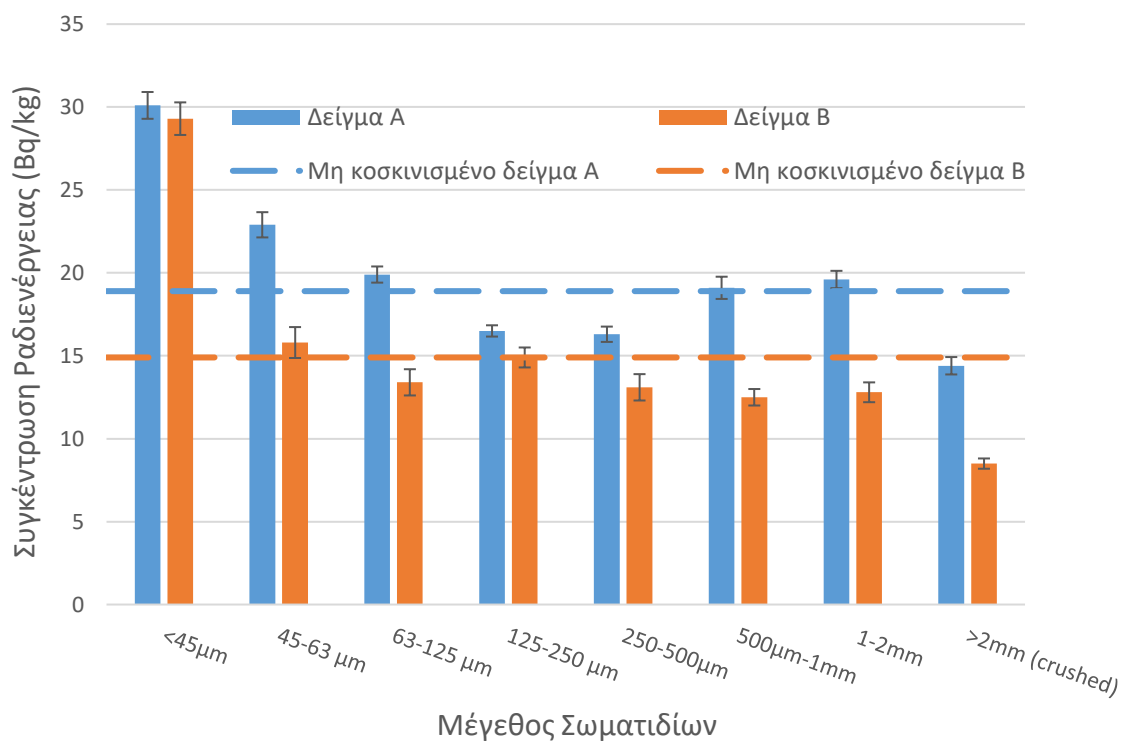
Σχήμα 3-30: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{137}Cs βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων Α και Β



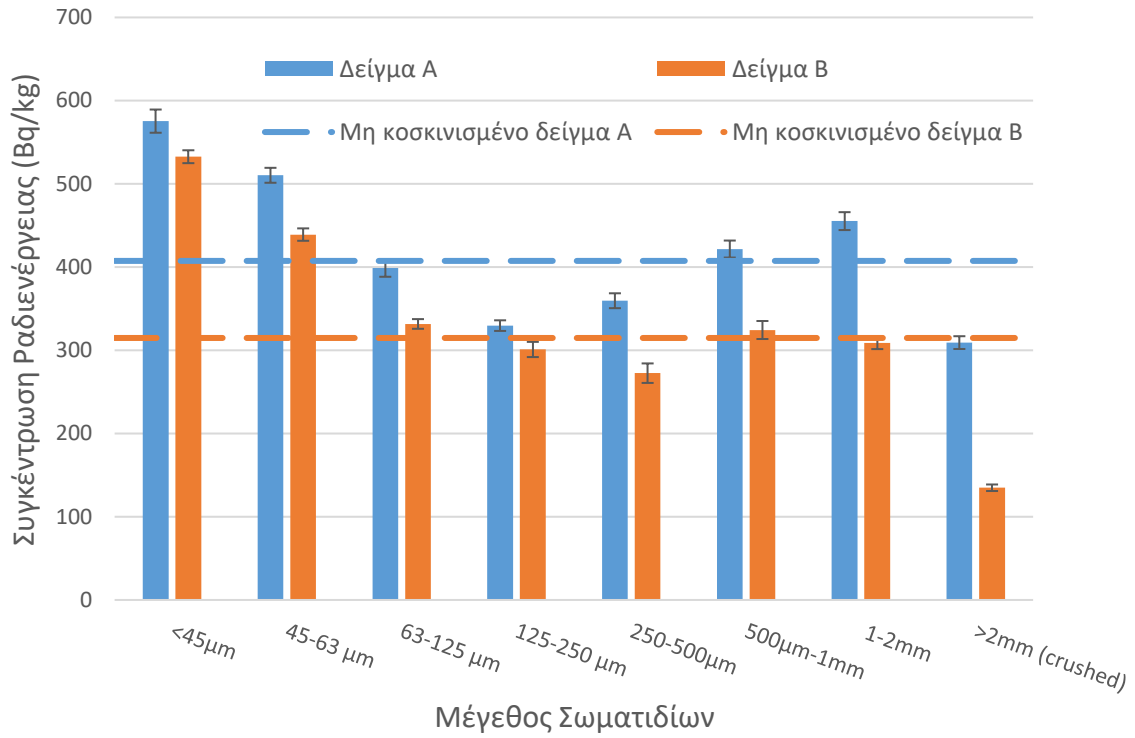
Σχήμα 3-31: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{228}Th βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων Α και Β



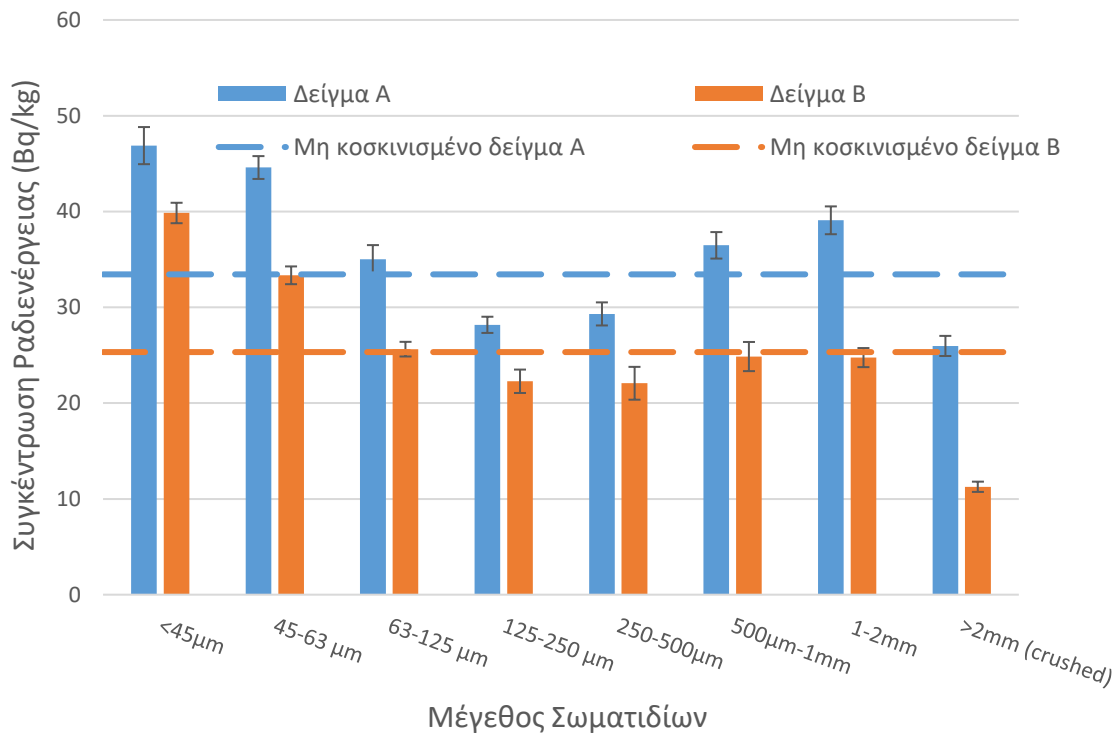
Σχήμα 3-32: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^7Be βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B



Σχήμα 3-33: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{226}Ra βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B

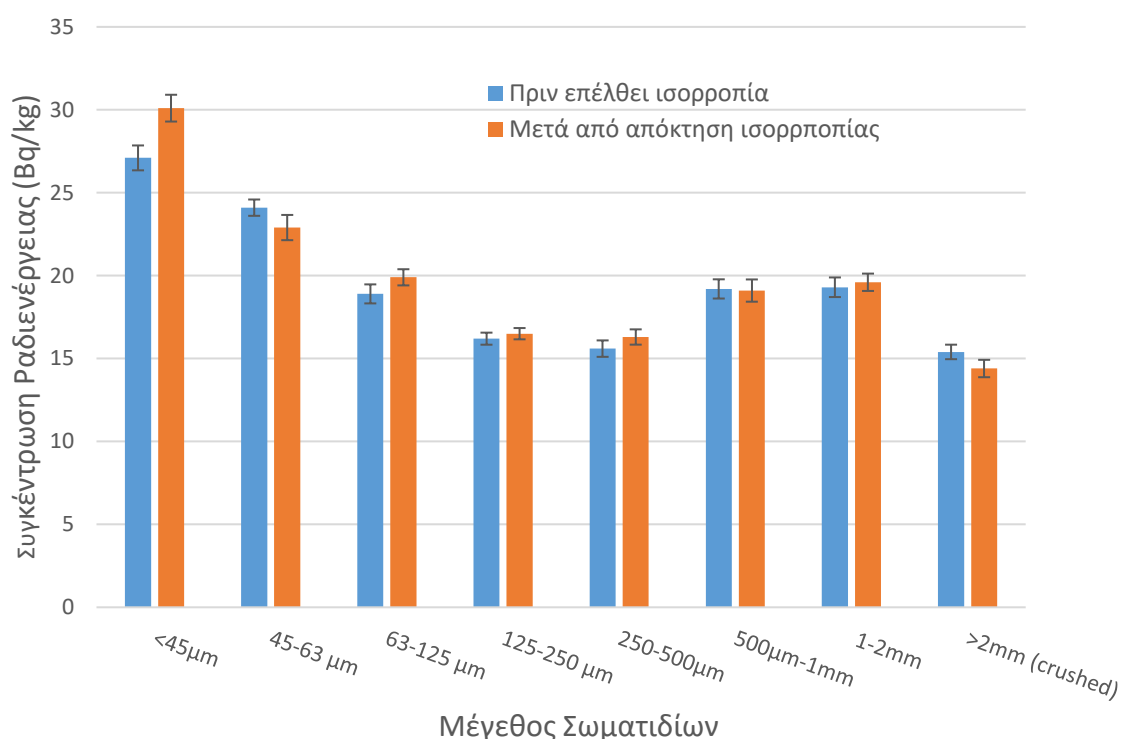


Σχήμα 3-34: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{40}K βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B

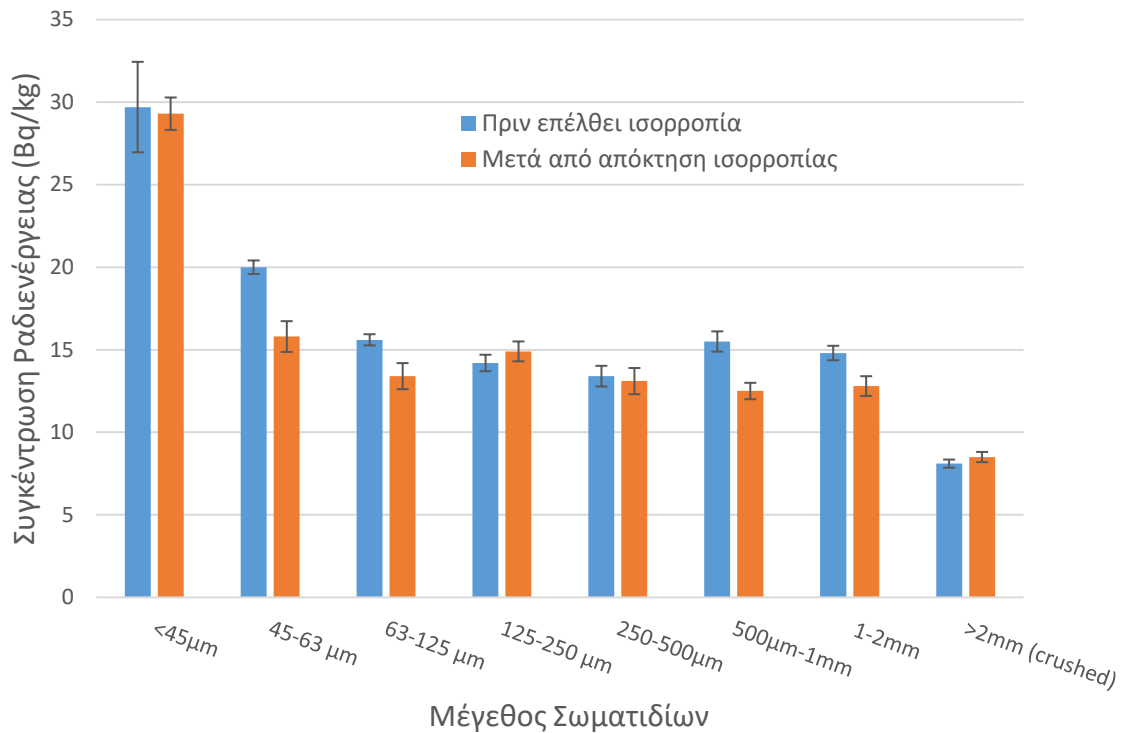


Σχήμα 3-35: Κατανομή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας του ^{228}Ra βάσει κοκκομετρίας και σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων A και B

Στα Σχήματα 3-27 έως 3-35 οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη συγκέντρωση ραδιενέργειας των ποιοτικών δειγμάτων για κάθε ένα από τα δύο δείγματα Α και Β. Είναι οι μετρήσεις που έγιναν μετά το πέρας της δεύτερης φάσης της συσκευασίας των δειγμάτων και είναι ακριβέστερες της σύντομης μέτρησης που έγινε στην αρχή των πειραμάτων και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-10. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του ^{226}Ra πριν και μετά τη δεύτερη φάση της συσκευασίας, δηλαδή πριν και μετά τη στεγανοποίησή του και την απόκτηση ισορροπίας μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του. Η σύγκριση αυτή δίνεται στα Σχήματα 3-36 και 3-37.



Σχήμα 3-36: Σύγκριση του ^{226}Ra από το δείγμα Α πριν και μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του



Σχήμα 3-37: Σύγκριση του ^{226}Ra από το δείγμα Β πριν και μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του

Από τα διαγράμματα των σχημάτων 3-27 έως 3-37 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Σημαντική διαφορά στις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ραδιενεργών ισοτόπων παρατηρείται ακόμα και μεταξύ δειγμάτων που συλλέχθηκαν μόνο με μερικά μέτρα μεταξύ τους απόσταση.
- Η συγκέντρωση της ραδιενέργειας για όλα τα ραδιενεργά ισότοπα είναι σημαντικά αυξημένη στα κλάσματα των σωματιδίων μικρότερου μεγέθους σε σχέση με τη συγκέντρωση ραδιενέργειας των μεγαλύτερου μεγέθους κλασμάτων. Για τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στο έδαφος από εξωτερικές πηγές (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^7Be) αυτό μπορεί να εξηγηθεί εύκολα. Η εξήγηση έγκειται στο γεγονός ότι από την αρχή της μετανάστευσης και εναπόθεσής τους προσκολλώνται στην επιφάνεια των σωματιδίων του χώματος. Αυτό μπορεί εύκολα να ερμηνευθεί, καθώς τα μικρού μεγέθους σωματίδια έχουν μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας προς όγκο (άρα και επιφάνειας προς μάζα). Για τα ραδιενεργά ισότοπα που προϋπάρχουν στο έδαφος η τάση αυτή πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω.

