

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ^{210}Pb ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΟΓΚΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ε. ΧΑΒΙΑΡΑ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Δ.Ι. Καράγγελος & Μ.Ι. Σάββα

ΑΘΗΝΑ 2015

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, αναθέτοντάς μου ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα που εξελίχθηκε στην παρούσα Δ.Ε. Η μεταδοτικότητα του στα μαθήματα επιλογής του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ήταν πέραν τις βοήθειας κατανόησης μεγεθών, φαινομένων και εννοιών, καθώς μου μετέδωσε επίσης την αγάπη του για το συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο.

Ευχαριστώ την Υποψήφια Διδάκτορα δις Μαρίλια Σάββα, για τη βοήθειά της στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Η καθοδήγηση και υπομονή της τόσο στα αρχικά όσο και στα μετέπειτα στάδια αυτής της Δ.Ε. ήταν καταλυτικές.

Ευχαριστώ, επίσης, το διδάκτορα κ. Δημήτριο Καραάγγελο, για την άψογη συνεργασία και την πολύτιμη κατάθεση εμπειρίας κατά την εκπόνηση και ολοκλήρωση της εργασίας.

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

Δημήτριος Ε. Χαβιάρας

Αθήνα, Απρίλιος 2015

Περίληψη

Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ πραγματοποιούνται συστηματικά μετρήσεις της συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος. Σε αυτό το πλαίσιο μελετάται και η συγκέντρωση του ισοτόπου ^{210}Pb στο χώμα, η κατά βάθος κατανομή του οποίου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς – εκτός των άλλων – μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη μελέτη της μεταφοράς του επιφανειακού χώματος που συνδέεται με φαινόμενα διάβρωσης του εδάφους και ιζηματογένεσης.

Ο προσδιορισμός του ^{210}Pb σε δείγματα εδάφους με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους πραγματοποιείται μέσω των φωτονίων χαμηλής ενέργειας (46.52 keV) που εκπέμπει και παρουσιάζει δυσκολίες, λόγω της ισχυρής αυτοαπορρόφησης των φωτονίων αυτών, ειδικά σε δείγματα μεγάλου όγκου. Επιπλέον, η ύπαρξη στο δείγμα άλλων ραδιενεργών ισοτόπων, τόσο φυσικών (π.χ. της σειράς του ^{238}U , του ^{232}Th και του ^{40}K) όσο και τεχνητών (π.χ. ^{137}Cs), οδηγεί στην αύξηση του συνεχούς υποστρώματος στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης των φωτονίων του ^{210}Pb , με συνακόλουθη αύξηση, τόσο του κατωτέρου επιπέδου ανίχνευσης του ισοτόπου, όσο και της αβεβαιότητας κατά τον ποσοτικό προσδιορισμό του. Τέλος, ένα άλλο θέμα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb είναι η κατά το δυνατόν μείωση του απαιτούμενου όγκου χώματος, προς διευκόλυνση της διαδικασίας δειγματοληψίας.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα πραγματοποίησης αναλύσεων εδάφους για τον προσδιορισμό ^{210}Pb , χρησιμοποιώντας μικρού όγκου δείγματα. Μελετήθηκαν μία σειρά από διαφορετικές κυλινδρικές γεωμετρίες δείγματος όγκου ($9 - 97 \text{ cm}^3$), ενώ οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο από τα ανιχνευτικά συστήματα που διατίθενται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ: (i) Low Energy Germanium (LEGe) και (ii) Extended Range Germanium (XtRa), το οποίο διαθέτει σύστημα Compton Suppression για μείωση του συνεχούς υποστρώματος. Η σύγκριση των διαφορετικών γεωμετριών πραγματοποιήθηκε τόσο πειραματικά, με τη μέτρηση τυπικών δειγμάτων τα οποία παρασκευάστηκαν, όσο και με χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo. Οι διάφορες γεωμετρίες αξιολογήθηκαν με μία σειρά από κριτήρια, με σκοπό την επιλογή της γεωμετρίας εκείνης που παρέχει τα πλέον ικανοποιητικά αποτελέσματα

σε όρους: ρυθμού καταμέτρησης, αβεβαιότητας μέτρησης, κατώτερου ορίου ανίχνευσης, απόδοσης, αυτοαπορρόφησης και όγκου δείγματος.

Η σύγκριση των διαφόρων γεωμετριών υπέδειξε μία από αυτές ως βέλτιστη, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε μια νέα κατά βάθος δειγματοληψία χώματος από την περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Τα δείγματα συσκευάστηκαν στη νέα γεωμετρία, αναλύθηκαν στον ανιχνευτή LEGe, και έγινε ποσοτικός προσδιορισμός των ^{210}Pb , ^{234}Th και ^{226}Ra , έπειτα από κατάλληλη βαθμονόμηση με τεχνικές Monte Carlo. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι η νέα γεωμετρία καλύπτει τις ανάγκες ανάλυσης των ισοτόπων ^{210}Pb και ^{226}Ra σε δείγματα χώματος μικρού όγκου.

Abstract

The Nuclear Engineering Laboratory of NTUA systematically conducts measurements for the determination of natural and artificial radionuclides in soil. Lead-210 is one of the isotopes studied, the soil depth profile of which is of particular interest, since - among other things - it can be used to study the transport of surface soil associated with erosion and sedimentation.

The quantification of ^{210}Pb in soil samples is performed using gamma spectroscopic methods. The low energy gamma photons emitted by the isotope (46.52 keV) present practical difficulties, as the phenomenon of self-absorption is strongly present, especially in large volume samples. In addition, a sample may contain other radioactive isotopes, both naturally occurring (e.g. radionuclides of the ^{238}U and ^{232}Th series and ^{40}K) as well as artificial ones (e.g. ^{137}Cs). This leads to an increase of the background continuum, which subsequently raises the Minimum Detectable Activity. Another issue that should be taken into account when studying the depth profile of ^{210}Pb , is the reduction of the required soil volume, to facilitate the sampling process.

This work examines the feasibility of using small volume samples for the quantification of ^{210}Pb in soil. Different cylindrical volume geometries (9 – 97 cm³) were examined, and analyses were conducted on two detectors: (i) Low Energy Germanium (LEGe) and (ii) Extended Range Germanium (XtRa), which has been equipped with a Compton Suppression System. The comparison of the various geometries was performed both experimentally, by analyzing typical samples, as well

as by using Monte-Carlo simulation techniques. The geometries were evaluated by qualitative and quantitative criteria, in order to select the one which provides the most satisfactory results in terms of: count rate, measurement uncertainty, Minimum Detectable Activity, efficiency, self-absorption and volume.

The comparison of the various geometries highlighted one of them as optimal, which was used in a soil core depth sampling within Zografou Campus. Samples of the new geometry were created and analyzed using the LEGe detector. The radioactivities of the isotopes ^{210}Pb , ^{234}Th και ^{226}Ra were determined, after appropriate calibrations using Monte Carlo methods. In conclusion, the new geometry fulfills the analyzing needs of the isotopes ^{210}Pb και ^{226}Ra in low volume soil samples.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΟ ΧΩΜΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	5
2.1	Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στη μελέτη δειγμάτων χώματος	5
2.2	Μελέτη της διάβρωσης/ιζηματογένεσης του εδάφους με τη χρήση ραδιοϊσοτόπων	6
2.2.1	Ισότοπα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης	7
2.2.2	Η προέλευση των πυρήνων ^{210}Pb σε δείγμα χώματος	9
2.2.3	Κατά βάθος κατανομή του ^{210}Pb	11
2.2.4	Διαχωρισμός προελεύσεων των πυρήνων ^{210}Pb με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους	12
2.2.5	Μοντέλα εκτίμησης ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης	13
2.2.6	Εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης με βάση το ^{210}Pb .	13
2.2.7	Θεωρητικό μοντέλο εκτίμησης ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης ακαλλιέργητων εδαφών με χρήση του ^{210}Pb	14
2.3	Η τεχνική δειγματοληψίας χώματος που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	18
2.4	Το πρόβλημα της μάζας του δείγματος κατά τη δειγματοληψία	19
2.5	Η ποιοτική επίδραση του μικρότερου όγκου δείγματος στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις ^{210}Pb	20
2.6	Παραμετρική ανάλυση γεωμετριών μικρού όγκου	21
2.7	Οι τεχνικές Monte Carlo στη γ-φασματοσκοπία	22
2.7.1	Ο κώδικας PENELOPE	24
2.7.2	Αρχεία εισόδου που καλείται να δημιουργήσει ο χρήστης	25
2.7.3	Εικονικοί ανιχνευτές	26
2.7.4	Τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN που χρησιμοποιήθηκαν	27
2.8	Ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Δ.Ε.	29
2.9	Απόδοση γ-φασματοσκοπικών ανιχνευτών	31
2.9.1	Ορισμός απόδοσης φωτοκορυφής	31
2.9.2	Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής	32
2.9.3	Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με τον κώδικα PENELOPE	35
2.9.4	Αβεβαιότητα πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής	37
2.9.5	Αβεβαιότητα καθαρού ρυθμού καταμέτρησης	38
2.9.6	Αβεβαιότητα ζύγισης	38
2.9.7	Αβεβαιότητα ειδικής ραδιενέργειας	38
2.10	Ελάχιστη μετρήσιμη ραδιενέργεια ενός δείγματος	40
2.10.1	Κρίσιμο Όριο L_c (Critical Limit)	41

2.10.2	Όριο Ανίχνευσης (Detection limit, L_d)	42
2.10.3	Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (Minimum Detectable Activity)	44
2.11	Το πρόβλημα της αυτοαπορρόφησης και ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης	45
2.12	Μέθοδοι εκτίμησης συντελεστή αναγωγής απόδοσης	49
3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	50
3.1	Περιγραφή πειραμάτων	50
3.1.1	Επιλογή δοχείων	51
3.1.2	Υλικά πλήρωσης γεωμετριών και οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν	52
3.2	Συστάσεις υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση	54
3.2.1	Δείγματα χώματος	55
3.2.2	Δείγματα τέφρας	56
3.2.3	Τελικά δεδομένα εισόδου υλικών δειγμάτων στο materials.exe	58
3.2.4	Υλικά τοιχωμάτων δοχείων	59
3.3	Αρχεία εισόδου γεωμετρίας *.geo που χρησιμοποιήθηκαν	60
3.4	Μετατροπή κώδικα χρήστη PENMAIN για πηγή όγκου	60
3.5	Εκτίμηση συντελεστή αναγωγής απόδοσης με χρήση του κώδικα PENELOPE	63
3.6	Εκτίμηση συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης χρήση της ολοκληρωτικής μεθόδου	63
3.7	Αποτελέσματα αναλύσεων των δειγμάτων για τα φωτόνια 46.52 keV του ^{210}Pb	65
3.7.1	Ρυθμοί καταμέτρησης	66
3.7.2	Πειραματικές και προσομοιούμενες αποδόσεις φωτοκορυφής	67
3.7.3	Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια	68
3.7.4	Διορθώσεις απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης	69
3.8	Παραμετρική μελέτη των γεωμετριών	70
3.8.1	Σύγκριση γεωμετριών σε όρους ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων 46.52 keV	70
3.8.2	Σύγκριση γεωμετριών σε όρους σχετικής αβεβαιότητας επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{210}Pb	71
3.8.3	Σύγκριση πειραματικών αποδόσεων φωτοκορυφής για την ενέργεια των φωτονίων του ^{210}Pb (46.52 keV)	74
3.8.4	Σύγκριση πειραματικών αποδόσεων με τις προσομοιούμενες από Monte Carlo	75
3.8.5	Σύγκριση γεωμετριών σε όρους Κατώτερης Ανιχνεύσιμης Ραδιενέργειας	79
3.8.6	Σύγκριση γεωμετριών σε όρους διόρθωσης απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης	80
3.8.7	Συμπεράσματα	82
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ	84

4.1	Δειγματοληψία χρώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και συσκευασία δειγμάτων στη νέα γεωμετρία	87
4.2	Βαθμονόμηση της νέας γεωμετρίας για χρήση με τον ανιχνευτή LEGe	90
4.2.1	Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με μεταφορά απόδοσης (efficiency transfer)	91
4.2.2	Μεθοδολογίες προσδιορισμού της πραγματικής απόδοσης σε δείγματα χρώματος με μεταφορά απόδοσης	91
4.2.3	Μοντέλα του ανιχνευτή LEGe που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό απόδοσης φωτοκορυφής 46.52 keV μέσω PENELOPE	95
4.2.4	Προσδιορισμός dead layers στην προσομοίωση PENELOPE για τον ανιχνευτή LEGe	96
4.2.5	Προσομοιώσεις για τη γεωμετρία 8 και τη νέα γεωμετρία	98
4.2.6	Συντελεστές αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης που υπολογίστηκαν για το ^{210}Pb	98
4.2.7	Σύγκριση μεθοδολογιών προσδιορισμού της πραγματικής απόδοσης	100
4.3	Πειραματικές κατά βάθος κατανομές του ^{210}Pb που προέκυψαν από την ανάλυση των νέων δειγμάτων χρώματος	101
4.4	Παρατηρήσεις και προτάσεις επί της χρήσης της νέας γεωμετρίας δείγματος	106
5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	108
5.1	Σύνοψη της εργασίας	108
5.2	Συμπεράσματα	113
5.3	Προτάσεις και μελλοντικά βήματα	114
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ	116
A.1	Πιστοποιητικό XiRa	116
A.2	Πιστοποιητικό LEGe	118
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ PENELOPE	119
B.1	Αρχεία γεωμετρίας “.geo”	119
B.2	Αύξοντες αριθμοί υλικών αρχείων “.mat” και αντιστοίχιση με τα αρχεία γεωμετρίας “.geo”	177
B.3	Γενικά αρχεία εισόδου “.in”	179
B.4	Τροποποίηση κώδικα “penmain.f” για πηγή όγκου	180
B.5	Έλεγχος ομοιομορφίας πηγής όγκου	185
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΖΥΓΙΣΕΩΝ	194
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	198

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γ-φασματοσκοπία είναι η τεχνική η οποία κατ' εξοχήν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα, όπως δείγματα τα οποία λαμβάνονται από το έδαφος. Συχνά για την ανάλυση της ραδιενέργειας του εδάφους είναι απαραίτητη η λήψη δειγμάτων, τόσο από την επιφάνεια, όσο και από μεγαλύτερα βάθη. Ένα από τα προβλήματα στις κατά βάθος αναλύσεις δειγμάτων χώματος με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας, είναι η επίπονη διαδικασία της συλλογής ικανής ποσότητας χώματος από κάθε βάθος, κάτι που επιβάλλεται από την εν γένει χαμηλή ειδική ραδιενέργεια του χώματος. Μάλιστα, όσο το κατά βάθος βήμα γίνεται μικρότερο, τόσο το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο. Για το λόγο αυτό το βήμα δειγματοληψίας είναι συνήθως αρκετά μεγάλο, (π.χ. 5cm), κάτι που δεν επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη της κατά βάθος κατανομής.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (Δ.Ε.) έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση και τελικά την υιοθέτηση από το ΕΠΤ-ΕΜΠ μιας νέας γεωμετρίας δειγμάτων μικρού ωφέλιμου όγκου, κάτι που θα διευκολύνει από άποψη χρόνου και κόπου τις δειγματοληψίες αλλά και τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που γίνονται με στόχο την μελέτη της κατά βάθος κατανομής ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος. Η εργασία αυτή θα εστιάσει στην ανάλυση του ^{210}Pb , του οποίου η κατά βάθος κατανομή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Ο ^{210}Pb ανιχνεύεται και ποσοτικοποιείται με τα φωτόνια ενέργειας 46.52 keV που εκπέμπει. Η χαμηλή ενέργεια των φωτονίων οδηγεί στην έντονη απορρόφηση των φωτονίων μέσα στο ίδιο το υλικό του δείγματος, ειδικά σε δείγματα μεγάλου όγκου. Επομένως, ποσοστό φωτονίων τα οποία εκπέμπονται από την πηγή, δεν αλληλεπιδρούν ποτέ με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερη απόδοση ανίχνευσης φωτοκορυφής. Επιπρόσθετα, στο δείγμα υπάρχουν και άλλα ραδιενεργά ισότοπα, είτε φυσικά (της σειράς του ^{238}U , του ^{232}Th και το ^{40}K), είτε τεχνητά (π.χ. ^{137}Cs). Όταν το δείγμα εντός του ανιχνευτή έχει μεγάλο όγκο, υπάρχουν περισσότεροι πυρήνες τέτοιων ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια υψηλότερης ενέργειας, τα οποία κάνουν μερική εναπόθεση ενέργειας στον κρύσταλλο του ανιχνευτή με αποτέλεσμα την αύξηση του συνεχούς υποστρώματος στην ενεργειακή περιοχή που ανιχνεύονται τα φωτόνια 46.52 keV που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του ^{210}Pb . Αυξημένο συνεχές υπόστρωμα

συνεπάγεται αύξηση του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης του ισοτόπου καθώς και της αβεβαιότητας κατά τον ποσοτικό προσδιορισμό του ισοτόπου, κάτι που ενδεχομένως δυσχεραίνει τη διαπίστωση της κατά βάθος κατανομής του ισοτόπου στο έδαφος.

Παρόλο που η χρήση μίας γεωμετρίας ανίχνευσης η οποία βασίζεται σε μεγάλο όγκο δείγματος παρουσιάζει το πλεονέκτημα μεγαλύτερης εν γένει συνολικής ραδιενέργειας¹ του δείγματος και συνεπώς του ρυθμού εκπομπής φωτονίων, μια γεωμετρία μικρού όγκου δείγματος παρουσιάζει ορισμένα οφέλη που μπορούν να αντισταθμίσουν την αυξημένο ρυθμό εκπομπής φωτονίων. Οι γεωμετρίες μικρού όγκου που έχουν μικρότερο ύψος, παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων, λόγω της μεγαλύτερης στερεάς γωνίας υπό την οποία φαίνεται ο ανιχνευτής και μικρότερη αυτοαπορρόφηση των φωτονίων στο δείγμα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό φωτονίων που εκπέμπονται από το δείγμα να φτάνουν στον κρύσταλλο του ανιχνευτή. Στα πλαίσια της ΔΕ διερευνήθηκε το κατά πόσον οι γεωμετρίες μικρού όγκου παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο συνεχές υπόστρωμα, ικανό να αντισταθμίζει σε όρους στατιστικής το χαμηλότερο ρυθμό καταγραφής φωτονίων στην φωτοκορυφή των 46.54 keV του ²¹⁰Pb.

Με σκοπό να βρεθεί μια γεωμετρία μικρού όγκου που να καλύπτει τις ανάγκες ανάλυσης του ²¹⁰Pb στο χώμα, επιλέχθηκαν με βάση ορισμένα κριτήρια 8 γεωμετρίες οι οποίες βασίζονται σε δοχεία τα οποία διατίθενται στο εμπόριο, οι οποίες συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους, όσο και με δύο από τις ήδη τυποποιημένες γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Έτσι, σχηματίστηκε ένα σύνολο δέκα γεωμετριών που μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Οι γεωμετρίες αυτές πληρώθηκαν με δύο τυπικά υλικά και αναλύθηκαν σε δύο από τους ανιχνευτές γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ και συγκρίθηκαν με βάση τον ωφέλιμο όγκο, και μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων η αβεβαιότητα της αντίστοιχης φωτοκορυφής κλπ. Οι συγκρίσεις αυτές έγιναν με βάση πειραματικά δεδομένα, καθώς και αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις Monte Carlo.

Καθώς ένας από τους λόγους για τους οποίους ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής του ²¹⁰Pb στο χώμα, είναι η μελέτη ρυθμού διάβρωσης και

¹ Η συνολική ραδιενέργεια του δείγματος (Bq) προκύπτει ως το γινόμενο της ειδικής ραδιενέργειας (Bq/kg) του δείγματος και της μάζας του δείγματος, η οποία εξαρτάται από τον όγκο του δοχείου που χρησιμοποιείται

ιζηματογένεσης στο έδαφος, στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται γενικά στοιχεία για τη μελέτη του ρυθμού διάβρωσης και ιζηματογένεσης. Για τέτοιους είδους μελέτες χρησιμοποιούνται και άλλα ισότοπα, όπως το ¹³⁷Cs και το ⁷Be, αλλά η εργασία αυτή εστιάζει στο ισότοπο του ²¹⁰Pb. Για το λόγο αυτό, δίνονται περισσότερες πληροφορίες ως προς την προέλευση και την κατακόρυφη κατανομή των πυρήνων του ²¹⁰Pb στο χώμα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι αρχές πάνω στις οποίες στηρίζονται οι μελέτες ρυθμού διάβρωσης και ιζηματογένεσης που χρησιμοποιούν το ισότοπο αυτό, καθώς και ένα από τα μοντέλα εκτίμησης εκτίμησής τους. Στο Κεφάλαιο αυτό δίνονται επιπλέον λεπτομέρειες ως προς την τεχνική συλλογής δειγμάτων χώματος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, το πρόβλημα της απαιτούμενης μάζας δειγματοληψίας, καθώς και η λογική που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία για τη διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης. Επίσης, γίνεται αναφορά σε ορισμένα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας, καθώς και στοιχεία των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, δίνονται οι ορισμοί της απόδοσης φωτοκορυφής, της ελάχιστης μετρήσιμης ραδιενέργειας ενός δείγματος, του συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, καθώς και οι τρόποι εκτίμησής τους. Τα μεγέθη αυτά αποτέλεσαν και τα κριτήρια σύγκρισης των υποψήφιων γεωμετριών. Τέλος, περιγράφεται η χρήση του κώδικα Monte Carlo PENELOPE, για τον – παράλληλα με τον πειραματικό – υπολογισμό ορισμένων εκ των παραπάνω μεγεθών.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αρχικά η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης² γεωμετρίας δείγματος. Αιτιολογείται η επιλογή των υποψήφιων γεωμετριών, παρουσιάζονται οι διαστάσεις τους, παρατίθενται τα τυπικά υλικά που πλήρωσαν τις γεωμετρίες, καθώς επίσης και τα μοντέλα που εισήχθησαν στον κώδικα PENELOPE για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των προσομοιώσεων και γίνεται οι συγκρίσεις μεταξύ των γεωμετριών με βάση τις διάφορες παραμέτρους. Το 3^ο Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη συνολική σύγκριση όλων των μεγεθών που προέκυψαν και τα συμπεράσματα της παραμετρικής μελέτης. Η σύγκριση των γεωμετριών απέφερε την πρόταση υιοθέτησης μίας εκ των γεωμετριών μικρού όγκου για τις αναλύσεις ²¹⁰Pb στο χώμα.

² Από τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν

Μετά την υιοθέτηση της νέας γεωμετρίας, αποφασίστηκε να γίνει η εφαρμογή της σε μία κατά βάθος δειγματοληψία και ανάλυση των δειγμάτων χώματος, με σκοπό τη μελέτη της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb . Η όλη διαδικασία δειγματοληψίας που έγινε εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου και της ανάλυσης που ακολούθησε περιγράφεται στο 4^ο Κεφάλαιο. Περιγράφονται η λογική της δειγματοληψίας, οι ιδιαιτερότητες και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη συσκευασία των δειγμάτων μικρού όγκου, με δεδομένη την επίσης μικρή συλλεχθείσα ποσότητα. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή LEGe για τη νέας γεωμετρία και για τις ενέργειες των φωτονίων των ισοτόπων³ ^{210}Pb , ^{234}Th (θυγατρικό του ^{238}U) και ^{214}Bi (θυγατρικό του ^{226}Ra). Η βαθμονόμηση έγινε με τη βοήθεια τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Επειδή ο προσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ραδιενέργειας των δειγμάτων μπορούσε να γίνει με περισσότερους από έναν τρόπους, εξετάστηκαν ορισμένες πιθανές μεθοδολογίες προσδιορισμού της, για το ισότοπο του ^{210}Pb . Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε να ακολουθηθεί, εφαρμόστηκε σε όλα τα κατά βάθος δείγματα χώματος που ελήφθησαν για τα τρία ισότοπα που εξετάστηκαν και προέκυψαν οι κατά βάθος κατανομές της ραδιενέργειάς τους με ικανοποιητική ακρίβεια. Στο τέλος του 4^{ου} Κεφαλαίου γίνεται εκτίμηση της εφαρμογής της νέας γεωμετρίας γίνονται διάφορες παρατηρήσεις, παρατίθενται τα προβλήματα που παρατηρήθηκαν, καθώς και προτάσεις για βελτίωση.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των προηγούμενων Κεφαλαίων, των συμπερασμάτων που προέκυψαν και παρατίθενται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τρία Παραρτήματα. Το πρώτο Παράρτημα περιλαμβάνει τα πιστοποιητικά των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν, το δεύτερο τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις με τον κώδικα PENELOPE καθώς και την τροποποίηση του κώδικα χρήστη για πηγή όγκου, και το τρίτο περιγράφει τη διαδικασία υπολογισμού των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στα αποτελέσματα της μέτρησης λόγω της ζύγισης των δειγμάτων.

³ Αν και το ενδιαφέρον της Δ.Ε. εστιάζεται στον ^{210}Pb , εντούτοις έχει μεγάλο ενδιαφέρον και η μελέτη της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ των ισοτόπων ^{238}U , ^{226}Ra ^{210}Pb που ανιχνεύονται στα δείγματα.

2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΟ ΧΩΜΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα γενικά στοιχεία και μεγέθη σχετικά με την ανάλυση της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων στο χώμα, μέσω της ραδιομετρικής τεχνικής της γ-φασματοσκοπίας, καθώς και μια από τις πρακτικές εφαρμογές αυτών των αναλύσεων. Πρόκειται για τη μελέτη της οριζόντιας μετακίνηση του χώματος (διάβρωση/ίζηματογένεση), με εστίαση στη χρήση των κατά βάθος κατανομών της συγκέντρωσης του ισοτόπου του ^{210}Pb στο έδαφος. Επίσης, παρουσιάζονται οι δυσκολίες γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του ^{210}Pb , καθώς και τα πιθανά οφέλη χρήσης γεωμετρικών δειγμάτων μικρού όγκου. Τέλος, περιγράφεται η συγκριτική μελέτη που έγινε στα πλαίσια αυτής της Δ.Ε., μεταξύ υπογήφινων δοχείων μικρού όγκου, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα και να υιοθετηθεί νέα γεωμετρία δείγματος που θα χρησιμοποιείται για τις αναλύσεις του ^{210}Pb στο χώμα.

2.1 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στη μελέτη δειγμάτων χώματος

Η γ-φασματοσκοπικές μέθοδοι ανάλυσης δειγμάτων οποιασδήποτε σύστασης, βασίζονται στην επεξεργασία του ενεργειακού φάσματος των φωτονίων που λαμβάνεται από κατάλληλο ανιχνευτή. Ο προσδιορισμός της ύπαρξης ή μη ενός ραδιοϊσοτόπου εντός του δείγματος καθίσταται δυνατός, καθώς οι ακτίνες γ (φωτόνια) που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του πυρήνα ενός ισοτόπου είναι χαρακτηριστικές για το εν λόγω ισότοπο και επομένως το ταυτοποιούν. Περαιτέρω επεξεργασία του φάσματος οδηγεί στον ποσοτικό προσδιορισμό της ραδιενέργειας του ισοτόπου που βρίσκεται εντός του δείγματος («καθαρή» ραδιενέργεια).

Οι τεχνικές της γ-φασματοσκοπίας παρουσιάζουν δύο κύρια πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων προσδιορισμού ραδιοϊσοτόπων: είναι μη καταστροφικές (επομένως το ίδιο δείγμα μπορεί να μετρηθεί παραπάνω από μια φορά, ή και με άλλη τεχνική), και η διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος είναι απλούστερη, καθώς δεν απαιτείται χημική μέθοδος διαχωρισμού των πυρήνων που ενδιαφέρουν. Επομένως, προτιμώνται στις περιπτώσεις μελέτης γ-ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία εκπέμπουν φωτόνια με ποσοστό εκπομπής που να επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό τους σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Η μελέτη της διάβρωσης και ιζηματογένεσης του εδάφους, αποτελεί μια μόνο από τις εφαρμογές που εκμεταλλεύονται φυσικά ή τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στο έδαφος.

2.2 Μελέτη της διάβρωσης/ιζηματογένεσης του εδάφους με τη χρήση ραδιοϊσοτόπων

Με τον όρο εδαφική διάβρωση περιγράφεται το φαινόμενο κατά το οποίο έδαφος και πετρώματα αφαιρούνται από το νερό (υδατική διάβρωση), τον άνεμο (αιολική διάβρωση), τα ζώα ή τον άνθρωπο (Imeson and Curfs, 2006). Επιπλέον, δραστηριότητες όπως η ισοπέδωση της γης και η χρήση φυτοφαρμάκων, η εκμετάλλευση των εδαφών έπειτα από πυρκαγιά, η υπερβόσκηση, κτλ, αυξάνουν τους ρυθμούς διάβρωσης.

Η ιζηματογένεση αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία υλικό που κατά βάση προέρχεται από τη διάβρωση του εδάφους, συσσωρεύεται και δημιουργεί νέα πετρώματα στις κοίτες των ποταμών, πεδιάδες, υγροτόπους, δέλτα και εκβολές ποταμών (Salomons and Förstner, 2010). Λόγω του ότι το φαινόμενο συνδέεται στενά με τη διάβρωση, οι μέθοδοι εκτίμησης του ρυθμού της ιζηματογένεσης με χρήση ραδιοϊσοτόπων παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές σε σχέση με αυτές του ρυθμού διάβρωσης.

Η υπερβολική διάβρωση προκαλεί προβλήματα, όπως ερημοποίηση, μειώσεις της γεωργικής παραγωγικότητας λόγω της υποβάθμισης του εδάφους και οικολογική κατάρρευση λόγω της απώλειας των πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά ανώτερων στρωμάτων του εδάφους. Επομένως, η μελέτη και η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων που να εκτιμούν το ρυθμό αυτής είναι αναγκαία.

Μια κατηγορία μεθόδων εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης, είναι αυτές που στηρίζονται στη Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος (Universal Soil Loss Equation-USLE, Wischmeier and Smith, 1965) καθώς και την αναθεωρημένη έκδοσή της (Revised Universal Soil Loss Equation-RUSLE, Renald et al., 1991). Η Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος προβλέπει το μακροπρόθεσμο μέσο ετήσιο ρυθμό διάβρωσης σε επικλινές έδαφος, με βάση τις βροχοπτώσεις, τον τύπο του εδάφους, την τοπογραφία και πρακτικές των καλλιεργιών. Το μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο ότι προβλέπει μόνο το ποσό της απώλειας εδάφους από επιφανειακή και αυλακωτή υδατική διάβρωση σε μια πλαγιά (Imeson and Curfs, 2006) και δε

λαμβάνονται υπ' όψιν περαιτέρω απώλειες χώματος που οφείλονται σε χαραδρωτική υδατική διάβρωση, αιολική διάβρωση και όργωμα της γης.

Μια διαφορετική κατηγορία μεθόδων εκτίμησης είναι αυτές που στηρίζονται στη χρήση ραδιοϊσοτόπων. Ένα πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων έγκειται στο ότι καθιστούν δυνατό τον χωρικό προσδιορισμό της διάβρωσης στο υπό μελέτη σημείο, σε αντίθεση με τη Γενική Εξίσωση Απώλειας Χώματος.

2.2.1 Ισότοπα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης

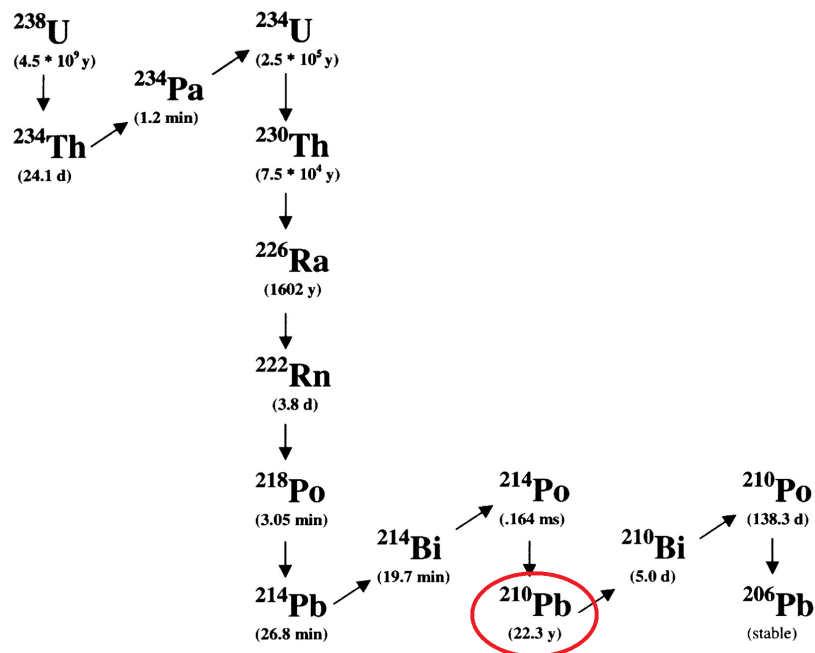
Τα συνηθέστερα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης είναι το ^{137}Cs , ο ^{210}Pb , και το ^7Be (Πετροβίτσος, 2011). Ο κυριότερος λόγος μετανάστευσης αυτών, θεωρείται ότι είναι το νερό και ο άνεμος, φυσικά φαινόμενα που προκαλούν τη διάβρωση και παρασύρουν τους κόκκους χώματος στους οποίους είναι προσκολλημένα τα ισότοπα αυτά. Ο ευκολότερος τρόπος προσδιορισμού αυτών είναι με χρήση τεχνικών γ-φασματοσκοπίας, όπως άλλωστε είναι και το αντικείμενο της παρούσης Δ.Ε.

Το ^{137}Cs αποτελεί ένα τεχνητό ισότοπο (χρόνος ημιζωής 30.08 έτη), προϊόν σχάσης εντός πυρηνικών αντιδραστήρων και όπλων. Καθώς είναι ανθρωπογενούς προέλευσης αποτελεί ένα μοναδικό ιχνηλάτη διάβρωσης και ιζηματογένεσης. Η πρώτη επαφή του ισοτόπου αυτού με περιβάλλον έγινε το 1945 με την πρώτη πυρηνική δοκιμή. Οι χρονολογίες της πρώτης επιφανειακής απόθεσής του λόγω των πυρηνικών δοκιμών (1954), καθώς της κορύφωσης αυτής (1963) διόλου τυχαία χρησιμοποιούνται στις σχέσεις των μοντέλων υπολογισμού ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης. Μεγάλα πυρηνικά ατυχήματα όπως αυτό του Τσερνόμπιλ (1986), της Φουκουσίμα (2011) κτλ, συνεπάγονται απελευθέρωση στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ άρα και νέες αποθέσεις ^{137}Cs στο χώμα. Το ισότοπο αυτό εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 661.62 keV, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανίχνευσή του με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους.

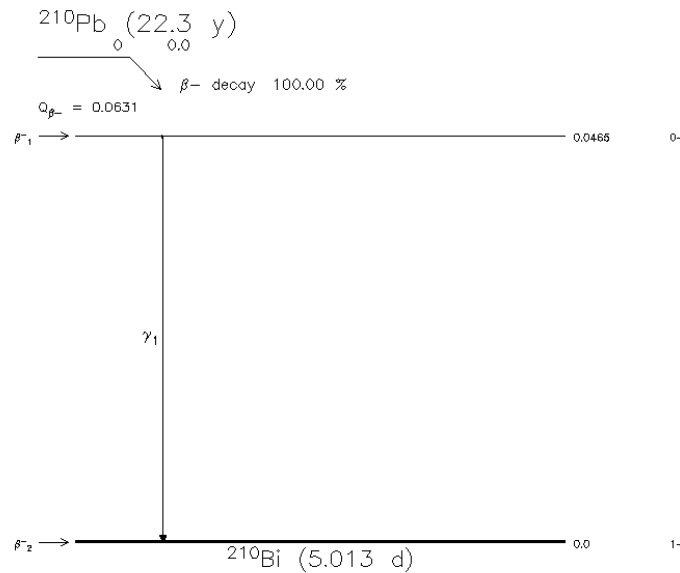
Το ^7Be αποτελεί ισότοπο κοσμικής προέλευσης (χρόνος ημιζωής 53.44 ημέρες), παραγόμενο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, λόγω των αλληλεπιδράσεων αυτής με ακτινοβολία κοσμικής προέλευσης. Ο ρυθμός εναπόθεσής του στην επιφάνεια της γης μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά, στην περιοχή 140-740 Bq m²·day⁻¹ (Wallbrink and Murray, 1994). Τα φωτόνια 477.60 keV που

εκπέμπει το ${}^7\text{Be}$, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και ποσοτικό προσδιορισμό του.

Ο ${}^{210}\text{Pb}$ είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο (χρονος ημιζωής 22.3 έτη), θυγατρικό της σειράς του ${}^{238}\text{U}$ (βλέπε Σχήμα 2-1). Παράγεται τόσο μέσα στο έδαφος, όσο και στον αέρα, κατά τη διάσπαση των θυγατρικών του ραδιενεργού αερίου ραδονίου (${}^{222}\text{Rn}$) το οποίο μπορεί να διαφύγει από το έδαφος. Η συγκέντρωση του ${}^{210}\text{Pb}$ μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, από τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας 46.52 keV που εκπέμπει κατά τη β-διάσπαση του (βλέπε Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-1: Η ραδιενεργός σειρά του ${}^{238}\text{U}$, στην οποία ανήκει ο ${}^{210}\text{Pb}$ (Osmond et al., 2002).



Σχήμα 2-2: Σχήμα ραδιενεργού διάσπασης του ^{210}Pb

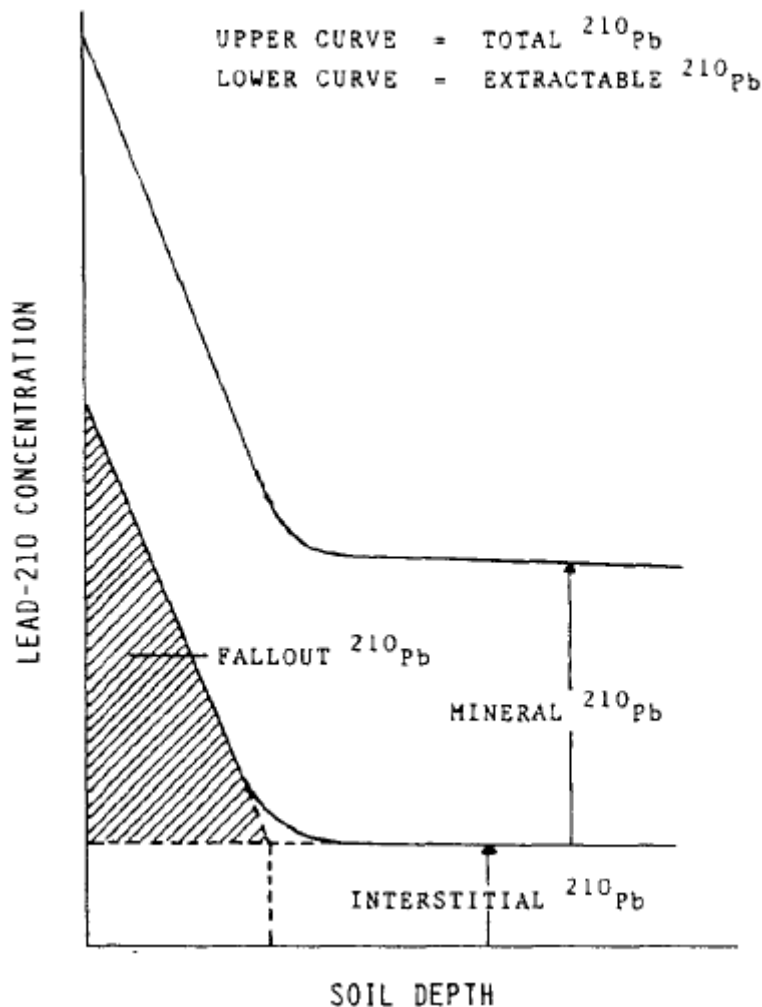
Η χαμηλή ενέργεια των φωτονίων του ^{210}Pb συνεπάγεται ισχυρή αυταπορρόφηση⁴, ειδικά σε δείγματα μεγάλου όγκου. Επιπλέον, η ύπαρξη στο δείγμα άλλων ραδιενεργών ισοτόπων, τόσο φυσικών (π.χ. της σειράς του ^{238}U , του ^{232}Th και του ^{40}K) όσο και τεχνητών (π.χ. ^{137}Cs), οδηγεί στην αύξηση του συνεχούς υποστρώματος στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης των φωτονίων του ^{210}Pb , με συνακόλουθη αύξηση του κατωτέρου επιπέδου ανίχνευσης του ισοτόπου.

Ο ρυθμός εναπόθεσης του ^{210}Pb εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώματος κάθε περιοχής (πχ πορώδες), τα καιρικά φαινόμενα και την εποχιακή αλλαγή ιδιοτήτων του χώματος που επηρεάζουν την εκροή του ^{222}Rn , όπως η υγρασία. Συγκεκριμένα για τα ελληνικά χώματα, οι συγκεντρώσεις του κυμαίνονται στο εύρος $82 \pm 40 \text{ Bq/kg}$ (Anagnostakis et al., 2002) σε βάθος 1 cm.

2.2.2 Η προέλευση των πυρήνων ^{210}Pb σε δείγμα χώματος

Καθώς η παρούσα Δ.Ε. εστιάζει στο ισότοπο του ^{210}Pb , κρίνεται σκόπιμο να δοθούν περισσότερες λεπτομέρειες ως προς την προέλευση των πυρήνων του στο έδαφος. Σύμφωνα με τους (Matthews and Potiripin, 1985), ο ^{210}Pb του χώματος μπορεί να διαχωριστεί σε 3 κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3.

⁴ Πρόκειται για την απορρόφηση των φωτονίων μέσα στο δείγμα από το οποίο εκπέμπονται



Σχήμα 2-3: Απλοποιημένο διάγραμμα της κατά βάθος συγκέντρωσης του ^{210}Pb , με απεικόνιση της συνεισφοράς της συγκέντρωσης των πυρήνων ορυκτού, διάμεσου και ανυποστήρικτου μολύβδου-210 (Matthews and Potipin 1985).

Η πρώτη κατηγορία είναι ο «ορυκτός» ^{210}Pb (mineral ^{210}Pb). Στην περίπτωση που το ραδιενεργό βραχύβιο ευγενές αέριο ^{222}Rn (χρόνος ημιζωής 3.8 ημέρες) δε διαφύγει από τον κόκκο χώματος στον οποίο παρήχθη ως θυγατρικό του ^{226}Ra , τότε και τα θυγατρικά του ραδονίου θα παραμείνουν στο χώμα. Επομένως και ο ^{210}Pb θα παραμείνει στον αρχικό κόκκο των πατρικών του. Η κατηγορία αυτή του ^{210}Pb θεωρείται ότι έχει σταθερή κατά βάθος συγκέντρωση.

Η δεύτερη κατηγορία είναι ο «διάμεσος» ^{210}Pb (interstitial ^{210}Pb). Στην περίπτωση που το ραδόνιο αποσπάται από τον αρχικό κόκκο στον οποίο παρήχθη, αλλά διασπαστεί πριν διαφύγει από το επιφανειακό χώμα, τα θυγατρικά του και άρα ο ^{210}Pb θα εναποτεθούν στην επιφάνεια ενός κόκκου χώματος που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος από τον αρχικό. Κατά παραδοχή θεωρείται ότι και η κατηγορία αυτή του ^{210}Pb έχει σταθερή κατά βάθος συγκέντρωση.

Η τρίτη κατηγορία είναι ο «πλεονάζων» ^{210}Pb (excess ^{210}Pb , συναντάται στην ξένη βιβλιογραφία και ως unsupported ή fallout). Πυρήνες ^{210}Pb που προέκυψαν από το ευγενές αέριο ^{222}Rn στον αέρα, κατακρημνίζονται στο έδαφος. Επίσης, οποιοδήποτε από τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου που υπάρχει στον αέρα πριν το ^{210}Pb (χρόνος ημιζωής έως λίγα λεπτά), μπορεί να εναποτεθεί στο χώμα με τους ίδιους τρόπους και να διασπαστεί τελικά σε ^{210}Pb . Οι πυρήνες ^{210}Pb που προέρχονται είτε από απευθείας εναπόθεση από τον αέρα ή/και τη βροχή, είτε από αυτά τα βραχύβια θυγατρικά, δεν προέρχονται από ^{226}Ra που υπήρχε σε κόκκους του όγκου χώματος που λαμβάνεται κατά τη δειγματοληψία, και θεωρούνται ως πλεονάζων ^{210}Pb .

Επισημαίνεται ότι η διαφυγή ή μη του ^{222}Rn από το έδαφος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώματος, όπως η υγρασία και το πορώδες.

2.2.3 Κατά βάθος κατανομή του ^{210}Pb

Ένα τυπικό κατακόρυφο προφίλ συγκέντρωσης ^{210}Pb σε μια αδιατάρακτη περιοχή αναφοράς περιέχει πυρήνες μολύβδου και των 3 προελεύσεων που περιγράφονται στην παράγραφο 2.2.2, και έχει εκθετική μορφή, με τη μέγιστη τιμή συγκέντρωσης στην επιφάνεια, οφειλόμενη στον πλεονάζοντα ^{210}Pb (Walling and He, 1992; Owens et al., 1996; Walling et al., 1995, 1996).

Η μέθοδος (Matthews and Potiripin, 1985), επιτρέπει το διαχωρισμό των 3 προελεύσεων με χημικές μεθόδους. Αρχικά, προσδιορίζεται αρχικά η συνολική κατά βάθος συγκέντρωση του ^{210}Pb . Σε αδιατάρακτο προφίλ θέσεως αναφοράς, οι τιμές συγκέντρωσης του «εκθετικού» τμήματος της επιφάνειας προκύπτουν από ^{210}Pb και των τριών προελεύσεων. Σε μεγαλύτερο βάθος, οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα -χαμηλότερα από τις τιμές της επιφάνειας-, με το χώμα να περιλαμβάνει πυρήνες ορυκτού και διάμεσου ^{210}Pb .

Εάν είναι επιθυμητό, με κατάλληλη χημική επεξεργασία μπορεί να απομονωθεί από το δείγμα ο «εξαγώγιμος» (extractable) ^{210}Pb , και στη συνέχεια να προσδιοριστεί η κατά βάθος συγκέντρωση του με τεχνικές β ή γ-φασματοσκοπίας. Ο εξαγώγιμος ^{210}Pb περιλαμβάνει το διάμεσο και πλεονάζοντα ^{210}Pb , καθώς αυτές οι δυο κατηγορίες δεν είναι ενσωματωμένες στον κόκκο όπως ο ορυκτός και επομένως εξάγονται πιο εύκολα. Σε αυτή την περίπτωση το «εκθετικό» τμήμα του προφίλ περιλαμβάνει διάμεσο και πλεονάζοντα ^{210}Pb , και σε μεγαλύτερα βάθη που οι συγκεντρώσεις σταθεροποιούνται, μόνο διάμεσο ^{210}Pb , επομένως πλέον είναι δυνατός

ο διαχωρισμός πυρήνων και των τριών προελεύσεων. Τονίζεται ότι αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει σαφώς αβεβαιότητα, καθώς δεν είναι βέβαιο ότι η συγκέντρωση του διάμεσου ^{210}Pb παραμένει σταθερή κατά βάθος.

2.2.4 Διαχωρισμός προελεύσεων των πυρήνων ^{210}Pb με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.2, ένα ποσοστό του ^{222}Rn το οποίο παράγεται στο χώμα διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Ο ^{210}Pb αποτελεί θυγατρικό του ^{222}Rn , επομένως μία ποσότητα ^{210}Pb παράγεται στον αέρα και συνακόλουθα αποτίθεται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό διαταράσσει την ραδιενεργό ισορροπία μεταξύ του ^{210}Pb και των πατρικών του στο επιφανειακό χώμα, καθώς η περιεκτικότητα σε ^{210}Pb μεταβάλλεται διαρκώς, ενώ οι πατρικοί πυρήνες φθίνουν σύμφωνα με το νόμο της ραδιενεργού εξασθένησης.

Τα μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης, στηρίζονται στην εκτίμηση της ραδιενέργειας του ^{210}Pb , καθώς και του πατρικού του ^{226}Ra (Robbins, 1978), όπως προκύπτει από την ανάλυση δειγμάτων χώματος, με σκοπό την εύρεση της περίσσειας (excess/fallout/unsupported) ^{210}Pb . Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τον ^{210}Pb αφορούν την μελέτη διάβρωσης/ιζηματογένεσης έως 100 έτη πριν τη δειγματοληψία (~4.5 χρόνοι υποδιπλασιασμού του ^{210}Pb). Βασίζονται στην παραδοχή ότι το σημείο δειγματοληψίας δεν έχει διαταραχθεί κατά τα διάστημα αυτό, ώστε να υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία του ^{226}Ra ($T_{1/2}=1600$ έτη) με τον ορυκτό και διάμεσο ^{210}Pb ($T_{1/2}=22.3$ έτη). Οι πυρήνες του μολύβδου που οφείλονται στο πατρικό ράδιο (υποστηριζόμενοι πυρήνες) αφαιρούνται από τον συνολικά μετρούμενο ^{210}Pb , για να προκύψει ο πλεονάζων ^{210}Pb του δείγματος, ο οποίος τελικά χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της διάβρωσης ή ιζηματογένεσης του εδάφους.

Όσα αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.3 περί της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb εξακολουθούν να ισχύουν ποιοτικά. Ωστόσο, ο διάμεσος και ορυκτός ^{210}Pb δε διαχωρίζονται με κάποιο τρόπο, καθώς στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις συνήθως δεν προηγείται χημική επεξεργασία του δείγματος. Η συγκέντρωση του υποστηριζόμενου μολύβδου ισούται με το άθροισμα των συγκεντρώσεων ορυκτού και διάμεσου ^{210}Pb , και ισούται με την περιεκτικότητα του ^{226}Ra στο δείγμα. Ο συνολικός ^{210}Pb , (καθώς και το πατρικό ^{226}Ra), προσδιορίζεται απευθείας με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας, και η περίσσεια του ^{210}Pb προκύπτει μέσω του ^{226}Ra όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

2.2.5 Μοντέλα εκτίμησης ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης

Τα μοντέλα προσδιορισμού της αναδιανομής χόματος χωρίζονται εν γένει σε 2 κατηγορίες, τα εμπειρικά και τα θεωρητικά.

Τα εμπειρικά μοντέλα αποτελούν συναρτήσεις που προσδιορίζουν τη μέση ετήσια απώλεια χόματος και βασίζονται σε μακροχρόνιες μελέτες του ρυθμού αυξομείωσης της συγκέντρωσης του εν λόγω ισοτόπου ως προς μια θέση αναφοράς. Παρουσιάζουν αρκετή αβεβαιότητα λόγω της χρήσης εμπειρικών δεδομένων, τα οποία επιπρόσθετα δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην εκτίμηση του ρυθμού ιζηματογένεσης. Επίσης, η εφαρμογή τους παρουσιάζει προβλήματα σε περιπτώσεις περιοχών όπου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία σε βάθος χρόνου, ή σε περιπτώσεις μελετών που διεξάγονται εκτός των χρονικών πλαισίων μέσα στα οποία τα μοντέλα θεωρείται ότι παρέχουν αποδεκτά αποτελέσματα.

Τα θεωρητικά μοντέλα στηρίζονται σε αναλυτικές σχέσεις, με βαθμό πολυπλοκότητας που ποικίλει. Τα πιο λεπτομερή μοντέλα λαμβάνουν υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του κάθε ισοτόπου, τους βασικούς παράγοντες διάβρωσης/ιζηματογένεσης και την επιρροή τους στις μετρούμενες συγκεντρώσεις, το μεταβαλλόμενο βάθος καλλιέργειας λόγω διάβρωσης/ιζηματογένεσης, κτλ.

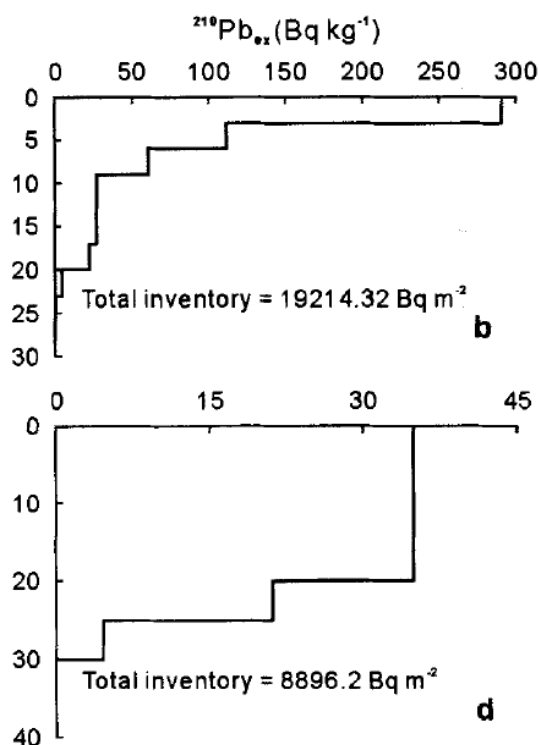
2.2.6 Εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης με βάση το ^{210}Pb .

Τα μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης με βάση το ^{210}Pb , βασίζονται στην εκτίμηση του κατά βάθος προφίλ από μια θέση αναφοράς. Ως θέση αναφοράς ορίζεται μια αδιατάρακτη από καλλιέργεια και το φαινόμενο της διάβρωσης περιοχή. Επιλέγεται κατά την κρίση του δειγματολήπτη, με βάση τα γεωγραφικά δεδομένα που διατίθεται για την εν λόγω περιοχή, όπως δορυφορικές εικόνες, προηγούμενες μελέτες στην περιοχή, καθώς και την αυτοψία του χώρου κατά τη διαδικασία σχεδιασμού της δειγματοληψίας.

Όταν η μέγιστη συγκέντρωση ^{210}Pb σε ένα δείγμα ακαλλιέργητου εδάφους που δεν προέρχεται από θέση αναφοράς βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, θεωρείται ότι η περιοχή αυτή έχει υποστεί ιζηματογένεση.

Αντίστοιχα, όταν η μέγιστη συγκέντρωση ^{210}Pb βρίσκεται μεν στην επιφάνεια του ακαλλιέργητου εδάφους, αλλά υπολείπεται της αντίστοιχης επιφανειακής συγκέντρωσης του προφίλ της θέσης αναφοράς, θεωρείται ότι η περιοχή αυτή έχει υποστεί διάβρωση.

Επειδή υπάρχει περίπτωση η μελέτη διάβρωσης/ιζηματογένεσης να γίνεται σε καλλιεργημένα εδάφη, είναι φανερό ότι η ανθρώπινη παρέμβαση οδηγεί σε ανάμιξη του χόματος, με αποτέλεσμα την πιθανώς ομοιογενή – ή εν γένει διαταραγμένη από μη φυσικές διεργασίες – κατά βάθος κατανομή του ισοτόπου που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης. Επομένως, είναι αναγκαία η ύπαρξη μοντέλων τόσο για ακαλλιέργητα εδάφη, όσο και για τη περιπλοκότερη περίπτωση των καλλιεργημένων εδαφών.



Σχήμα 2-4: Παράδειγμα της κατά βάθος συγκέντρωσης του ^{210}Pb σε αδιατάρακτο σημείο αναφοράς (b) και σε καλλιεργημένο έδαφος (d) (Zheng et al., 2007).

2.2.7 Θεωρητικό μοντέλο εκτίμησης ρυθμού διάβρωσης/ιζηματογένεσης ακαλλιέργητων εδαφών με χρήση του ^{210}Pb

Ένα από τα αναλυτικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις μελέτες εκτίμησης ρυθμών διάβρωσης και ιζηματογένεσης, είναι το μοντέλο διάχυσης και μετανάστευσης (diffusion and migration model). Το μοντέλο αυτό, εκτός από την ατμοσφαιρική εναπόθεση στο χώμα του υπό μελέτη ισοτόπου (^{137}Cs ή ^{210}Pb) στο χρόνο, λαμβάνει υπόψη και τις φυσικο-χημικές και βιολογικές διεργασίες που οδηγούν στην ανακατανομή αυτού κατά βάθος (Pegoyev and Fridman, 1978, Bachhuber et al., 1982, Reynolds et al., 1982, Walling and He, 1992, 1993, Knatko et al., 1996, Walling and He, 1997).

Στην περίπτωση του ^{210}Pb (Walling and He, 1999, Walling et al., 2003) το μοντέλο προσαρμόζεται ανάλογα. Συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.2.5, χρησιμοποιείται η περιεκτικότητα του χώματος σε πλεονάζοντα ^{210}Pb . Οι πυρήνες πλεονάζοντος μολύβδου που βρίσκονταν εντός του χώματος 100 έτη πριν τη δειγματοληψία θεωρούνται αμελητέα ποσότητα, καθώς το ποσοστό αυτών που απομένει στο χώμα τη στιγμή της δειγματοληψίας αντιστοιχεί σε ~4.5%, σύμφωνα με το νόμο της ραδιενεργού εξασθένησης. Ακόμη, στην αδιατάρακτη από διάβρωση και ιζηματογένεση θέση αναφοράς, η συγκέντρωση του πλεονάζοντος ^{210}Pb παραμένει σταθερή, λόγω των επίσης σταθερών ρυθμών διάσπασης και εναπόθεσης του ισοτόπου από την ατμόσφαιρα.

Η ροή απόθεσης σε ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) του ^{210}Pb δίνεται από τη σχέση:

$$I(t) = \frac{A_{ref} \cdot \ln(2)}{T_{1/2}} \quad (2-1)$$

όπου:

A_{ref} : η απόθεση σε ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) του πλεονάζοντος μολύβδου στη θέση αναφοράς,

$T_{1/2}$: ο χρόνος ημιζωής του μολύβδου σε έτη.

Η κατά βάθος κατανομή του πλεονάζοντος ^{210}Pb στο χώμα δίνεται από τη σχέση:

$$C_u(z) = C_u(0) \cdot e^{-\beta z} \quad (2-2)$$

όπου:

z : το κατά μάζα βάθος (kg/m^2)

$C_u(0)$: η ειδική ραδιενέργεια σε Bq/kg του πλεονάζοντος ^{210}Pb στο επιφανειακό κλάσμα χώματος.

$C_u(z)$: η ειδική ραδιενέργεια σε Bq/kg του πλεονάζοντος ^{210}Pb στο κατά μάζα βάθος z .

Ο σταθερός συντελεστής β σχετίζεται με το βαθμό διείσδυσης του πλεονάζοντος ^{210}Pb στο χώμα. Συνδέεται με τους συντελεστές μετανάστευσης και διάχυσης (μηχανισμοί που επηρεάζουν την διείσδυση του πλεονάζοντος ^{210}Pb) με την εξής σχέση:

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{V^2}{D^2} + \frac{4\lambda}{D}} - \frac{V}{D} \right) \quad (2-3)$$

όπου:

- λ : η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του ^{210}Pb σε (yr^{-1}).
- V : ο συντελεστής μετανάστευσης σε ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) του πλεονάζοντος ^{210}Pb . Καθώς η μέγιστη συγκέντρωση του πλεονάζοντος ^{210}Pb βρίσκεται στο επιφανειακό χώμα περιοχής αναφοράς, γίνεται η παραδοχή ότι η κατά βάθος κατανομή δε μεταβάλλεται λόγω μετανάστευσης, επομένως ο συντελεστής αυτός είναι μηδενικός (He and Walling, 1997).
- D : ο συντελεστής διάχυσης ($\text{kg}^2\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{yr}^{-1}$).

Η τιμή του συντελεστή β βρίσκεται μεταβάλλοντας τους συντελεστές V (για την περίπτωση του ^{210}Pb μηδενικός) και D , έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων μεταξύ των τιμών της πειραματικής κατά βάθους κατανομής και του μοντέλου της εκθετικής σχέσης (2-2) να ελαχιστοποιείται (Porto et.al., 2006).

Ο ρυθμός διάβρωσης R ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) δίνεται από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (2-4) και (2-5).

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') \cdot e^{-R/H}}{\sqrt{D \cdot \pi \cdot (t-t')}} e^{-V^2(t-t')/(4D) - \lambda(t-t')} dt' \quad (2-4)$$

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt' = A_{ref} - A \quad (2-5)$$

όπου:

- A : η συγκέντρωση του πλεονάζοντος ^{210}Pb σε ένα σημείο δειγματοληψίας (Bq/m^2)

H: το βάθος χαλάρωσης (relaxation depth). Ορίζεται ως το βάθος μάζας στο οποίο η συγκέντρωση του πλεονάζοντος ^{210}Pb μειώνεται στο $1/e$ σχετικά με τη συγκέντρωσή του στο επιφανειακό χώμα.

t: χρονική περίοδος μελέτης και ισούται με 100 yr για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

λ : η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του ^{210}Pb (yr^{-1})

P: ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων χώματος. Εκφράζει το λόγο της συγκέντρωσης του πλεονάζοντος ^{210}Pb στη διαβρωμένη ποσότητα χώματος που μεταφέρεται προς τη συγκέντρωση του περισσευούμενου ^{210}Pb στο χώμα. Κατά (He and Walling, 1996), με παραδοχή σφαιρικότητας των κόκκων και ίσης πυκνότητας μεταξύ θέσης αναφοράς και σημείου που έχει υποστεί διάβρωση, ορίζεται ως:

$$P = \left(\frac{r_0}{r_m}\right)^{0.65} \quad (2-6)$$

r_0 : η ακτίνα του κόκκου του χώματος στη θέση αναφοράς.