- Το γεγονός ότι τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα έχουν αυξημένη συγκέντρωση στα λεπτόκοκκα κλάσματα πρέπει να λαμβάνετε υπόψιν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας και της επεξεργασίας δειγμάτων, καθώς και σε μελέτες μετανάστευσης ραδιενεργών ισοτόπων. Από τα σχήματα 3-27 έως 3-35 γίνεται προφανές ότι ένα δείγμα που δεν έχει υποστεί κοσκίνισμα διαφέρει σημαντικά από τα κλάσματά του ως προς τις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των περιεχόμενων σε αυτά ραδιενεργών ισοτόπων.
- Ανεξάρτητα από τις κοκκομετρικές κατανομές των δειγμάτων και το κλάσμα χώματος στο οποίο απαντάται το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας τους, η τάση των ραδιενεργών ισοτόπων να συσσωρεύονται στα μικρότερα κλάσματα χώματος παραμένει αμετάβλητη.
- Οι μετρήσεις για το ^{226}Ra πριν και μετά την αποκατάσταση ισορροπίας μεταξύ αυτού και των θυγατρικών του, ως αποτέλεσμα στεγανοποίησης των δειγμάτων χώματος, παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές, γεγονός που αποτελεί ένδειξη χαμηλής εκροής ραδονίου από το χώμα.

Επιπλέον από τα αποτελέσματά της παραπάνω διερεύνησης διαπιστώνεται μια συστηματική αύξηση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στο κλάσμα 1-2mm, και ορισμένες φορές και στα γειτονικά του, η οποία έρχεται σε αντίθεση με την σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας όσο αυξάνει το μέγεθος των σωματιδίων. Η ιδιαιτερότητα αυτή πιθανόν να οφείλεται στη δημιουργία συσσωματωμάτων από μικρότερης διαμέτρου σωματίδια με αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας, τα οποία δεν έσπασαν κατά την επεξεργασία των δειγμάτων. Αποτέλεσμα της μη ορθής κοκκομετρική κατανομής των συσσωματωμάτων αυτών πιθανόν να οδήγησε σε «πλουσιότερο» κλάσμα 1-2mm αυξάνοντας τη μετρούμενη σε αυτό συγκέντρωση ραδιενέργειας. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος έλαβε χώρα περεταίρω επεξεργασία του κλάσματος των 1-2mm του δείγματος Α, εφαρμόζοντας υγρό αντί ξηρό κοσκίνισμα. Η διαδικασία της επεξεργασίας αυτής και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

4 Ανάλυση δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης

Η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, αποτελεί μια παραλλαγή της ξηρής κοσκίνισης με τη βασική διαφορά τους να εντοπίζεται στη χρήση υγρού (νερού για την παρούσα ΔΕ) κατά τη διάρκεια της κοσκίνισης. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παρούσα ΔΕ και δίνονται και σχολιάζονται τα συλλεχθέντα αποτελέσματα καθώς και οι διαφορές τους με τα αποτελέσματα της μεθόδου της ξηρής κοσκίνισης.

4.1 Ανάγκη για υγρή κοσκίνιση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δείγματα χώματος που αναλύθηκαν, επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, έδωσαν μια καθαρή τάση συσσώρευσης των ραδιενεργών ισοτόπων στα μικρότερης διαμέτρου κλάσματα χώματος, αλλά παρουσίασαν και μια ιδιαιτερότητα αυξημένης συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα μεγάλα κλάσματα χώματος και ιδιαίτερα στο κλάσμα των 1-2mm.

Η ιδιαιτερότητα αυτή δεν είχε κάποια άμεση εξήγηση και εξετάστηκε η υπόθεση ότι η αυξημένη συγκέντρωση της ραδιενέργειας στο κλάσμα αυτό μπορεί να οφείλεται σε συσσωματώματα δημιουργημένα από μικρότερης διαμέτρου κλάσματα και όχι από αυτούσια σωματίδια διαμέτρου 1-2mm. Για την διερεύνηση της υπόθεσης αυτής αποφασίστηκε να οδηγηθεί σε επανεπεξεργασία αποκλειστικά το κλάσμα των 1-2mm του δείγματος Α με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης (wet sieving) ώστε να διασπαστούν τα συσσωματώματα, αν υπάρχουν, και να προσδιοριστεί η κατανομή των επιμέρους σωματιδίων που αποτελούν το συγκεκριμένο κλάσμα.

4.2 Μεθοδολογία ανάλυσης υγρής κοσκίνισης

Για τη διαδικασία της υγρής κοσκίνισης χρησιμοποιήθηκε η ίδια συσκευή με αυτή της ξηρής κοσκίνισης (AS-200 Control) αλλά με τις απαραίτητες αλλαγές, όπως αυτές περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Επειδή ήταν η πρώτη φορά που έγινε το πείραμα της υγρής κοσκίνισης στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, τα πειράματα, εκτός από τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής του κλάσματος των 1-2mm, είχαν σκοπό και την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που να μπορεί να ακολουθηθεί σε παρόμοιες μελλοντικές έρευνες.

Αρχικά, έγινε η επιλογή των κατάλληλων κοσκίνων, τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν αυτά των 45 μ m, 63 μ m, 125 μ m, 250 μ m, 500 μ m και 1mm, καθώς το κλάσμα προς κοσκίνιση ήταν αυτό των 1-2mm, επομένως το κόσκινο των 2mm δεν είχε χρήση στο συγκεκριμένο πείραμα. Τα κόσκινα τοποθετήθηκαν ανά αύξουσα διάμετρο οπής και προσαρμόστηκαν στη συσκευή κοσκίνισης. Για τη διάταξη της υγρής κοσκίνισης χρησιμοποιήθηκε μια ειδική βάση για τα κόσκινα, η οποία έχει εσωτερική κλίση και έξοδο για την αποστράγγιση του υγρού δείγματος. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και ειδικό καπάκι, το οποίο συνδεδεμένο με πλαστικό σωλήνα παρέχει σε μορφή σταγόνων το νερό για την κοσκίνιση. Η διάταξη της υγρής κοσκίνισης απεικονίζεται στο σύνολό της στο σχήμα 4-1.

Για την κατανόηση της διαδικασίας της υγρής κοσκίνισης έγιναν δοκιμές, όπου κοσκινίστηκαν ποσότητες άνω και κάτω των 100gr από το κλάσμα των 1-2mm, ώστε να συλλεχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη σωστότερη διεξαγωγή της προς μελέτη υγρή κοσκίνισης του εν λόγω κλάσματος. Η διαδικασία ξεκινά με την ανάμειξη του δείγματος χώματος προς κοσκίνιση σε δοχείο με νερό και έγχυσή του στο άνω κόσκινο, ασφαλίζοντας στη συνέχεια προσεκτικά τη στήλη των κοσκίνων με το καπάκι και θέτοντας σε λειτουργία τη διάταξη της κοσκίνισης, με πλάτος κοσκίνισης στα 1.5 mm (το πλάτος επιλέχθηκε για την παρούσα ΔΕ). Όταν η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία, ξεκίνησε η τροφοδοσία του νερού στα κόσκινα, η παροχή του οποίου γινόταν χειροκίνητα από ένα δοχείο. Η τροφοδοσία γινόταν όσο το δυνατόν με σταθερό ρυθμό σε χωνί προσαρμοσμένο στο ένα άκρο του σωλήνα που συνδεόταν με το καπάκι της στήλης των κοσκίνων. Να επισημάνουμε ότι το νερό που

χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία αυτή ήταν φιλτραρισμένο μέσα από ειδική στήλη απόσταξης



Σχήμα 4-1: Διάταξη υγρής κοσκίνισης όπως αυτή διαμορφώθηκε για την παρούσα ΔΕ

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοσκίνισης, επειδή τα κόσκινα είναι στεγανά σε νερό και σκόνη, σε κάποιες περιπτώσεις δημιουργήθηκαν θύλακες αέρα ανάμεσα σε αυτά, επηρεάζοντας ως επί το πλείστον τα κόσκινα των 63 μm και 45 μm , όπως είχε επισημανθεί στις βιβλιογραφικές αναφορές (Retsch 2005). Αυτή οι θύλακες αέρα εμπόδιζαν τη ροή του δείγματος ανάμεσα στα κόσκινα και δυσχέραιναν τη διαδικασία κοσκίνισης. Τρόποι για την επίλυση αυτού του προβλήματος παρατίθενται παρακάτω, στα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που έλαβαν χώρα.

Το πέρας της κοσκίνισης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Retsch, 2005), ολοκληρώνεται όταν το συλλεγόμενο υγρό δείγμα που εξέρχεται από τη στήλη των κοσκίνων είναι οπτικά καθαρό. Ωστόσο επειδή η διαδικασία ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα, αποφασίστηκε να περατωθεί όταν ένα ελαφρώς θολό υγρό δείγμα

συλλεγόταν από το κόσκινο βάσης, θεωρώντας ικανοποιητική την κοσκίνιση των δειγμάτων. Επομένως, σταμάτησε η τροφοδοσία του νερού και παρέμεινε σε λειτουργία η συσκευή κοσκίνισματος έως ότου να σταματήσει η ροή υγρού δείγματος από τη βάση των κοσκίνων. Όταν σταμάτησε η ροή του υγρού δείγματος απενεργοποιήθηκε η συσκευή κοσκίνισματος και αφαιρέθηκε η στήλη των κοσκίνων από αυτή.

Τα κλάσματα που παρέμειναν στα κόσκινα συλλέχθηκαν σε αλουμινένια σκεύη, χρησιμοποιώντας ένα κουτάλι και έναν υδροβολέα με απιονισμένο νερό για την καλύτερη απόσπαση των κλασμάτων από τα τοιχώματα των κοσκίνων. Το κλάσμα των $45\mu\text{m}$ συλλέχθηκε μαζί με το νερό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σε δοχεία, μέσω πλαστικού σωλήνα συνδεδεμένου στην έξοδο της βάσης της στήλης των κοσκίνων. Μετά το πέρας της κοσκίνισης τα κόσκινα πλύθηκαν στην ειδική συσκευή πλυσίματος κοσκίνων, όπως και στην ξηρή κοσκίνιση.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών αυτών κοσκίνισεων, προέκυψαν μία σειρά από συμπεράσματα σχετικά με τη διαδικασία, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Η ποσότητα του δείγματος χόματος που τοποθετείται προς υγρή κοσκίνιση δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100 gr. Στην περίπτωση που το όριο αυτό ξεπεραστεί υπάρχει η πιθανότητα τα κόσκινα με οπές μικρότερης διαμέτρου (45 μm και 63 μm) να φράξουν και να μην επιτρέπουν το υγρό δείγμα να διέλθει από αυτά.
- Για την αντιμετώπιση του προβλήματος φραξίματος των κοσκίνων προτείνεται η χρήση ενδιάμεσων δακτυλίων που εκτονώνουν τους δημιουργούμενους θύλακες αέρα, χωρίς να επηρεάζουν τη στεγανότητα των κοσκίνων, οι οποίοι όμως δεν είναι διαθέσιμοι στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, καθώς και η τοποθέτηση των βοηθητικών αλυσίδων στα κόσκινα των 45 μm και 63 μm , μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ.
- Στην περίπτωση που κριθεί αναγκαία η διακοπή της υγρής κοσκίνισης πριν την ολοκλήρωσή της, θα πρέπει να αποφευχθεί η αφαίρεση μέρους ή όλων των κοσκίνων από τη διάταξη καθώς η επανατοποθέτησή τους στη διάταξη κοσκίνισης και η επανεκκίνηση της διαδικασίας μπορεί να συνοδευθούν από τη δημιουργία θυλάκων αέρα μεταξύ των κοσκίνων.

- Σε περίπτωση φραξίματος των κοσκίνων ακολουθείται η αντίθετη τακτική, από την παραπάνω παρατήρηση, δηλαδή αποσπώνται τα μικρά κόσκινα από την υπόλοιπη στήλη των κοσκίνων, ώστε να εκτονωθούν η δημιουργούμενοι θύλακες αέρα, και να γίνει μερική απόφραξή τους. Στη συνέχεια επανατοποθετούνται στη στήλη και συνεχίζεται η κοσκίνιση.

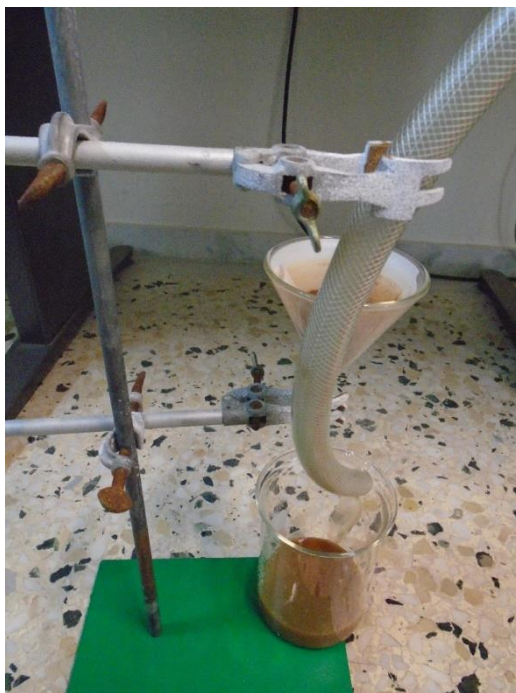
Έχοντας επομένως συλλέξει τις πληροφορίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, προβήκαμε στην υγρή κοσκίνιση του δείγματος χώματος που θέλαμε να αναλύσουμε περαιτέρω. Για την υγρή κοσκίνιση των δειγμάτων ενδιαφέροντος χρησιμοποιήσαμε 8660.2gr φιλτραρισμένου νερού και κοσκίνισαμε συνολικά 152.5gr δείγματος χώματος από το κλάσμα των 1-2mm του δείγματος A, σε δύο φάσεις.

Συνοπτικά, τα βήματα για την ανάλυση ενός δείγματος χώματος με υγρή κοσκίνιση είναι τα ακόλουθα:

- *Επιλογή των κοσκίνων προς χρήση.*
- *Τοποθέτηση των κοσκίνων ανά αύξουσα διάμετρο οπής και προσαρμογής τους στη συσκευή κοσκίνισης. Χρήση της ειδικής βάσης για αποστράγγιση του υγρού δείγματος, καθώς και του ειδικού καπακιού συνδεδεμένου με πλαστικό σωλήνα για την παροχή σε μορφή σταγόνων του νερού για την κοσκίνιση. Προτείνεται η χρήση ενδιάμεσων δακτυλίων στα κόσκινα για εξισορρόπηση της πίεσης, σε περίπτωση που είναι διαθέσιμοι. Επιπλέον, προτείνεται η τοποθέτηση βοηθητικών αλυσίδων στα κόσκινα των 45μm και 63μm.*
- *Ανάμειξη του δείγματος χώματος με νερό.*
- *Τοποθέτηση του δείγματος προς κοσκίνιση στο άνω κόσκινο. Η ποσότητα δείγματος χώματος που τοποθετείται στο άνω κόσκινο δε πρέπει να ξεπερνά τα 100gr.*
- *Προσεκτική ασφάλιση της στήλης των κοσκίνων με το καπάκι.*
- *Έναρξη της κοσκίνισης. Ρύθμιση του πλάτους κοσκίνισης κατ' επιλογή των ερευνητών.*
- *Τροφοδοσία του νερού.*
- *Πέρασ της κοσκίνισης. Το πέρας της κοσκίνισης καθορίζεται από τον εκάστοτε ερευνητή σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχει θέσει για το πείραμά του. Βάσει*

βιβλιογραφίας, το πέρας σηματοδοτείται από την εξαγωγή καθαρού νερού από το κόσκινο βάσης.

- Συλλογή των κλασμάτων.
- Πλύσιμο των κοσκίνων.



Σχήμα 4-2: Διάταξη συλλογής του κλάσματος των <math><45\mu\text{m}</math> μαζί με το νερό από τη βάση της στήλης των κοσκίνων

4.3 Ξήρανση των δειγμάτων

Όπως και στην ξηρή έτσι και στην υγρή κοσκίνιση είναι απαραίτητη η ξήρανση των δειγμάτων πριν τη φασματοσκοπική ανάλυσή τους, ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπ' όψιν το υψηλό ποσοστό υγρασίας των δειγμάτων όπως λαμβάνονται από τα κόσκινα, αλλά και το γεγονός ότι το μικρότερο σε διάμετρο κλάσμα συλλέγεται μαζί με όλο τον όγκο του υγρού που χρησιμοποιήθηκε για την κοσκίνιση.