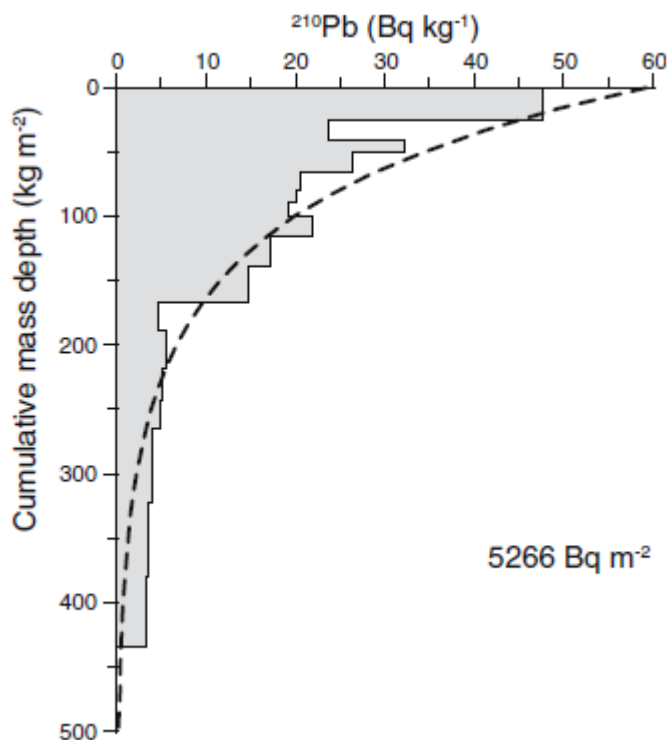
r_m : η ακτίνα του κόκκου στη διαβρωμένη θέση.

Ο ρυθμός ιζηματογένεσης, υπολογίζεται με τις ίδιες σχέσεις, με τη διαφορά ότι συμβολίζεται με R' ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) αντί για R , η διαφορά στο δεξί μέλος της σχέσης (2-5) θα είναι (A-Aref), και ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους κόκκων θα είναι ο P'

$$P = \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^{0.65} \quad (2-7)$$

r_0 : η ακτίνα του κόκκου του χώματος στη θέση αναφοράς.

r_m : η ακτίνα του κόκκου στη θέση που έχει υποστεί ιζηματογένεση.



Σχήμα 2-5: Πειραματικά σημεία και η προσαρμοσμένη καμπύλη του εκθετικού μοντέλου του ^{210}Pb (Porto et al., 2006)

2.3 Η τεχνική δειγματοληψίας χώματος που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Όπως γίνεται σαφές, για την επιτυχή εφαρμογή του όποιου μοντέλου για το προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης ή ιζηματογένεσης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η δειγματοληψία χώματος από διάφορα βάθη και η γ-φασματοσκοπική τους ανάλυση. Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) αναπτύχθηκε πρόσφατα μία νέα τεχνική δειγματοληψίας (Πετροβίτσος 2011), η οποία επιτρέπει σχετικά εύκολα και με ακρίβεια τη συλλογή δειγμάτων χώματος, έως βάθους $\sim 30\text{cm}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6, η τεχνική αυτή στηρίζεται στη χρήση κυλινδρικού δειγματολήπτη, αποτελούμενου από δύο ημικυκλικά τμήματα διαμέτρου 82.5 mm , συγκρατούμενα με κατάλληλους δακτυλίους-σφικτήρες. Ο δειγματολήπτης εισάγεται στο έδαφος με χρήση σφύρας και εν συνεχεία εξάγεται από το έδαφος μαζί με το χώμα που βρίσκεται μεταξύ των δύο ημικυκλικών τμημάτων. Μετά την αφαίρεση των σφικτήρων, το χώμα μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων μπορεί να διαιρεθεί κατά βάθος, ανάλογα με το επιθυμητό βήμα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να συλλέγονται δείγματα χώματος που αντιστοιχούν σε πάχος 1cm , με όγκο $\sim 45 \text{ cm}^3$.



*Σχήμα 2-6: Εισαγωγή του δειγματολήπτη στο χώμα (αριστερά) και ληφθέν δείγμα χώματος (δεξιά)
(Πετροβίτσος, 2011).*

Σε περιπτώσεις μελετών διάβρωσης/ιζηματογένεσης η δειγματοληψία εδάφους πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές, ώστε να ληφθεί τουλάχιστον ένα κατά βάθος δείγμα χώματος από κάθε θέση δειγματοληψίας που έχει οριστεί κατά την προκαταρκτική μελέτη της εκάστοτε περιοχής. Καθώς πολλές φορές καθίσταται αναγκαία η εξασφάλιση μιας ελάχιστης ποσότητας υλικού από κάθε θέση δειγματοληψίας, λαμβάνονται 2 ή περισσότερα χωρικά εξαρτημένα (<10 m μεταξύ τους, Sutherland, 1994) υποδείγματα όμοιου όγκου. Αυτά ενδέχεται να αναμιχθούν καταλλήλως πριν τη συσκευασία και ανάλυσή τους με γ-φασματοσκοπικές μεθόδους, να αναλυθούν ανεξάρτητα ή να χρησιμοποιηθούν ως μάρτυρες για το σημείο δειγματοληψίας.

2.4 Το πρόβλημα της μάζας του δείγματος κατά τη δειγματοληψία

Καθώς το κατακόρυφο προφίλ του μολύβδου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πρώτα εκατοστά του επιφανειακού χώματος, κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας συνήθως απαιτούνται μικρά κατά βάθος βήματα (1-2 cm). Ο όγκος του χώματος που λαμβάνεται σε κάθε μικρό (1-2 cm) βήμα βάθους από έναν μόνο δειγματολήπτη εδάφους είναι δυνατόν να μην επαρκεί για την πλήρωση των τυποποιημένων γεωμετριών του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις δειγμάτων χώματος (40-282 cm³). Η ύπαρξη ξένων υλικών στο χώμα όπως βλάστηση και λίθοι, καθιστούν αυτό το πρόβλημα αρκετά έντονο. Η κατάσταση γίνεται ακόμα πιο δυσμενής σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητός ο διαχωρισμός των δειγμάτων χώματος σε κοκκομετρικά κλάσματα, ακόμα και αν γίνει αποδεκτό μεγαλύτερο κατά βάθος βήμα.

Επομένως, είναι αναγκαία η λήψη δύο ή περισσότερων υποδειγμάτων σε κάθε θέση, με σκοπό την ανάμιξη των αντίστοιχων δειγμάτων για κάθε βάθος. Παρότι η

τεχνική δειγματοληψίας που περιγράφηκε προηγουμένως εφαρμόζεται ευκολότερα σε σχέση με άλλες μεθόδους που είχαν εφαρμοσθεί στο παρελθόν, εξακολουθεί να αποτελεί επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, γεγονός που γίνεται ιδιαίτερα αισθητό όταν ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας σε μια περιοχή περιλαμβάνει πολλές θέσεις.

Μια προσέγγιση για την βελτιστοποίηση της τεχνικής δειγματοληψίας χώματος από άποψη χρόνου και κόπου, είναι η μείωση του απαιτούμενου όγκου χώματος, που επιτυγχάνεται με τη χρήση γεωμετρίας δείγματος μικρότερου όγκου.

2.5 Η ποιοτική επίδραση του μικρότερου όγκου δείγματος στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις ^{210}Pb

Καθώς η μελέτη της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb απαιτεί μικρά κατά βάθος βήματα, η ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ποσότητας χώματος για τον προσδιορισμό του ^{210}Pb σε κάθε βήμα είναι επιθυμητή σε καθαρά πρακτικό επίπεδο. Ωστόσο, μικρότερη ποσότητα συνεπάγεται και λιγότερους πυρήνες ^{210}Pb , για στο συγκεκριμένο δείγμα χώματος. Για λόγους καθαρά στατιστικής και επίτευξης χαμηλής αβεβαιότητας σε εύλογο χρονικό διάστημα, είναι επιθυμητή η μέτρηση όσο το δυνατόν περισσότερων φωτονίων από αυτά που εκπέμπει το δείγμα στη μονάδα του χρόνου. Επομένως, η μάζα του δείγματος που αναλύεται δεν είναι αποδεκτό να μειωθεί τόσο που να καθιστά χρονικά ασύμφορη την ανάλυση του δείγματος. Επιπλέον, ο πολύ χαμηλός ρυθμός εκπομπής φωτονίων του ^{210}Pb που θα εκπέμπονται από ένα πολύ μικρό δείγμα ενδεχομένως δεν θα επιτρέπει τη διάκριση της φωτοκορυφής του ^{210}Pb από το υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.

Παρά τις παραπάνω δυσκολίες που μπορεί να επιφέρει η μείωση της μάζας του δείγματος σε επίπεδο γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, εν γένει η μείωση του ύψους του δείγματος μπορεί να έχει και θετικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, αυξάνεται ο λόγος των ανιχνευόμενων φωτονίων προς τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή. Αυτό συμβαίνει λόγω της καλύτερης απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων που μπορεί να σημαίνει μία γεωμετρία πολύ κοντά στον ανιχνευτή και της μείωσης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης εντός του δείγματος. Τέλος, το μικρότερο πλήθος πυρήνων που εκπέμπουν φωτόνια υψηλότερης ενέργειας εντός του δείγματος χώματος, σημαίνει και μικρότερη συνεισφορά στο συνεχές υπόστρωμα από τις σκεδάσεις Compton εντός του υλικού της πηγής ή στον ανιχνευτή, κάτι που βελτιώνει την ανίχνευση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας του ^{210}Pb .

2.6 Παραμετρική ανάλυση γεωμετριών μικρού όγκου

Όλες οι ποιοτικές παρατηρήσεις της παραγράφου 2.5, ποσοτικοποιούνται με μεγέθη που σχετίζονται άμεσα με τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διεξαγωγή μιας παραμετρικής μελέτης που να χρησιμοποιεί αυτά τα μεγέθη, ώστε να υιοθετηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ μια γεωμετρία μικρού όγκου σε μελλοντικές αναλύσεις ^{210}Pb δειγμάτων χώματος, η οποία να αντικαθιστά τις ήδη τυποποιημένες.

Για τεχνοοικονομικούς λόγους, δεν είναι δυνατή η κατασκευή εκ του μηδενός πλαστικών κυλινδρικών γεωμετριών δείγματος από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Επομένως, η παραμετρική μελέτη αναγκαστικά περιορίζεται σε άμεσα διαθέσιμες γεωμετρίες του εμπορίου, επιλεγμένες με ορισμένα κριτήρια.

Ο αρχικός σχεδιασμός μιας τέτοιας παραμετρικής μελέτης προϋποθέτει τον προσδιορισμό των μεγεθών σύγκρισης για κάθε γεωμετρία, έπειτα από πειραματικές γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις για ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα υλικά δείγματος. Ορισμένες από τις παραμέτρους σύγκρισης μπορούν να προσδιορισθούν και με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo. Τα συμπεράσματα περί πιθανής χρήσης γεωμετρίας μικρού όγκου εξάγονται μέσω παράλληλης ποιοτικής σύγκρισης των αποτελεσμάτων αυτών.

Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή αυτής της παραμετρικής μελέτης μεταξύ των επιλεγμένων γεωμετριών ήταν τα εξής:

- Ο όγκος του δοχείου, για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω.
- Ο καθαρός ρυθμός καταμέτρησης (counts per second, cps) φωτονίων.
- Η σχετική αβεβαιότητα επιφάνειας φωτοκορυφής.
- Η απόδοση φωτοκορυφής, τόσο πειραματικά, όσο και με τεχνικές Monte-Carlo.
- Η Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια (Minimum Detectable Activity, MDA).
- Ο συντελεστής διόρθωσης απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης.

Οι ορισμοί των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζονται στις παραγράφους 2.9-2.11. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται:

- Οι γεωμετρίες δείγματος που εξετάστηκαν,
- Τα υλικά δείγματος που επιλέχθηκαν για να πληρώσουν τα δοχεία,

- Τα μοντέλα υλικών-γεωμετρίας ανιχνευτή και δοχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση
- Τα αποτελέσματα όλων των μεγεθών της παραμετρικής μελέτης.
- Τα συμπεράσματα περί πρότασης υιοθέτησης μίας εκ των εξεταζόμενων γεωμετριών.

2.7 Οι τεχνικές Monte Carlo στη γ-φασματοσκοπία

Οι μέθοδοι Monte Carlo, είναι κατάλληλες για την επίλυση προβλημάτων στοχαστικής φύσεως ή πολλών βαθμών ελευθερίας, μέσω της χρήσης τυχαίων αριθμών και κατάλληλων υπολογιστικών σχέσεων που μοντελοποιούν το πρόβλημα. Οι τεχνικές αυτές βρίσκουν χρήση σε προβλήματα προσομοίωσης αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας με την ύλη, μηχανικής των ρευστών, κυτταρικών δομών, επιχειρηματικών ρίσκων κτλ.

Στα πλαίσια των γ-φασματοσκοπικών εφαρμογών, οι προσομοιώσεις Monte Carlo χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση μεγεθών όπως η απόδοση φωτοκορυφής (βλ. παράγραφο 2.9), με σκοπό την διεξαγωγή συγκριτικών μελετών και βαθμονομήσεις γ-ανιχνευτών, συμπληρωματικά ή αντικαθιστώντας τις αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες. Ο πρωταρχικός σκοπός της παρούσης Δ.Ε. ήταν η διεξαγωγή μιας τέτοιας συγκριτικής μελέτης, επομένως θεωρήθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν τεχνικές Monte Carlo, παράλληλα με τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που έγιναν. Επιπρόσθετα, στο Κεφάλαιο 4 έγινε βαθμονόμηση της γεωμετρίας η οποία προτάθηκε προς υιοθέτηση για τρεις ενέργειες ισοτόπων (^{210}Pb , ^{234}Th , ^{226}Ra), με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo, λόγω έλλειψης κατάλληλης πηγής βαθμονόμησης.

Οι κώδικες που υλοποιούν τις τεχνικές Monte Carlo στο πεδίο των αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας-ύλης, βασίζονται στην παρακολούθηση πολλών «ιστοριών» σωματιδιακών και φωτονιακών ακτινοβολιών. Για ένα φωτόνιο, η παρακολούθηση αυτή τυπικά ακολουθεί την εξής μεθοδολογία:

Έστω μονοενεργειακή σημειακή γ-ραδιενεργός πηγή, η οποία βρίσκεται στην θέση (x_0, y_0, z_0) , όπου και ξεκινά η παρακολούθηση της ιστορίας ενός φωτονίου, αρχικής ενέργειας E_0 , ίσης με του φωτονίου του ισοτόπου που εξετάζεται. Η επόμενη θέση στην οποία θα βρεθεί το φωτόνιο αποφασίζεται ως εξής:

1. Επιλέγονται τυχαίες γωνίες φ και θ στο χώρο, με χρήση των οποίων υπολογίζεται το μοναδιαίο διάνυσμα της τροχιάς κίνησης.
2. Επιλέγεται τυχαία η απόσταση που θα διανύσει το φωτόνιο. Για το βήμα

αυτό απαιτείται η γνώση της μέσης ελεύθερης διαδρομής (mean free path), η οποία εξαρτάται από το είδος του υλικού, καθώς και την ενέργεια του φωτονίου σε εκείνη τη θέση.

3. Με γνωστές τις ενεργές διατομές αλληλεπίδρασης, επιλέγεται ποια αλληλεπίδραση θα συμβεί με χρήση τυχαίου αριθμού, καθώς και υπολογίζεται η τελική ενέργεια του φωτονίου αυτής της θέσης.

Χάρη στα βήματα 1-3, υπολογίζεται η θέση (x_1, y_1, z_1) και η ενέργεια E_1 του φωτονίου. Επαναλαμβάνοντας τα βήματα 1-3, προκύπτει η επόμενη θέση (x_2, y_2, z_2) και η επόμενη ενέργεια E_2 κ.ο.κ.

Για την αποφυγή σπατάλης υπολογιστικών πόρων και χρόνου, συνήθως ορίζεται μια ελάχιστη ενέργεια E_{min} . Εάν η ενέργεια προκύψει μικρότερη από την E_{min} , η ιστορία του φωτονίου τερματίζεται και θεωρείται ότι αποδίδει την ενέργειά του στο υλικό ως θερμότητα. Με παρόμοια λογική τερματίζεται η ιστορία ενός φωτονίου εάν διασχίσει τα όρια ενός όγκου ελέγχου, εντός του οποίου μόνο ο κώδικας φέρει αποτελέσματα που οδηγούν στην επίλυση του προβλήματος.

Παρόμοια βήματα με μικρές διαφορές εφαρμόζονται και για τις υπόλοιπες σωματιδιακές ακτινοβολίες. Ακόμα και στην περίπτωση ισοτόπου που εκπέμπει μοναδικό φωτόνιο, είναι σημαντικό ο κώδικας να επιτρέπει την παρακολούθηση της ιστορίας δευτερογενών ακτινοβολιών. Για την περίπτωση προσομοίωσης της απόδοσης ενός ανιχνευτή όπως σε αυτήν την Δ.Ε., αυτό σημαίνει ότι δεν αποκλείεται να ανήκουν στην ενεργειακή περιοχή που εξετάζεται για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής.

Είναι φανερό λοιπόν, ότι η δυνατότητα παρακολούθησης της ιστορίας δευτερογενών ακτινοβολιών επηρεάζει το πόσο κοντά θα είναι τα τελικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά, όπου τίθεται θέμα δόκιμης σύγκρισης αυτών μεταξύ τους. Περαιτέρω αποκλίσεις δημιουργούνται και από άλλες αδυναμίες της τεχνικής προσομοίωσης, όπως:

- Η ύπαρξη συνεχούς και διακριτού υποστρώματος, το οποίο συνήθως δε λαμβάνεται υπ' όψιν.
- Η ακρίβεια μοντελοποίησης του προβλήματος, τόσο όσον αφορά τη γεωμετρική λεπτομέρεια όσο και τη σύσταση των υλικών
- Οι αβεβαιότητες των πυρηνικών σταθερών και άλλων αριθμητικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται εσωτερικά από τον κώδικα
- Ο τρόπος δημιουργίας του σήματος μέσα στον ανιχνευτή.

2.7.1 Ο κώδικας *PENELOPE*

Ο κώδικας Monte Carlo που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης ονομάζεται *PENELOPE* (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons, Baró et al., 1995). Αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau στο πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης το 1996, με διαρκείς προσθήκες και ανανεώσεις ως και σήμερα. Στην ανάπτυξη του αρκτικόλεξου απουσιάζει η αναφορά στην δυνατότητα προσομοίωσης φωτονίων, καθώς αυτή προστέθηκε αργότερα. Το εύρος ενεργειών προσομοίωσης ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων, προερχόμενων από σημειακή πηγή, είναι 50 eV ως 1 GeV. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε μοντέλο σκέδασης, το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων, με αναλυτικά μοντέλα φυσικών μεγεθών όπως οι ενεργές διατομές κάθε προσομοιούμενης αλληλεπίδρασης.

Ο κώδικας *PENELOPE* αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτινών, οι οποίες εφαρμόζονται για την προσομοίωση των διαφόρων αλληλεπιδράσεων για ένα πρόβλημα που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα σωματίδια/φωτόνια που προέρχονται από σημειακή πηγή και διαδίδονται μέσα στην ύλη. Ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει το κυρίως πρόγραμμα που θα αποδώσει τις ζητούμενες εξόδους (μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της απόδοσης ανίχνευσης φωτοκορυφής, περικλειόμενη δόση κτλ), κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση ιστοριών φωτονίων, ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Επίσης, είναι απαραίτητη η εισαγωγή των κατάλληλων αρχείων εισόδου, ώστε να περιγραφεί η γεωμετρία του προβλήματος με τα υλικά που την απαρτίζουν, και για τις ζητούμενες ενέργειες ακτινοβολιών.

Προς διευκόλυνση του χρήστη, η έκδοση 2005 *PENELOPE* περιλαμβάνει τρία έτοιμα προγράμματα χρήστη:

- *PENSLAB*: Προσομοίωση διάδοσης β^+ , β^- και γ ακτινοβολιών από σημειακή πηγή σε επίπεδη πλάκα.
- *PENCYL*: Προσομοίωση διάδοσης β^+ , β^- και γ ακτινοβολιών από σημειακή πηγή σε αυστηρά αξονοσυμμετρικές κυλινδρικές γεωμετρίες.
- *PENMAIN*: Προσομοίωση διάδοσης β^+ , β^- και γ ακτινοβολιών από σημειακή πηγή σε γενική περίπτωση σύνθετης γεωμετρίας, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς από το χρήστη σε ξεχωριστό αρχείο εισόδου.

Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας *PENMAIN*, καθώς ήταν επιθυμητή η κατά το δυνατόν πληρέστερη περιγραφή της γεωμετρίας του ανιχνευτή και των

δοχείων. Ο χρήστης είναι δυνατόν να κάνει μετατροπές στους παραπάνω έτοιμους κώδικες, -καθώς και στις υπορουτίνες που τους συνοδεύουν όπου χρειάζεται, με σκοπό την προσαρμογή στο εκάστοτε πρόβλημα δίχως την ανάγκη δημιουργίας νέου κώδικα. Ένα παράδειγμα είναι η μετατροπή του κώδικα ώστε να προσομοιώνει πηγές όγκου, κάτι το οποίο δεν υποστηρίζεται σε κανένα από τα 3 παραπάνω προγράμματα στην έκδοση PENELOPE 2005. Στα πλαίσια αυτής της Δ.Ε., πραγματοποιήθηκαν τέτοιες μετατροπές για προσομοίωση πηγών όγκου, όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.4.

2.7.2 Αρχεία εισόδου που καλείται να δημιουργήσει ο χρήστης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την προσομοίωση του εκάστοτε προβλήματος της γ-φασματοσκοπίας μέσω του κώδικα PENELOPE, είναι απαραίτητη η είσοδος ορισμένων στοιχείων που να μοντελοποιούν το πρόβλημα, από την προσομοιούμενη γεωμετρία ως τα υλικά αυτής, τις αρχικές ενέργειες των φωτονίων της πηγής που ενδιαφέρουν, κτλ. Στις επόμενες υποπαραγράφους παρατίθενται περισσότερα στοιχεία ως προς αυτά τα αρχεία εισόδου.

2.7.2.1 Αρχείο εισόδου γεωμετρίας (επέκταση “.geo”)

Σε αυτό το αρχείο (κωδικοποίησης ASCII) περιγράφεται η γεωμετρία του προβλήματος που προσομοιώνεται. Αυτή μπορεί να είναι πολύ απλή (πχ κύλινδρος φτιαγμένος από ένα υλικό) έως πολύπλοκη (ανιχνευτής γ-φασματοσκοπίας με συνιστώσες φτιαγμένες από διαφορετικά υλικά, μοντέλο ανθρώπινου σώματος, κτλ).

Οι διάφορες γεωμετρίες όγκου περιγράφονται ως στοιχειώδη γεωμετρικά σχήματα των επιθυμητών διαστάσεων, φραγμένα από τις κατάλληλες επιφάνειες, τα οποία αποτελούνται από ομογενή υλικά. Για παράδειγμα, ένας συμπαγής κύλινδρος πεπερασμένης ακτίνας και μήκους, ορίζεται ως ένα «σώμα» (body), το οποίο αποτελείται από μια επιφάνεια κυλίνδρου ορισμένης ακτίνας και άπειρου μήκους, και δύο επίπεδα σε συγκεκριμένο ύψος στο χώρο που ορίζουν την άνω και την κάτω επιφάνεια του κυλίνδρου. Κάθε μία 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. Είναι δυνατόν ένα σώμα να μοιράζεται επιφάνειες με ένα άλλο, όταν τα 2 αυτά σώματα γειτονεύουν. Ένα πολύπλοκο αντικείμενο που στον φυσικό κόσμο αποτελεί ένα φυσικό σώμα/όγκο, είναι πιθανόν να πρέπει να διαχωριστεί σε

παραπάνω από ένα σώματα για να εισαχθεί με την επιθυμητή ακρίβεια στο αρχείο γεωμετρίας.

2.7.2.2 Αρχείο εισόδου υλικών

Με χρήση του βοηθητικού προγράμματος material.exe που συνοδεύει το πακέτο του κώδικα PENELOPE, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα στοιχείο, μια κοινή χημική ένωση, ή να εισάγει τη σύσταση και την πυκνότητα ενός υλικού που δεν περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων. Η έξοδος αυτού του προγράμματος αποτελεί ένα αρχείο που έχει την τυπική ονομασία *.mat και περιλαμβάνει τις φυσικές σταθερές που χρειάζεται ο κώδικας για να υπολογίσει τις αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών μέσα στο υλικό αυτό. Στις περιπτώσεις που η προσομοίωση περιλαμβάνει περισσότερα του ενός υλικά, είναι απαραίτητη η ενοποίηση όλων των επιμέρους αρχείων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα συνολικό αρχείο *.mat. Ο αύξων αριθμός με τον οποίο εισάγονται τα επιμέρους αρχεία *.mat στο συνολικό αρχείο αυτό, ισχύει και για το αρχείο γεωμετρίας *.geo.

2.7.2.3 Κύριο αρχείο εισόδου

Αποτελεί το κατευθυντήριο αρχείο εισόδου δεδομένων. Σε αυτό 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, σε αυτό το αρχείο, το οποίο έχει τη γενική ονομασία *.in δηλώνονται τα ονόματα του αρχείου γεωμετρίας και υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση.

2.7.3 Εικονικοί ανιχνευτές

Ορισμένα από τα μεγέθη του προβλήματος που καλείται να επιλύσει ο κώδικας, μπορεί να αναφέρονται σε συγκεκριμένη υποπεριοχή του συνολικού όγκου μέσα στα όρια του οποίου προσομοιώνονται οι αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ύλη. Για αυτό το σκοπό, το πρόγραμμα PENMAIN περιέχει τρία είδη εικονικών ανιχνευτών, οι οποίοι ορίζονται στο γενικό αρχείο εισόδου. Κάθε εικονικός ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σώμα (body) ή όγκο της συνολικής γεωμετρίας, για το οποίο καταγράφει τις διάφορες τιμές των μεγεθών σε ένα διακριτό αρχείο εξόδου.

- Ανιχνευτής αλληλεπιδράσεων (Impact Detector): Κάθε ανιχνευτής αλληλεπίδρασης που δηλώνεται, έχει όγκο που ταυτίζεται με ένα συγκεκριμένο σώμα της γεωμετρίας. Ο ορισμός του γίνεται με χρήση του αύξοντα αριθμού που αντιστοιχεί στο σώμα, όπως έχει δοθεί στο αρχείο γεωμετρίας *.geo. Το αρχείο εξόδου ενός ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, περιέχει τις ενέργειες εισόδου σωματιδίων και φωτονίων στον όγκο του ανιχνευτή, αποτελώντας ουσιαστικά ένα ενεργειακό φάσμα.

- Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (Energy Deposition Detector): Οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας ορίζονται όμοια με τους ανιχνευτές αλληλεπιδράσεων, ως συγκεκριμένα σώματα της γεωμετρίας. Η διαφορά έγκειται στο ότι σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται η αποτιθέμενη ενέργεια στον ορισμένο όγκο. Η έξοδος του ανιχνευτή αποτελεί αρχείο που περιέχει το ενεργειακό φάσμα της απορροφώμενης ακτινοβολίας.

- Ανιχνευτής περικλειόμενης δόσης (Dose enclosure): Οι ανιχνευτές δόσης ορίζονται ως ένα πλέγμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου σχήματος, επομένως δεν ταυτίζονται απαραίτητα με σώμα της γεωμετρίας, όπως οι προηγούμενοι ανιχνευτές που αναφέρθηκαν. Η έξοδος του ανιχνευτή δόσης περιέχει την συνολική δόση που καταγράφηκε λόγω των σωματιδιακών/φωτονιακών αλληλεπιδράσεων με την ύλη, όπως επίσης την κατανομή αυτής εντός του ορισμένου πλέγματος.

2.7.4 Τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN που χρησιμοποιήθηκαν

Ο κώδικας PENMAIN στην τυπική του μορφή δημιουργεί μία σειρά από αρχεία εξόδου που περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Επιπρόσθετα αρχεία εξόδου προκύπτουν όταν δηλώνονται εικονικοί ανιχνευτές. Παρακάτω αναλύονται δύο από τα αρχεία εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της Δ.Ε.

2.7.4.1 Το αρχείο εξόδου “penmain.dat”

Σε αυτό το αρχείο καταγράφονται βασικές παράμετροι της προσομοίωσης, όπως ορίστηκαν από τον χρήστη το γενικό αρχείο εισόδου *.in, όπως επίσης και κάποια αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το αρχείο αυτό ανανεώνεται με νέες πληροφορίες ανάλογα με το χρονικό βήμα (dump time) που έχει οριστεί στο αρχείο *.in. Οι πληροφορίες που καταγράφονται στον αρχείο penmain.dat περιλαμβάνουν :

- την ημερομηνία και ώρα διεξαγωγής της προσομοίωσης,
- τον τίτλο της εργασίας,
- την περιγραφή της πηγής,

- παραμέτρους των υλικών της κατασκευής,
- την ονομασία του αρχείου εισόδου γεωμετρίας *.geo,
- το μέγιστο μήκος βήματος για κάθε σώμα,
- χαρακτηριστικά των διαφόρων ανιχνευτών που ορίζονται,
- τις ονομασίες των αρχείων dump,
- το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (dump time) στο οποίο ανανεώνονται τα αρχεία εξόδου,
- τον αριθμό των προσομοιούμενων ιστοριών σωματιδίων/φωτονίων, και
- τον επιθυμητό χρόνο διάρκειας της προσομοίωσης.

Τα δεδομένα της προσομοίωσης που περιέχονται στο τμήμα των αποτελεσμάτων του penmain.dat περιλαμβάνουν:

- τη συνολική χρονική διάρκεια και ταχύτητα της προσομοίωσης (ιστορίες/δευτερόλεπτο),
- το συνολικό αριθμό των πρωτογενών σωματιδίων που εξήλθαν από την κατασκευή, οπισθοσκεδάστηκαν, και απορροφήθηκαν,
- το κλάσμα των πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων που εκπέμφθηκαν, οπισθοσκεδάστηκαν, και απορροφήθηκαν, προς τον συνολικό αριθμό ιστοριών που δημιουργήθηκαν κατά την προσομοίωση,
- τις πιθανότητες εκπομπής, οπισθοσκέδασης και απορρόφησης δευτερογενών σωματιδίων και φωτονίων που προέκυψαν κατά την προσομοίωση, και τέλος
- τη μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας σε κάθε σώμα της κατασκευής.