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τα κόσκινα σε αλουμινένια σκεύη, με τη βοήθεια του υδροβολέα τοποθετήθηκαν σε διηθητικά φίλτρα ώστε να ξηραθούν όσο το δυνατόν συντομότερα. Το κλάσμα των <math><45\mu\text{m}</math>, που συλλέχθηκε σε αρκετά δοχεία, αφέθηκε αδιατάραχτο για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα ώστε να καθιζάνει, και με

τη βοήθεια σήραγγας αφαιρέθηκε το νερό. Το νερό που αφαιρέθηκε από το υγρό δείγμα πέρασε στο σύνολό του από διηθητικά φίλτρα ώστε να συλλεχθεί το εναπομείναν κλάσμα χρώματος που δεν είχε καθιζάνει καθώς και να απομονωθεί το «καθαρό» νερό με σκοπό να διερευνηθεί η πιθανότητα αυτό να έχει διαλύσει ραδιενεργά ισότοπα από το δείγμα μας.

Μετά την αφαίρεση του συνόλου του νερού από τα δοχεία, το εναπομείναν ίζημα, που αποτελούσε το δείγμα των <math><45\mu\text{m}</math>, αφέθηκε να ξεραθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με την ολοκλήρωση της ξήρανσης των δειγμάτων, αυτά συλλέχθηκαν από τα διηθητικά φίλτρα και τα δοχεία, τοποθετήθηκαν σε αλουμινένια σκεύη και ζυγίστηκαν σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας.

Το «καθαρό» νερό που συλλέχθηκε ως αποτέλεσμα της διήθησης του νερού από τα δοχεία αποτελεί το υγρό δείγμα και έχει μάζα 7603.7gr. Η διαφορά των 1000gr περίπου του υγρού δείγματος με το νερό που χορηγήθηκε για την υγρή κοσκίνιση αποτελεί απώλειες που μοιράστηκαν στη στήλη των κοσκίνων, στην υγρασία των υπόλοιπων συλλεχθέντων κλασμάτων και στο νερό που εξατμίστηκε κατά τη διάρκεια της διήθησης του υγρού κλάσματος των <math><45\mu\text{m}</math>. Για την επεξεργασία και ανάλυσή του υγρού δείγματος ακολουθήθηκε μια διαφορετική διαδικασία που θα περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 4.6.



Σχήμα 4-3: Από αριστερά προς τα δεξιά τα συλλεχθέντα κλάσματα των 1-2mm, 500μm-1mm, 250μm-500μm, 125μm-250μm, 63μm-125μm, 45μm-63μm μετά την ξήρανσή τους



Σχήμα 4-4: Το δείγμα των <math><45\mu\text{m}</math> μέσα στα δοχεία συλλογής μετά το πέρας της ξήρανόσής του,

4.4 Συσκευασία των δειγμάτων

Για την πλήρωση μιας συγκεκριμένης και κατάλληλα βαθμονομημένης γεωμετρίας δείγματος χρειάζεται και η ανάλογη μάζα από το προς ανάλυση δείγμα. Το σύνολο της διαδικασίας των πειραμάτων της υγρής κοσκίνισης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρο, και για την συλλογή ικανοποιητικής ποσότητας δείγματος για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χώματος απαιτούνται αρκετές μέρες ξήρανης και επεξεργασίας.

Ύστερα από ένα εύλογο διάστημα επεξεργασίας των δειγμάτων οι μάζες των συλλεχθέντων κλασμάτων δεν ήταν αρκετές για τη συσκευασία δειγμάτων για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χωριστά. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η ομαδοποίηση κάποιων κλάσεων ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη μάζα προς συσκευασία και να χρησιμοποιηθεί μια πρόσφατα αναπτυγμένη γεωμετρία από το ΕΠΤ-ΕΜΠ (Χαβιαράς 2015), η οποία απαιτεί πολύ μικρή μάζα δείγματος για την πλήρωσή της. Η νέα αυτή γεωμετρία πλήρωσης των δειγμάτων είναι κυλινδρική με μέση ακτίνα 2.8cm, ύψος 0.76cm και όγκο πλήρωσης περίπου 18cm^3 . Οι νέες κλάσεις που προέκυψαν ύστερα από την ομαδοποίηση των συλλεχθέντων κλασμάτων είναι οι <math><45\mu\text{m}</math>, $45\mu\text{m}-125\mu\text{m}</math>,$

125 μ m-1mm, 1-2mm. Μετά την ομαδοποίηση των κλάσεων, τα δείγματα συσκευάστηκαν και σφραγίστηκαν με σιλικόνη, προσεκτικά τοποθετημένη χρησιμοποιώντας πιστόλι σιλικόνης.

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα της υγρής κοσκίνισης έδειξαν ότι το κλάσμα των 1-2mm δεν αποτελείτο αποκλειστικά από σωματίδια των 1-2mm αλλά και από συσσωματώματα μικρότερων σωματιδίων, η κατανομή των οποίων δίνεται στον πίνακα 4-1.

Αρχική μάζα χώματος(gr)	152.5			
Μέγεθος Σωματιδίων	Συλλεχθείσα μάζα χώματος(gr)	Απώλειες στα φίλτρα (gr)	Σύμπτυξη Κλασμάτων (gr)	Ποσοστό επί της συλλεχθείσας μάζας χώματος(%)
<45 μ m	71.31	14.69	71.31	52
45-63 μ m	7.39	0.24	23.98	18
63-125 μ m	16.59	0.24		
125-250 μ m	12.20	0.22	20.97	15
250-500 μ m	5.77	0.15		
500 μ m-1mm	3.00	0.18		
1-2mm	20.40	0.12	20.40	15
Σύνολο	136.66	15.84	136.66	100

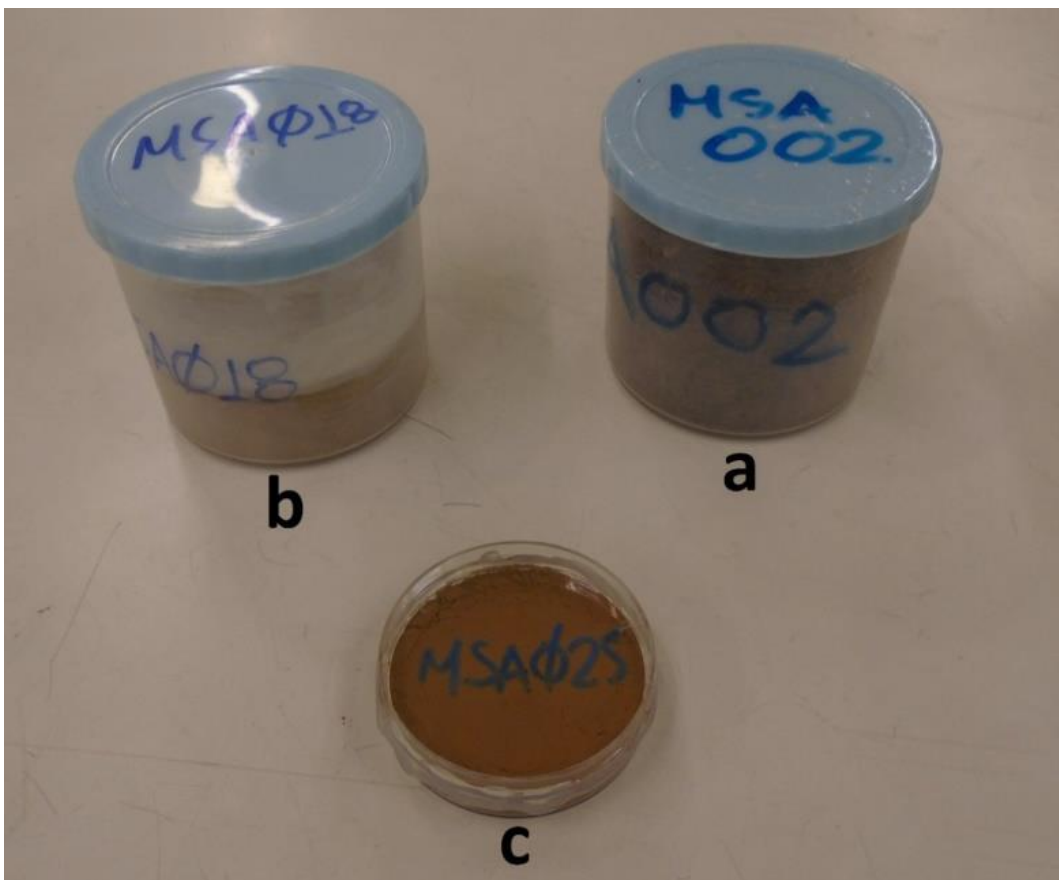
Πίνακας 4-1: Η κοκκομετρική κατανομή του κλάσματος των 1-2mm ως αποτέλεσμα της υγρής του κοσκίνισης

Ο σχολιασμός του πίνακα 4-1 και η απεικόνισή του σε μορφή διαγράμματος δίνεται στην παράγραφο 4.7.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η οπτική σύγκριση των 3 διαφορετικών τυποποιημένων γεωμετριών του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ΔΕ εργασία. Η γεωμετρία των 18cm³ καθώς και η σύγκρισή της με τις γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για τα δείγματα της ξηρής κοσκίνισης δίνονται στα σχήματα 4-5 και 4-6.



Σχήμα 4-5: Συσκευασμένα δείγματα ομαδοποιημένων κλασμάτων από την επεξεργασία του κλάσματος 1-2mm με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης



Σχήμα 4-6: Οι τυποποιημένες γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ΔΕ, με τους εξής όγκους πλήρωσης : a) 282cm^3 , b) 97.2cm^3 , c) 18.0cm^3

4.5 Συλλογή και ανάλυση φασμάτων

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και ανάλυσης των φασμάτων των κοκκομετρικών κλασμάτων που συσκευάστηκαν στη γεωμετρία πλήρωσης των 18cm³. Η ανάλυση του υγρού δείγματος δίνεται στην παράγραφο 4.6.

Τα δείγματα που συσκευάστηκαν στη γεωμετρία των 18cm³ αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας στον ανιχνευτή LEGe. Τα φάσματα συλλέχθηκαν για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 48 ωρών και τα ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν είναι τα ²¹⁰Pb, ²⁴¹Am, ²³⁴Th, ¹³⁷Cs, και το ⁴⁰K.

Το ζήτημα που προέκυψε στη συγκεκριμένη ανάλυση ήταν αυτό της βαθμονόμησης απόδοσης, καθώς για την καινούρια αυτή γεωμετρία δεν ήταν γνωστή η απόδοση για τις ενέργειες των φωτονίων που εκπέμπουν τα παραπάνω ισότοπα. Για το λόγο αυτό η απόδοση φωτοκορυφής για τη νέα γεωμετρία και για τις ζητούμενες ενέργειες υπολογίστηκε με τη μέθοδο της μεταφοράς απόδοσης, η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 4.5.1.

4.5.1 Μέθοδος Μεταφοράς Απόδοσης

Σε πολλές περιπτώσεις, ο διαθέσιμος εξοπλισμός είτε η ποσότητα του δείγματος μπορεί να οδηγήσουν στη συσκευασία δειγμάτων σε μη τυποποιημένη γεωμετρία, δηλαδή σε γεωμετρία για την οποία δεν είναι γνωστή η απόδοσή της για τις διάφορες ενέργειες φωτονίων. Στην περίπτωση αυτή, αντί να υπολογιστούν πειραματικά οι αποδόσεις για τη νέα γεωμετρία, είναι δυνατόν να υπολογιστούν μέσω της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης.

Βάσει της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης, α) εάν υπάρχουν δύο γεωμετρίες δείγματος οι οποίες πληρώνονται με το ίδιο δείγμα και αναλύονται στον ίδιο ανιχνευτή, β) αν είναι γνωστή η πειραματική τιμή απόδοσης για μία ενέργεια για μία από αυτές γ) και αν εκτιμηθεί η απόδοση φωτοκορυφής μέσω τεχνικών Monte Carlo για τις δύο γεωμετρίες και την ίδια ενέργεια, τότε η απόδοση της άλλης γεωμετρίας είναι δυνατόν να προσεγγιστεί εφαρμόζοντας την εξίσωση 4-1 (Piton et al. 2000).

$$eff_{ET,2} = eff_{\Pi,1} * \frac{eff_{MC,2}}{eff_{MC,1}} \quad (4-1)$$

όπου:

$eff_{ET,2}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 2 η οποία προσεγγίζεται με μεταφορά απόδοσης.

$eff_{\Pi,1}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 1, η οποία έχει προσδιοριστεί πειραματικά.

$eff_{MC,1}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 1 όπως προκύπτει μέσω τεχνικών Monte Carlo.

$eff_{MC,2}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 1 όπως προκύπτει μέσω τεχνικών Monte Carlo.

Ο παραπάνω τύπος μεταφοράς απόδοσης είναι γενικός και μπορεί να εφαρμοσθεί με διάφορες δυνατές παραλλαγές. Βάση προηγούμενης έρευνας του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Χαβιαράς 2015), επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μεταφορά απόδοσης σύμφωνα με τον τύπο που ακολουθεί:

$$eff_{(ET,2, 4MHCL)} = eff_{(\Pi,1, 4MHCL)} * \frac{eff_{(MC,2, 4MHCL)}}{eff_{(MC,1, 4MHCL)}} \quad (4-2)$$

$$eff_{(ET,2, soil)} = eff_{(ET,2, 4MHCL)} * \eta \quad (4-3)$$

όπου:

$eff_{(ET,2, 4MHCL)}$: η απόδοση φωτοκορυφής για υλικό πηγής 4M HCl, με εφαρμογή της μεταφοράς απόδοσης.

$eff_{(MC,1, 4MHCL)}$: η απόδοση φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης για γνωστή γεωμετρία και υλικό πηγής 4M HCl (προσομοίωση αρχικής απόδοσης).

$eff_{(MC,2, 4MHCL)}$: η απόδοση φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης για τη νέα γεωμετρία και υλικό πηγής 4M HCl (προσομοίωση τελικής απόδοσης).

$eff_{(PI,1, 4MHCL)}$: η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για γνωστή γεωμετρία και υλικό πηγής 4M HCl (πειραματική αρχική απόδοση).

$eff_{(ET,2, soil)}$: η διορθωμένη απόδοση φωτοκορυφής για γνωστή γεωμετρία και υλικό πηγής χώμα.

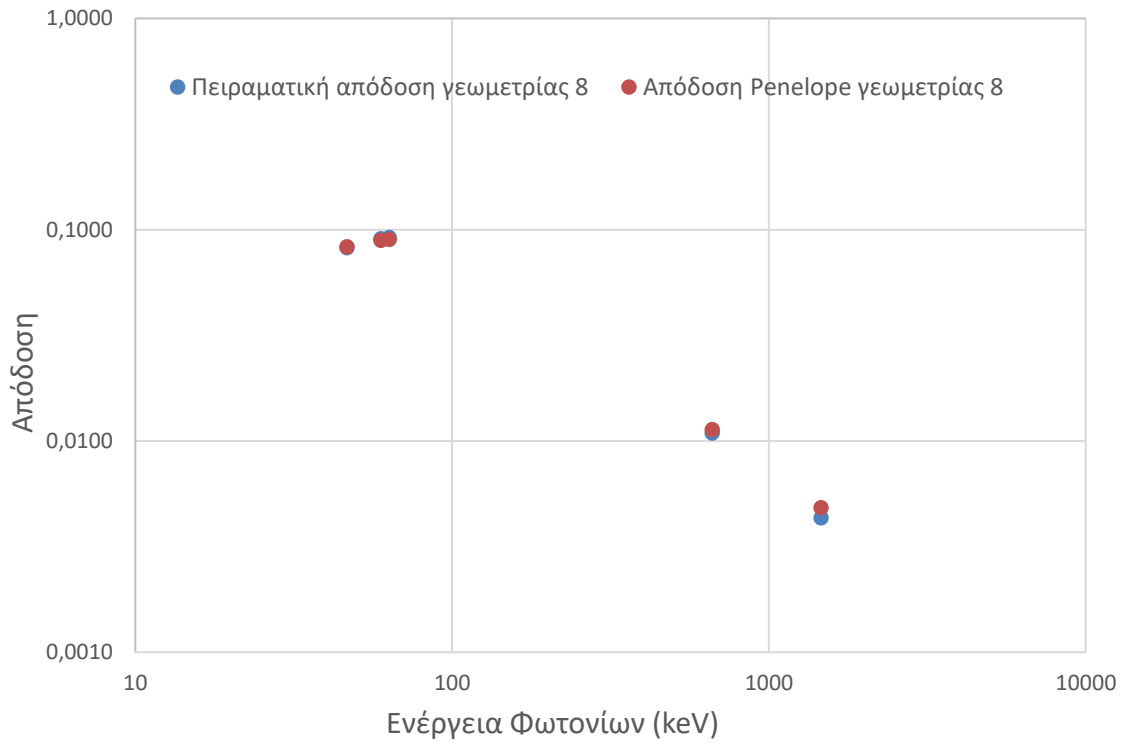
η : ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης, για τη νέα γεωμετρία

Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του κώδικα PENELOPE. Τα αρχεία γεωμετρίας (*.geo) και τα κύρια αρχεία εισόδου (*.in) δίνονται στο Παράρτημα Β. Οι συντελεστές αναγωγής απόδοσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της απόδοσης λόγω του φαινομένου της αυταπορρόφησης στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών, υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα factor (Αναγνωστάκης 1998).

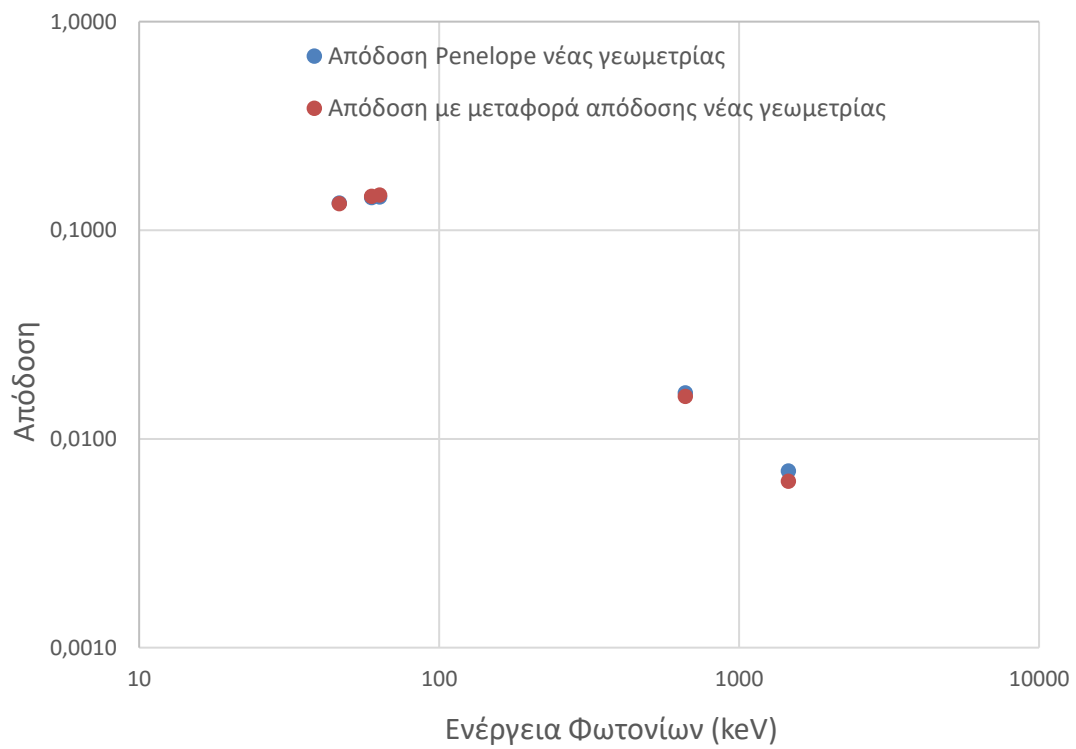
Στους πίνακες 4-2 και 4-3 δίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού της απόδοσης για τη νέα γεωμετρία (βάσει των σχέσεων 4-2 και 4-3) έχοντας ως γνωστή γεωμετρία την τυποποιημένη γεωμετρία 8 του ΕΠΤ-ΕΜΠ με όγκο πλήρωσης 40cm³.

Ενέργεια φωτονίων (keV)	Πειραματική απόδοση, γεωμ. 8 (4M HCl)	Απόδοση PENELOPE, γεωμ.8 (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Απόδοση PENELOPE, νέα γεωμ. (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)
46.52	0.0823	0.0829	1.9E-05	0.1353	5.2E-05
59.54	0.0905	0.0892	3.2E-05	0.1434	2.3E-05
63.29	0.0917	0.0899	4.8E-05	0.1444	6.0E-05
661.62	0.0109	0.0113	3.3E-05	0.0167	2.3E-05
1460.75	0.0043	0.0048	2.8E-05	0.0070	1.9E-05

Πίνακας 4-2 : Πειραματικές αποδόσεις και οι αποδόσεις προσομοίωσης με τις αβεβαιότητές τους για τη γεωμετρία 8 και τη νέα γεωμετρία για τα δείγματα υγρής κοσκίνισης, όπως αυτές εξαρτώνται από την ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων



Σχήμα 4-7: Σύγκριση πειραματικής απόδοσης και απόδοσης προσομοίωσης γεωμετρίας 8



Σχήμα 4-8: Σύγκριση απόδοσης προσομοίωσης και απόδοσης με τη μέθοδο μεταφοράς απόδοσης για τη νέα γεωμετρία

	Ενέργεια φωτονίων (keV)	Απόδοση με μεταφορά απόδοσης. νέα γεωμ. (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Συντελεστής αναγωγής απόδοσης (η)	Διορθωμένη απόδοση. νέα γεωμ. (soil)
<45 μ m 1.0506 gr/cm ³	46.52	0.1342	6.1E-05	0.9464	0.1270
	59.54	0.1456	5.7E-05	0.9650	0.1405
	63.29	0.1474	9.9E-05	0.9699	0.1429
	661.62	0.0160	5.2E-05	1.0000	0.0160
	1460.75	0.0063	4.0E-05	1.0000	0.0063
45 μ m-125 μ m 1.1283 gr/cm ³	46.52	0.1340	6.1E-05	0.9328	0.1250
	59.54	0.1460	5.7E-05	0.9552	0.1395
	63.29	0.1470	9.9E-05	0.9608	0.1412
	661.62	0.0160	5.2E-05	1.0000	0.0160
	1460.75	0.0063	4.0E-05	1.0000	0.0063
125 μ m-1mm 0.8794 gr/cm ³	46.52	0.1340	6.1E-05	0.9770	0.1309
	59.54	0.1460	5.7E-05	0.9868	0.1441
	63.29	0.1470	9.9E-05	0.9901	0.1455
	661.62	0.0160	5.2E-05	1.0000	0.0160
	1460.75	0.0063	4.0E-05	1.0000	0.0063
1-2mm 0.6444 gr/cm ³	46.52	0.1340	6.1E-05	1.0202	0.1367
	59.54	0.1460	5.7E-05	1.0179	0.1486
	63.29	0.1470	9.9E-05	1.0189	0.1498
	661.62	0.0160	5.2E-05	1.0000	0.0160
	1460.75	0.0063	4.0E-05	1.0000	0.0063

Πίνακας 4-3 : Η τελική υπολογισμένη απόδοση για τη νέα γεωμετρία συσκευασίας των δειγμάτων υγρής κοσκίνισης

4.5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων

Έχοντας πλέον τις αποδόσεις για τη νέα γεωμετρία συσκευασίας στις ενέργειες ενδιαφέροντος, μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση ραδιενέργειας για τα συλλεχθέντα δείγματα ανάγοντας τη μετρούμενη συγκέντρωση ραδιενέργειας που υπολογίζεται από τον κώδικα SPUNAL βάσει του παρακάτω τύπου:

$$R = R_S * \frac{eff_S}{eff} \quad (4-4)$$

όπου:

R : η διορθωμένη συγκέντρωση ραδιενέργειας βαθμονομημένη στη γεωμετρία συσκευασίας των δειγμάτων της υγρής κοσκίνισης εκφρασμένη σε Bq/kg.

R_s : η συγκέντρωση ραδιενέργειας που δόθηκε από τον κώδικα SPUNAL βαθμονομημένη στη γεωμετρία 8.

eff_s : η πειραματική απόδοση της γεωμετρίας 8.

eff : η απόδοση υπολογισμένη με τη μεθοδολογία μεταφοράς απόδοσης για τη γεωμετρία συσκευασίας των δειγμάτων.

Επιπροσθέτως, στις μετρήσεις, εκτός από την αναγωγή της αβεβαιότητας, που δόθηκε από τον κώδικα SPUNAL, στη νέα γεωμετρία, εισάγεται και μια αβεβαιότητα 4% οφειλόμενη στη βαθμονόμηση απόδοσης με τεχνικές Monte Carlo. Η νέα συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$uncertainty_{total} = \sqrt{(uncertainty_{spunald})^2 + (uncertainty_{m.c.})^2} \quad (4-5)$$

Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με τις διορθωμένες ως προς την απόδοση συγκεντρώσεις ραδιενέργειας και τις αβεβαιότητές τους εκφρασμένες σε μορφή $\pm 1\sigma$, δίνονται στους πίνακες 4-4 και 4-5.

Μέγεθος σωματιδίων	<45 μ m		45-125 μ m	
	Συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/kg)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/kg)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)
Pb-210	339.9	9.6	144.9	5.6
Am-241	165.3	4.1	73.5	2.0
Th-234	30.4	7.9	14.9	4.8
Cs-137	15.6	1.1	0.0	0.0
K-40	625.7	22.3	208.0	15.0

Πίνακας 4-4: Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, για τα κλάσματα <45 μ m και 45-125 μ m της υγρής κοσκίνισης.

Μέγεθος σωματιδίων	125μm-1mm		1-2mm	
	Συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/kg)	Αβεβαιότητα (±1σ)	Συγκέντρωση ραδιενέργειας (Bq/kg)	Αβεβαιότητα (±1σ)
Pb-210	112.3	5.0	79.1	5.9
Am-241	53.4	1.4	17.3	0.7
Th-234	7.9	4.3	16.1	6.1
Cs-137	2.0	1.0	2.6	1.5
K-40	170.8	15.7	299.4	25.2

Πίνακας 4-5: Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, για τα κλάσματα 125μm-1mm και 1-2mm της υγρής κοσκίνισης

4.6 Προετοιμασία και ανάλυση του υγρού δείγματος

Ως αποτέλεσμα της διήθησης του υγρού κλάσματος των <45μm συλλέχθηκαν 7603.7gr υγρού δείγματος. Λόγω της μεγάλης μάζας του υγρού δείγματος, για να συγκεντρωθούν σε ένα δείγμα προς ανάλυση όποια ραδιενεργά ισότοπα πιθανόν περιέχει, αποφασίστηκε να εξατμιστεί στο σύνολό του και να συλλεχθεί για ανάλυση το όποιο ίζημα προκύψει από την ξήρανση.

Για την ξήρανση του υγρού δείγματος χρησιμοποιήθηκε ένα υδατόλουτρο, το οποίο έχει στο κέντρο του μια μεγάλη εσωτερική κοιλότητα η οποία γεμίζεται με νερό, κατά προτίμηση φιλτραρισμένο προς αποφυγή συσσώρευσης αλάτων. Το υδατόλουτρο έχει τη δυνατότητα για ακριβή ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού της κοιλότητας, μέσα στην οποία εμβαπτίζονται τα δοχεία με το δείγμα προς εξατμισμό. Τα δοχεία με το δείγμα τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένες υποδοχές στο καπάκι της συσκευής, και σταθεροποιούνται στη θέση με λαβίδες στήριξης. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται η διαδικασία εξατμισμού του υγρού μείγματος χωρίς να προκαλείται ο βρασμός του. Για τις ανάγκες ξήρανσης του συγκεκριμένου υγρού δείγματος ρυθμίστηκε η θερμοκρασία της κοιλότητας νερού εντός του υδατόλουτρου στους 80°C.

Για την ξήρανση του υγρού δείγματος χρησιμοποιήθηκαν δύο δοχεία συλλογής. Όταν ολοκληρώθηκε η ξήρανση, μέσα στα δοχεία αυτά καθίζανε οτιδήποτε στερεό

σωματίδιο είχε παρασυρθεί μέσα από τα διηθητικά φίλτρα μαζί με το υγρό δείγμα. Το ίζημα αυτό συλλέχθηκε από τα δοχεία, και για τη διευκόλυνση της αποκόλλησής του από αυτά χρησιμοποιήθηκε αραιωμένο διάλυμα νιτρικού οξέος, το οποίο χορηγήθηκε, με χρήση σταγονόμετρου, σε μικρές ποσότητες. Το δείγμα αυτό τοποθετήθηκε σε κυλινδρική γεωμετρία με εσωτερική διάμετρο 86.13mm και εσωτερικό ύψος 12.91mm. Επειδή όμως έπρεπε να εξατμιστεί το υγρό μέρος που προστέθηκε για την αποκόλληση του δείγματος από τα δοχεία συλλογής, το δείγμα τοποθετήθηκε σε ειδικό φούρνο, του οποίου η θερμοκρασία ρυθμίστηκε σταθερή τους 67°C, και αφέθηκε σε αυτόν έως την πλήρη ξήρανσή του.



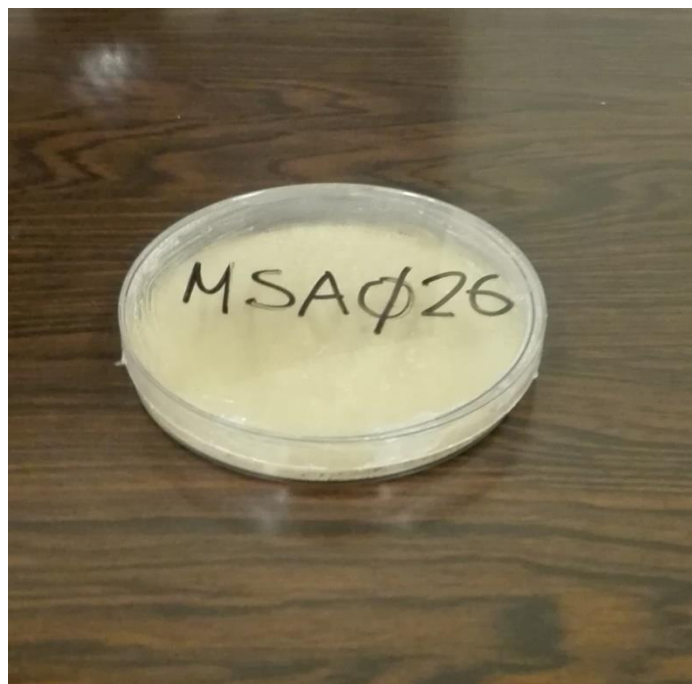
Σχήμα 4-9 : Υδατόλουτρο

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της τελικής φάσης ξήρανσης το δείγμα αφαιρέθηκε από το φούρνο και ζυγίστηκε για την παρακολούθηση της μεταβολή της μάζας του. Όταν η μεταβολή μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων έγινε μικρότερη του 1%, η περιεχόμενη στο δείγμα υγρασία θεωρήθηκε αμελητέα και αυτό αφαιρέθηκε από το φούρνο ξήρανσης. Μετά το πέρας της τελικής ξήρανσης υπολογίστηκε η μάζα του υγρού δείγματος αφαιρώντας το απόβαρο του τρυβλίου στο οποίο είχε τοποθετηθεί. Το εναπομείναν ίζημα ,που αποτελεί το υγρό δείγμα, είχε μάζα 4.1945gr και κυλινδρική γεωμετρία με διάμετρο 86.13mm και ύψος 2.5mm

περίπου. Το δείγμα σφραγίστηκε με σιλικόνη και ετοιμάστηκε για την διαδικασία της ανάλυσής του.