2.7.4.2 Το αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_#.dat

Το αρχείο αυτό αποτελεί την έξοδο ενός ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, και περιλαμβάνει την κατανομή της αποτιθέμενης ενέργειας ενός ανιχνευτή και μόνο. Το σύμβολο “#” αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του ανιχνευτή. Μπορούν να δηλωθούν μέχρι και 5 εικονικοί ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας με τα αντίστοιχα αρχεία εξόδου τους. Το αρχείο περιλαμβάνει τρεις στήλες. Η πρώτη στήλη περιέχει τις ενέργειες (eV) που εναποτέθηκαν στον ανιχνευτή από σωματιδιακές και φωτονιακές ακτινοβολίες. Το εύρος των ενεργειών και το βήμα αυτών, ορίζεται από τον χρήστη στο αρχείο εισόδου *.in. Η δεύτερη στήλη περιλαμβάνει την πυκνότητα πιθανότητας ($1/(eV \cdot \text{σωματίδιο})$) ένα σωματίδιο/φωτόνιο να αποθέσει στον ανιχνευτή την ενέργεια που αναγράφεται στην αντίστοιχη σειρά της πρώτης στήλης. Στην τρίτη στήλη αναγράφεται η αντίστοιχη αβεβαιότητα της πυκνότητας πιθανότητας της 2^{15} στήλης σε επίπεδο 3σ .

2.8 *Ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Δ.Ε.*

Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ: Ο ανιχνευτής ευρείας περιοχής XtRa (EXtended Range) και ο ανιχνευτής χαμηλών ενεργειών τύπου LEGE (Low Energy Germanium). Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά στοιχεία αυτών των ανιχνευτικών διατάξεων. Τα πιστοποιητικά του κατασκευαστή για τους δύο ανιχνευτές παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Extended Range, Xtra

Ανιχνευτής γερμανίου που τέθηκε σε λειτουργία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ το 1999. Η διάταξη ανιχνευτική διάταξη αποτελείται από τις παρακάτω συνιστώσες:

- Ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου εκτεταμένου εύρους (XtRa) της Canberra Industries (CI)
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της CI
- Προενισχυτής τύπου 2002CSL της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2025 της CI
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8701 της CI
- Πολυκαναλικός ενισχυτής, AIM-550 της CI
- Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN₂), τύπου 1786 της CI
- Θωράκιση, τύπου 767 της CI

Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή είναι:

- Ενεργός διάμετρος 80 mm
- Ύψος 78 mm
- Απόσταση κρυστάλλου-παραθύρου κρυοστάτη 5 mm
- Παράθυρο κρυοστάτη από ανθρακονήματα πάχους 0.5 mm
- Σχετική απόδοση 104%
- Λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 82.2:1

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών κρυστάλλου και παραθύρου κρυοστάτη, ο ανιχνευτής παρουσιάζει υψηλή απόδοση σε μεγάλο ενεργειακό εύρος. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε εύρος ημίσειας ύψους (FWHM) δίνεται στο πιστοποιητικό του κατασκευαστή:

- FWHM=1.03 keV για φωτόνια 122.06 keV (⁵⁷Co)

- FWHM=2.043 keV για φωτόνια 1332.5 keV (^{60}Co)

Το 2011 η ανιχνευτική διάταξη XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ αναβαθμίστηκε με την εγκατάσταση σε αυτήν συστήματος Compton Suppression, το οποίο αποτελείται από ανιχνευτή NaI(Tl) εσωτερικής διαμέτρου 195 mm και ύψους 267 mm (Savva et al. 2013). Το σύστημα Compton Suppression χρησιμοποιείται με σκοπό τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος. Η διάταξη έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης συλλογής φασμάτων με και χωρίς τη χρήση του συστήματος Compton Suppression.

Low Energy Germanium, LEGe

Ανιχνευτής γερμανίου που τέθηκε σε λειτουργία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ το 1988. Η διάταξη είναι βαθμονομημένη ώστε να λειτουργεί σε δύο ενεργειακές περιοχές φωτονίων (20-200 keV και 20-2000 keV), ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε ανάλυσης δείγματος. Στην παρούσα Δ.Ε. ο ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά με ενεργειακή βαθμονόμηση 0-2000 keV. Η ανιχνευτική διάταξη αποτελείται από:

- Επίπεδο ανιχνευτή γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe), τύπου GL2020-7500 της Canberra Industries (CI)
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI
- Προενισχυτής τύπου 2001CP της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8075 της CI
- Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI
- Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN_2), τύπου 1786A της CI
- Κατακόρυφος κρυοστάτης τύπου 7500 της CI
- Ατσάλινη θωράκιση ανιχνευτή, κατάλληλα σχεδιασμένη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη βελτίωση του υποστρώματος, εσωτερικής επένδυσης από κάδμιο και χαλκό

Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή LEGe είναι:

- Επίπεδος ανιχνευτής τύπου n-core
- Ενεργός διάμετρος 50.5 mm
- Επιφάνεια 2000 mm²
- Πάχος 20 mm
- Απόσταση κρυστάλλου-παραθύρου κρυοστάτη 5 mm

- Παράθυρο κρυστάτη από βηρύλλιο (Be) πάχους 0.5 mm
- Συνιστώμενη τάση λειτουργίας 2000V

Οι μικρές διαστάσεις του ανιχνευτή βελτιώνουν τη διακριτική του ικανότητα. Επίσης, το μικρό πάχος του παραθύρου του κρυστάτη καθώς και ο υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο, οδηγούν σε μικρή εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών (<200 keV), καθιστώντας δυνατή την ανίχνευσή τους. Ωστόσο, λόγω του μικρού πάχους και της ύπαρξης κενού, το παράθυρο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο. Στα πλαίσια της ΔΔ (Αναγνωστάκης, 1998) σχεδιάστηκε και τοποθετήθηκε κατάλληλη βάση από plexiglass πάνω στην οποία τοποθετούνται τα δείγματα, με σκοπό την προστασία του παραθύρου. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε εύρος ημίσειας ύψους (FWHM) δίνεται στο πιστοποιητικό του κατασκευαστή:

- FWHM=0.341 keV για φωτόνια 5.9 keV (^{55}Fe)
- FWHM=0.530 keV για φωτόνια 122 keV (^{57}Co)

2.9 Απόδοση γ-φασματοσκοπικών ανιχνευτών

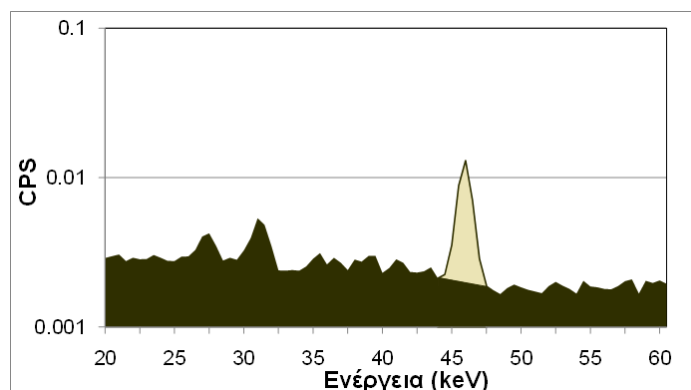
Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας, από όποιο υλικό και αν αυτός αποτελείται. Αποτελεί οδηγό της καταλληλότητάς του για τη μέτρηση του εκάστοτε δείγματος. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί αποδόσεων, όπως: η απόδοση φωτοκορυφής, η ολική απόδοση, η εσωτερική απόδοση, καθώς και η σχετική απόδοση του ανιχνευτή. Καθεμιά από τις παραπάνω αποδόσεις εξαρτάται από την ενέργεια του προς μελέτη φωτονίου, τον τρόπο που έχει συγκροτηθεί η διάταξη, και τη γεωμετρία του δείγματος.

Στα πλαίσια της παρούσης Δ.Ε. εξετάστηκαν 10 διαφορετικές γεωμετρίες ως προς την απόδοση φωτοκορυφής τους (βλ παράγραφο 3.1). Επομένως, για την ενέργεια των 46.52 keV των φωτονίων του ^{210}Pb έπρεπε να υπολογιστούν πειραματικά 10 διαφορετικές τιμές της απόδοσης για κάθε ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε και να συγκριθούν αυτές μεταξύ τους. Εκτός από τον πειραματικό προσδιορισμό, η απόδοση εκτιμήθηκε και με τον κώδικα προσομοίωσης PENELOPE.

2.9.1 Ορισμός απόδοσης φωτοκορυφής

Ένα φωτόνιο το οποίο εξέρχεται από το δείγμα, μπορεί να εναποθέσει στον ανιχνευτή ολόκληρη την αρχική ενέργειά του, ένα μέρος αυτής, ή να μην αλληλεπιδράσει καθόλου. Η απόδοση φωτοκορυφής (peak efficiency), εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων που αφήνουν όλη τους την ενέργεια στον ανιχνευτή, σε σχέση το σύνολο των εκπεμπόμενων από το δείγμα. Αποτελεί απαραίτητο μέγεθος

για τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός ισότοπου, σε τυπικές γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, όπου η ραδιενέργεια του δείγματος στο εξεταζόμενο ισότοπο δεν είναι γνωστή.



Σχήμα 2-7: Φωτοκορυφή του ^{210}Pb σε τυπικό γ-φάσμα.

2.9.2 Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής

Για να γίνει ο πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής (peak efficiency) για μία ορισμένη γεωμετρία δείγματος και ενέργεια φωτονίου, απαιτείται η πλήρωση της γεωμετρίας αυτής με γ-ραδιενεργό πηγή, γνωστής ραδιενέργειας, που να εκπέμπει φωτόνια στην υπόψη ενέργεια. Συγκεκριμένα, κατά τη βαθμονόμηση μιας γεωμετρίας χρησιμοποιείται πρότυπη ραδιενεργή πηγή, η ακριβής σύσταση της οποίας, καθώς και οι ραδιενέργεια των ισότοπων που περιέχει δίνονται από τον κατασκευαστή της πηγής. Η σχέση μέσω της οποίας ορίζεται η απόδοσης φωτοκορυφής είναι:

$$eff_{peak} = \frac{cps_{net}}{gps} \quad (2-8)$$

όπου:

eff_{peak} : η απόδοση φωτοκορυφής (peak efficiency),

cps_{net} : ο καθαρός ρυθμός καταμέτρησης των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπονται από το δείγμα, σε counts per second ή cps,

gps : ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων από την ραδιενεργό πηγή (gammas per second).

Ο ρυθμός εκπεμπόμενων φωτονίων (gps) ορίζεται ως:

$$gps = R' \cdot m \cdot yield \quad (2-9)$$

όπου:

- R'***: η ειδική ραδιενέργεια της πηγής σε (Bq/kg),
m: η καθαρή μάζα του δείγματος σε kg,
yield: το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της υπόψη ενέργειας, το οποίο είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ή βάση δεδομένων (Bé et al. 2004).

Εν γένει, ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων (cps) ορίζεται ως εξής:

$$cps = \frac{Area}{t} \quad (2-10)$$

όπου:

- Area***: η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής του φάσματος, η οποία εκφράζει το συνολικό πλήθος των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας που ανιχνεύθηκαν κατά τη διάρκεια του χρόνου μέτρησης,
t: ο χρόνος μέτρησης του δείγματος από τον ανιχνευτή.

Ο καθαρός ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων ορίζεται ως:

$$cps_{net} = cps_{Sample Total} - cps_{brnd} \quad (2-11)$$

Τα μεγέθη που εμφανίζονται στην παραπάνω σχέση ορίζονται ως εξής:

- cps_{Sample Total}***: ο συνολικός ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας, όπου περιλαμβάνονται τόσο τα φωτόνια του δείγματος, όσο και του υποστρώματος και δίνεται από τη σχέση:

$$cps_{Sample Total} = \frac{Area_{Sample Total}}{t_{Sample Total}} \quad (2-12)$$

όπου:

$Area_{Sample Total}$: το πλήθος φωτονίων (επιφάνεια φωτοκορυφής) που ανιχνεύθηκαν κατά τη μέτρηση του δείγματος στο οποίο περιλαμβάνονται τόσο τα φωτόνια του δείγματος όσο και του υποστρώματος.

$t_{Sample Total}$: ο χρόνος μέτρησης δείγματος.

cps_{brnd} : ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων μόνο του υποστρώματος (cps), ο οποίος προκύπτει από φάσμα που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή, δίχως να έχει τοποθετηθεί δείγμα στην ανιχνευτική διάταξη. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση, δημιουργείται μια φωτοκορυφή που προέρχεται από πυρήνες που βρίσκονται τόσο στο περιβάλλον, όσο και στη θωράκιση του ανιχνευτή. Το υπόστρωμα θεωρείται ότι δεν κυμαίνεται τόσο που να χρειάζεται νέα μέτρηση πριν μετρηθεί ένα νέο δείγμα ή μια νέα σειρά δειγμάτων. Επομένως, χρησιμοποιήθηκαν τιμές που είχαν προκύψει από ήδη μετρημένα παλαιότερα φάσματα, για κάθε ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Ισούται με:

$$cps_{brnd} = \frac{Area_{brnd}}{t_{brnd}} \quad (2-13)$$

όπου:

$Area_{brnd}$: η επιφάνεια φωτοκορυφής (πλήθος φωτονίων ή counts) κατά τη μέτρηση του υποστρώματος

t_{brnd} : ο χρόνος μέτρησης φάσματος υποστρώματος.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, προκύπτει η σχέση πειραματικού υπολογισμού απόδοσης που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μια από τις υπό εξέταση γεωμετρίες:

$$eff_{peak} = \frac{cps_{Sample Total} - cps_{brnd}}{R' \cdot m \cdot yield} \quad (2-14)$$

Οι επιφάνειες φωτοκορυφής δείγματος, υποστρώματος, οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, καθώς και οι χρόνοι μέτρησης που αναφέρονται παραπάνω, παρέχονται από τον κώδικα επεξεργασίας γ-φασμάτων SPUNAL που χρησιμοποιείται στο ΕΜΠ. Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης, η ειδική ραδιενέργεια της πηγής βαθμονόμησης θα πρέπει να είναι γνωστή. Η καθαρή μάζα κάθε δείγματος προκύπτει από ζύγιση που πραγματοποιείται κατά την πλήρωση των δοχείων με το υλικό

δείγματος γνωστής ειδικής ραδιενέργειας. Το ποσοστό εκπομπής (yield) βρίσκεται από βιβλιογραφία/βάσεις δεδομένων. Τα σφάλματα των εμπλεκόμενων μεγεθών είναι είτε γνωστά είτε είναι δυνατός ο υπολογισμός τους και χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το συνολικό σφάλμα της απόδοσης φωτοκορυφής, όπως αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

2.9.3 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με τον κώδικα *PENELOPE*

Μια από τις γ-φασματοσκοπικές εφαρμογές της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος *PENELOPE*, είναι η εύρεση της απόδοσης φωτοκορυφής ενός ανιχνευτή. Η μέθοδος αυτή ακολουθείται σε περιπτώσεις συγκριτικών μελετών όπως αυτή, ή/και περιπτώσεων που δεν είναι δυνατή η πειραματική βαθμονόμηση μίας διάταξης.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.7.4, ο κώδικας *PENMAIN* έχει τη δυνατότητα δήλωσης εικονικών ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας, με συνακόλουθη καταγραφή των αποτελεσμάτων στο/α αρχεία εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*. Ως εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, δηλώνεται το σώμα που αντιστοιχεί στον κρύσταλλο του ανιχνευτή της πραγματικής πειραματικής διάταξης, όπως έχει εισαχθεί στο αρχείο γεωμετρίας και με το κατάλληλο υλικό (στη συγκεκριμένη περίπτωση Ge). Οι σχέσεις που υπολογίζουν την απόδοση φωτοκορυφής για μια ορισμένη ενέργεια, καθώς και την αντίστοιχη σχετική αβεβαιότητα είναι οι παρακάτω:

$$eff(E_i) = p(E_i) \cdot bin_width \quad (2-15)$$

$$unc_{eff}(\%, 1\sigma) = \frac{100}{3} \cdot \frac{\sigma_p(E_i)}{p(E_i)} \quad (2-16)$$

όπου:

$p(E_i)$: η πυκνότητα πιθανότητας, ένα σωματίδιο/φωτόνιο να αποθέσει στον ανιχνευτή την ενέργεια E_i , σε μονάδες $(1/(eV \cdot \text{σωματίδιο}))$. Αποτελεί στοιχείο της σειράς της 2^{n5} στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*.

$\sigma_p(E_i)$: η απόλυτη αβεβαιότητα της πυκνότητας πιθανότητας $p(E_i)$, σε επίπεδο 3σ . Αποτελεί στοιχείο της σειράς της 3^{n5} στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*.

bin_width: το εύρος της ενεργειακής διαμέρισης (eV), όπως προκύπτει εμμέσως από το ενεργειακό παράθυρο και το πλήθος των καναλιών του εικονικού ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας στο αρχείο εισόδου *.in.

Στη Δ.Ε. (Βασιλοπούλου, 2008), μελετήθηκε η επίδραση του εύρους της ενεργειακής διαμέρισης στον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και προτείνεται – σε περίπτωση όπου αυτό είναι μικρό – να λαμβάνονται υπ’ όψιν στον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής πρόσθετα κανάλια, με ενέργεια μικρότερη από το κανάλι που περιλαμβάνει την ενέργεια που ενδιαφέρει. Η φωτοκορυφή που προκύπτει από την ανάλυση δείγματος σε πραγματικό ανιχνευτή, παρουσιάζει κεντροειδές, γύρω από το οποίο σχηματίζεται η φωτοκορυφή, με το τελικό πλάτος αυτής να ορίζεται από το εύρος ημίσειας ύψους φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη ενέργεια/κανάλι. Στην περίπτωση της προσομοίωσης, ενδιαφέρει το αριστερό τμήμα της φωτοκορυφής, καθώς περιλαμβάνει φωτόνια της πηγής τα οποία έχουν ελαφρώς μειωμένη ενέργεια λόγω προηγούμενης αλληλεπίδρασης. Κατ’ αναλογία με το πλήθος των καναλιών που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή αριθμητικού αποτελέσματος της επιφάνειας φωτοκορυφής, ορίζεται το πλήθος των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής. Η διαφορά είναι ότι τα κανάλια που συμμετέχουν στον υπολογισμό αντιστοιχούν μόνο σε μικρότερες ενέργειες της «ονομαστικής», επομένως σε όρους πραγματικού πειραματικού φάσματος αυτό σημαίνει ότι λαμβάνεται υπ’ όψιν μόνο το αριστερά τμήμα της φωτοκορυφής. Η σχέση υπολογισμού του αριθμού των καναλιών που χρησιμοποιούνται στον τελικό υπολογισμό είναι η (2-17):

$$n_{eff(E_i)} = \frac{1.5 \cdot FWHM(E_i)}{bin_width} \quad (2-17)$$

$$FWHM(keV) = a_1 \cdot FWHM(ch) \quad (2-18)$$

όπου:

FWHM(E_i): το εύρος ημίσειας ύψους για την ενέργεια E_i, δοσμένο σε eV

FWHM(ch): το εύρος ημίσειας ύψους για το κανάλι που αντιστοιχεί στην ενέργεια E_i, δοσμένο σε πλήθος καναλιών.

a₁: ο παράγοντας που πολλαπλασιάζει τον πρωτοβάθμιο όρο της ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Οι σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής και του σχετικού της σφάλματος (1σ) μέσω προσομοίωσης, τότε γράφονται ως εξής:

$$eff(E_i) = \sum_{i=1}^{i=n} p(E_i) \cdot bin_width \quad (2-19)$$

$$unc_{eff}(\%, 1\sigma) = \frac{100}{3} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_p(E_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} p(E_i)^2}} \quad (2-20)$$

Στα πλαίσια της Δ.Ε., ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής και της αντίστοιχης αβεβαιότητας για κάθε γεωμετρία πηγής ανιχνευτή έγιναν σε φύλλο excel. Η σχετική αβεβαιότητα κυμαίνεται περί το 1%. Επειδή δεν υπάρχει άμεσος τρόπος στον κώδικα PENMAIN να τερματίζεται κάποια προσομοίωση ακριβώς σε αβεβαιότητα 1% και επειδή το πόσο γρήγορα επιτυγχάνεται αυτή η στατιστική εξαρτάται από τον συνδυασμό γεωμετρίας/υλικού, έπρεπε να υπάρχει διαρκής έλεγχος των αρχείων εξόδου και υπολογισμός της αβεβαιότητας μετά από κάθε ανανέωσή τους, η οποία συμβαίνει ανά χρονικό βήμα ίσο με το dump time που ορίστηκε στο αρχείο *.in. Έπειτα από μερικές δοκιμές, κρίθηκε ως επαρκώς μικρό βήμα dump 5 λεπτών για τις περισσότερες γεωμετρίες.

Η συνολική αβεβαιότητα της προσομοίωσης, ωστόσο, είναι μεγαλύτερη, καθώς δεν λαμβάνονται υπ' όψιν τα συστηματικά σφάλματα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοχείων δείγματος, της πηγής εντός του δοχείου, ανιχνευτών, καθώς και φυσικών σταθερών του κώδικα PENELOPE, όπως πχ ενεργές διατομές, διότι είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Στην Δ.Ε. (Σάββα 2009) εκτιμήθηκε ότι μια ικανοποιητική τιμή της συστηματικής αβεβαιότητας είναι ~2%.

2.9.4 Αβεβαιότητα πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής

Η συνολική σχετική αβεβαιότητα απόδοσης φωτοκορυφής, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$unc_{eff} = \sqrt{unc_{cps\ net}^2 + unc_{s_act}^2 + unc_{scale}^2} \quad (2-21)$$

όπου:

- $unc_{cps\ net}$: η σχετική αβεβαιότητα καθαρού ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων.
 unc_{scale} : η σχετική αβεβαιότητα ζύγισης.
 unc_{s_act} : η σχετική αβεβαιότητα ειδικής ραδιενέργειας του δείγματος.

Ο τρόπος υπολογισμού των επιμέρους αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην παραπάνω σχέση παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

2.9.5 Αβεβαιότητα καθαρού ρυθμού καταμέτρησης

Απόλυτη αβεβαιότητα καθαρού ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων 46.52 keV:

$$\sigma_{cps_{net}} = \sqrt{\sigma_{cps_{Sample\ Total}}^2 + \sigma_{cps_{brnd}}^2} \quad (2-22)$$

όπου:

- $\sigma_{cps\ Sample\ Total}$: η απόλυτη αβεβαιότητα του συνολικού ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων που μετρήθηκαν κατά την ανάλυση του δείγματος (φωτόνια δείγματος και φωτόνια υποστρώματος).
 $\sigma_{cps\ brnd}$: η απόλυτη αβεβαιότητα ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων του φάσματος υποστρώματος.

2.9.6 Αβεβαιότητα ζύγισης

Το σύνολο των δειγμάτων ζυγίστηκε με τη βοήθεια αναλογικού ζυγού. Σε περιπτώσεις όπου αυτό ήταν εφικτό, τα δείγματα ζυγίστηκαν και σε ψηφιακό ζυγό μεγαλύτερης ακριβείας. Η αβεβαιότητα της ζύγισης γενικά δεν αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής (ενδεικτικά αναφέρεται πως η αβεβαιότητα του αναλογικού ζυγού που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.029gr σε επίπεδο 1σ), ωστόσο για λόγους πληρότητας λαμβάνεται υπόψιν. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πως υπολογίστηκε δίνονται στο Παράρτημα Γ.

2.9.7 Αβεβαιότητα ειδικής ραδιενέργειας

Κατά την ανάλυση ενός δείγματος και τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας του, η συνολική σχετική αβεβαιότητα της ειδικής ραδιενέργειας δίνεται από τη σχέση (Παλαμάρα 2010):

$$unc_{s_act} = \sqrt{unc_R^2 + unc_f^2 + unc_{sr}^2 + unc_a^2} \quad (2-23)$$

όπου:

- unc_R***: η σχετική αβεβαιότητα προσδιορισμού επιφάνειας φωτοκορυφής.
- unc_f***: η σχετική αβεβαιότητα λόγω προσαρμογής της συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι έχει την τιμή 4.3% για τον ανιχνευτή XtRa και γεωμετρία 2 (Καρφόπουλος, 2012).
- unc_{sr}***: η σχετική αβεβαιότητα λόγω του προτύπου αναφοράς, η οποία δίνεται ίση με 3.1% για τα ισότοπα χαμηλών ενεργειών (²¹⁰Pb και ²³⁴Th).
- unc_a***: η σχετική αβεβαιότητα λόγω αυταπορρόφησης, η οποία έχει εκτιμηθεί προσεγγιστικά ίση με 1%. Εφαρμόζεται μόνο στα ισότοπα χαμηλών ενεργειών (²¹⁰Pb και ²³⁴Th).

Ο ²¹⁰Pb αποτελεί ισότοπο χαμηλής ενέργειας, στην ενεργειακή περιοχή του οποίου παρατηρείται αυξημένο υπόστρωμα, με όποιες δυσκολίες ανάλυσης αυτό συνεπάγεται. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να ληφθεί υπ' όψιν και η αβεβαιότητα της επιφάνειας του υποστρώματος στον υπολογισμό της αβεβαιότητας της επιφάνειας φωτοκορυφής. Για τον προσδιορισμό της επιφάνειας του υποστρώματος του δείγματος, χρησιμοποιείται η επιφάνεια του υποστρώματος από ένα φάσμα υποστρώματος. Η σχέση που τα συνδέει είναι η εξής:

$$B_{sample} = \frac{t_{sample}}{t_{brnd}} \cdot B_{brnd} \quad (2-24)$$

όπου:

- B_{brnd}***: η επιφάνεια του υποστρώματος στο φάσμα υποστρώματος.
- t_{sample}***: ο χρόνος μέτρησης φάσματος δείγματος.
- t_{brnd}***: ο χρόνος μέτρησης φάσματος υποστρώματος.

Η αντίστοιχη απόλυτη αβεβαιότητα του υποστρώματος του δείγματος, θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\sigma_{B_{sample}} = \frac{t_{sample}}{t_{brnd}} \cdot \sigma_{B_{brnd}} \quad (2-25)$$

όπου:

σ_B : η απόλυτη αβεβαιότητα της επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{210}Pb στο φάσμα του υποστρώματος.

Η σχετική αβεβαιότητα του υποστρώματος του δείγματος τότε υπολογίζεται ως εξής:

$$unc_{B_{sample}} = \frac{t_{sample}}{t_{brnd}} \cdot \frac{B_{brnd}}{B_{sample}} \cdot unc_{B_{brnd}} \quad (2-26)$$

όπου:

$unc_{B_{brnd}}$: η σχετική αβεβαιότητα της επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{210}Pb στο φάσμα του υποστρώματος.

Η σχετική αβεβαιότητα του προσδιορισμού επιφάνειας φωτοκορυφής υπολογίζεται τότε από τη σχέση (2-27). Ο κώδικας SPUNAL υπολογίζει τις αβεβαιότητες της επιφάνειας φωτοκορυφών σε επίπεδο 1.65σ. Ωστόσο τα αποτελέσματα της εργασίας παρατίθεται σε επίπεδο 1σ, επομένως είναι κάτι που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τη χρήση της σχέσης (2-27):

$$unc_R = \frac{\sqrt{(unc_{Sample\ Total} (\%) \cdot Area_{Sample\ Total})^2 + (unc_{B_{sample}} (\%) \cdot B_{sample})^2}}{100 \cdot (Area_{Sample\ Total} - B_{sample})} \quad (2-27)$$

2.10 Ελάχιστη μετρήσιμη ραδιενέργεια ενός δείγματος

Οι μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος περιλαμβάνουν την ανίχνευση ισοτόπων πολύ χαμηλής συγκέντρωσης, μεγάλων αβεβαιοτήτων με συνέπεια τη δυσκολία διάκρισής τους από το υπόστρωμα (Καρφόπουλος, 2012). Υπάρχει συνεπώς ανάγκη στατιστικού ελέγχου που να υπολογίζει την ελάχιστη τιμή ραδιενέργειας που μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά σημαντικά διαφορετική, για ορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Ελέγχεται ουσιαστικά η μηδενική υπόθεση:

H_0 : το εξεταζόμενο δείγμα δεν περιέχει πυρήνες του ισοτόπου προς ανίχνευση.

H_1 : το εξεταζόμενο δείγμα περιέχει πυρήνες του ισοτόπου προς ανίχνευση.

Οι 2 τύποι σφάλματος που συνοδεύουν τον στατιστικό έλεγχο αυτό για δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης είναι:

- Σφάλμα τύπου I, που αντιστοιχεί στην εσφαλμένη απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης, με πιθανότητα εμφάνισης α .
- Σφάλμα τύπου II, που αντιστοιχεί στην εσφαλμένη αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης, με πιθανότητα εμφάνισης β .

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στον στατιστικό έλεγχο που περιγράφεται παραπάνω, είναι το Κρίσιμο Όριο (Critical Limit- L_c), το Όριο Ανίχνευσης (Detection Limit- L_d) καθώς και η Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια (Minimum Detectable activity-MDA), όπως εισήχθησαν και αναλύθηκαν στις εργασίες (Currie, 1968) και (Gilmore and Hemingway, 1995). Τα παραπάνω μεγέθη που ποσοτικοποιήθηκαν από τον στατιστικό έλεγχο, μπορούν να χρησιμεύσουν στη σύγκριση ανιχνευτικών διατάξεων και τεχνικών. Στην περίπτωση της παρούσας Δ.Ε. ενδιαφέρει ειδικά η Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια, ως μια από τις παραμέτρους σύγκρισης των διαφόρων γεωμετριών δείγματος που δοκιμάζονται στα πλαίσια της Δ.Ε. Παρακάτω εισάγονται τα μεγέθη που αναφέρθηκαν και ο τρόπος υπολογισμού τους.

2.10.1 Κρίσιμο Όριο L_c (Critical Limit)

Η ανίχνευση της ραδιενέργειας ενός γ -ραδιενεργού ισότοπου σε ένα δείγμα πραγματοποιείται με τη μελέτη της αντίστοιχης φωτοκορυφής σε κατάλληλο φάσμα. Το φάσμα αυτό έχει στον άξονα των τετμημένων την ενέργεια, και στον άξονα των τεταγμένων το πλήθος των καταγεγραμμένων φωτονίων, ή το ρυθμό καταγραφής αυτών. Η αυξημένη καταγραφή φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή του φάσματος που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο φωτόνιο μπορεί να αποτελεί κύμανση του συνεχούς υποστρώματος, ή να προέρχεται όντως από φωτόνια τη υπόψη ενέργειας που καταγράφηκαν στον ανιχνευτή.

Το Κρίσιμο όριο L_c αποτελεί το κάτω όριο, μετρούμενο σε καταγεγραμμένα γεγονότα («καθαρή» επιφάνεια), για το οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική φωτοκορυφή. Επειδή το ζητούμενο είναι ο διαχωρισμός της φωτοκορυφής από το υπόστρωμα, οι σχέσεις υπολογισμού του L_c περιλαμβάνουν την επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος, όπως αυτή λαμβάνεται μετά τη λήψη του φάσματος (*a posteriori*), τον αριθμό των καναλιών της φωτοκορυφής και του συνεχούς υποστρώματος, καθώς και έναν συντελεστή που εξαρτάται από το επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Θεωρώντας ότι έχουν πραγματοποιηθεί πολλαπλές

αναλύσεις υποστρώματος – δηλαδή ενός δείγματος μηδενικής ραδιενέργειας – σχηματίζεται κανονική κατανομή του μεγέθους της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής η οποία έχει μέση τιμή ίση με 0 και τυπική απόκλιση σ_0 . Ο αριθμός των καταγραφόμενων φωτονίων υπέρ του μηδενός, για τα οποία μια ανάλυση δείγματος αποφαίνεται την ύπαρξη του ισοτόπου στο δείγμα δίνεται από τη σχέση (2-28), με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση σ_0 να δίνεται από τη σχέση (2-29).

$$L_c = k_a \cdot \sigma_0 \quad (2-28)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{B \cdot (1 + n/(2m))} \quad (2-29)$$

όπου:

- L_c :** το κρίσιμο όριο (Critical Limit) μετρούμενο σε πλήθος καταμετρημένων φωτονίων,
- k_a :** συντελεστής που για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισούται με 1.645,
- σ_0 :** τυπική απόκλιση της κατανομής κατά (Gilmore and Hemingway, 1995),
- B :** επιφάνεια υποστρώματος στο φάσμα του δείγματος, μετρούμενο σε πλήθος καταμετρημένων γεγονότων,
- n :** το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή στο φάσμα του δείγματος,
- m :** το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή του υποστρώματος στο φάσμα του δείγματος.

2.10.2 Όριο Ανίχνευσης (Detection limit, L_d)

Ως όριο ανίχνευσης L_d ορίζεται η κατώτερη τιμή της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής, η οποία ανιχνεύεται με βεβαιότητα σε συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Ο προσδιορισμός του ορίου ανίχνευσης θα γίνει με τη λογική των πολλών δειγματοληψιών όπως και στο κρίσιμο όριο L_c . Ωστόσο, αντί για δείγμα μηδενικής ραδιενέργειας, θεωρείται ότι το δείγμα έχει ραδιενέργεια τέτοια ώστε η καθαρή επιφάνεια να ισούται με την ελάχιστη για την οποία οριακά ανιχνεύεται από την κύμανση του υποστρώματος, δηλαδή να ισούται με το L_c . Τότε σχηματίζεται κανονική κατανομή με μέση τιμή το L_c . Αριστερά του L_c δεν ανιχνεύεται το ισότοπο στο δείγμα, κατά τον τρόπο που ορίστηκε το κρίσιμο όριο. Το δεξί τμήμα της κανονικής κατανομής περί το L_c το ισότοπο διακρίνεται από το υπόστρωμα, σε

ποσοστό 50%. Για να αυξηθεί αυτό το ποσοστό στο επίπεδο εμπιστοσύνης που ζητείται, το νέο όριο ανίχνευσης L_d θα πρέπει να βρίσκεται δεξιότερα του L_c . Θεωρώντας κανονική κατανομή περί το L_d , προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού του:

$$L_d = L_c + k_\beta \cdot \sigma_d \quad (2-30)$$

$$\sigma_d = \sqrt{L_d + \sigma_o^2} \quad (2-31)$$

όπου:

L_d : το όριο ανίχνευσης (Detection Limit) μετρούμενο σε πλήθος καταμετρημένων γεγονότων,

k_β : συντελεστής, που για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισούται με 1.645,

σ_d : τυπική απόκλιση της κατανομής του L_d κατά (Gilmore G. and Hemingway J., 1995).

Ο συνδυασμός των σχέσεων (2-30) και (2-31) οδηγεί στην τελική σχέση υπολογισμού κατά τη μεθοδολογία (Gilmore and Hemingway, 1995):

$$L_d = 2.71 + 3.29 \cdot \sigma_o \quad (2-32)$$

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας εύρεσης του L_d είναι ότι αγνοείται η συνεισφοράς του διακριτού υποστρώματος, η οποία πολλές φορές είναι σημαντικής. Ειδικότερα, για το υπό εξέταση ισότοπο του ^{210}Pb είναι γνωστό ότι περιέχεται σε ίχνη εντός της θωράκισης των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως, στο υπόστρωμα σχηματίζεται φωτοκορυφή στα 46.52 keV, η οποία δυσχεραίνει περαιτέρω την διάκριση της επιφάνειας της καθαρής φωτοκορυφής εξαιτίας του δείγματος και οδηγεί σε λανθασμένη εικόνα των ορίων ανίχνευσης και της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της Δ.Ε. για την εισαγωγή της συνιστώσας του διακριτού υποστρώματος στους υπολογισμούς εισάγεται στην εργασία (Luca, 2009). Η μέθοδος προϋποθέτει τη χρήση ενός φάσματος υποστρώματος, ώστε να ληφθεί υπ' όψιν η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής του ^{210}Pb στο φάσμα του δείγματος, η οποία εξ' ορισμού αποτελεί το διακριτό υπόστρωμα. Τότε, η σχέση που υπολογίζει το όριο ανίχνευσης γράφεται ως εξής:

$$L_d = 2k_a \sqrt{B_s \left(1 + \frac{n_s}{2m_s}\right) + A_b \frac{t_s}{t_b} \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right) + B_b \left(\frac{t_s}{t_b}\right)^2 \left(1 + \frac{n_b}{2m_b}\right)} \quad (2-33)$$

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_b :** η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής ^{210}Pb 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.

Η τιμή του L_d που υπολογίζεται από τη σχέση (2-33), είναι υψηλότερη αυτής που υπολογίζεται από τη σχέση (2-32). Αυτό την καθιστά «αυστηρότερη», καθώς για την ανίχνευση του ισοτόπου στο ίδιο επίπεδο εμπιστοσύνης, απαιτούνται περισσότερα καταγεγραμμένα φωτόνια τα οποία να προέρχονται όντως από το δείγμα, δηλαδή μεγαλύτερη καθαρή φωτοκορυφή, ώστε να διακριθεί από το συνεχές και διακριτό υπόστρωμα.

2.10.3 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (*Minimum Detectable Activity*)

Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (Minimum Detectable Activity, MDA), αποτελεί ένα μέγεθος που καταδεικνύει την ελάχιστη ποσότητα ραδιενέργειας ενός ισοτόπου εντός του δείγματος, ώστε αυτό να ανιχνεύεται για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Ουσιαστικά αποτελεί το αποτέλεσμα της μετατροπής του L_d από καταγεγραμμένα φωτόνια σε μονάδα μέτρησης ραδιενέργειας (Bq ή Bq/kg).

Στην περίπτωση της παρούσας Δ.Ε. αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα ποσοτικά κριτήρια σύγκρισης των 10 γεωμετριών. Το μέγεθος αυτό αδυνατεί να απαντήσει στο ερώτημα «πόση είναι η ελάχιστη ραδιενέργεια που μπορεί να

ανιχνευθεί», διότι υπολογίζεται μετά από τη μέτρηση (*a posteriori*) και εξαρτάται από το υλικό του δείγματος και την περιεκτικότητά του στο ραδιενεργό ισότοπο που ενδιαφέρει. Μπορεί, ωστόσο, στην περίπτωση σύγκρισης διατάξεων, γεωμετριών και μετρητικών τεχνικών, να καταδείξει σε ποια περίπτωση υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να διακριθεί από το υπόστρωμα και άρα να ανιχνευθεί η φωτοκορυφή, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρούνται σταθερές οι υπόλοιπες συνθήκες ανάλυσης (χρόνος μέτρησης, υλικό δείγματος κτλ). Η σχέση υπολογισμού του MDA είναι:

$$MDA = \frac{L_d}{t_s \cdot yield \cdot eff \cdot mass} \quad (2-34)$$

2.11 Το πρόβλημα της αυτοαπορρόφησης και ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, τα φωτόνια που προέρχονται από το δείγμα, υπόκεινται σε αυτοαπορρόφηση μέσα στο ίδιο το υλικό του δείγματος. Για μία καθορισμένη γεωμετρία δείγματος που χρησιμοποιείται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας είναι δεδομένη και έχει προσδιορισθεί πριν από την ανάλυση, πειραματικά με χρήση πρότυπης πηγής βαθμονόμησης, ή μέσω προσομοίωσης. Καθώς η γεωμετρία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δειγμάτων διαφορετικής σύστασης από την πηγή βαθμονόμησης, η απόδοση κατά την ανάλυση του δείγματος μπορεί να διαφέρει εξαιτίας του διαφορετικού βαθμού αυτοαπορρόφησης των φωτονίων, μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του δείγματος. Αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς είναι η εισαγωγή συστηματικής αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό της ραδιενέργειας του δείγματος. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη εισαγωγής διόρθωσης της απόδοσης που έχει προκύψει για την εξεταζόμενη ενέργεια κατά τη βαθμονόμηση, λαμβάνοντας υπ' όψιν το υλικό του δείγματος και την επίδραση της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης που αυτό παρουσιάζει.

Η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για μια συγκεκριμένη γεωμετρία που προκύπτει από τη βαθμονόμηση (φαινόμενη απόδοση) δεν περιλαμβάνει διόρθωση αυτοαπορρόφησης λόγω της πρότυπης πηγής και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$eff_{CS} = \frac{area_{CS}}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (2-35)$$

όπου:

- area_{CS}***: η επιφάνεια της φωτοκορυφής για τη υπόψη ενέργεια, όπως προκύπτει από το φάσμα της πηγής βαθμονόμησης (counts),
- time***: ο χρόνος συλλογής του φάσματος (second),
- yield***: το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της εξεταζόμενης ενέργειας,
- activity***: η ραδιενέργεια της πηγής βαθμονόμησης, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή της πηγής.

Εάν μέσα στον όγκο της πηγής βαθμονόμησης δεν υπήρχε καθόλου αυτοαπορρόφηση, η παραπάνω σχέση θα γραφόταν:

$$eff_{o,CS} = \frac{area_{o,CS}}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (2-36)$$

όπου:

- eff_{o,CS}***: η απόδοση φωτοκορυφής της πηγής βαθμονόμησης όταν αυτή πληρώνει τη συγκεκριμένη γεωμετρία και δεν απορροφώνται φωτόνια μέσα στο υλικό της πηγής,
- area_{o,CS}***: η επιφάνεια φωτοκορυφής για τα φωτόνια της υπόψη ενέργειας, εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση φωτονίων μέσα στην πηγή,
- time***: ο χρόνος συλλογής του φάσματος (second). Είναι ίσος με τον χρόνο συλλογής του φάσματος της πηγής που παρουσιάζει αυτοαπορρόφηση.

Ορίζεται ο συντελεστής φ , ο οποίος συνδέει την επιφάνεια της φωτοκορυφής του φάσματος της πηγής βαθμονόμησης, με την ιδεατή επιφάνεια που θα σχηματιζόταν στην περίπτωση απουσίας αυτοαπορρόφησης:

$$\varphi = \frac{area_{CS}}{area_{o,CS}} \quad (2-37)$$

Ο συντελεστής φ παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, καθώς δεν είναι δυνατόν στην περίπτωση ύπαρξης αυτοαπορρόφησης να ληφθεί μεγαλύτερη επιφάνεια φωτοκορυφής από ότι στην ιδανική περίπτωση. Η ραδιενέργεια της πηγής βαθμονόμησης είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, όπως επίσης ο χρόνος συλλογής φάσματος και το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου. Επομένως οι σχέσεις (2-36) και (2-37) μπορούν να συνδυαστούν:

$$eff_{o,CS} = \frac{eff_{CS}}{\varphi} \quad (2-38)$$

Κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος, η ραδιενέργεια του δείγματος για ένα ισότοπο που εκπέμπει φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, δίχως να ληφθεί υπ' όψιν η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων, δίνεται από τον τύπο:

$$activity_{sample} = \frac{area_{sample}}{time \cdot yield \cdot eff_{CS}} \quad (2-39)$$

όπου:

$area_{sample}$: Η επιφάνεια της φωτοκορυφής στο φάσμα του δείγματος,

$time$: Ο χρόνος συλλογής του φάσματος του δείγματος,

eff_{CS} : Η φαινόμενη απόδοση φωτοκορυφής όπως αναφέρεται παραπάνω, η οποία, προκύπτει από την ανάλυση του φάσματος πηγής βαθμονόμησης, υπό την προϋπόθεση ότι το δείγμα παρουσιάζει την ίδια αυτοαπορρόφηση με το υλικό της πηγής.

Η σχέση (2-39) εισάγει αβεβαιότητα, καθώς αμελεί το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης. Κατά τις γ -φασματοσκοπικές αναλύσεις δειγμάτων ενδιαφέρει ο υπολογισμός της πραγματικής ραδιενέργειας, η οποία προκύπτει χρησιμοποιώντας τις ιδανικές τιμές της επιφάνειας φωτοκορυφής και απόδοσης φωτοκορυφής όπως προκύπτει από την πηγή βαθμονόμησης, και ισχύουν στην ιδεατή περίπτωση όπου δεν εμφανίζεται αυτοαπορρόφηση φωτονίων στο υλικό του δείγματος.

$$activity_{o,sample} = \frac{area_{o,sample}}{time \cdot yield \cdot eff_{o,CS}} \quad (2-40)$$

όπου:

- area_{o,sample}***: Η επιφάνεια φωτοκορυφής του δείγματος εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση μέσα σε αυτό,
time: Ο χρόνος συλλογής του φάσματος δείγματος, ο οποίος ισούται με το χρόνο συλλογής φάσματος της μη ιδανικής περίπτωσης που παρουσιάζει αυτοαπορρόφηση.

Κατ' αντιστοιχία με το συντελεστή ϕ , ορίζεται και ο λόγος ω , ο οποίος συνδέει την επιφάνεια της φωτοκορυφής του δείγματος που προκύπτει από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, σε σχέση με την αντίστοιχη ιδανική επιφάνεια φωτοκορυφής στην περίπτωση απουσίας της αυτοαπορρόφησης:

$$\omega = \frac{area_{sample}}{area_{o,sample}} \quad (2-41)$$

Ομοίως η τιμή του λόγου ω παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, για τους ίδιους λόγους με το συντελεστή ϕ . Επειδή τα ιδανικά μεγέθη $area_{o,sample}$ και $eff_{o,CS}$ δεν μπορούν να υπολογιστούν ώστε να προκύψει η τελικώς ζητούμενη πραγματική ραδιενέργεια, αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2-37), (2-41) στην (2-40) και προκύπτει:

$$activity_{o,sample} = \frac{\frac{area_{sample}}{\omega}}{time \cdot yield \cdot \frac{eff_{CS}}{\phi}} \quad (2-42)$$

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.9.2, η (πραγματική) απόδοση φωτοκορυφής που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της (πραγματικής) ραδιενέργειας ισοτόπων μέσα σε δείγματα, ορίζεται ως το πλήθος των φωτονίων μιας ενέργειας που ανιχνεύονται προς το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από το δείγμα. Παρατηρώντας ότι ο λόγος ω/ϕ μπορεί να ληφθεί ως παράγοντας της πειραματικά υπολογιζόμενης κατά τη βαθμονόμηση φαινόμενης απόδοσης eff_{CS} , προκύπτει η σχέση που δίνει την πραγματική απόδοση φωτοκορυφής:

$$eff = \frac{\omega}{\varphi} \cdot eff_{CS} = \eta \cdot eff_{CS} \quad (2-43)$$

όπου η ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης μεταξύ πηγής και δείγματος, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ενέργεια φωτονίων και ζεύγος υλικών πηγής βαθμονόμησης και δείγματος.

Τελικά η πραγματική ραδιενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$activity_{o,sample} = \frac{area_{sample}}{time \cdot yield \cdot eff} \quad (2-44)$$

2.12 Μέθοδοι εκτίμησης συντελεστή αναγωγής απόδοσης

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις, (2-37), (2-41) και (2-43), η συμμετοχή ιδεατών επιφανειών φωτοκορυφών στον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής απόδοσης, σημαίνει ότι δεν υπάρχει απλή σχέση που να τον υπολογίζει απευθείας για κάθε περίπτωση γεωμετρίας και δείγματος. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης.

1. Αναλυτική σχέση που βασίζεται στην παραδοχή ότι τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή και ανιχνεύονται στον ανιχνευτή συνιστούν παράλληλη δέσμη. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η παραδοχή αποκλίνει από την πραγματικότητα, καθώς η πηγή/δείγμα βρίσκεται πολύ κοντά στον ανιχνευτή.
2. Απευθείας εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης μέσω ολοκληρωτικής μεθόδου (Debertin, 1988). Η μέθοδος αυτή αφορά αποκλειστικά σε κυλινδρικές γεωμετρίες.
3. Απευθείας εκτίμηση με αριθμητικό υπολογισμό. Παράδειγμα τέτοιας μεθόδου για την εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για ένα συνδυασμό πηγής-γεωμετρίας-υλικού δείγματος, είναι η τοποθέτηση σημειακής πηγής σε διάφορες θέσεις εντός της γεωμετρίας, και ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής που προκύπτει. Εν γένει τέτοιες μέθοδοι είναι

επίπונες στην εφαρμογή τους λόγω των πολλών θέσεων στις οποίες πρέπει να τοποθετηθεί και να μετρηθεί η σημειακή πηγή.

4. Εκτίμηση μέσω προσομοίωσης Monte Carlo. Οι κώδικες προσομοίωσης Monte Carlo προσομοιώνουν υπολογιστικά τις αλληλεπιδράσεις κάθε φωτονίου που προέρχεται από την πηγή ξεχωριστά. Επομένως, είναι εύκολο να καταγραφεί το πλήθος των φωτονίων που άφησαν όλη την ενέργεια στον ανιχνευτή σε σχέση με αυτά που προέρχονται από την πηγή και συνακόλουθα είναι εφικτή η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής.

3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Το αντικείμενο της παρούσης ΔΕ είναι η σύγκριση μεταξύ των διαθέσιμων δοχείων/γεωμετριών δείγματος-ανιχνευτή και η αναζήτηση της βέλτιστης εξ αυτών για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος. Για τις ανάγκες αυτής της συγκριτικής μελέτης, πραγματοποιήθηκαν τόσο πειράματα όσο και προσομοιώσεις με χρήση τεχνικών Monte Carlo. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται:

- Η λογική εκλογής των υπό εξέταση δοχείων.
- Τα υλικά των δειγμάτων που επιλέχθηκαν να πληρώσουν τις γεωμετρίες ώστε να καταστεί δυνατή η γ-φασματοσκοπική ανάλυση αυτών.
- Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να γίνει σύγκριση των δοχείων, μέσω τεχνικών Monte Carlo, με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE.
- Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και χρησίμευσαν ως κριτήρια σύγκρισης.
- Τα συμπεράσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

3.1 Περιγραφή πειραμάτων

Στις παραγράφους 3.1.1-3.1.2, δίνονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την προετοιμασία και τη διεξαγωγή των πειραματικών γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των οποίων επέτρεψε τη διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης, μεταξύ ορισμένων υποψήφιων προς υιοθέτηση γεωμετριών μικρού όγκου. Τα πειράματα που έγιναν συνοψίζονται ως εξής:

- Πλήρωση επιλεγμένων προς εξέταση γεωμετριών με 2 συνήθη υλικά δείγματος.
- Ανάλυση των δειγμάτων που συσκευάστηκαν για 24 ώρες το καθένα στις γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων.

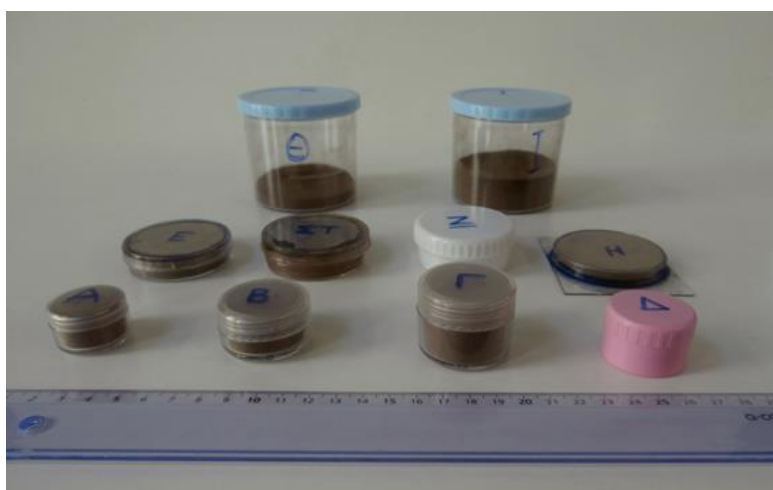
3.1.1 Επιλογή δοχείων

Το πρώτο βήμα για την διεξαγωγή της συγκριτικής ανάλυσης ήταν η εύρεση κυλινδρικών πλαστικών δοχείων του εμπορίου που να πληρούν το κριτήριο του μικρού ωφέλιμου όγκου. Ο Πίνακας 3-1 περιέχει τις διαστάσεις και τον όγκο των

δοχείων που επιλέχθηκαν. Σημειώνεται ότι τα δοχεία ογκομετρήθηκαν με απιονισμένο νερό, καθώς πολλά από αυτά δεν είναι απόλυτα κυλινδρικά.

Γεωμετρία	Μέση Ακτίνα (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm ³)
A	1.25	1.73	9.1
B	1.61	1.70	14.5
Γ	1.69	2.73	24.6
Δ	1.41	1.99	12.6
E	2.59	1.20	24.1
ΣΤ	2.65	1.34	27.6
Z	2.40	1.89	34.1
H	2.85	0.64	17.9
Θ	3.61	1.00	40.0
I	3.62	2.20	97.2

Πίνακας 3-1: Εξεταζόμενες γεωμετρίες δείγματος.



Σχήμα 3-1: Δοχεία που χρησιμοποιήθηκαν

Οι γεωμετρίες A-Δ και Z επιλέχθηκαν λόγω της ευκολίας σφραγίσματός τους (βιδωτό καπάκι). Οι γεωμετρίες E, ΣΤ και H σφραγίζονται πιο δύσκολα, επιλέχθηκαν δε λόγω του μικρού πάχους δείγματος, που έχει ως συνέπεια χαμηλότερη αυτοαπορρόφηση μέσα στο δείγμα. Οι γεωμετρίες Θ και I αποτελούν τις τυποποιημένες γεωμετρίες με κωδικούς «8» και «5» αντίστοιχα του ΕΠΤ-ΕΜΠ και χρησιμοποιούν το ίδιο δοχείο όγκου 282 cm³, το οποίο όμως είναι πληρωμένο έως ορισμένου ύψους για κάθε γεωμετρία. Οι γεωμετρίες Θ και I αναλύθηκαν ως γεωμετρίες αναφοράς, με τον ίδιο τρόπο όπως και οι υπόλοιπες γεωμετρίες.

3.1.2 Υλικά πλήρωσης γεωμετριών και οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων επιλέχθηκαν δύο υλικά, η ειδική ραδιενέργεια των οποίων έχει ήδη προσδιοριστεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, με ανάλυση σε τυποποιημένη γεωμετρία μεγάλου όγκου.

Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χώμα προερχόμενο από την περιοχή της Μεγαλόπολης, το οποίο έχει συλλεχθεί και αναλυθεί στο πλαίσιο προηγούμενης εργασίας, και περιέχει $198 \text{ Bq/kg} \pm 7.0\%$ ^{210}Pb . Η αβεβαιότητα δίνεται σε επίπεδο 1σ , και είναι η ολική αβεβαιότητα της μέτρησης όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.9.7. Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του χώματος (Παλαμάρα, 2010). Το δείγμα αυτό επιλέχθηκε γιατί από άποψη σύστασης είναι τυπικό δείγμα χώματος, αλλά περιέχει σχετικά αυξημένη ραδιενέργεια ^{210}Pb , γεγονός που διευκολύνει τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Ισότοπο	Ειδική Ραδιενέργεια (Bq/kg) \pm αβεβαιότητα (1 σ)
^{210}Pb	$197.85 \pm 7.0\%$
^{137}Cs	$63.95 \pm 0.3\%$
^{40}K	$509.69 \pm 1.5\%$
^{228}Ac	$34.11 \pm 5.6\%$
^{234}Th	$30.27 \pm 18.9\%$

Πίνακας 3-2: Ειδική ραδιενέργεια ορισμένων ισωτόπων στο υποδείγμα χώματος 8.1 (Παλαμάρα, 2010), συνοδευόμενη από την ολική σχετική αβεβαιότητα μέτρησης σε επίπεδο 1σ .

Το δεύτερο υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ιπτάμενη τέφρα προερχόμενη από λιγνιτικό σταθμό (Μεγαλόπολη IV), με ειδικής ραδιενέργεια ^{210}Pb ίση με $874 \text{ Bq/kg} \pm 5.6\%$ (1σ , ολική αβεβαιότητα της μέτρησης). Το υλικό αυτό περιέχει υψηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας σε σχέση με το τυπικό χώμα και επιλέχθηκε για να μελετηθεί η επίδραση του αυξημένου συνεχούς υποστρώματος στον προσδιορισμό του ^{210}Pb . Σημειώνεται ότι το υλικό αυτό αποτελεί ξεκάθαρα υλικό TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) διότι η περιεκτικότητά του σε φυσικό ^{210}Pb είναι αυξημένη σε σχέση με τον λιγνίτη από τον οποίο προήλθε.

Από κάθε υλικό πληρώθηκε ένα δοχείο από κάθε γεωμετρία, δημιουργώντας έτσι 2 σετ δειγμάτων. Ο Πίνακας 3-3 περιέχει την καθαρή μάζα κάθε ενός από τα δείγματα που συσκευάστηκαν. Το σύνολο των 20 δειγμάτων (2 υλικά x 10 γεωμετρίες) αναλύθηκε στον ανιχνευτή XtRa (EXtended Range) του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από κάθε

ανάλυση προέκυψαν δύο φάσματα, καθώς η ανιχνευτική διάταξη του XtRa λαμβάνει ταυτόχρονα φάσμα με και χωρίς τη χρήση του συστήματος Compton Suppression (CSS). Επίσης, τα δείγματα χόματος αναλύθηκαν και στον ανιχνευτή LEGe (Low Energy Germanium), με σκοπό να ελεγχθεί εάν παρουσιάζει κάποιο πλεονέκτημα έναντι του ανιχνευτή XtRa κατά την ανάλυση του ^{210}Pb , ο οποίος εκπέμπει φωτόνια χαμηλής ενέργειας. Κάθε δείγμα αναλύθηκε σε κάθε ανιχνευτή για χρονική διάρκεια 24h.

Γεωμετρία	Μάζα χόματος (gr)	Μάζα Ιπτάμενης Τέφρας (gr)
A	8.1	8.8
B	13.5	14.0
Γ	24.6	23.9
Δ	12.6	12.1
E	22.7	23.4
ΣΤ	32.5	26.7
Z	33.6	33.1
H	16.2	17.0
Θ	35.1	38.8
I	84.5	85.9

Πίνακας 3-3: Οι καθαρές μάζες των δειγμάτων που συσκευάστηκαν για κάθε γεωμετρία.

Τα δείγματα χόματος αναλύθηκαν και στον ανιχνευτή χαμηλών ενεργειών τύπου LEGe (Low Energy Germanium), με σκοπό να διερευνηθεί εάν παρέχει κάποιο πλεονέκτημα στην ανίχνευση του ^{210}Pb . Η διάρκεια συλλογής των φασμάτων ήταν επίσης 24h.

Ο Πίνακας 3-4 αποτελεί υπόμνημα για την αντιστοίχιση των ζευγών γεωμετριών-υλικών, με τις αντίστοιχες ονομασίες που δόθηκαν στα ληφθέντα φάσματα. Για παράδειγμα, το φάσμα ιπτάμενης τέφρας από τον ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία Δ, είναι το “box4ta”. Οι αντίστοιχες θέσεις των φασμάτων στο αρχείο φασμάτων του κώδικα SPUNAL φαίνονται στον ίδιο πίνακα, και είναι της μορφής “16/2.XXX”. Ο Πίνακας 3-5 περιέχει τα φάσματα υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν.

Από τα γ-φάσματα αυτά, ελήφθησαν μέσω του κώδικα SPUNAL οι επιφάνειες φωτοκορυφής για το φωτόνιο 46.52 keV του ^{210}Pb , η αβεβαιότητά τους σε επίπεδο 1.65σ, καθώς και οι χρόνοι ανάλυσης των δειγμάτων, με σκοπό τον υπολογισμό των μεγεθών που αποτέλεσαν τα πειραματικά κριτήρια σύγκρισης των γεωμετριών.

Γεωμετρία	Χώμα			Ιπτάμενη Τέφρα	
	XtRa	XtRa-CSS	LEGe	XtRa	XtRa-CSS
A	box1c (16/2.117)	box1d (16/2.118)	box1e (16/2.208)	box1ta (16/2.206)	box1tb (16/2.207)
B	box2a (16/2.89)	box2b (16/2.90)	box2c (16/2.212)	box2ta (16/2.210)	box2tb (16/2.211)
Γ	box3c (16/2.127)	box3d (16/2.128)	box3e (16/2.216)	box3ta (16/2.214)	box3tb (16/2.215)
Δ	box4a (16/2.95)	box4b (16/2.96)	box4c (16/2.219)	box4ta (16/2.217)	box4tb (16/2.218)
E	box5a (16/2.98)	box5b (16/2.99)	box5c (16/2.224)	box5ta (16/2.222)	box5tb (16/2.223)
ΣΤ	box6c (16/2.129)	box6d (16/2.130)	box6e (16/2.225)	box6ta (16/2.226)	box6tb (16/2.227)
Z	box7a (16/2.106)	box7b (16/2.107)	box7c (16/2.228)	box7ta (16/2.229)	box7tb (16/2.230)
H	box8a (16/2.109)	box8b (16/2.110)	box8c (16/2.233)	box8ta (16/2.231)	box8tb (16/2.232)
Θ	box9a (16/2.181)	box9b (16/2.182)	box9c (16/2.237)	box9ta (16/2.238)	box9tb (16/2.239)
I	box10a (16/2.184)	box10b (16/2.185)	box10c (16/2.240)	box10ta (16/2.241)	box10tb (16/2.242)

Πίνακας 3-4: Αντιστοίχιση γεωμετριών και υλικών με τις κωδικές ονομασίες των φασμάτων του κάθε δείγματος που ελήφθησαν από τους ανιχνευτές.