Σχήμα 4-10: Το ίζημα που συλλέξαμε από το υγρό δείγμα τοποθετημένο σε ρυθμιζόμενο φούρνο για την τελική φάση της ξήρανσής του



Σχήμα 4-11: Το συσκευασμένο ίζημα του υγρού δείγματος

4.6.1 Προσδιορισμός απόδοσης για τη γεωμετρία του υγρού δείγματος

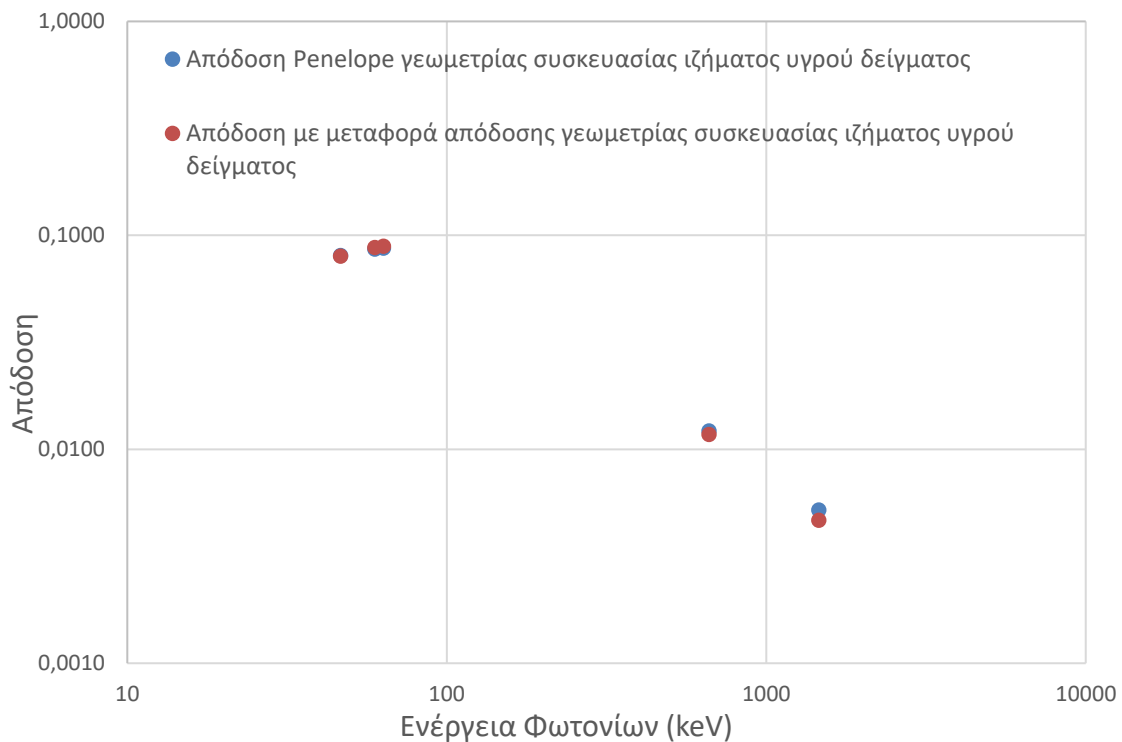
Η τελική γεωμετρία του υγρού δείγματος, όπως αυτή διαμορφώθηκε από την επεξεργασία του, δεν αποτελεί μία από τις τυποποιημένες γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Επομένως, η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία δεν είναι διαθέσιμη από τον κώδικα SPUNAL. Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης, με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε στην παράγραφο 4.5, και υπολογίστηκαν οι ζητούμενες αποδόσεις μέσω προσομοιώσεων στον κώδικα PENELOPE. Τα αρχεία γεωμετρίας και εισόδου του κώδικα PENELOPE για τη γεωμετρία του υγρού δείγματος δίνονται στο Παράρτημα Β. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των υπολογισμών των καινούριων αποδόσεων για κάθε ενέργεια ενδιαφέροντος δίνονται στους πίνακες 4-6 και 4-7.

Ενέργεια φωτονίων (keV)	Πειραματική απόδοση, γεωμ. 8 (4M HCl)	Απόδοση PENELOPE, γεωμ.8 (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Απόδοση PENELOPE, γεωμετρία υγρού δείγματος (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)
46.52	0.0823	0.0829	1.9E-05	0.0806	2.1E-05
59.54	0.0905	0.0892	3.2E-05	0.0865	2.3E-05
63.29	0.0917	0.0899	4.8E-05	0.0874	2.4E-05
661.62	0.0109	0.0113	3.3E-05	0.0122	2.6E-05
1460.75	0.0043	0.0048	2.8E-05	0.0052	2.2E-05

Πίνακας 4-6: Οι πειραματικές αποδόσεις και οι αποδόσεις προσομοίωσης με τις αβεβαιότητές τους, για τη γεωμετρία 8 και τη νέα γεωμετρία για το ίζημα του υγρού δείγματος

Ενέργεια φωτονίων (keV)	Απόδοση με μεταφορά απόδοσης, γεωμετρία υγρού δείγματος (4M HCl)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Πυκνότητα δείγματος χώματος (gr/cm^3)	Συντελεστής αναγωγής απόδοσης (η)	Διορθωμένη απόδοση. νέα γεωμ. (soil)
46.52	0.0800	2.8E-05	0.2880	0.9464	0.0757
59.54	0.0878	3.9E-05		0.9650	0.0847
63.29	0.0892	5.3E-05		0.9699	0.0865
661.62	0.0117	4.3E-05		1.0000	0.0117
1460.75	0.0047	3.3E-05		1.0000	0.0047

Πίνακας 4-7: Η τελική υπολογισμένη απόδοση με τις διορθώσεις για τη γεωμετρία συσκευασίας του ιζήματος του υγρού δείγματος



Σχήμα 4-12: Σύγκριση απόδοσης προσομοίωσης και απόδοσης με τη μέθοδο της μεταφοράς απόδοσης για τη γεωμετρία συσκευασίας του ιζήματος του υγρού δείγματος

4.6.2 Αποτελέσματα ανάλυσης του υγρού δείγματος

Το δείγμα αναλύθηκε για χρονικό διάστημα 500,000s στον ανιχνευτή LEGe. Από το φάσμα που συλλέχθηκε διαπιστώνεται ότι μόνο για τα ^{241}Am και ^{40}K ανιχνεύεται στο φάσμα φωτοκορυφή αυξημένη σε σχέση με το υπόστρωμα, γεγονός που σημαίνει ότι για τα υπόλοιπα ισότοπα που εξετάζουμε (^{234}Th , ^{210}Pb , ^{137}Cs) δεν υπάρχουν ενδείξεις μεταφοράς τους από το δείγμα εδάφους στο νερό που χρησιμοποιήθηκε για την υγρή κοσκίνιση.

Με την ίδια διαδικασία που υπολογίσαμε τη συγκέντρωση ραδιενέργειας των ζητούμενων ραδιενεργών ισotόπων στη παράγραφο 4.5 υπολογίσαμε τη συγκέντρωση ραδιενέργειας των δύο ραδιενεργών ισotόπων που ανιχνεύτηκαν για το υγρό δείγμα. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 4-8.

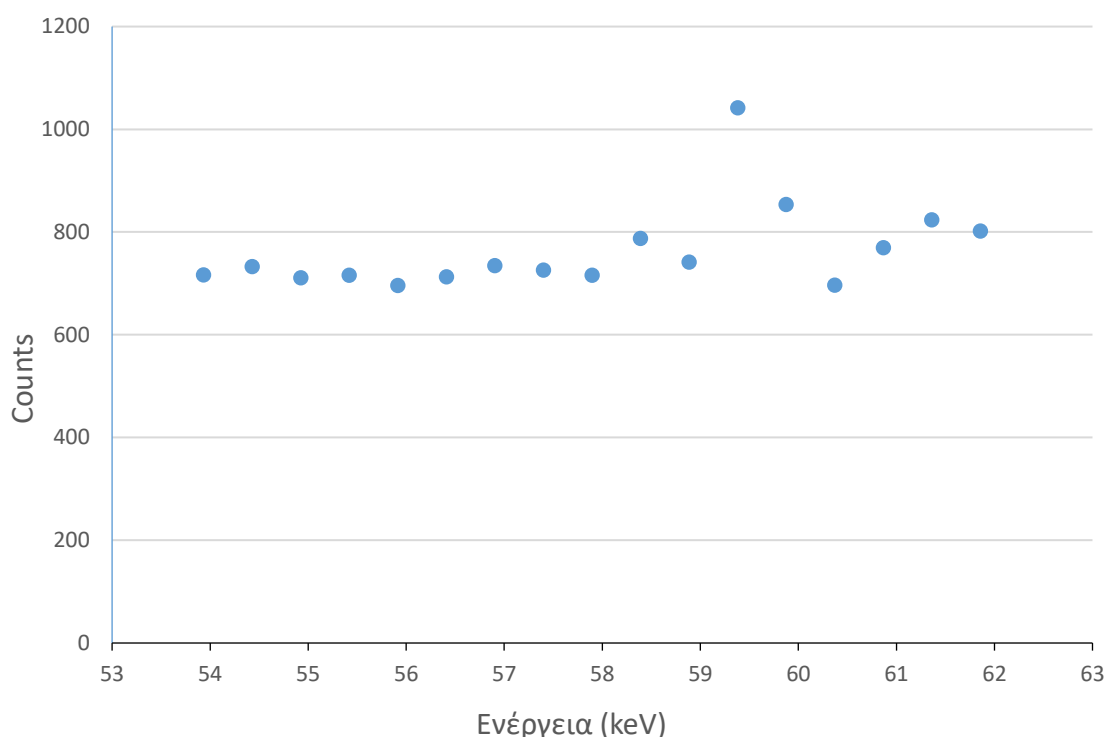
Ραδιενεργά Ισότοπα	Συγκέντρωση ραδιενέργειας στη γεωμ. υγρού δείγματος (Bq/kg)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Συγκέντρωση ραδιενέργειας στη γεωμ. υγρού δείγματος (Bq/L)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)
Am-241	5.5	1.8	0.003	0.001
K-40	396	74	0.192	0.036

Πίνακας 4-8: Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του ιζήματος του υγρού δείγματος σε Bq/kg ιζήματος και σε Bq/L του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την υγρή κοσκίνιση

Η ανίχνευση ^{241}Am και ^{40}K στο υγρό δείγμα σημαίνει ότι είναι πιθανόν κατά την υγρή κοσκίνιση να έχει γίνει ανακατανομή της ραδιενέργειας για τα ισότοπα αυτά μεταξύ των διαφόρων κοκκομετρικών, κλασμάτων λόγω της επίδρασης του νερού. Για τη εξέταση της έκτασης μιας πιθανής τέτοιας ανακατανομής, υπολογίστηκε η συνολική ραδιενέργεια που μεταφέρθηκε στο υγρό δείγμα ως ποσοστό της ραδιενέργειας που ανιχνεύεται στο σύνολο των στερεών δειγμάτων. Τα ποσοστά αυτά ανά ραδιενεργό ισότοπο ενδιαφέροντος δίνονται στον πίνακα 4-9.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα, διαπιστώνεται ότι πολύ μικρό ποσοστό της ραδιενέργειας του ^{241}Am φαίνεται να έχει μεταφερθεί προς το υγρό δείγμα, γεγονός που σημαίνει ότι οι μετρήσεις ραδιενέργειας των στερεών κλασμάτων μετά την υγρή κοσκίνιση μπορούν να θεωρούνται αξιόπιστες. Αυτό ήταν σε κάποιο βαθμό

αναμενόμενο, καθώς όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.3 το ^{241}Am στο περιβάλλον αναμένεται να απαντάται σε μορφή υδροξειδίου με περιορισμένη κινητικότητα σε υδάτινα περιβάλλοντα. Δε γίνεται να θεωρηθούν απόλυτα αξιόπιστες και οι μετρήσεις των στερεών κλασμάτων για το ^{40}K , καθώς η ποσότητα που μεταφέρθηκε στο υγρό δείγμα αν και μικρή δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Προκύπτει επομένως ότι πιθανή αλληλεπίδραση μεταξύ του δείγματος και του υγρού κατά την κοσκίνιση πρέπει να ελέγχεται, ανάλογα και με το εξεταζόμενο ισότοπο.



Σχήμα 4-13: Η φωτοκορυφή του ^{241}Am όπως αυτή διακρίνεται στο συλλέξαν φάσμα του ιζήματος του υγρού δείγματος

Ραδιενεργά Ισότοπα	Ραδιενέργεια Υγρού Δείγματος (Bq)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Συνολική Ραδιενέργεια Στερεών Δειγμάτων (Bq)	Αβεβαιότητα ($\pm 1\sigma$)	Ποσοστό της ραδιενέργειας που διαλύθηκε στο υγρό δείγμα
Am-241	0.023	0.008	15	0.3	0.15%
K-40	1.66	0.31	59	1,7	2.8%

Πίνακας 4-9: Σύγκριση της συνολικής ραδιενέργειας υγρού δείγματος και στερεών δειγμάτων.

Καθώς δεν ανιχνεύθηκαν τα υπόλοιπα προς μελέτη ραδιενεργά ισότοπα στο ίζημα του υγρού δείγματος, και η γεωμετρία συσκευασίας του δεν ήταν τυποποιημένη, κρίθηκε σκόπιμος ο προσδιορισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (MDA) για τις ενέργειες των φωτονίων των ραδιενεργών ισότοπων ενδιαφέροντος. Για την παρούσα ΔΕ, χρησιμοποιώντας για ραδιενέργεια υποστρώματος φάσμα που πάρθηκε για 500,000 sec από τον ανιχνευτή LEGe χωρίς να περιέχει δείγμα, υπολογίστηκε, βάσει των τύπων του Παραρτήματος Δ, σε φύλλο Excel η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA) σε Bq/kg για τη γεωμετρία του υγρού δείγματος. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών δίνονται στον πίνακα 4-10:

	Ενέργεια (keV)	Απόδοση (eff)	Ποσοστό Εκπομπής (yield)	MDA (Bq/kg)
Pb-210	46.52	0.0763	0.043	75
Am-241	59.54	0.08473	0.359	7
Th-234	63.29	0.0847	0.048	72
Cs-137	661.62	0.0122	0.951	11
K-40	1460.83	0.0052	0.110	171

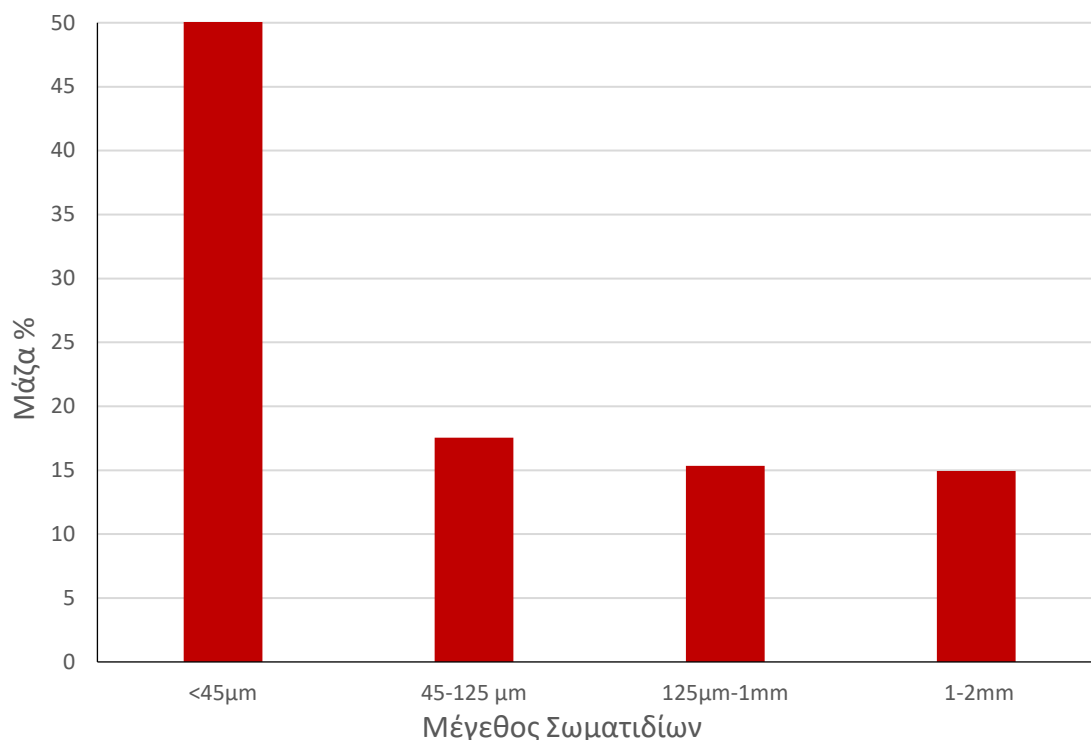
Πίνακας 4-10: Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA) για τις ζητούμενες ενέργειες φωτονίων στη γεωμετρία συσκευασίας του υγρού δείγματος

Βάσει των αποτελεσμάτων του πίνακα 4-10 παρατηρείται ότι μόνο για το ^{40}K ανιχνεύθηκε συγκέντρωση ραδιενέργειας ανώτερη της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας για τη γεωμετρία συσκευασίας του υγρού δείγματος.