Φάσματα Υποστρώματος		
XtRa	XtRa-CSS	LEGe
bg4274 (16/2.51)	bg1403 (16/2.52)	bg3239 (16/1.23)

Πίνακας 3-5: Φάσματα υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ανιχνευτή

3.2 Συστάσεις υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Στις παραγράφους 3.2.1-3.2.4, περιγράφεται ο τρόπος εκλογής και επεξεργασίας της σύστασης των υλικών που εισήχθησαν στον κώδικα PENELOPE για το δείγμα και το υλικό πλήρωσης. Σκοπός ήταν η κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των υλικών αυτών. Εξυπακούεται ότι η σύσταση των υλικών των δειγμάτων (χώμα & τέφρα) δεν είναι ακριβώς η ίδια με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

3.2.1 Δείγματα χώματος

Για να προσεγγιστεί η χημική σύσταση των δειγμάτων χώματος που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τη Δ.Ε. (Μαρούδη, 2009), τα οποία αναφέρονται σε χημική σύσταση τυπικού

ανόργανου (οργανική ύλη <20%) χώματος υγρασίας 10% (Πίνακας 3-6). Ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αναφέρεται στην Δ.Ε. (Μαρούδη, 2009) ώστε να διαχωριστεί η περιεκτικότητα του υδρογόνου και του οξυγόνου στο χώμα, καθώς και στην υγρασία του χώματος. Στη συνέχεια έγινε αναγωγή των αποτελεσμάτων σε υγρασία 4.1%, η οποία είναι και η υγρασία στην οποία είχαν συσκευαστεί τα δείγματα χώματος που αναλύθηκαν στα πειράματα.

Η αναγωγή της περιεκτικότητας ενός στοιχείου (εκτός της υγρασίας) από ένα άθροισμα περιεκτικότητων επί τις εκατό σε ένα άλλο, έγινε με τον τύπο:

$$c'_i(\%) = \frac{c_i \cdot \sum_i c'_i}{\sum_i c_i} \quad (3-1)$$

όπου:

- c'_i : η νέα περιεκτικότητα κ.β.% για το i-στό στοιχείο του χώματος,
 c_i : η προηγούμενη περιεκτικότητα κ.β.% για το i-στό στοιχείο του χώματος,
 $\sum_i c'_i$: το νέο ποσοστιαίο άθροισμα των περιεκτικότητων που ζητείται,
 $\sum_i c_i$: το προηγούμενο ποσοστιαίο άθροισμα των περιεκτικότητων.

Στοιχείο	% κ.β για 10% υγρασία	% κ.β. για 4.1 % υγρασία
H στην υγρασία	1.110	0.456
O στην υγρασία	8.890	3.644
H εκτός υγρασίας	0.990	1.055
O εκτός υγρασίας	47.800	50.934
Al	6.992	7.450
Si	23.722	25.277
K	3.095	3.298
Ca	3.095	3.298
Fe	4.307	4.589

Πίνακας 3-6: Σύσταση χώματος που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.

Σχετικά με την εύρεση των περιεκτικότητων οξυγόνου και υδρογόνου που περιλαμβάνονται μόνο στην υγρασία του χώματος:

- 4.1% κ.β. υγρασία (H₂O) ισοδυναμεί με 4.1 gr H₂O σε 100 gr χώματος.
- 1 μόριο H₂O, δηλαδή 1 mol H₂O, απαρτίζεται από 2 άτομα H και 1 άτομο O.
- Σε 18 gr H₂O (M_BH₂O=18), περιέχονται 2 gr H και 16 gr O, καθώς το ατομικό βάρος του υδρογόνου ισούται με τη μονάδα και του οξυγόνου με 16.
- Σε 4.1 gr H₂O (υγρασία συσκευασίας δειγμάτων), θα περιέχονται 2*(4.1/18)

gr H, και $16 \cdot (4.1/18)$ gr O στα 100 gr χώματος, δηλαδή 0.456% κ.β. και 3.644% κ.β αντίστοιχα.

3.2.2 Δείγματα τέφρας

Οι κατά βάρος συστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις των δειγμάτων τέφρας, ακολουθούν αυτές που αναγράφονται στην εργασία (Skodras et al., 2006), τυπικές για το σταθμό Μεγαλόπολης, με τη διαφορά ότι λήφθησαν υπ' όψιν μόνο οι χημικές ενώσεις με περιεκτικότητα άνω του 10%.

Ένωση	% κ.β.
SiO ₂	39.7
Al ₂ O ₃	14.0
CaO	15.8
SO ₃	14.1
Fe ₂ O ₃	11.7
Σύνολο	95.3

Πίνακας 3-7: Αρχική σύσταση ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-7, το άθροισμα των οξειδίων που θεωρήθηκαν ότι απαρτίζουν την τυπική ιπτάμενη τέφρα, είναι μικρότερο του 100%. Επομένως, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη αναγωγή στο 100%, ώστε να εισαχθούν οι περιεκτικότητες στο βοηθητικό πρόγραμμα material.exe και να δημιουργηθεί το αρχείο “.mat” της ιπτάμενης τέφρας της προσομοίωσης.

Με δεδομένα τα ατομικά βάρη κάθε επιμέρους στοιχείου, τον αριθμό των ατόμων του κάθε στοιχείου στην ένωση, και τις περιεκτικότητες του Πίνακα 3-7, οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

$$c_{i,j} = \frac{AB_i \cdot n_{i,j}}{MB_j} \cdot w_j \quad (3-2)$$

όπου:

$c_{i,j}$: η αναλογία gr στοιχείου/gr τυπικής ΙΤ για κάθε στοιχείο i που συμμετέχει στην ένωση j . Ως τυπική ιπτάμενη τέφρα εδώ εννοείται το μείγμα όπως αναφέρεται στην εργασία (Skodras et al., 2006),

AB_i : το ατομικό βάρος του στοιχείου i ,

$n_{i,j}$: το πλήθος ατόμων του στοιχείου i στην ένωση j ,

- MB_j :** το μοριακό βάρος της κάθε ένωσης, υπολογισμένο ως το άθροισμα $\Sigma(AB_i \cdot n_{ij})$, για όλες τις ενώσεις j (5 οξείδια στο σύνολο),
- w_j :** η κατά βάρος περιεκτικότητα τη ένωσης j στο μείγμα της τυπικής ιπτάμενης τέφρας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-7.

Το άθροισμα των περιεκτικότητων των οξειδίων που αποτελούν το μείγμα της ιπτάμενης τέφρας της προσομοίωσης είναι 95.3%, δηλαδή 95.3 gr στα 100 gr τυπικής ιπτάμενης τέφρας. Διαιρώντας κάθε $c_{i,j}$ με την περιεκτικότητα αυτή, προκύπτει η αναλογία του στοιχείου i στο μίγμα της προσομοίωσης, που είναι και η επιθυμητή. Εξαιρέση αποτελεί το οξυγόνο, το οποίο συμμετέχει σε όλες τις ενώσεις του τελικού μείγματος, επομένως πρέπει οι επιμέρους περιεκτικότητες οξυγόνου που προκύπτουν από κάθε ένωση να αθροιστούν. Οι σχέσεις που δίνουν τις επιθυμητές περιεκτικότητες είναι:

$$C_i = \frac{c_{i,j}}{0.953} \left[\frac{\text{gr στοιχείου}_i}{\text{gr IT προσομοίωσης}} \right] \quad (3-3)$$

ενώ ειδικά για το οξυγόνο:

$$C_o = \sum_j \frac{c_{o,j}}{0.953} \left[\frac{\text{gr O}}{\text{gr IT προσομοίωσης}} \right] \quad (3-4)$$

Μια επαλήθευση της παραπάνω μεθοδολογίας μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπ' όψιν τις διαστάσεις των διαφόρων αναλογιών:

$$\frac{\frac{\text{gr στοιχείου}_i}{\text{gr ένωσης}_j} \cdot \frac{\text{gr ένωσης}_j}{\text{gr IT τυπικής}}}{\frac{\text{gr IT προσομοίωσης}}{\text{gr IT τυπικής}}} = \frac{\text{gr στοιχείου}_i}{\text{gr IT προσομοίωσης}} \quad (3-5)$$

Όπου ο αριθμητής του αριστερά μέλους αποτελεί τις μονάδες του μεγέθους $c_{i,j}$ και το κλάσμα του παρονομαστή του αριστερά μέλους αποτελεί τις μονάδες της συνολικής

περιεκτικότητας των οξειδίων στο αρχικό μίγμα της ιπτάμενης τέφρας. Το κλάσμα του δεξιά μέλους αποτελεί τις μονάδες της τελικής περιεκτικότητας C_i .

3.2.3 Τελικά δεδομένα εισόδου υλικών δειγμάτων στο *materials.exe*

Οι κατά βάρος συστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν τελικά ως είσοδος στο βοηθητικό πρόγραμμα *material.exe* για τη δημιουργία των υλικών που προσεγγίζουν το χόμα και την ιπτάμενη τέφρα του πειράματος, φαίνονται στον Πίνακα 3-8:

	Στοιχείο	H	O	Al	Si	K	Ca	Fe	S
Χόμα	% κ.β.	1.51	54.58	7.45	25.28	3.30	3.30	4.59	-
Τέφρα	% κ.β.	-	46.40	7.80	19.50	-	11.90	8.60	5.90

Πίνακας 3-8: Τελικές συστάσεις χόματος και ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Εκτός από τις κατά βάρος συστάσεις των διαφόρων στοιχείων, για την πλήρη περιγραφή του υλικού απαιτείται και η εισαγωγή των πυκνοτήτων συσκευασίας κάθε δείγματος. Ο Πίνακας 3-9 περιέχει τις πυκνότητες των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Γεωμετρίες	Πυκνότητα χόματος (gr/cm^3)	Πυκνότητα Ιπτάμενης Τέφρας (gr/cm^3)
A	0.89	0.97
B	0.93	0.97
Γ	1.00	0.97
Δ	1.00	0.96
E	0.94	0.97
ΣΤ	1.18	0.97
Z	0.99	0.97
H	0.91	0.95
Θ	0.88	0.97
I	0.94	0.88

Πίνακας 3-9: Πειραματικές πυκνότητες υλικών δειγματος.

Ο όγκος κάθε δοχείου βρέθηκε με χρήση απιονισμένου νερού, ενώ η καθαρή μάζα είχε προσδιοριστεί κατά τη δημιουργία του δείγματος με την πλήρωση της γεωμετρίας. Τα δείγματα χόματος έγινε προσπάθεια να συσκευαστούν με το μέγιστο δυνατό καθαρό βάρος. Ωστόσο, δεν ήταν πάντα πρακτικά δυνατό να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός συμπίεσης σε κάθε γεωμετρία, επομένως προέκυψαν μικρές διαφορές στις πυκνότητες. Για τα δείγματα ιπτάμενης τέφρας, το καθαρό βάρος για κάθε δείγμα επιλέχθηκε έτσι ώστε οι περισσότερες γεωμετρίες να περιέχουν υλικό ίσης

πυκνότητας, πλην 2 εξαιρέσεων όπου παραπάνω συμπίεση ήταν αδύνατη, επομένως αφαιρέθηκε μικρή ποσότητα μάζας, με αποτέλεσμα λίγο μικρότερη πυκνότητα.

3.2.4 Υλικά τοιχωμάτων δοχείων

Για τα δοχεία τα οποία επιλέχθηκαν προς πλήρωση κατά το σχεδιασμό του πειράματος δεν ήταν γνωστή η ακριβής σύσταση του υλικού του δοχείου, παρά μόνο η γενικότερη οικογένειά του (πχ πλαστικό). Επομένως στα πλαίσια αυτής της ΔΕ, τα υλικά που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση αποτελούν κοντινές προσεγγίσεις, έπειτα από μια σύντομη έρευνα αγοράς δοχείων παρόμοιου τύπου.

Συγκεκριμένα, τα δοχεία Α έως Δ αποτελούν δοχεία καλλυντικών, επομένως θεωρήθηκε ως πιθανή σύσταση το υλικό PET (Polyethylene terephthalate) ως ασφαλές για τρόφιμα και ουσίες που έρχονται σε επαφή με το δέρμα. Το δοχείο Ζ παρουσιάζει παρόμοια μορφή, επομένως θεωρήθηκε και αυτό ως κατασκευασμένο από PET. Τα τρυβλία Petri Ε και ΣΤ, καθώς και το καπάκι του τρυβλίου όμοιου με του ΣΤ που χρησιμοποιήθηκε ως γεωμετρία Η, θεωρήθηκαν ότι είναι φτιαγμένα από πολυπροπυλένιο (polypropylene), υλικό που συναντάται συχνά στις περιγραφές προϊόντος κατασκευαστών για πλαστικά μη-αποστειρωμένα τρυβλία.

Για να διαπιστωθεί κατά πόσο διαφέρουν τα αποτελέσματα της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης, μεταξύ των υλικών PET και πολυπροπυλενίου, για τις γεωμετρίες Β και Ζ, η προσομοίωση επαναλήφθηκε διατηρώντας σταθερό το υλικό δείγματος και όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους, εκτός από το υλικό του δοχείου. Οι διαφορές που προέκυψαν θεωρήθηκαν ασήμαντες. Παρόμοιος έλεγχος με ίδιο συμπέρασμα έγινε και για υλικό δοχείου πολυστυρένιο (polystyrene) για τη γεωμετρία Η, καθώς αποτελεί εξίσου πιθανή σύσταση πλαστικού τρυβλίου Petri. Για τις γεωμετρίες Θ και Ι, οι οποίες συσκευάζονται με το ίδιο τυποποιημένο δοχείο του ΕΠΤ-ΕΜΠ, λήφθηκε ως υλικό το plexiglass, ακολουθώντας τη λογική της Δ.Ε. (Φωτεινάκη, 2012). Ο Πίνακας 3-10 παρουσιάζει τις αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιώσεων.

Γεωμετρία	Υλικό	eff	Εναλλακτικό Υλικό	eff _{εναλ. υλικού}	% απόκλιση
Z	PET	0.14396	πολυπροπυλένιο	0.14854	-3.2
B	PET	0.15502	πολυπροπυλένιο	0.15640	-0.9
H	πολυπροπυλένιο	0.22805	πολυστυρένιο	0.22683	-0.5

3.3 Αρχεία εισόδου γεωμετρίας *.geo που χρησιμοποιήθηκαν

Ως βάση των αρχείων εισόδου γεωμετρίας *.geo για κάθε σετ γεωμετρίας/υλικού που προσομοιώθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένα αρχείο γεωμετρίας που είχε δημιουργηθεί στα πλαίσια της ΔΔ (Σάββα, υπό εκπόνηση) και παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β της παρούσας ΔΕ. Αυτό το αρχείο γεωμετρίας περιέχει την ανιχνευτική διάταξη XtRa-CSS, δηλαδή την εξωτερική θωράκιση, και όλα τα υπόλοιπα επιμέρους τμήματα εντός αυτής, συμπεριλαμβανομένου του CSS. Τονίζεται ότι παρά την ύπαρξη του κρυστάλλου NaI στο αρχείο γεωμετρίας, δεν λαμβάνονται αποτελέσματα φάσματος μειωμένου υποστρώματος όπως στην πραγματική πειραματική διάταξη XtRa-CSS, καθώς κάτι τέτοιο προϋποθέτει βαθύτερες μετατροπές στον κώδικα χρήστη από ότι ήταν το αντικείμενο της παρούσης ΔΕ. Επομένως, προσομοιώνεται μόνο η λειτουργία του ανιχνευτή XtRa, με τα σώματα που αντιστοιχούν στον ανιχνευτή NaI να βρίσκονται εκεί για λόγους πληρότητας και καλύτερης προσέγγισης ως προς τις αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας-ύλης που προσομοιώνονται.

Το επόμενο βήμα ήταν η εισαγωγή των διαστάσεων των δοχείων στο αρχείο γεωμετρίας του ανιχνευτή. Τα δοχεία μετρήθηκαν με παχύμετρο, και δημιουργήθηκαν κατάλληλες επιφάνειες στο αρχείο *.geo, ώστε να περιγραφούν κατά το δυνατόν πληρέστερα τα σώματα που τα αποτελούν. Έπειτα, δημιουργήθηκαν το/τα κατάλληλα σώματα για την πηγή όγκου του εκάστοτε υλικού που πληρώνει τη γεωμετρία του δοχείου.

3.4 Μετατροπή κώδικα χρήστη PENMAIN για πηγή όγκου

Όπως προαναφέρθηκε, ο κώδικας PENMAIN της έκδοσης PENELOPE 2005, δεν περιλαμβάνει τη δυνατότητα προσομοίωσης πηγής όγκου, παρά μόνο σημειακής πηγής. Επομένως, καθίσταται απαραίτητη η τροποποίηση του κώδικα χρήστη (Αθανασίου, 2006). Αυτό επιτυγχάνεται με την τυχαία και ομογενή επιλογή σημειακής πηγής εντός του όγκου του υλικού του δείγματος, από την οποία θα ξεκινήσει η παρακολούθηση της ιστορίας ενός φωτονίου. Η σειρά με την οποία επιλέγονται τυχαία οι συντεταγμένες σε κάθε άξονα, οι γεωμετρικοί περιορισμοί, και η απόρριψη των σημείων εκτός της γεωμετρίας της πηγής, εξαρτώνται από τις διαστάσεις και το σχήμα του εσωτερικού κάθε δοχείου (κύλινδρος, κύλινδρος και σφαίρα σε περίπτωση εσωτερικής καμπυλότητας, κώνος), επομένως ο κώδικας χρήστη έπρεπε να τροποποιηθεί για κάθε γεωμετρία ξεχωριστά.

Για τις γεωμετρίες με κυλινδρικό εσωτερικό, με χρήση εντολής γεννήτριας τυχαίων αριθμών, επιλέγεται τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 1, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με το ύψος της πηγής και αποδίδεται η κατάλληλη τιμή του άξονα z, ώστε να βρίσκεται εντός των ορίων του σώματος που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη πηγή όγκου. Έπειτα, με αντίστοιχο τρόπο επιλέγονται τυχαίες συντεταγμένες x,y στο διάστημα [-1,1], οι οποίες πολλαπλασιάζονται με την ακτίνα του κυλίνδρου, και διαπιστώνεται εάν βρίσκονται εντός της επιφάνειας του κύκλου σε εκείνη τη διατομή. Εάν όχι, επιλέγονται τιμές για τις συντεταγμένες z,x,y από την αρχή.

Για τα δοχεία με ελαφρά κωνικότητα, η ακτίνα της κυκλικής τομής του κώνου σε αυτό το ύψος, λαμβάνεται από την αντίστοιχη συνάρτηση κωνικότητας που υπολογίστηκε κατά τη δημιουργία του αντίστοιχου σώματος στο αρχείο γεωμετρίας.

Για τις γεωμετρίες με μερική εσωτερική καμπυλότητα, επιλέγεται παρόμοια τυχαίο z. Εάν αυτό βρίσκεται εντός του ύψους που θεωρείται κυλινδρική η πηγή, ισχύουν τα παραπάνω βήματα για τον κύλινδρο. Εάν βρίσκεται εντός της – κατά παραδοχή –σφαιρικής καμπυλότητας, ο έλεγχος των (x,y) γίνεται όμοια με παραπάνω με την εξής διαφορά: ως ακτίνα κυκλικής επιφάνειας, θεωρείται εκείνη που αντιστοιχεί στον κύκλο που προκύπτει από την τομή κατά z ημίσεως σφαίρας, ακτίνας ίσης με του κυλίνδρου του κυλινδρικού τμήματος, το ύψος του κέντρου της οποίας βρίσκεται στο z στο οποίο έχει οριστεί η έναρξη της καμπυλότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, όλες οι κυκλικές τομές της σφαίρας κατά z, θα έχουν ακτίνα ίση ή μικρότερη από αυτή της σφαίρας, η τιμή της οποίας προκύπτει γεωμετρικά. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2, ενώ στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται η γεωμετρία A, όπως μοντελοποιείται με τον τρόπο αυτό από τον κώδικα.

Σε πειραματικό επίπεδο, θεωρείται ότι υπάρχει ίση πιθανότητα να αποδιεγερθεί πυρήνας και να εκπεμφθεί φωτόνιο, από όλα τα σημεία εντός του υλικού της πηγής ενός ορθά προετοιμασμένου δείγματος. Ένα απαραίτητο βήμα για την επαλήθευση της ομοιογένειας της πηγής που προσομοιώνεται, είναι η εκτέλεση του κώδικα, με μια μικρή τροποποίηση στο πρόγραμμα χρήστη για ταυτόχρονη καταγραφή των καρτεσιανών συντεταγμένων (x,y,z), οι οποίες επιλέγονται ως έναρξη της ιστορίας του επόμενου φωτονίου που θα προσομοιωθεί, συνήθως σε μια τομή της γεωμετρίας (κρατώντας δηλαδή μια συντεταγμένη εντός πολύ στενών ορίων). Μετά την εκτέλεση επαρκούς πλήθους ιστοριών, μια ποιοτική εποπτεία σε διάγραμμα των συντεταγμένων, μιας ή περισσότερων τομών της πηγής όγκου, αρκεί για την

φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας για έναν εικονικό ανιχνευτή, ο οποίος ανιχνεύει φωτόνια που προέρχονται από σημειακή πηγή ή πηγή όγκου. Για μια συγκεκριμένη γεωμετρία, εκτιμώντας την απόδοση φωτοκορυφής 46.52 keV μια φορά για το υλικό του δείγματος (χώμα ή ιπτάμενη τέφρα) και μια φορά για μια από τις υγρές πηγές βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης προκύπτει από τη σχέση (3-6) ως απλός λόγος της μιας απόδοσης ως προς την άλλη.

$$\eta_{PENELOPE} = \frac{eff_{PENELOPE \text{ υλικό δείγματος}}}{eff_{PENELOPE \text{ υλικό πηγής βαθμονόμησης}}} \quad (3-6)$$

3.6 Εκτίμηση συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης χρήση της ολοκληρωτικής μεθόδου

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα factor (Αναγνωστάκης 1998), το οποίο υλοποιεί την ολοκληρωτική μέθοδο. Για κυλινδρικές γεωμετρίες, δίχως περιορισμό ύψους, ορίζεται το μέγεθος:

$$J(\mu) = \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x + d)^2} r dx dr \quad (3-7)$$

όπου:

- R:** η ακτίνα της πηγής σε cm,
- t:** το ύψος της πηγής σε cm,
- d:** η ιδεατή απόσταση μεταξύ πηγής και ανιχνευτή σε cm, και ορίζεται ως η απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος που βρίσκεται απέναντι από τον ανιχνευτή, ως έναν ιδανικό σημειακό ανιχνευτή, που βρίσκεται μέσα στον ανιχνευτή,
- μ:** ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής (1/cm) για τα φωτόνια της ενέργειας που μελετάται.

Για τυχαίο σημείο εντός της πηγής, στο οποίο θεωρείται ότι διασπάται πυρήνας ενός ραδιενεργού ισότοπου και αποτελεί αφετηρία της ιστορίας ενός φωτονίου, ορίζονται τα γεωμετρικά μεγέθη που παρουσιάζονται εντός του ολοκληρώματος:

- x : κάθετη απόσταση σημείου από την βάση της πηγής που είναι κοντύτερα στον ανιχνευτή. Ισχύει ότι $x \leq t$,
- r : ακτίνα του σημείου ως προς τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου της πηγής. Ισχύει ότι $r \leq R$,
- z : για ένα φωτόνιο το οποίο φτάνει παρθενικό στον ανιχνευτή (καμία αλληλεπίδραση εντός της πηγής, ή σε ενδιάμεσα υλικά) και εναποθέτει όλη του την ενέργεια σε αυτόν, το μέγεθος αυτό συμβολίζει το μήκος εντός της πηγής που διανύει το εν λόγω φωτόνιο. Υπολογίζεται ως:

$$z = x \frac{\sqrt{r^2 + (x + d)^2}}{x + d} \quad (3-8)$$

Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης η , μπορεί να οριστεί ως:

$$\eta = \frac{J(\mu_{sample})}{J(\mu_{CS})} \quad (3-9)$$

Όπου μ_{sample} , μ_{CS} είναι οι ολικοί γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης για το υλικό του δείγματος και του υλικού της πηγής αντίστοιχα.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν ως είσοδος στο πρόγραμμα factor ήταν τα εξής:

- Επιλογή του Ανιχνευτή «4» (αρίθμηση που αντιστοιχεί στον ανιχνευτή XtRa).
- Ύψος και διάμετρος για τις κυλινδρικές γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά. Πολλές από τις γεωμετρίες δεν είναι απόλυτα κυλινδρικές, και παρουσιάζουν ελαφρά κωνικότητα ή σφαιρικότητα προς τη βάση του δοχείου, επομένως λήφθηκε προσεγγιστικά σε κάθε περίπτωση η αντίστοιχη μέση διάμετρος. Ο Πίνακας 3-1 περιέχει τις διαστάσεις που εισήχθησαν στο πρόγραμμα.
- Η ενέργεια 46.52 keV των φωτονίων του ^{210}Pb .
- Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού του δείγματος μ_{sample} (cm^{-1}). Τονίζεται ότι, καθώς δεν έγινε χημική ανάλυση των δειγμάτων χρώματος και τέφρας, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τη σύσταση των δύο υλικών που θεωρήθηκε ότι πλησιάζουν τις πραγματικές, στα πλαίσια της προσομοίωσης μέσω του κώδικα PENELOPE, όπως

εξηγείται στην παράγραφο 3.2. Το πρόγραμμα “tables.exe” που περιλαμβάνεται στο πακέτο των αρχείων του κώδικα PENELOPE έχει – εκτός των άλλων – τη δυνατότητα παρουσίασης της τιμής του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, όπως υπολογίζεται για τη σύσταση ενός αρχείου υλικού που έχει δημιουργηθεί.

- Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής μ_{cs} (cm^{-1}). Ως υλικό πηγής βαθμονόμησης που έχει την κωδική ονομασία QCY12 επιλέχθηκε 4M HCl πυκνότητας 1.04 gr/cm^3 . Η τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης του διαλύματος εκτιμάται από το πρόγραμμα factor.

3.7 Αποτελέσματα αναλύσεων των δειγμάτων για τα φωτόνια 46.52 keV του ^{210}Pb

Με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας στη γ -φασματοσκοπική ανάλυση ^{210}Pb σε δείγματα χρώματος μικρού όγκου, οι προτεινόμενες γεωμετρίες έπρεπε να αξιολογηθούν με τα ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το ζητούμενο ήταν η επιλογή αυτής που παρέχει τα πλέον ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όρους:

- Ωφέλιμου όγκου.
- Ρυθμού καταγραφόμενων γεγονότων.
- Αβεβαιότητας μέτρησης επιφάνειας φωτοκορυφής.
- Κατώτερου ορίου ανίχνευσης.
- Απόδοσης φωτοκορυφής.
- Αυτοαπορρόφησης.

Στις παραγράφους, 3.7.1-3.7.4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκριτικών μεγεθών, όπως προέκυψαν για το συνδυασμό των γεωμετριών και υλικών δείγματος (χώμα και ιπτάμενη τέφρα) που εξετάστηκαν.

3.7.1 Ρυθμοί καταμέτρησης

Όλα τα φάσματα που συλλέχθηκαν από τα εξεταζόμενα δείγματα, αναλύθηκαν με τον κώδικα γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL, για να προσδιοριστεί η επιφάνεια της φωτοκορυφής του ^{210}Pb . Από την επιφάνεια αυτή, αφαιρέθηκε η συνεισφορά του υποστρώματος, η οποία έχει προσδιοριστεί με την πραγματοποίηση

μέτρησης υποστρώματος μεγάλης διάρκειας (300 – 500 ksec). Στον Πίνακα 3-11, παρουσιάζονται οι καθαροί ρυθμοί καταμέτρησης της φωτοκορυφής (counts per second, cps) για τις αναλύσεις δειγμάτων που έγιναν στους ανιχνευτές XtRa, με και χωρίς τη χρήση του συστήματος CSS, καθώς και στον ανιχνευτή LEGe. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα συνοδεύονται από την αβεβαιότητα κατά τον προσδιορισμό της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής, σε επίπεδο 1σ.

Γεωμετρία	cps ±αβεβαιότητα (1σ), χόμα			cps ±αβεβαιότητα (1σ), Ιπτάμενη Τέφρα	
	XtRa	XtRa-CSS	LEGe	XtRa	XtRa-CSS
A	0.0100 ±13.4%	0.0114 ±11.1%	0.0076 ±9.6%	0.0530 ±11.0%	0.0533 ±9.5%
B	0.0159 ±9.0%	0.0158 ±8.1%	0.0103 ±7.1%	0.0754 ±7.9%	0.0776 ±6.7%
Γ	0.0221 ±6.8%	0.0224 ±6.1%	0.0145 ±5.5%	0.0975 ±6.3%	0.0994 ±5.4%
Δ	0.0144 ±9.9%	0.0141 ±9.1%	0.0100 ±7.3%	0.0685 ±8.6%	0.0686 ±7.5%
E	0.0333 ±4.8%	0.0330 ±4.4%	0.0203 ±4.3%	*0.1617 ±3.9%	0.1652 ±3.3%
ΣΤ	0.0411 ±4.3%	0.0417 ±3.8%	0.0259 ±3.7%	*0.1807 ±3.5%	0.1821 ±3.1%
Z	0.0361 ±4.7%	0.0366 ±4.2%	0.0236 ±3.8%	*0.1726 ±3.7%	0.1751 ±3.2%
H	0.0277 ±5.5%	0.0275 ±5.0%	0.0166 ±4.9%	0.1341 ±4.6%	0.1361 ±3.9%
Θ	0.0457 ±3.8%	0.0457 ±3.5%	0.0255 ±3.6%	*0.2374 ±2.8%	0.2435 ±2.4%
I	0.0749 ±2.9%	0.0750 ±2.7%	0.0394 ±2.8%	*0.3365 ±2.2%	0.3448 ±1.9%

Πίνακας 3-11: Ρυθμός καταμέτρησης φωτοκορυφής ^{210}Pb (46.52 keV) για όλα τα δείγματα και τους ανιχνευτές.

Στον Πίνακα 3-11, οι τιμές του καθαρού ρυθμού καταμέτρησης που φέρουν αστερίσκο (μετρήσεις ιπτάμενης τέφρας του XtRa για τα δοχεία E, ΣΤ, Z, Θ, I), έχουν προκύψει έπειτα από εισαγωγή ξεχωριστής εντολής στον κώδικα SPUNAL, με την οποία έγινε “εξαναγκασμένη” singlet ανάλυση της φωτοκορυφής του ^{210}Pb . Η αρχική ανάλυση του φάσματος από τον SPUNAL απέδωσε αποτελέσματα για την επιφάνεια της φωτοκορυφής του ^{210}Pb μέσω multiplet ανάλυσης (πολλαπλή φωτοκορυφή. Τα αποτελέσματα της multiplet ανάλυσης παρουσιάζουν τόσο αυξημένη μικτή επιφάνεια φωτοκορυφής (κατά ~5.8-8.5%), όσο και αυξημένη αβεβαιότητα μέτρησης της εν λόγω επιφάνειας (κατά ~1.2-1.6% στην απόλυτη αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ).

3.7.2 Πειραματικές και προσομοιούμενες αποδόσεις φωτοκορυφής

Στην παράγραφο 2.9.2 δόθηκε ο τρόπος πειραματικού υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής του φωτονίου 46.52 keV που ακολουθήθηκε. Τα αποτελέσματα για όλους τους ανιχνευτές-δείγματα-γεωμετρίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-12.

Γεωμετρία	eff, χόμα			eff, Ιπτάμενη Τέφρα	
	XtRa	XtRa-CSS	LEGe	XtRa	XtRa-CSS
A	0.1472 ±15.10%	0.1670 ±13.13%	0.1116 ±12.78%	0.1619 ±6.95%	0.1629 ±6.68%
B	0.1400 ±11.37%	0.1390 ±10.69%	0.0908 ±10.77%	0.1450 ±6.54%	0.1491 ±6.32%
Γ	0.1071 ±9.73%	0.1082 ±9.28%	0.0702 ±9.35%	0.1098 ±6.35%	0.1119 ±6.20%
Δ	0.1360 ±12.11%	0.1330 ±11.46%	0.0939 ±10.96%	0.1524 ±6.59%	0.1526 ±6.42%
E	0.1750 ±8.45%	0.1730 ±8.26%	0.1062 ±8.46%	0.1860 ±5.96%	0.1900 ±5.88%
ΣΤ	0.1502 ±8.18%	0.1526 ±7.96%	0.0947 ±8.06%	0.1821 ±5.92%	0.1835 ±5.86%
Z	0.1280 ±8.40%	0.1300 ±8.14%	0.0836 ±8.13%	0.1403 ±5.98%	0.1423 ±5.90%
H	0.2030 ±8.87%	0.2010 ±8.46%	0.1217 ±8.90%	0.2123 ±6.02%	0.2154 ±5.93%
Θ	0.1547 ±7.95%	0.1548 ±7.82%	0.0863 ±7.92%	0.1646 ±5.86%	0.1689 ±5.81%
I	0.1054 ±7.55%	0.1055 ±7.48%	0.0555 ±7.57%	0.1072 ±5.82%	0.1098 ±5.77%

Πίνακας 3-12: Πειραματικός προσδιορισμός απόδοσης φωτοκορυφής για τα φωτόνια 46.52 keV (^{210}Pb).

Στην παράγραφο 2.9.3 δόθηκε ο τρόπος υπολογισμού της προσομοιούμενης απόδοσης φωτοκορυφής. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-13.

Γεωμετρία	eff _{PENELOPE} ±αβεβαιότητα (1σ), χόμα	eff _{PENELOPE} ±αβεβαιότητα (1σ), Ιπτάμενη Τέφρα
	A	0.1685 ±2.22%
B	0.1550 ±2.23%	0.1353 ±2.28%
Γ	0.1192 ±2.31%	0.1058 ±2.17%
Δ	0.1554 ±2.23%	0.1392 ±2.28%
E	0.1906 ±2.18%	0.1685 ±2.21%
ΣΤ	0.1671 ±2.21%	0.1641 ±2.21%
Z	0.1440 ±2.24%	0.1272 ±2.27%
H	0.2268 ±2.26%	0.2098 ±2.27%
Θ	0.1678 ±2.16%	0.1545 ±2.16%
I	0.1136 ±2.16%	0.1035 ±2.18%

Πίνακας 3-13: Προσομοιούμενες αποδόσεις φωτοκορυφής των δειγμάτων χόματος και ιπτάμενης τέφρας, για τα φωτόνια 46.52 keV του ^{210}Pb .

3.7.3 Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια

Για κάθε ένα από τα φάσματα που αναλύθηκαν, υπολογίστηκε η Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια (Minimum Detectable Activity, MDA), όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.10.3. Ο Πίνακας 3-14 περιλαμβάνει την Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια, υπολογισμένη κατά (Gilmore and Hemingway, 1995).

Γεωμετρία	MDA (Bq/kg), χώρα			MDA (Bq/kg), Ιπτάμενη Τέφρα	
	XtRa	XtRa-CSS	LEGe	XtRa	XtRa-CSS
A	38.88	30.09	41.41	52.72	46.79
B	25.73	20.96	31.77	44.02	37.83
Γ	19.58	17.42	23.96	39.46	34.51
Δ	28.75	26.07	31.98	44.93	39.75
E	13.58	12.39	18.20	26.00	22.66
ΣΤ	12.14	10.76	15.12	24.62	21.94
Z	13.58	12.05	15.89	26.73	23.42
H	12.39	11.37	21.08	27.12	23.83
Θ	10.81	9.70	14.93	21.67	18.88
I	13.64	12.52	11.52	20.10	17.65

Πίνακας 3-14: MDA κατά τη μεθοδολογία (Gilmore and Hemingway, 1995).

Ο Πίνακας 3-15 περιλαμβάνει την Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.10.3 (Luca, 2009).

Γεωμετρία	MDA (Bq/kg), χώρα			MDA (Bq/kg), Ιπτάμενη Τέφρα	
	XtRa	XtRa-CSS	LEGe	XtRa	XtRa-CSS
A	45.45	35.77	46.03	56.08	50.02
B	29.68	25.07	35.01	45.97	39.68
Γ	22.24	19.96	26.13	40.73	35.72
Δ	33.08	30.38	35.45	47.26	42.03
E	15.28	14.04	19.66	26.69	23.31
ΣΤ	13.39	11.95	16.19	25.20	22.49
Z	15.03	13.42	17.11	27.30	23.97
H	14.11	13.01	22.95	28.10	24.77
Θ	11.94	10.79	16.04	22.03	19.22
I	14.55	13.37	12.10	20.28	17.81

Πίνακας 3-15: MDA κατά τη μεθοδολογία (Luca, 2009), η οποία λαμβάνει υπ' όψιν τη συνεισφορά του διακριτού υποστρώματος.

3.7.4 Διορθώσεις απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης

Ο συντελεστής διόρθωσης απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης η υπολογίστηκε με δύο τρόπους για κάθε γεωμετρία-υλικό δείγματος, όπως αναφέρεται στις παραγράφους 3.5 και 3.6, με χρήση της ολοκληρωτικής μεθόδου (κυλινδρικές γεωμετρίες-πρόγραμμα factor) και με χρήση του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3-16.

Γεωμετρία	η-χώμα		η-Ιπτάμενη Τέφρα	
	PENELOPE	Ολοκληρωτική μέθοδος	PENELOPE	Ολοκληρωτική μέθοδος
A	0.89964	0.93897	0.80189	0.83312
B	0.92419	0.92893	0.80684	0.83751
Γ	0.84768	0.87621	0.75294	0.78139
Δ	0.89203	0.89759	0.79907	0.81718
E	0.93406	0.93886	0.82562	0.86046
ΣΤ	0.83370	0.87368	0.81862	0.84868
Z	0.86866	0.90169	0.76729	0.81395
H	0.93810	0.96777	0.86785	0.91668
Θ	0.93605	0.95709	0.86188	0.86977
I	0.88775	0.90069	0.80844	0.82040

Πίνακας 3-16: Συντελεστής η αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης.

3.8 Παραμετρική μελέτη των γεωμετριών

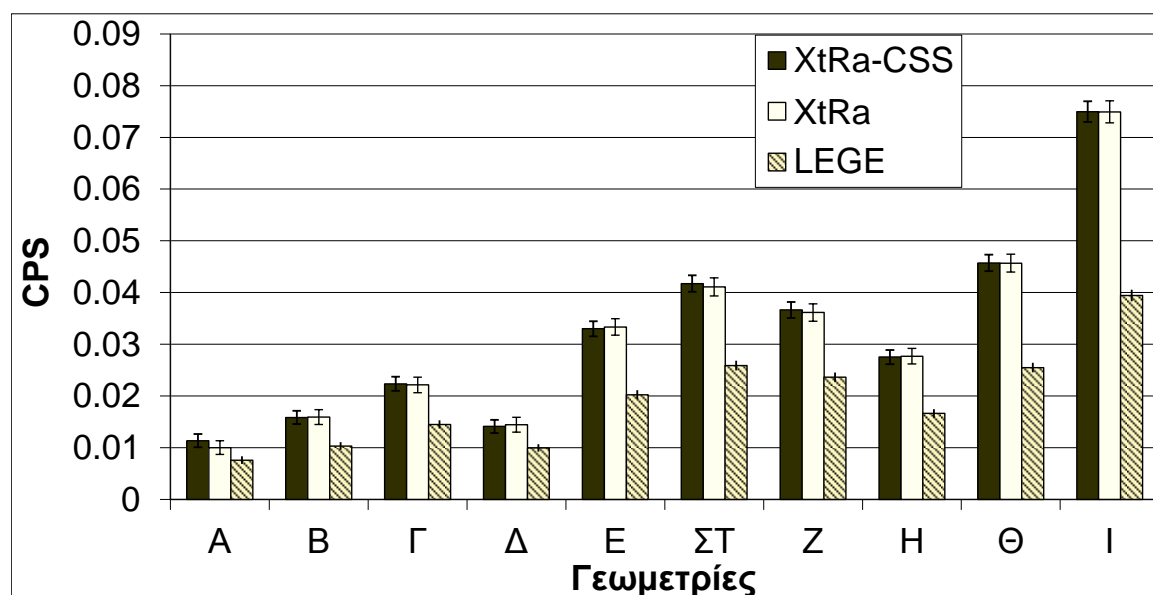
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η σύγκριση των μεγεθών που υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.7. Επειδή καμία από της γεωμετρίες δεν παρουσίασε τη βέλτιστη εικόνα σύμφωνα με όλα τα παραπάνω κριτήρια, στην παράγραφο 3.8.7 παρουσιάζεται η λογική επιλογής μίας από αυτές προς υιοθέτηση.

3.8.1 Σύγκριση γεωμετριών σε όρους ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων 46.52 keV

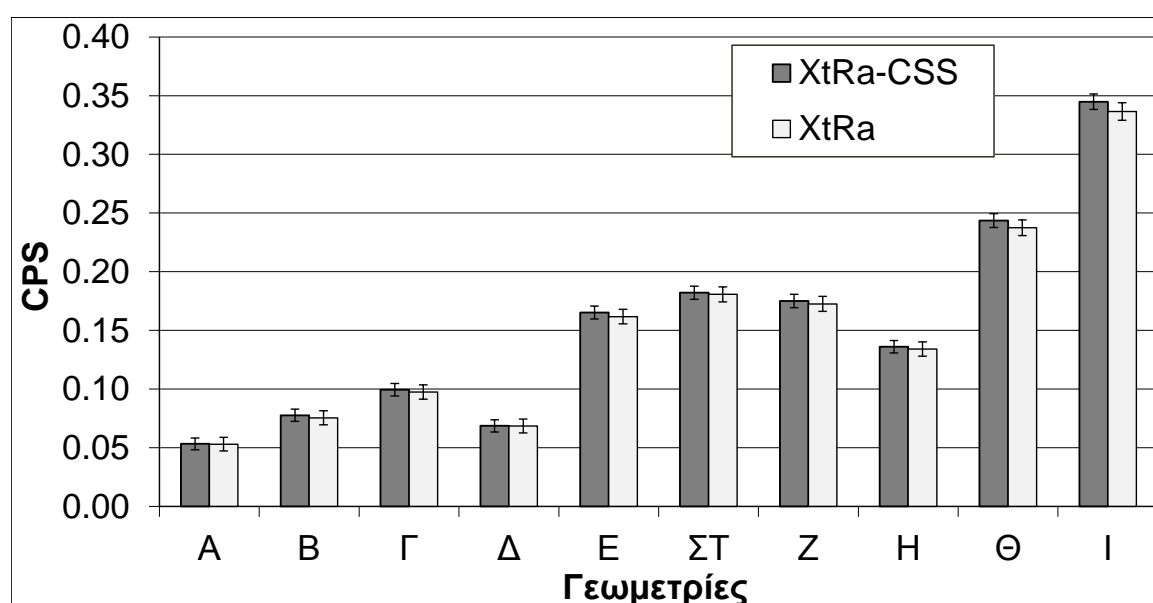
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των γεωμετριών σε όρους καθαρού ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων 46.52 keV, με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.7.1.

Από το Σχήμα 3-4, διαπιστώνεται ότι ο ανιχνευτής LEGE δίνει μικρότερο ρυθμό καταμέτρησης φωτονίων σε σχέση με τον ανιχνευτή XtRa-CSS. Αυτό συμβαίνει διότι ο LEGe έχει αρκετά μικρότερο πάχος κρυστάλλου Ge σε σχέση με τον XtRa (20 mm έναντι 78 mm, βλέπε ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α). Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν επηρέασε τα ποιοτικά συμπεράσματα που προέκυψαν σε αυτή τη συγκριτική μελέτη.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η γεωμετρία I, καθώς περιέχει σημαντικά μεγαλύτερη μάζα υλικού, παρουσιάζει το μεγαλύτερο ρυθμό καταμέτρησης εκ των δέκα δοχείων και για τα δύο υλικά δείγματος. Οι γεωμετρίες A-Δ που χρησιμοποιούν δοχεία καλλυντικών, παρουσιάζουν μικρότερους ρυθμούς καταμέτρησης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δοχεία. Οι γεωμετρίες E-Z κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα και για τα δύο υλικά. Η γεωμετρία H φαίνεται να παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη εικόνα ως προς το ρυθμό καταμέτρησης από τις γεωμετρίες A-Δ, ωστόσο τη χειρότερη από τα δοχεία E-I. Η γεωμετρία Θ αποτελεί τη δεύτερη καλύτερη ως προς τους ρυθμούς καταμέτρησης φωτονίων, με τη διαφορά από τις E-H να αυξάνεται στο δείγμα αυξημένης ραδιενέργειας της ιπτάμενης τέφρας.



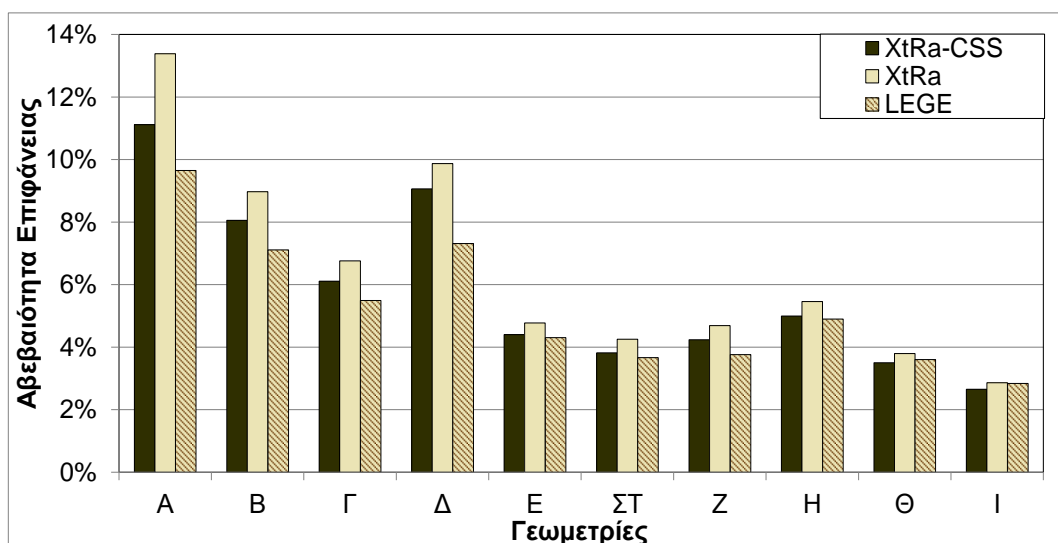
Σχήμα 3-4: Ρυθμός καταμέτρησης φωτοκορυφής ^{210}Pb (46.52 keV) στα δείγματα χρώματος.



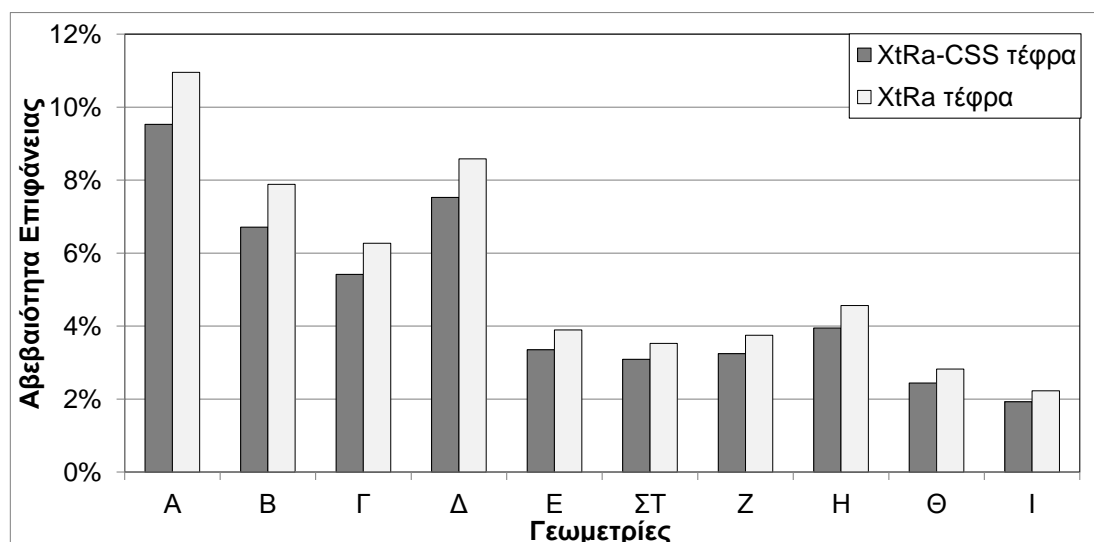
Σχήμα 3-5: Ρυθμός καταμέτρησης φωτοκορυφής ^{210}Pb (46.52 keV) στα δείγματα ιπτάμενης τέφρας

3.8.2 Σύγκριση γεωμετριών σε όρους σχετικής αβεβαιότητας επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{210}Pb

Για κάθε ένα από τα συλλεχθέντα φάσματα ο κώδικας SPUNAL εκτιμά και την αβεβαιότητα λόγω προσδιορισμού επιφάνειας για κάθε φωτοκορυφή. Στα Σχήματα 3-6 και 3-7, παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες καθαρής επιφάνειας του ανιχνευτή XtRa, με και χωρίς τη χρήση του συστήματος CSS, για τα δείγματα χώματος και ιπτάμενης τέφρας αντίστοιχα, με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασης του CSS στις αβεβαιότητες των διαφόρων γεωμετριών δείγματος. Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζονται επιπρόσθετα και οι αβεβαιότητες του ανιχνευτή LEGe για τα δείγματα χώματος.



Σχήμα 3-6: Σχετική αβεβαιότητα προσδιορισμού της φωτοκορυφής ^{210}Pb (46.52 keV) για τα δείγματα χώματος.



Σχήμα 3-7: Σχετική αβεβαιότητα προσδιορισμού της φωτοκορυφής ^{210}Pb (46.52 keV) για τα δείγματα ιπτάμενης τέφρας.

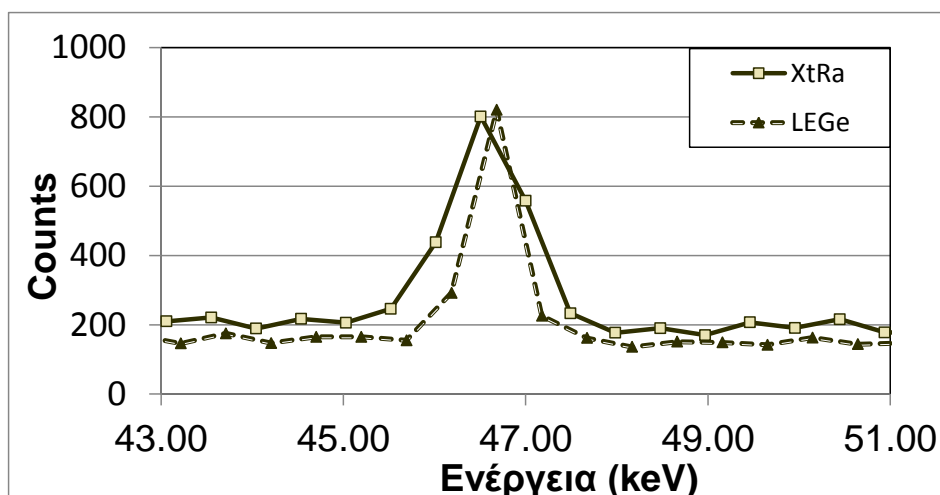
Από τα Σχήματα 3-6 και 3-7, διαπιστώνεται ότι οι γεωμετρίες Α-Δ έχουν σημαντικά υψηλότερες αβεβαιότητες από τις υπόλοιπες. Από τις ήδη χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες Θ και Ι, η χαμηλότερη αβεβαιότητα επιτυγχάνεται στη μεγαλύτερου όγκου γεωμετρία Ι. Από τις προτεινόμενες νέες γεωμετρίες, η χαμηλότερη αβεβαιότητα επιτυγχάνεται για τη γεωμετρία ΣΤ, αν και για όλες τις γεωμετρίες Ε-Η η αβεβαιότητα κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα.

Όπως αναμενόταν, τα δείγματα ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζουν χαμηλότερες αβεβαιότητες, καθ' ότι η μεγαλύτερη ραδιενέργειά τους συνεπάγεται και καλύτερη στατιστική για τον ίδιο χρόνο ανάλυσης στον ανιχνευτή ΧtRa. Παρατηρείται, επίσης, ότι για τα περισσότερα δείγματα χόματος, ο ανιχνευτής LEGe παρουσιάζει λίγο χαμηλότερες αβεβαιότητες από τον ανιχνευτή ΧtRa (με ή χωρίς χρήση του CSS), με τη διαφορά να είναι πιο αισθητή στα δοχεία καλλυντικών μικρής μάζας Α, Β, Δ. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι ο ανιχνευτής LEGe είναι μικρότερου πάχους, επομένως λιγότερα φωτόνια υψηλότερων ενεργειών του δείγματος αλληλεπιδρούν με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή σε σχέση με τον ανιχνευτή ΧtRa. Αυτό οδηγεί στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος στην περιοχή της φωτοκορυφής 46.5 keV, επομένως και μικρότερες αβεβαιότητες.

Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται η περιοχή της φωτοκορυφής αυτής, όπως προέκυψε από την ανάλυση του δείγματος χόματος γεωμετρίας Α στους ανιχνευτές ΧtRa και LEGe, για τον ίδιο χρόνο ανάλυσης (86400 sec). Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος συνδυασμός γεωμετρίας και ανιχνευτών, είναι ότι παρουσιάζουν την πιο έντονη διαφορά στην αβεβαιότητα καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής. Στον Πίνακα Πίνακας 3-17 παρουσιάζεται η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής του δείγματος χόματος γεωμετρίας Α για τους δύο ανιχνευτές, συνοδευόμενη από την αντίστοιχη επιφάνεια υποστρώματος κάτω από την φωτοκορυφή. Τα δεδομένα του πίνακα υπολογίστηκαν κατά τη μεθοδολογία (Gilmore and Hemingway, 1995).

Η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής του ΧtRa είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του LEGe (κατά 29.4%), λόγω του μεγαλύτερου πάχους κρυστάλλου Ge (βλέπε και παράγραφο 3.8.1). Ωστόσο, ο λόγος καθαρής επιφάνειας προς την επιφάνεια υποστρώματος είναι μικρότερος της μονάδας για τον ΧtRa και μεγαλύτερος της μονάδας για τον LEGe (βλέπε Πίνακα 3-17). Τελικά, παρότι ο ΧtRa υπερέχει σε όρους καθαρής φωτοκορυφής, παρουσιάζει επίσης υψηλότερο υπόστρωμα άρα και ελαφρώς μεγαλύτερη αβεβαιότητα σε σχέση με τον LEGe,

γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ανάλογα με τις ανάγκες ανάλυσης του εκάστοτε δείγματος.

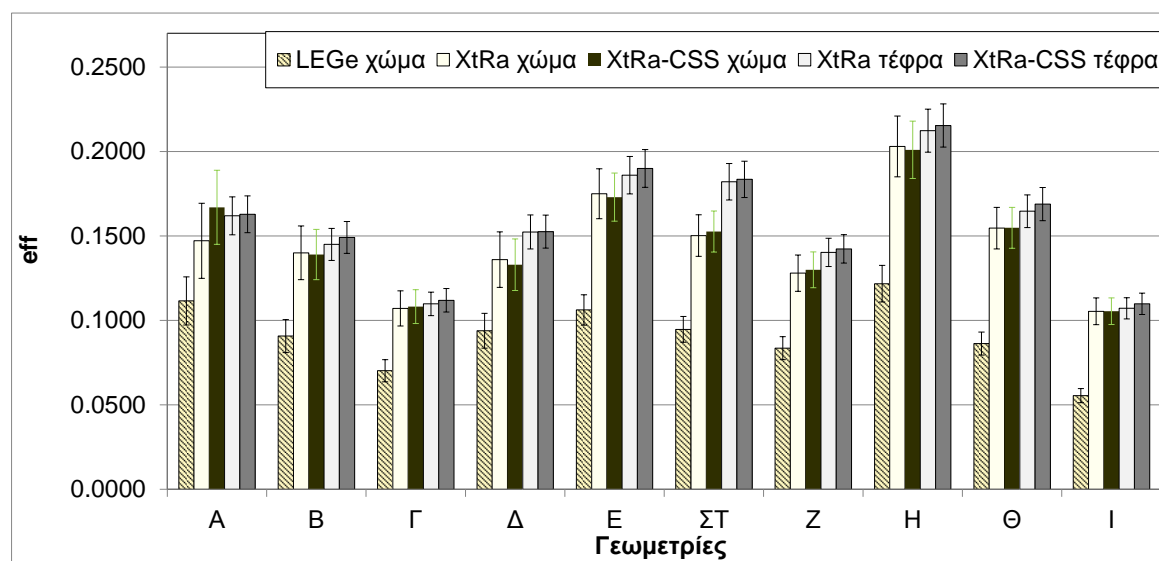


Σχήμα 3-8: Σύγκριση της περιοχής της φωτοκορυφής 46.52 keV για το ίδιο δείγμα, αναλυμένο στον ίδιο χρόνο στους ανιχνευτές XtRa και LEGe.

Ανιχνευτής	Καθαρή επιφάνεια	Επιφάνεια υποστρώματος
XtRa	1266	1393
LEGe	894	761

Πίνακας 3-17: Καθαρές επιφάνειες φωτοκορυφής για το δείγμα χρώματος σε γεωμετρία Α, κατά τη μεθοδολογία (Gilmore and Hemingway, 1995).

3.8.3 Σύγκριση πειραματικών αποδόσεων φωτοκορυφής για την ενέργεια των φωτονίων του ^{210}Pb (46.52 keV)



Σχήμα 3-9: Πειραματικός προσδιορισμός απόδοσης φωτοκορυφής για τα φωτόνια 46.52 keV (^{210}Pb).

Στο Σχήμα 3-9 παρατηρείται πως ο ανιχνευτής LEGe παρουσιάζει χαμηλότερες αποδόσεις σε όλες τις γεωμετρίες χώματος σε σχέση με τον ανιχνευτή XtRa (με ή χωρίς χρήση CSS), λογική απόρροια των χαμηλότερων ρυθμών καταμέτρησης. Οι ανιχνευτές XtRa και XtRa-CSS παρουσιάζουν παρεμφερείς τιμές και για τα δύο υλικά, οδηγώντας στα ίδια ποιοτικά συμπεράσματα για τη σχετική τάση των αποδόσεων των γεωμετριών. Σε κάθε περίπτωση, η υψηλότερη απόδοση παρουσιάζεται για τη γεωμετρία δείγματος H.

3.8.4 Σύγκριση πειραματικών αποδόσεων με τις προσομοιούμενες από Monte Carlo

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 2.9, υπολογίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής και μέσω του κώδικα PENELOPE για κάθε συνδυασμό δοχείου-δείγματος που προσομοιώθηκε. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η συγκριτική ανάλυση των διαφόρων γεωμετριών και όχι η βαθμονόμηση απόδοσης, επομένως η σύγκλιση των πειραματικών με τις προσομοιούμενες αποδόσεις φωτοκορυφής σε ποιοτικό επίπεδο θα αρκούσε. Ωστόσο, η περιγραφή του προβλήματος μέσω των αρχείων εισόδου, έγινε έτσι ώστε να είναι δυνατή σε κάποιο βαθμό και η σύγκριση πειραματικών και προσομοιούμενων τιμών της απόδοσης.

Ένας τρόπος με τον οποίο απαντάται το ερώτημα του αν δύο τιμές που αντιπροσωπεύουν το ίδιο μέγεθος (πχ απόδοση φωτοκορυφής ενός συγκεκριμένου συνδυασμού φωτοκορυφής-δοχείου-δείγματος) διαφέρουν, είναι ο στατιστικός έλεγχος U-test. Προϋπόθεση για την εκτέλεση αυτού του στατιστικού τεστ αποτελεί η γνώση των αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τις συγκρινόμενες τιμές. Τότε, ο συντελεστής U του στατιστικού τεστ υπολογίζεται όπως στη σχέση .

$$U = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (3-10)$$

όπου:

x_1, x_2 : η πρώτη και η δεύτερη συγκρινόμενη τιμή αντίστοιχα.

σ_1, σ_2 : το απόλυτο σφάλμα της πρώτης και της δεύτερης τιμής αντίστοιχα.

Η σύγκριση γίνεται με τις εξής οριακές τιμές του συντελεστή U (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%):

$U < 1.96$ στατιστικά ασήμαντη διαφορά.

$U > 2.57$ στατιστικά σημαντική διαφορά.

$1.96 \leq U \leq 2.57$ περιοχή αβεβαιότητας.

Οι Πίνακες 3-18 και 3-19 περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα του U-test για τις πειραματικές και τις προσομοιούμενες τιμές της απόδοσης, για τα δείγματα χρώματος και ιπτάμενης τέφρας αντίστοιχα. Παρατηρείται πως σε όλα τα ζεύγη γεωμετρίας-υλικού δείγματος, ο συντελεστής U προκύπτει μικρότερος του 1.96. Επομένως οι τιμές πειράματος-προσομοίωσης δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Οι σχετικές αβεβαιότητες των Πινάκων 3-18 και 3-19, περιλαμβάνουν τόσο το τυχαίο σφάλμα, όπως προκύπτει από το σχετικό αρχείο εξόδου του κώδικα PENELOPE, όσο και μια τυπική συστηματική αβεβαιότητα μοντέλου προσομοίωσης 2% όπως προτείνεται στη Δ.Ε. (Σάββα, 2009).