Επισημαίνεται ότι η ραδιενέργεια του ^{241}Am έχει ανιχνευθεί στο φάσμα, παρόλο που είναι χαμηλότερη από το MDA. Αυτό σημαίνει ότι η ραδιενέργεια είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με τις δυνατότητες της τεχνικής μας, και δε μπορεί να ανιχνευθεί αξιόπιστα. Σε μια επαναληπτική ανάλυση του ίδιου δείγματος, είναι πιθανό το ^{241}Am να μην ανιχνευθεί.

4.7 Αποτελέσματα –σχολιασμός

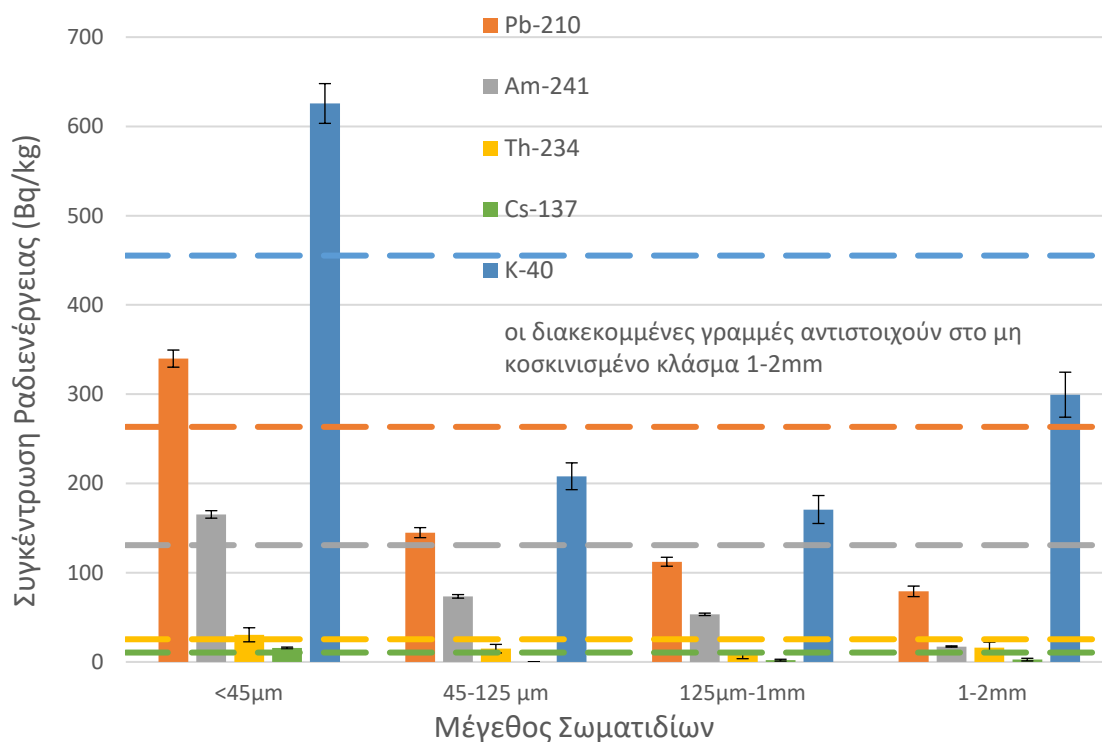
Βάσει των ζυγίσεων μετά το πέρας της ξήρανσης των κλασμάτων που συλλέχθηκαν από την υγρή κοσκίνιση, η κατανομή της κοκκομετρίας για το κλάσμα των 1-2mm δίνεται στο σχήμα 4-14.



Σχήμα 4-14: Κοκκομετρική κατανομή του κλάσματος των 1-2mm του δείγματος Α, ύστερα από την επεξεργασία του με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης

Βάσει των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής κατανομής του κλάσματος των 1-2mm, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο κλάσμα αποτελείται κυρίως από συσσωματώματα μικρότερων κλασμάτων. Το αυτούσιο κλάσμα των 1-2mm αποτελεί μικρό μέρος της μάζας που προέκυψε ως αποτέλεσμα της ξηρής κοσκίνισης του δείγματος Α, γεγονός που δικαιολογεί την αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας του εν λόγω κλάσματος, καθώς αυτή προσδίδεται σε αυτό από τα συσσωματώματα σωματιδίων μικρότερων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης των συλλεχθέντων δειγμάτων από την κοκκομετρική ανάλυση του κλάσματος των 1-2mm με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης δίνονται συγκριτικά για τα διάφορα ραδιενεργά ισότοπα, στο σχήμα 4-15.



Σχήμα 4- 15 :Συγκέντρωση ραδιενέργειας των κλασμάτων από την επεξεργασία του κλάσματος των 1-2mm με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα σωματίδια που αποτελούσαν τα συσσωματώματα του κλάσματος των 1-2mm ακολουθούν την τάση αύξησης της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στα μικρότερα κλάσματα του χώματος που παρατηρήθηκε και με την ξηρή κοσκίνιση. Την μόνη απόκλιση παρουσιάζει το ^{40}K στο κλάσμα των 1-2mm, γεγονός που δικαιολογείται από την αυξημένη συγκέντρωση οργανικής ύλης στο συγκεκριμένο κλάσμα, καθώς οτιδήποτε πευκοβελόνες και άλλα οργανικά δεν έφυγαν κατά την επεξεργασία των δειγμάτων παρατηρήθηκε οπτικά ότι κυριαρχούσαν στα κλάσματα των 1-2mm και >2mm.

Τέλος, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης του υγρού δείγματος σε συνδυασμό με τα όρια ανίχνευσης, συμπεραίνεται ότι το ^{40}K παρασύρθηκε από το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την υγρή κοσκίνιση, σε τέτοιο βαθμό ώστε να περάσει μέσα από τα διηθητικά φίλτρα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στο προκαταρκτικό

συμπέρασμα ότι το υγρό στοιχείο επιδρά σημαντικά στην κατανομή των ραδιενεργών ισοτόπων στα σωματίδια του χώματος, όχι μόνο διαλύοντας τα συσσωματώματα και παρασέρνοντας τα μικρά σε μέγεθος σωματίδια, αλλά ανακατανέμοντας και ραδιενεργά σωματίδια παρασέρνοντάς τα από σωματίδια στα οποία έχουν αρχικά εναποτεθεί. Το ίδιο συμπέρασμα δεν μπορεί να προκύψει για τα υπόλοιπα ραδιενεργά ισότοπα που εξετάστηκαν, καθώς η συγκέντρωση ραδιενέργειας τους δεν είναι ανιχνεύσιμη στο νερό, με ασθενείς μόνο ενδείξεις να παρατηρούνται για το ^{241}Am . Επισημαίνεται ότι τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ δεν αποσκοπούσαν στη μελέτη της κινητικότητας των διαφόρων ισοτόπων εξαιτίας της επίδρασης του νερού. Τέτοιου είδους μελέτη απαιτεί το σχεδιασμό και την υλοποίηση εξειδικευμένων πειραμάτων.

5 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια σύνοψη της εργασίας που έγινε, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, καθώς και προτάσεις για μελλοντικά βήματα.

5.1 Σύνοψη της εργασίας

Ο στόχος της παρούσας ΔΕ ήταν η διερεύνηση της τάσης που εμφανίζουν ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα στο επιφανειακό χώμα να έχουν αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας στα μικρότερου μεγέθους σωματίδια. Τα ραδιενεργά ισότοπα που μελετήθηκαν ήταν: ^{210}Pb , ^{241}Am , ^{234}Th , ^7Be , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{228}Th , ^{226}Ra και ^{228}Ra . Η τάση αυτή αποτελεί ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο καθώς μπορεί να επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των ραδιενεργών ισοτόπων, ενώ επιπλέον θέτει ερωτήματα για το πότε θα πρέπει ένα δείγμα χώματος να αναλύεται ως έχει και πότε να αναλύεται κάθε κοκκομετρικό κλάσμα του ξεχωριστά.

Για την παρούσα ΔΕ συλλέχθηκαν δείγματα χώματος από δύο σημεία όπισθεν του Κτηρίου Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν καθώς είχαν ρυπανθεί στο παρελθόν με μικρές ποσότητες ^{241}Am . Το ^{241}Am είχε εναποτεθεί στο χώμα ως αποτέλεσμα της διασποράς του από την κορυφή ενός αλεξικέραυνου τοποθετημένου στην οροφή του Κτηρίου, το οποίο, λόγω της χρόνιας έκθεσής του στα στοιχεία της φύσης, είχε αστοχήσει. Το ^{241}Am διεσπάρη στην οροφή του εργαστηρίου, και με τη βοήθεια της βροχής, μέσω του συστήματος αποστράγγισης της οροφής εναποτέθηκε στο περιβάλλον χώμα σε μικρή έκταση. Τα δύο σημεία δειγματοληψίας, επιλέχθηκαν στην περιοχή όπου αναμενόταν η μέγιστη συγκέντρωση σε ^{241}Am , βάσει προηγούμενης έρευνας που είχε λάβει χώρα στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Τα συλλεχθέντα δείγματα ξηράθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και διαχωρίστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης χωρίζοντάς τα σε κλάσματα των $<45\mu\text{m}$, $45-63\mu\text{m}$, $63-125\mu\text{m}$, $125-250\mu\text{m}$, $250-500\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}-1\text{mm}$, $1-2\text{mm}$, και $>2\text{mm}$. Το κλάσμα των $>2\text{mm}$, για διευκόλυνση της συσκευασίας που ακολούθησε, τοποθετήθηκε σε θραυστήρα για περαιτέρω επεξεργασία. Στη συνέχεια,

συσκευάστηκαν δείγματα για όλα τα κλάσματα, που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της ξηρής κοσκίνισης των δειγμάτων, και για τα δύο σημεία συλλογής χόματος.

Τα συσκευασμένα δείγματα αναλύθηκαν γ-φασματοσκοπικά στον ανιχνευτή LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ και η επεξεργασία των συλλεχθέντων φασμάτων καθώς και τα αποτελέσματα δόθηκαν από το πρόγραμμα SPUNAL που έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν προέκυψε μια καθαρή αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα μικρότερης διαμέτρου κλάσματα χόματος. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στο κλάσμα των 1-2mm, η οποία έρχεται σε αντίθεση με την σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων.

Η μη προφανώς εξηγούμενη αύξηση της ραδιενέργειας στο κλάσμα των 1-2mm μας οδήγησε στην περαιτέρω επεξεργασία αυτού του συγκεκριμένου κλάσματος χόματος. Υποθέτοντας ότι η αυξημένη ραδιενέργεια του κλάσματος ενδιαφέροντος δεν οφειλόταν σε κάποια ιδιότητα του κλάσματος αυτού, ούτε σε κάποια ιδιαιτερότητα των ραδιενεργών ισοτόπων, αλλά σε συσσωματώματα σωματιδίων μικρότερης διαμέτρου, αποφασίστηκε η επανεπεξεργασία του συγκεκριμένου κλάσματος με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Λόγω του μεγάλου όγκου εργασίας που απαιτείται για την ανάλυση δειγμάτων με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης, η επεξεργασία έγινε μόνο για ένα από τα δύο σημεία δειγματοληψίας, το οποίο είχε και την υψηλότερη συγκέντρωση ραδιενέργειας.

Για την υγρή κοσκίνιση χρησιμοποιήθηκε η διάταξης της ξηρής κοσκίνισης με τις απαραίτητες αλλαγές, που περιεγράφηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 4, και το κλάσμα των 1-2mm χωρίστηκε σε κλάσματα των <math><45\mu\text{m}</math>, $45-63\mu\text{m}$, $63-125\mu\text{m}$, $125-250\mu\text{m}$, $250-500\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}-1\text{mm}$ και $1-2\text{mm}$. Τα αποτελέσματα της υγρής κοσκίνισης έδειξαν ότι το κλάσμα των 1-2mm δεν αποτελείτο αποκλειστικά από αυτοτελή σωματίδια των 1-2mm αλλά και από συσσωματώματα δημιουργημένα από σωματίδια μικρότερης διαμέτρου. Τα συλλεχθέντα κλάσματα ξηράθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετρήθηκε η υγρασία τους και συσκευάστηκαν βάσει των μεθόδων που ακολουθούνται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Λόγω της μικρής μάζας των κλασμάτων που συλλέχθηκαν από την υγρή κοσκίνιση, κρίθηκε αναγκαία η χρήση γεωμετρίας συσκευασίας διαφορετικής από αυτής που χρησιμοποιήθηκε για τα κλάσματα της ξηρής κοσκίνισης. Για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή

για τη νέα γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE. και εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4.

Επιπροσθέτως, το υγρό δείγμα που συλλέχθηκε κατά την διαδικασία της υγρής κοσκίνισης ως αποτέλεσμα της διήθησης του υγρού κλάσματος των <45 μm , εξατμίστηκε σε υδατόλουτρο και τον εναπομείναν ίζημα ξηράνθηκε και συσκευάστηκε. Η γεωμετρία της συσκευασίας του υγρού δείγματος ήταν επίσης μη τυποποιημένη γεωμετρία, και για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για τις διάφορες ενέργειες φωτονίων που ενδιαφέρουν ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, μέσω προσομοίωσης και μεταφοράς απόδοσης. Το υγρό δείγμα αναλύθηκε στον ανιχνευτή LEGe με τη μέθοδο της γ -φασματοσκοπίας για να διαπιστωθεί εάν το νερό είναι ικανό να παρασύρει ραδιενεργά ισότοπα τα οποία είναι προσκολλημένα στα σωματίδια του χόματος. Με το πέρας της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης του υγρού δείγματος, ολοκληρώθηκε και το πειραματικό κομμάτι της παρούσας ΔΕ.

5.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα ΔΕ παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Όλα τα υπό μελέτη ραδιενεργά ισότοπα παρουσίασαν αύξηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας με την μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων του χόματος, ανεξάρτητα από την προέλευση και κοκκομετρική κατανομή των μητρικών τους δειγμάτων. Η παρατηρούμενη αυτή τάση συγκέντρωσης των ραδιενεργών ισωτόπων στα λεπτόκοκκα σωματίδια χόματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας και της επεξεργασίας δειγμάτων, καθώς και σε μελέτες μετανάστευσης ραδιενεργών ισωτόπων.
- Όλα τα προς μελέτη ραδιενεργά ισότοπα παρουσίασαν τη μέγιστη συγκέντρωση ραδιενέργειας στο λεπτότερο κλάσμα χόματος των <45 μm .
- Σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας μεταξύ δειγμάτων που συλλέχθηκαν μόνο με μερικά μέτρα μεταξύ τους απόσταση.

- Σημαντική διαφορά παρατηρείται μεταξύ της μετρούμενης συγκέντρωσης ραδιενέργειας ενός δείγματος, που δεν έχει χωριστεί στα κοκκομετρικά του κλάσματα, και του καθενός κοκκομετρικού του κλάσματος χωριστά.
- Προσδιορίστηκε ότι το κλάσμα των 1-2mm που συλλέχθηκε ως αποτέλεσμα επεξεργασίας του δείγματος Α με τη μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης, αποτελείται και από συσσωματώματα σωματιδίων μικρότερης διαμέτρου, πέραν των αυτούσιων σωματιδίων διαμέτρου 1-2mm. Τα συσσωματώματα αυτά προσδίδουν στο συγκεκριμένο κλάσμα αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας, που δεν απεικονίζει την πραγματική συγκέντρωση ραδιενέργειας των καθαρών σωματιδίων διαμέτρου 1-2mm. Η ιδιαιτερότητα αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σε μελλοντικές μελέτες, αν και μπορεί να θεωρηθεί ως ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των συλλεχθέντων δειγμάτων χώματος.
- Η ραδιενέργεια των κλασμάτων που προέκυψαν από την υγρή κοσκίνιση είναι συγκρίσιμη με αυτή των αντίστοιχων από ξηρή κοσκίνιση.
- Το υγρό στοιχείο έχει τη δυνατότητα να παρασύρει ραδιενεργά ισότοπα προσκολλημένα σε σωματίδια χώματος. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο αυτό ήταν εμφανές για το ^{40}K , ενώ υπήρχαν σοβαρές ενδείξεις για το ^{241}Am . Για τα άλλα ισότοπα, τα επίπεδα της ραδιενέργειας ήταν κάτω από τα επίπεδα ανίχνευσης της διάταξης.
- Οι διαφορές που παρουσιάζει η συγκέντρωση της ραδιενέργειας του ραδιενεργού ισότοπου ^{226}Ra πριν και μετά τη στεγανοποίηση των δειγμάτων (που οδηγεί στην αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του) είναι πολύ μικρές, γεγονός που υποδεικνύει χαμηλή εκροή ^{222}Rn από τα δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν.
- Η μέθοδος «cone and quartering», για την επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος από ένα μεγαλύτερο σε όγκο δείγμα, παρουσιάζει σημαντική αξιοπιστία, με τα αποτελέσματά μελέτης του αντιπροσωπευτικού δείγματος να έχουν μικρές αποκλίσεις από τα αποτελέσματα μελέτης του δείγματος στο σύνολό του.

5.3 Προτάσεις και μελλοντικά βήματα

Το άμεσο μελλοντικό βήμα που προτείνεται είναι η επέκταση της μελέτης, που διενεργήθηκε στην παρούσα ΔΕ, και σε περαιτέρω σημεία γύρω από το εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, αλλά και σε άλλα σημεία και εδάφη. Μια τέτοια εκτεταμένη μελέτη θα ενισχύσει τα αποτελέσματά και θα επιβεβαιώσει την τάση των ραδιενεργών ισοτόπων να συσσωρεύονται στα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια. Επιπλέον, η μελέτη αυτής της τάσης μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα ραδιενεργά ισότοπα πέραν αυτών που μελετήθηκαν στην παρούσα ΔΕ. Συμπληρωματικά, εκτός του επιφανειακού χώματος, προτείνεται ο κοκκομετρικός διαχωρισμός και η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των κατά βάθους κλασμάτων του.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διερεύνηση της εξάρτησης της κατανομής της ραδιενέργειας στα κοκκομετρικά κλάσματα ενός δείγματος χώματος με τις χημικές ιδιότητες και τη σύσταση του ίδιου του χώματος. Τέτοιου είδους μελέτη προϋποθέτει μεγάλο όγκο δειγματοληψίας αλλά και εξειδικευμένες αναλύσεις στις οποίες προς το παρόν δεν έχει εμπειρία το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Μια επιπλέον πρόταση για περαιτέρω έρευνα είναι η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της υγρασίας κατά τη δειγματοληψία των συλλεχθέντων δειγμάτων και της κατανομής κοκκομετρίας τους. Η υγρασία ενός δείγματος επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη δημιουργία συσσωματωμάτων, επομένως και την κοκκομετρική κατανομή των επιμέρους του κλασμάτων, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τη μετρούμενη, ανά κοκκομετρικό κλάσμα χώματος συγκέντρωση ραδιενέργειας. Η επίδραση της αρχικής υγρασίας κατά τη δειγματοληψία των δειγμάτων χώματος φάνηκε ιδιαίτερα μεταξύ των δειγμάτων Α και Β της παρούσας ΔΕ, όπου στο μεν δείγμα Α, με υψηλή αρχική υγρασία, είχαν δημιουργηθεί αρκετά συσσωματώματα στο κλάσμα των 1-2mm, ενώ στο δείγμα Β, με χαμηλή αρχική υγρασία, το φαινόμενο αυτό δεν ήταν ιδιαίτερα έντονο.

Τα αποτελέσματα της παρούσας ΔΕ έδειξαν ότι το ^{241}Am συσσωρεύεται στα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια του χώματος. Βασιζόμενοι σε αυτά προτείνεται να λάβει χώρα επανεξέταση των ήδη συλλεχθέντων, αλλά και καινούριων δειγμάτων, που αφορούν τη ραδιενεργή ρύπανση οφειλόμενη στο ατύχημα του Chernobyl, με

σκοπό το διαχωρισμό τους σε κοκκομετρικά κλάσματα και τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των μικρότερων σε διάμετρο κλασμάτων. Μια τέτοιου είδους ανάλυση πιθανόν να δώσει ενδείξεις για την ύπαρξη του ^{241}Am στα δείγματα αυτά, κάτι το οποίο πριν τον κοκκομετρικό διαχωρισμό των δειγμάτων να μην ήταν δυνατό.

Όσον αφορά τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης, προτείνεται να λάβουν χώρα περισσότερα στο πλήθος πειράματα, με σκοπό τη βελτίωση της μεθόδου, η οποία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Ακόμα, ένας μεγαλύτερος αριθμός πειραμάτων θα δώσει περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο το νερό επηρεάζει τα ραδιενεργά ισότοπα, καθώς θα μελετηθεί εκτενώς η αξιοπιστία της συγκεκριμένης μεθόδου και θα προσδιοριστεί το αν και πότε θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Φυσικά θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να πραγματοποιηθούν και εξειδικευμένα πειράματα leaching στο χώμα.

Επιπροσθέτως, προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης, όχι μόνο σε δείγματα χώματος, αλλά και σε άλλα υλικά, όπως η ιπτάμενη τέφρα. Τέτοια πειράματα μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τον προσδιορισμό της χρησιμότητας, αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας της μεθόδου αυτής στα υλικά αυτά.

Παράρτημα Α: Πιστοποιητικό Ανιχνευτή LEGe

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 follows:

Energy	5.9 keV	122 keV	
Resolution (eV (FWHM))	400	530	

Crystal Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4* CPE + PHC

7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1968

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)

Preampifier 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 ⁶⁰		
Energy (keV)	5.9	6.4 *	122		
FWHM (eV)	361		530		
FWTM (eV)			996		

* Substitutes for Fe-55 in some cases where Fe-55 peaks are not well separated.

Παράρτημα Β: Αρχεία εισόδου PENELOPE

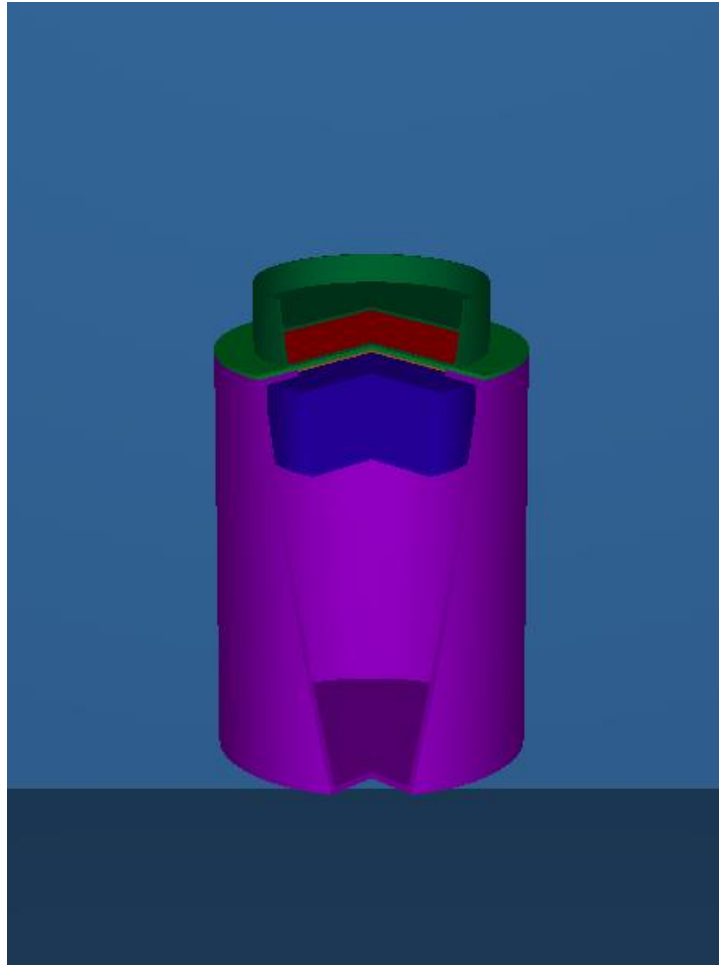
Για την παρούσα ΔΕ έγινε η προσομοίωση δύο κυλινδρικών γεωμετριών συσκευασίας, όγκου 18cm^3 και 14.56 cm^3 , οι οποίες περιγράφονται στις παραγράφους 4.5 και 4.6 αντίστοιχα. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας PENELOPE (2011) και στο παράρτημα αυτό δίνονται τα αρχεία εισόδου “.geo” και “.in” που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια των προσομοιώσεων αυτών.

B.1 Αρχεία εισόδου “.geo”

Σε αυτού του τύπου τα αρχεία 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.

Παρακάτω ακολουθούν τα αρχεία εισόδου “.geo” για τις δύο γεωμετρίες προσομοιώσεις, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των συλλεχθέντων δειγμάτων από την επεξεργασία του δείγματος των 1-2mm με υγρή κοσκίνιση.

B.1.1 Αρχείο εισόδου “.geo” για τη γεωμετρία συσκευασίας των συλλεχθέντων κλασμάτων της υγρής κοσκίνισης με όγκο πλήρωσης 18cm³.



Σχήμα B-1: Το μοντέλο της γεωμετρίας συσκευασίας των συλλεχθέντων κλασμάτων από την υγρή κοσκίνιση εντός του ανιχνευτή LEGe

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEGe Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1)  PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2)  PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3)  CYLINDER R1=2.525

```



```

X-SCALE=( 3.20000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 3.20000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 104) CYLINDER in patouras
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 3.10000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 3.10000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 105) Konos eksoterikos
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( -4.72589792000000E-04, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( -0.16049149300000E+00, 0)
  A0=( -1.36257277880000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 106) Konos esoterikos
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( -4.72589792000000E-04, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( -0.15614366700000E+00, 0)
  A0=( -1.28974669190000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 107) CYLINDER kapaki
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 3.85000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 3.85000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 108) ztopkapaki=7.4
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 7.40000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 109) Cylinder R=2.80(trivlio esvteriki toixoma)
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.80000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.80000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 110) Cylinder R=2.85(trivlio exvteriki toixoma)
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.85000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.85000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 111) z=0.1 (trivlio patos katw)
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 0.10000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 112) z=0.175(trivlio patos panw)
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 0.17500000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```



```

SURFACE ( 55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 25) Fe front
MATERIAL( 9)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 26) Fe back
MATERIAL( 9)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 27) plexiglas holder
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY (1000) trivlio patos
MATERIAL( 10)
SURFACE ( 111), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 112), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 110), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY (1001) trivlio kapaki
MATERIAL( 10)
SURFACE ( 113), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 114), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 110), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY (1002) trivlio toixomata
MATERIAL( 10)
SURFACE ( 111), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 115), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 110), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 109), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY (1003) trivlio pigi ogou
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 112), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 113), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 109), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2001) patoura
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)

```

```

C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2002) patos geom8
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2003) plevres geom8
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 108), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2004) kapaki geom8
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 108), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 107), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2005) deigma geom8
C MATERIAL( 5)
C SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 90) whole apparatus
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 7)
BODY ( 10)
BODY ( 11)
BODY ( 12)
BODY ( 13)
BODY ( 14)
BODY ( 15)
BODY ( 16)
BODY ( 17)
BODY ( 18)
BODY ( 19)
BODY ( 20)
BODY ( 21)
BODY ( 22)
BODY ( 23)
BODY ( 24)
BODY ( 25)
BODY ( 26)
BODY ( 27)
BODY (1000)
BODY (1001)
BODY (1002)
BODY (1003)
C BODY (2001)
C BODY (2002)
C BODY (2003)

```



```
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 0.60000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 19) CONE out
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( -4.59183670000000E-04, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( -0.15811225000000E+00, 0)
  A0=( -1.36108290000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 20) CONE in (geom8)
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( -4.72589800000000E-04, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( -0.15595463000000E+00, 0)
  A0=( -1.28662570000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 21) PLANE Z12=7.5
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 7.50000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 22) PLANE Z13=1.1
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.10000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 23) CYLINDER R7=4.1
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.10000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.10000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 24) PLANE Z14=7.7
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 7.70000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 25) CYLINDER R8=3.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 3.85000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 3.85000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 26) PLANE Z15=7.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 7.30000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 27) PLANE Z16=7.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 7.90000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 28) PLANE Z17=8.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
```



```

000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 39) PLANE Z25=32.6
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.26000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 40) square_X1 x1=15.05
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( -1.50500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 41) square_X2 x2=15.15
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( -1.51500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 42) square_X3 x3=15.25
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( -1.52500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 43) square_X4 x4=25.15
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( -2.51500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 44) square_X5 x5=-15.05
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)

```

```

    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( 1.50500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 45) square_X6 x6=-15.15
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( 1.51500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 46) square_X7 x7=-15.25
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( 1.52500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 47) square_X8 x8=-25.15
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( 2.51500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 48) square_Y1 y1=15.25
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
    AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
    AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
    A0=( -1.52500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

```
SURFACE ( 49) square_Y2 y2=15.35
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  A0=( -1.53500000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 50) square_Y3 y3=15.45
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  A0=( -1.54500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 51) square_Y4 y4=25.35
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  A0=( -2.53500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 52) square_Y5 y5=-15.25
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
  AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  A0=( 1.52500000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 53) square_Y6 y6=-15.35
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYY=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
  AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
```



```

INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.54000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 115)  z=0.5 (trivlio ypsos plirosis)
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 0.50000000000000E+00,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 1)  Be Cryostat Window
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 2)  Al upper
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 3)  Al side
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 4)  Al down
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 5)  Ge front dead layer
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 6)  Ge side dead layer
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 7)  Ge crystal
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 10)  lege Be window vacuum
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY   ( 11)  lege vacuum
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)

```



```

C SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2003) plevres geom8
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 108), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2004) kapaki geom8
C MATERIAL( 4)
C SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 108), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 107), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
C BODY (2005) deigma geom8
C MATERIAL( 5)
C SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(+1)
C SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(-1)
C SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(-1)
C 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 90) whole apparatus
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 7)
BODY ( 10)
BODY ( 11)
BODY ( 12)
BODY ( 13)
BODY ( 14)
BODY ( 15)
BODY ( 16)
BODY ( 17)
BODY ( 18)
BODY ( 19)
BODY ( 20)
BODY ( 21)
BODY ( 22)
BODY ( 23)
BODY ( 24)
BODY ( 25)
BODY ( 26)
BODY ( 27)
BODY (1000)
BODY (1001)
BODY (1002)
BODY (1003)
C BODY (2001)
C BODY (2002)
C BODY (2003)
C BODY (2004)
C BODY (2005)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

B.2 Γενικά αρχεία εισόδου “.in”

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.

B.2.1 Παράδειγμα αρχείου εισόδου για τη γεωμετρία συσκευασίας των δειγμάτων από την υγρή κοσκίνιση και για ενέργεια 59.54 keV

```
TITLE  LEGe Detector
      . (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
      >>>>>>> Source definition.
SKPAR   2                [Primary particles: 1=electron, 2=photon,
3=positron]
SENERG  59540            [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0.0,0.0,0.00
SBOX    7,7,4
SBODY   31
SCONE   0.0,0,180.0
      .
      >>>>>>> Material data and simulation parameters.
                Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME  Aluminum.dat
MFNAME  Beryllium.dat
MFNAME  Germanium.dat
MFNAME  Plexiglass.dat
MFNAME  HCl4M.dat
MFNAME  Air.dat
MFNAME  Tin.dat
MFNAME  Copper.dat
MFNAME  Iron.dat
MFNAME  Polystyrene.dat
      .
      >>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN  lege.geo        [Geometry file, up to 20 chars]
      .
      >>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     0,200000,200    [Energy window and no. of bins]
NBANGL  10,10          [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]
      .
ENDETC  0,60000,1000
EDBODY  7
      .
      >>>>>>> Job properties.
DUMPTO  dump.dmp       [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   30              [Dumping period, in sec]
END     [Ends the reading of input data]
```

B.2.2 Παράδειγμα αρχείου εισόδου για τη γεωμετρία συσκευασίας του ιζήματος του υγρού δείγματος και για ενέργεια 46.52 keV

```
TITLE  LEGe Detector
      . (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
      >>>>>>> Source definition.
SKPAR   2           [Primary particles: 1=electron, 2=photon,
3=positron]
SENERG 46520       [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0.0,0.0,0.375
SBOX   9,9,0.5
SBODY  29
SCONE  0.0,0,180.0
      .
      >>>>>>> Material data and simulation parameters.
                Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME  Aluminum.dat
MFNAME  Beryllium.dat
MFNAME  Germanium.dat
MFNAME  Plexiglass.dat
MFNAME  HCl4M.dat
MFNAME  Air.dat
MFNAME  Tin.dat
MFNAME  Copper.dat
MFNAME  Iron.dat
MFNAME  Polystyrene.dat
      .
      >>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN  lege-90x14.geo           [Geometry file, up to 20
chars]
      .
      >>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     0,200000,200           [Energy window and no. of bins]
NBANGL 10,10                  [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]
      .
ENDETC  0,46600,1000
EDBODY  7
      .
      >>>>>>> Job properties.
DUMPTO  dump.dmp              [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   30                    [Dumping period, in sec]
END                                           [Ends the reading of input data]
```

Παράρτημα Γ: Πλύσιμο των κοσκίνων

Ανά δύο διαδοχικά κοσκινίσματα, καθώς και μετά το πέρας της διαδικασίας κοσκίνισης, για την αποφυγή φραξίματος των οπών των κοσκίνων, αυτά οδηγούνται σε διαδικασία πλύσης. Η πλύση των κοσκίνων λαμβάνει χώρα σε ειδικό λουτρό υπερήχων, το οποίο περιέχει μία κοιλότητα η οποία χωρά ένα κόσκινο. Η κοιλότητα αυτή γεμίζεται με απιονισμένο νερό, προστίθεται απορρυπαντικό και τοποθετείται μέσα της το κόσκινο προς πλύση. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται το λουτρό και ρυθμίζεται να στέλνει υπερήχους στο εσωτερικό της κοιλότητας για χρονικό διάστημα 5 λεπτών. Όταν το πλύσιμο ολοκληρωθεί αφαιρείται το κόσκινο από το λουτρό, ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και το επόμενο κόσκινο προς πλύση τοποθετείται μέσα στην κοιλότητα της συσκευής, έως ότου πλυθούν όλα τα κόσκινα. Όταν ολοκληρωθεί το πλύσιμο όλων των κοσκίνων, αδειάζεται το λουτρό και ξεπλένεται με απιονισμένο νερό. Το απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται προς αποφυγή εναπόθεσης αλάτων στα κόσκινα αλλά και στο λουτρό υπερήχων.

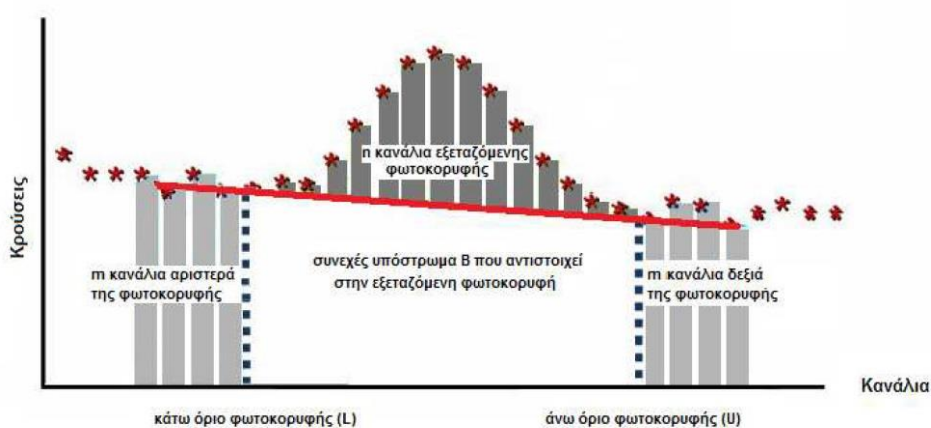


Σχήμα Γ-1: Συσκευή πλυσίματος κοσκίνων με χρήση υπερήχων

Παράρτημα Δ: Όρια Ανίχνευσης

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου μία φωτοκορυφή είναι ασθενής και δε διακρίνεται καθαρά από το υπόστρωμα. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργείται ο προβληματισμός του κατά πόσον η φωτοκορυφή αυτή είναι πραγματική ή αποτελεί απλά κύμανση του υποστρώματος. Ο προβληματισμός αυτός είναι λογικό να οδηγεί στο ερώτημα, ποια είναι η ελάχιστη ραδιενέργεια ενός δείγματος (δηλαδή η αντίστοιχη επιφάνεια φωτοκορυφής) ώστε να μπορεί να διακριθεί η φωτοκορυφή πάνω από το υπάρχον υπόστρωμα.

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 την 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 για μία φωτοκορυφή φαίνονται τα n κανάλια στα οποία κατανέμεται, τα m κανάλια αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής για εκτίμηση του υποστρώματος, καθώς και το συνεχές υπόστρωμα B που αντιστοιχεί στην υπόψη φωτοκορυφή.



Σχήμα Δ-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 τη σχέση (Luca 2009).

$$L_D = 2k_a \sqrt{B_s \left(1 + \frac{n_s}{2m_s}\right) + A_b \frac{t_s}{t_b} \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right) + B_b \left(\frac{t_s}{t_b}\right)^2 \left(1 + \frac{n_b}{2m_b}\right)}$$

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.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται συνήθως για την ανιχνευτική ικανότητα μίας διάταξης είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης ραδιενέργειας, MDA, το οποίο υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης τροποποιημένης ώστε ως επιφάνεια να λαμβάνεται το L_D .

$$MDA = \frac{L_D}{time * yield * eff * mass}$$

Βιβλιογραφία

1. Αναγνωστάκης Μ., *"Γ-Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών"*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.
2. Αναγνωστάκης Μ., *"Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση και Προστασία"*, Διαφάνειες Μαθήματος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π, Αθήνα 2014
3. Βιβλιοθήκη ισοτόπων Radiation Decay v4 έκδοση, Charles Hacker, Griffith University, 2005
4. Παλαμαρά Ε., *"Διερεύνηση Της Επίδρασης Της Μεθοδολογίας Προετοιμασίας Δειγμάτων Χώματος στον Προσδιορισμό Της Φυσικής και Τεχνητής Τους Ραδιενέργειας"*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
5. Παναγιωτόπουλος Κ., *"Εδαφοφυσική"* Γιαχούδη – Γιαπούλη, 1984
6. Πέππας Θ., *"Εγκατάσταση και Παραμετρική Μελέτη Διάταξης Ανάλυσης Κοκκομετρία-Εφαρμογή στην Κοκκομετρική Ανάλυση και Τον Προσδιορισμό Των Ραδιολογικών Χαρακτηριστικών Των Διαφόρων Κλασμάτων Ιπτάμενης Τέφρας"*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008
7. Σάββα Μ., *"Βαθμονόμηση Ανιχνευτικής Διάταξης Γερμανίου για Τον Προσδιορισμό Του Ισοτόπου ${}^7\text{Be}$ στα Ατμοσφαιρικά Αερολύματα με Χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης Monte Carlo"*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009
8. Σάκκουλα Ε., *"Κοκκομετρική και γ-Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χώματος από Την Περιοχή Της Μεγαλόπολης"*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014
9. Σιμόπουλος Σ., *"Μετρήσεις Ραδιενέργειας των Ελληνικών Εδαφών μετά το Ατύχημα στο Chernobyl"*, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα 1987
10. Χαβιαράς Δ., *"Παραμετρική Μελέτη της Γεωμετρίας Δείγματος για Την Ανίχνευση ${}^{210}\text{Pb}$ σε Δείγματα Χώματος Μικρού Όγκου"*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2015

11. Aarkrog A., *"The Radiological Impact of the Chernobyl Debris Compared with that from Nuclear Weapons Fallout"*, Riso National Laboratory, Denmark 1987
12. Anagnostakis M., Hinis E., Simopoulos S., Angelopoulos M., *"Natural Radioactivity Mapping of Greek Surface Soils"*, Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S3-S8, 1996
13. Ashraf M., Akib S., Maah M., Yusoff I., Balkhair K., *"Cesium-137: Radio-Chemistry, Fate, and Transport, Remediation, and Future Concerns"*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44:1740–1793, 2014
14. ASTM, *"Standard Practice for Soil Sample Preparation for the Determination of Radionuclides"*, ASTM International Standard C999-05, West Conshohocken, PA., 2009.
15. Baeza A., Del Rio M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J., *"Influence of Geology and Soil Particle Size on the Surface-Area/Volume Activity Ratio for Natural Radionuclides"*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 189, No. 2 (1995), 289-299
16. Binder H., *"Lexikon der chemischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Daten und Zahlen"*, 1999
17. Byrne A., Komosa A., *"Possibilities for Determination of ²⁴¹Am in Environmental Samples by Gamma Counting, with and without Radiochemistry"*, The Science of the Total Environment, 130/131, 1993, 197-206
18. Canadian Nuclear Society, *"Smoke Detectors and Americium-241 Fact Sheet"*, https://cns-snc.ca/media/pdf_doc/ecc/smoke_am241.pdf, ημερομηνία πρόσβασης: Ιούνιος 2016
19. Department of Energy (DOE), *"The Procedures Manual of the Environmental Measurements Laboratory"*, HASL-300-ED.27-Vol 1, 1997
20. Environmental Protection Agency (EPA), *"Multi-agency radiological laboratory analytical protocols manual (MARLAP), Laboratory sample preparation (12th chapter)"*, U.S. Government Printing Office, EPA 402-B-04-001A, 2004
21. EPA, *"Radiological Laboratory Sample Analysis Guide for Incident Response – Radionuclides in Soil"*, National Air and Radiation Environmental

- Laboratory, Office of Radiation and Indoor Air, U.S. Environmental Protection Agency, 402-R-12-006, 2012
22. Frindik O., Vollmer S., *"Particle-Size Dependent Distribution of Thorium and Uranium Isotopes in Soil"*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 241, No. 2 (1999), 291-296
 23. Her Majesty's Stationery Office, *"Levels of Radioactivity in the UK from the Accident at Chernobyl, USSR, A Compilation of the Results of Environmental Measurements in the UK"*, Department of Agriculture for Northern Ireland, Department of the Environment, Department of the Environment for Northern Ireland, Department of Health and Social Security, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, National Radiological Protection Board, Scottish Office, Welsh Office, 1986
 24. Hou X., Roos P., *"Critical Comparison of Radiometric and Mass Spectrometric Methods for the Determination of Radionuclides in Environmental, Biological and Nuclear Waste Samples"*, Analytica Chimica Acta 608 (2008), 105-139
 25. International Atomic Energy Agency (IAEA), *"Measurement of Radionuclides in Food and the Environment"*, Technical Report Series No. 295, IAEA, Vienna, 1989.
 26. International Atomic Energy Agency, *"Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience"*, Radiological Assessment Reports Series, Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Vienna 2006
 27. Ivanov E., Ramzina T., Kham'yanov L., Vasil'chenko V., Korotkov V., Nosovskii A., Oskolkov B., *"Radioactive Contamination of the Environment with ^{241}Am as a Result of the Chernobyl Accident"*, Atomic Energy, Vol. 77, No. 2, 1994
 28. "JCGM, *"Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement"*, JCGM 100:2008"
 29. Kammash T., Galbraith D., Jan T., *"An Americium-Fueled Gas Core Nuclear Rocket"*, American Institute of Physics, 1993
 30. Karfopoulos K., Papadakos G., Karangelos D., Rouni P., Petropoulos N., Anagnostakis M., Hinis E., Simopoulos S., *"Radioactive Contamination due*

- to *241Am Lightning Rod Failure*", Proceedings of the 14th Hellenic Symposium on Nuclear Physics, NTUA, 2004
31. Lu Y., Yang Y., Zheng F., Wang B., Zhang P., *"Electronic, Mechanical, and Thermodynamic Properties of Americium Dioxide"*, 2012
 32. Luca A., *"Some considerations about MDA and ISO 11929-3(2000)"*, 17th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Bratislava, Slovakia, September 2009
 33. Marumo J., Isiki V., Miyamoto H., Ferreira R., Bellini M., Lima L., *"Investigation of the Radiation Risk Due to Environmental Contamination by 241Am from Lightning Rods Disposed at Uncontrolled Garbage Dumps"*, Radiation and Environmental Biophysics (2008), 47:131–137"
 34. McCabe D., Protz R., University of Guelph, *"Faunal Effects On The Distribution Of Gamma Emitting Radionuclides In Four Forested Soils"*, Water, Air, and Soil Pollution 57-58: 521-532, 1991
 35. Mietelski J., Was B., *"Americium, Curium and Rare Earths Radionuclides in Forest Litter Samples from Poland"*, Applied Radiation and Isotopes Vol. 48, No. 5, pp. 705-713, 1997
 36. Nogueira P., Rühm W., Lopez M., Vrba T., Buchholz W., Fojtík P., Etherington G., Broggio D., Huikari J., Marzocchi O., Lynch T., Lebacqz A., Li C., Oško J., Malátova I., Franck D., Breustedt B., Leone D., Scott J., Shutt A., Hauck B., Capello K., Pérez-López B., Navarro-Amaro J., Pliszczynski T., Fantínová K., Tolmachev S., *"EURADOS 241Am Skull Measurement Intercomparison"*, Radiation Measurements 82 (2015), 64-73
 37. Petropoulos N., Hinis E., Simopoulos S., *"Cs-137 Chernobyl Fallout in Greece and its Associated Radiological Impact"*, Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S369-S373, 1996
 38. Piton F., Lépy M., Bé M., Plagnard J., *"Efficiency Transfer and Coincidence Summing Corrections for γ -ray Spectrometry"*, Applied Radiation and Isotopes 52 (2000), 791-795
 39. Potiens Jr. A., Dellamano J., Vicente R., Raelle M., Wetter N., Landulfo E., *"Laser Decontamination of the Radioactive Lightning Rods"*, Radiation Physics and Chemistry, 95 (2014), 188–190

40. Ramsey M., Ellison S., *"Measurement Uncertainty Arising from Sampling: A Guide to Methods and Approaches"*, Eurachem, EUROLAB, CITAC, Nordtest and the RSC Analytical Methods Committee, 2007
41. Ray D., *"Accumulation and Mobility of Radionuclides in the Sellafield Near-Shore"*, Master Thesis, School of Chemistry, Manchester, 2013
42. Retsch, *"How to Carry Out Wet Sieving"*, Guide for Wet Sieving, Retsch Company, 2005
43. Ristic M., Degetto S., Ast T., *"Determination of Americium-241 in Sediments by Gamma Spectroscopy"*, Journal of the Serbian Chemical Society-2764, 65(5-6), 451-456, 2000
44. Robertson J., Thomas Cd., Caddy B., Lewis A., *"Particle Size Analysis of Soils-A Comparison of Dry and Wet Sieving Techniques"*, Forensic Science International, 24 (1984), 209-217
45. Roeck D., *"Partitioning of Natural Radionuclides in the Waste Streams of Coal-Fired Utilities"*, Health Physics Vol. 52, No.3 (March), pp. 311-323, 1987
46. Savva M., Karangelos D., Anagnostakis M., Simopoulos S., *"Analysis of Size-Fractionated Soil Samples by Gamma Spectrometry"*, Applied Radiation and Isotopes 109 (2016), 563–565
47. Schulz W., *"The Chemistry of Americium"*, ERDA Critical Review Series, United States of America, 1976
48. Simopoulos S., *"Soil Sampling and Cs-137 Analysis of the Chernobyl fallout in Greece"*, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 40, No. 7, pp. 607-613, 1989 Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A
49. Simopoulos S., Angelopoulos M., *"Deposition Measurements in Europe after the Chernobyl Accident, and Comparison with the Greek 'NTUA data set' "*, Hellenic Cancer Society, Athens 1991
50. Sokolik G., Ovsianikova S., Ivanova T., Leinova S., *"Soil-Plant Transfer of Plutonium and Americium in Contaminated Regions of Belarus After the Chernobyl Catastroph"*, Environment International, 30 (2004), 939– 947
51. Strain J., Leddicotte G., *"The Preparation, Properties, and Uses of Americium-241, Alpha-, Gamma-, and Neutron Sources"*, Oak Ridge National Laboratory, Union Carbide Corporation, U.S. Atomic Energy Commission, 1962

52. Veen J., Wijk A., Mook W., "*Core Fragments in Chernobyl Fallout*", Nature Vol.323, 1986
53. Wanogho S., Gettinby G., Caddy B., Robertson J., "*Some Factors Affecting Soil Sieve Analysis in Forensic Science.2. Wet Sieving*", Forensic Science International, 33 (1987), 139-147