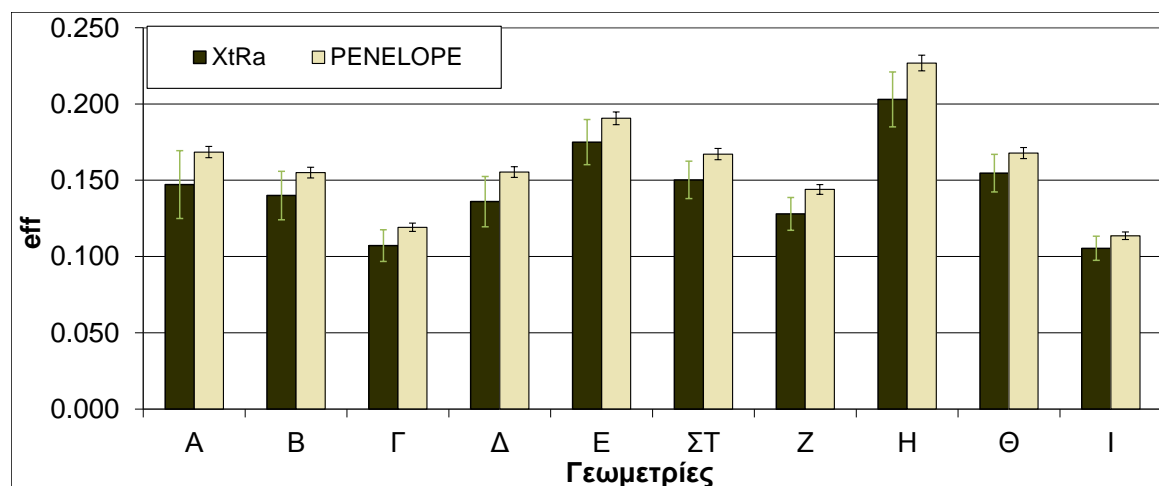
Γεωμετρία	eff _{PENELOPE} ±αβεβαιότητα (1σ)	eff _{XiRa} ±αβεβαιότητα (1σ)	% απόκλιση πειράματος- PENELOPE	U-test
A	0.1685 ±2.22%	0.1472 ±15.10%	-14.5	0.96
B	0.1550 ±2.23%	0.1400 ±11.37%	-10.7	0.94
Γ	0.1192 ±2.31%	0.1071 ±9.73%	-11.2	1.14
Δ	0.1554 ±2.23%	0.1360 ±12.11%	-14.3	1.17
E	0.1906 ±2.18%	0.1750 ±8.45%	-8.9	1.05
ΣΤ	0.1671 ±2.21%	0.1502 ±8.18%	-11.3	1.36
Z	0.1440 ±2.24%	0.1280 ±8.40%	-12.5	1.47
H	0.2268 ±2.26%	0.2030 ±8.87%	-11.7	1.31
Θ	0.1678 ±2.16%	0.1547 ±7.95%	-10.3	1.02
I	0.1136 ±2.16%	0.1054 ±7.55%	-3.5	0.99

Πίνακας 3-18: Τιμές απόδοσης προσομοίωσης χρώματος για τις 10 γεωμετρίες και σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές.

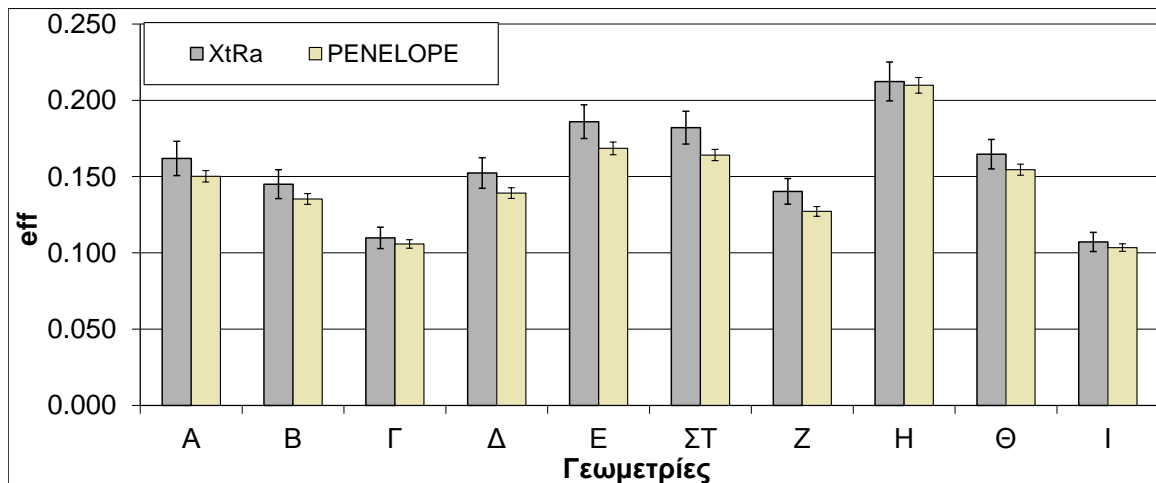
Γεωμετρία	eff _{PENELOPE} ±αβεβαιότητα (1σ)	eff _{XtRa} ±αβεβαιότητα (1σ)	% απόκλιση πειράματος- PENELOPE	U-test
A	0.1502 ±2.24%	0.1619 ±6.95%	7.3	1.04
B	0.1353 ±2.28%	0.1450 ±6.54%	6.7	1.01
Γ	0.1058 ±2.17%	0.1098 ±6.35%	3.6	0.56
Δ	0.1392 ±2.28%	0.1524 ±6.59%	8.6	1.30
E	0.1685 ±2.21%	0.1860 ±5.96%	9.4	1.56
ΣΤ	0.1641 ±2.21%	0.1821 ±5.92%	9.9	1.65
Z	0.1272 ±2.27%	0.1403 ±5.98%	9.4	1.54
H	0.2098 ±2.27%	0.2123 ±6.02%	1.2	0.19
Θ	0.1545 ±2.16%	0.1646 ±5.86%	7.2	0.99
I	0.1035 ±2.18%	0.1072 ±5.82%	10.1	0.56

Πίνακας 3-19: Τιμές απόδοσης προσομοίωσης ιπτάμενης τέφρας για τις 10 γεωμετρίες και σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές.

Στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής όπως προέκυψαν πειραματικά από τις αναλύσεις του ανιχνευτή XtRa, σε σύγκριση με τις τιμές που προέκυψαν από την αντίστοιχη προσομοίωση, για το υλικό χρώματος. Για την ιπτάμενη τέφρα η εικόνα είναι παρεμφερής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11, με τη διαφορά ότι η απόδοση από PENELOPE προκύπτει μικρότερη από την πειραματική, για όλες τις γεωμετρίες.



Σχήμα 3-10: Απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια 46.52 keV (²¹⁰Pb), πειραματικά και με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo PENELOPE, για υλικό χρώμα.



Σχήμα 3-11: Απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια 46.52 keV (^{210}Pb), πειραματικά και με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo PENELOPE, για υλικό ιπτάμενη τέφρα..

Όπως αναφέρθηκε στις παραγράφους 3.2 και 3.3, υπήρξε προσπάθεια προσέγγισης των πειραματικών υλικών δειγμάτων με συστάσεις βασισμένες σε αυτές της βιβλιογραφίας, καθώς και η πληρέστερη δυνατή περιγραφή της γεωμετρίας του ανιχνευτή και του αναλυόμενου δείγματος. Οι αποκλίσεις της πειραματικής απόδοσης από την προσομοιούμενη κινούνται στο εύρος -14.5% με 1.2%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μοντελοποίηση, παρότι επαρκής για τους στόχους της παρούσης Δ.Ε., δεν ήταν ιδανική.

Τυπικά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο τρόπος βελτιστοποίησης της προσομοίωσης ώστε να προσεγγίζει ορθότερα το πείραμα, περιλαμβάνει τροποποιήσεις στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή που περιέχονται στα των αρχεία εισόδου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ πειραματικής και προσομοιούμενης τιμής της απόδοσης. Μια από τις πηγές αβεβαιότητας που δεν λήφθηκαν υπ' όψιν στην τελική αβεβαιότητα των αποδόσεων μέσω της προσομοίωσης, είναι τα πάχη των νεκρών ζωνών (dead layers), τα οποία προσδιορίζονται μέσω επαναληπτικής μεθόδου όπως περιγράφεται στη Δ.Ε. (Βασιλοπούλου, 2008). Η εύρεση του πάχους νεκρής ζώνης αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία, η οποία θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί για όλες τις γεωμετρίες, μέχρι να μειωθεί στο ελάχιστο η απόκλιση της απόδοσης φωτοκορυφής από το πείραμα. Στο αρχείο γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε το πάχος της εμπρόσθιας νεκρής ζώνης ισούται με 0.4 μm , ενώ της περιφερειακής νεκρής ζώνης 200 μm .

Καθώς η σύσταση των προσομοιούμενων υλικών δοχείων/δειγμάτων αποτελεί προσέγγιση και δε στηρίζεται σε χημικό προσδιορισμό της πραγματικής σύστασης, θεωρήθηκε άσκοπο να προσδιοριστεί το πάχος των dead layers με λεπτομέρεια, από

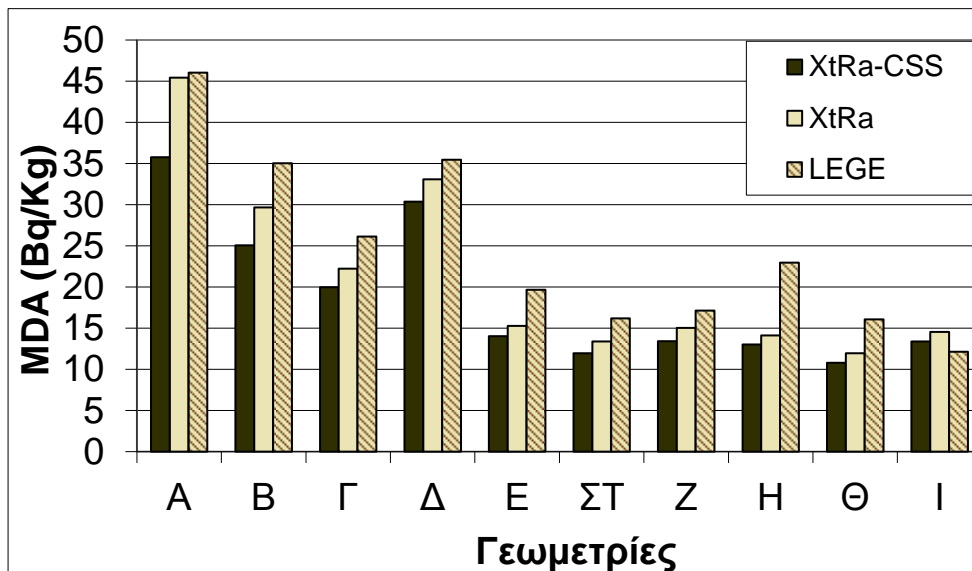
τη στιγμή που ήδη ο παράγοντας της σύστασης των υλικών (προσομοιούμενων και πειραματικών) αποτελεί πιθανότερη εξήγηση του ότι συστηματικά οι πειραματικές τιμές απόδοσης υπολείπονται της προσομοίωσης για υλικό χώματος, ενώ συμβαίνει το αντίστροφο για υλικό ιπτάμενης τέφρας.

Το ασφαλές συμπέρασμα που τελικά εξάγεται από την παράλληλη εύρεση απόδοσης φωτοκορυφής μέσω πειράματος και Monte Carlo, είναι ότι η σχετική τάση των αποτελεσμάτων των αποδόσεων για το σύνολο των γεωμετριών είναι παρόμοια μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση που δεν ήταν δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός της απόδοσης, η προσομοίωση θα οδηγούσε σε ορθή ποιοτικά σύγκριση μεταξύ των γεωμετριών.

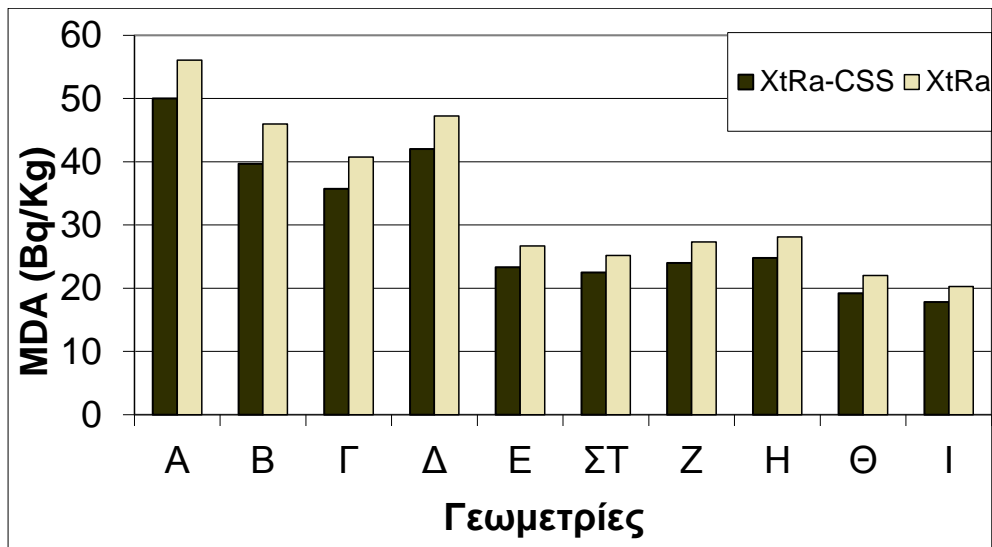
3.8.5 Σύγκριση γεωμετριών σε όρους Κατώτερης Ανιχνεύσιμης Ραδιενέργειας

Στα Σχήματα 3-12 και 3-13 παρουσιάζονται οι τιμές MDA για τα δείγματα χώματος και ιπτάμενης τέφρας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνεισφορά του υποστρώματος κατά τη μεθοδολογία (Luca, 2009). Έχουν περιληφθεί για λόγους σύγκρισης οι τιμές του MDA που προκύπτουν από τον ανιχνευτή XtRa για υλικό χώμα και ιπτάμενη τέφρα, με και χωρίς τη χρήση του συστήματος CSS.

Όπως διαπιστώνεται, σε όλες τις περιπτώσεις το MDA του ανιχνευτή XtRa είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο MDA που εκτιμήθηκε με τη χρήση του CSS. Επιπλέον, στο Σχήμα 3-12 έχει περιληφθεί και η τιμή του MDA που προκύπτει από τις μετρήσεις στον ανιχνευτή LEGe, η οποία επίσης σε κάθε περίπτωση είναι υψηλότερη από αυτήν που προσδιορίστηκε για τα φάσματα με τον ανιχνευτή XtRa-CSS. Προκύπτει επομένως ότι η βέλτιστη ανίχνευση χαμηλών επιπέδων ^{210}Pb επιτυγχάνεται από τον ανιχνευτή XtRa με χρήση του συστήματος CSS, ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία. Όσον αφορά στις διάφορες γεωμετρίες, διαπιστώνεται ότι η χαμηλότερη τιμή του MDA προέκυψε για τη γεωμετρία I, που είναι όμως αυτή με τον υψηλότερο όγκο δείγματος.



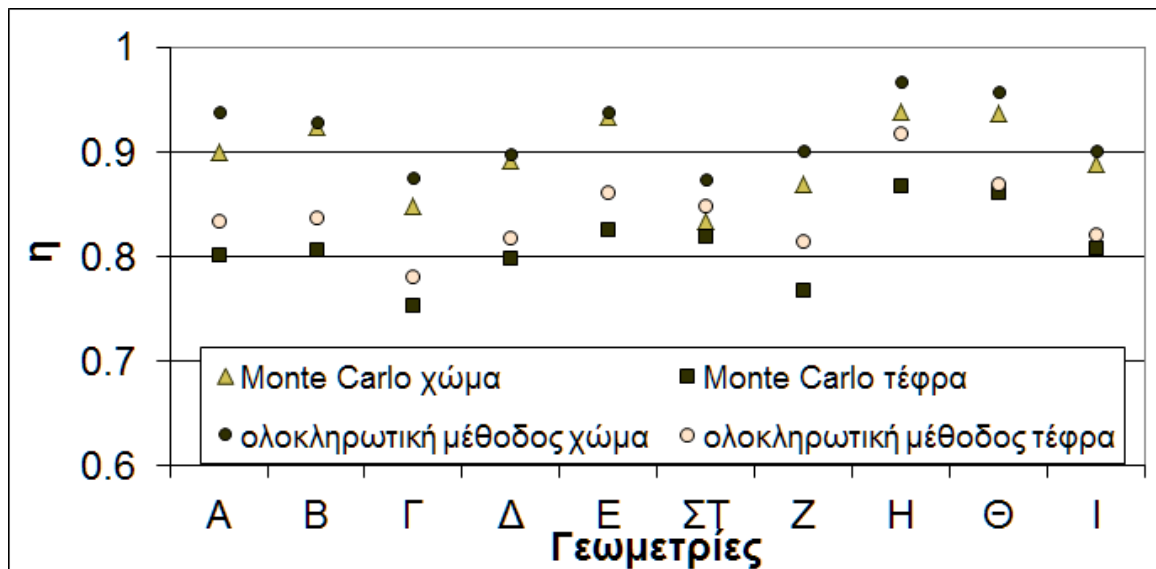
Σχήμα 3-12: MDA δειγμάτων χώματος.



Σχήμα 3-13: MDA δειγμάτων τέφρας.

3.8.6 Σύγκριση γεωμετριών σε όρους διόρθωσης απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης

Στο Σχήμα 3-14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , λόγω αυτοαπορρόφησης για χώμα και για τέφρα, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση Monte Carlo και το πρόγραμμα factor. Οι όποιες διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων προσδιορισμού του συντελεστή αναγωγής θα πρέπει να αποδίδονται στο γεγονός ότι, αφενός μεν αποτελούν προσεγγιστικές μεθόδους, αφετέρου τα υλικά στο πείραμα και την προσομοίωση δεν είναι τα ίδια.



Σχήμα 3-14: Συντελεστής αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης.

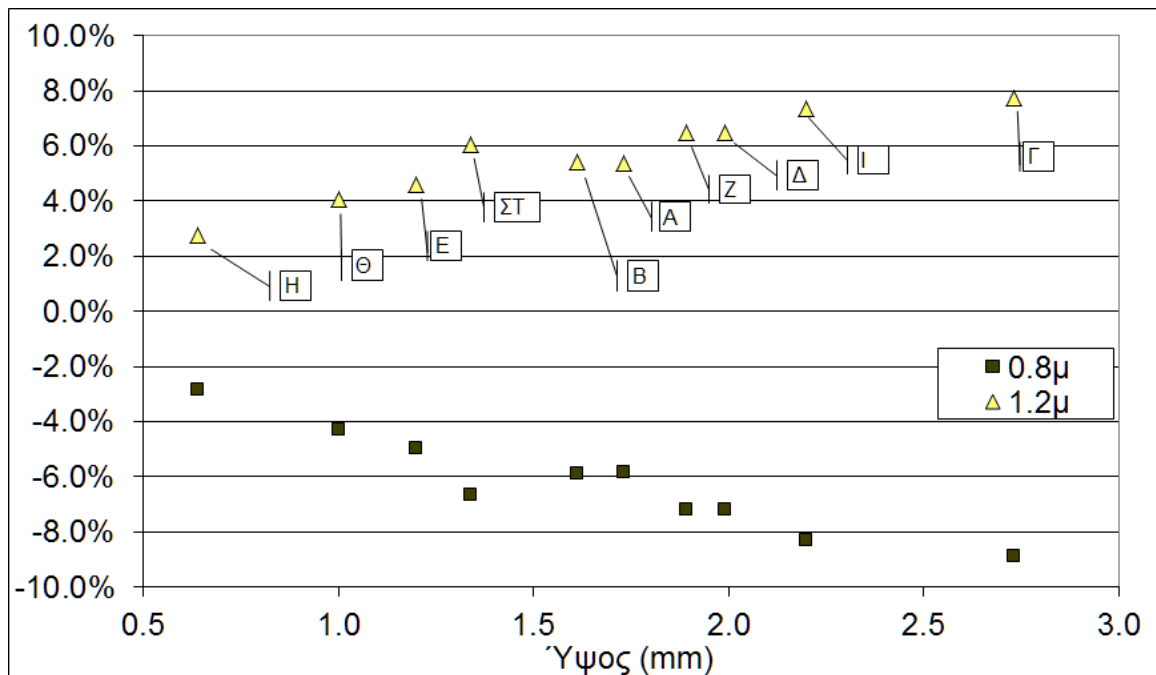
Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η , τόσο μικρότερη η διόρθωση της απόδοσης που απαιτείται για τις συγκεκριμένες συνθήκες ανάλυσης (ενέργεια, γεωμετρία, υλικό πηγής και δείγματος). Αυτό είναι επιθυμητό, διότι μικρότερη διόρθωση οδηγεί και σε χαμηλότερες αβεβαιότητες του ίδιου του συντελεστή.

Σε κάθε περίπτωση, η υψηλότερη τιμή του συντελεστή διόρθωσης (πιο κοντά στη μονάδα), παρουσιάζεται στη γεωμετρία Η.

Επιπρόσθετα με την εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η όπως φαίνεται παραπάνω, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας αυτού, με χρήση του προγράμματος factor. Εκτός από τις τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης που προέρχονται από την εκτίμηση της σύστασης χώματος/τέφρας που εισήχθησαν στον κώδικα PENELOPE, στο πρόγραμμα factor εισήχθησαν και τιμές που διαφέρουν κατά $\pm 20\%$ από τις τιμές αυτές. Στο Σχήμα 3-15, φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, ως προς το ύψος των δοχείων. Ο λόγος για τον οποίο κρίθηκε σκόπιμη αυτή η ανάλυση, είναι το υπαρκτό πρόβλημα της έντονης διαφοροποίησης που μπορεί να παρουσιάζει ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης η , ακόμα και όταν αναλύονται δείγματα από το ίδιο υλικό (π.χ. χώματα με διαφορετική προέλευση), ή το ίδιο το υλικό συσκευασμένο με λίγο διαφορετική πυκνότητα. Ουσιαστικά αποτελεί μια επιβεβαίωση του ότι οι γεωμετρίες με χαμηλό ύψος, άρα και χαμηλή αυτοαπορρόφηση, επηρεάζονται λιγότερο από το υλικό του δείγματος. Στο Σχήμα 3-15, ο άξονας τν τεταγμένων αντιστοιχεί στο μέγεθος:

$$\frac{\eta_{\mu} - \eta_{\mu \pm 20\%}}{\eta_{\mu}} (\%) \quad (3-11)$$

Όπως ήταν αναμενόμενο, η γεωμετρία χαμηλότερου ύψους παρουσιάζει και μικρότερη αλλαγή στη τιμή του συντελεστή αναγωγής απόδοσης (τιμές πιο κοντά στην ευθεία $y=0\%$), για την ίδια κατ' απόλυτο τιμή μεταβολή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης



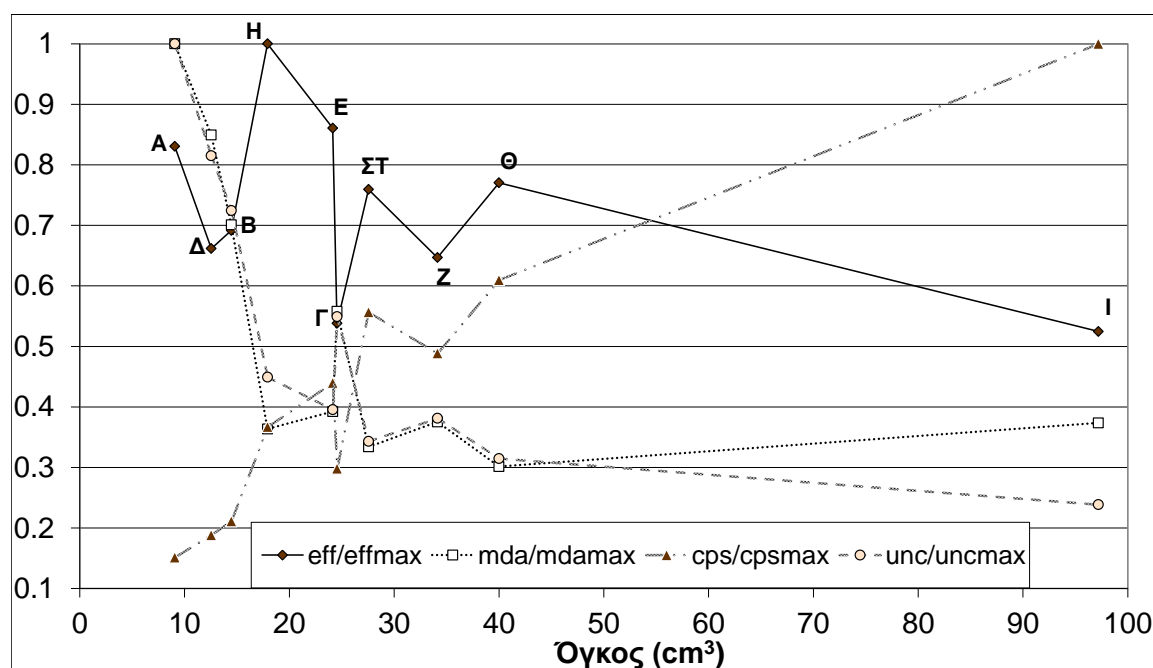
Σχήμα 3-15: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, για υλικό «τυπικό χρώμα».

3.8.7 Συμπεράσματα

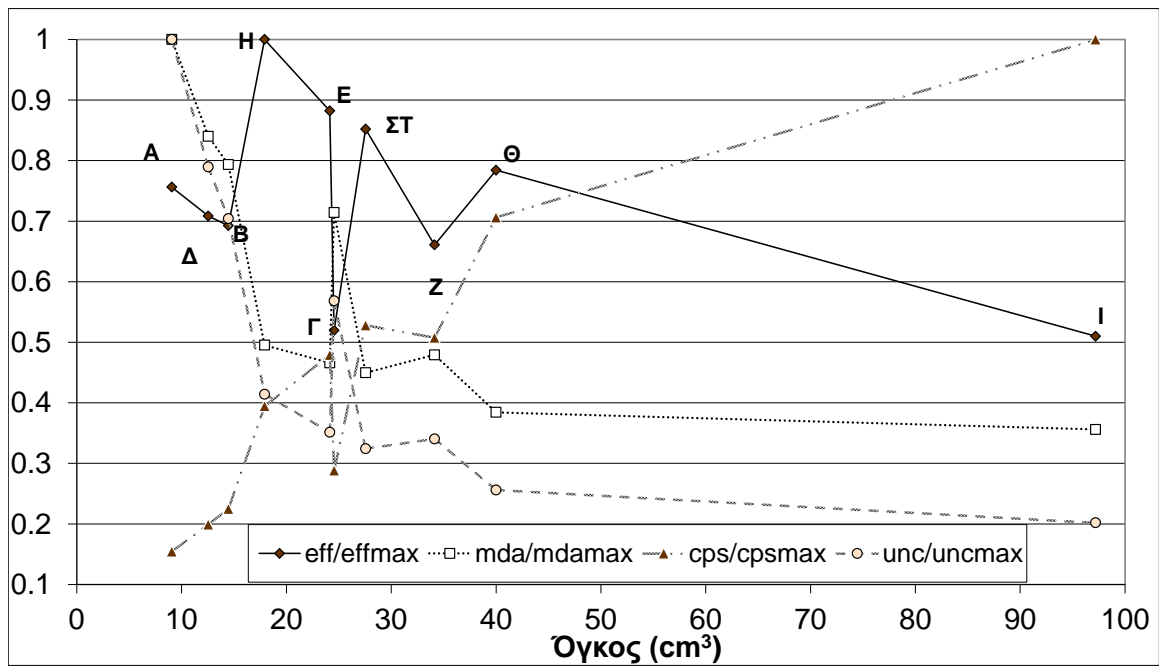
Στα Σχήματα 3-16 και 3-17 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα μεγέθη που μελετήθηκαν για το δείγμα χρώματος και το δείγμα ιπτάμενης τέφρας, κανονικοποιημένα ως προς τις μέγιστες τιμές τους, σε σχέση με τον όγκο του δοχείου. Τα παρακάτω σχόλια ισχύουν και για τα δύο σχήματα, επομένως και για τα δύο υλικά, καθώς παρουσιάζουν παρεμφερείς εικόνες. Παρατηρείται ότι – όπως ήταν αναμενόμενο – η γεωμετρία που περιέχει τη μεγαλύτερη μάζα χρώματος (I) έχει και τον καλύτερο ρυθμό καταμέτρησης (cps) και επομένως τη μικρότερη αβεβαιότητα. Ωστόσο, η καλύτερη απόδοση προσδιορισμού φωτοκορυφής επιτυγχάνεται στη σχετικά μικρού όγκου γεωμετρία Η.

Από άποψη MDA διαπιστώνεται, κατ' αρχήν, ότι τα δοχεία A-Δ δίνουν υψηλότερες τιμές από τα δοχεία E-I. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το δοχείο Γ εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερη απόδοση και αυξημένο MDA σε σχέση με τα παραπλήσιου όγκου δοχεία E και ΣΤ. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το δοχείο Γ έχει μεγαλύτερο ύψος από τα E, ΣΤ, γεγονός που επιδρά αρνητικά στην απόδοση φωτοκορυφής για γεωμετρικούς λόγους.

Τα MDA των γεωμετριών E-I είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν και την απαιτούμενη ποσότητα δείγματος για την πλήρωση του δοχείου, το δοχείο Η σαφώς πλεονεκτεί, αφού επιτυγχάνει συγκρίσιμο MDA με τα πολύ μεγαλύτερου όγκου δοχεία Θ, Ι. Εξετάζοντας παράλληλα το Σχήμα 3-14, διαπιστώνεται ότι το δοχείο Η εμφανίζει τον πλησιέστερο στη μονάδα συντελεστή διόρθωσης αυτοαπορρόφησης, γεγονός που είναι θετικό, καθώς μικρότερο ποσοστό φωτονίων ενέργειας 46.52 keV απορροφώνται μέσα στο δείγμα και επιπλέον, η επίδραση της αβεβαιότητας του συντελεστή διόρθωσης είναι μικρότερη στο τελικό αποτέλεσμα. Συγκρίνοντας τις δύο μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γεωμετρίες Θ και Ι, διαπιστώνεται ότι, αν και η Ι επιτυγχάνει σαφώς μεγαλύτερο ρυθμό καταμέτρησης και σχετικά χαμηλότερη αβεβαιότητα, τελικά δεν υπερτερεί σημαντικά σε όρους MDA. Η επιλογή της Ι έναντι της Θ συνεπάγεται αύξηση του όγκου δειγματοληψίας από τα 40.0 cm³ στα 97.2 cm³, αλλά μείωση του MDA κατά μόνο ~20%. Επομένως, δεν θεωρείται δικαιολογημένη στις περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητός μικρός όγκος δειγματοληψίας.



Σχήμα 3-16: Σύγκριση των εξεταζόμενων μεγεθών ως προς τον όγκο για το δείγμα χώματος.



Σχήμα 3-17: Σύγκριση των εξεταζόμενων μεγεθών ως προς τον όγκο για το δείγμα ιπτάμενης τέφρας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, από τις νέες γεωμετρίες που εξετάστηκαν, προτείνεται για υιοθέτηση η γεωμετρία Η, καθώς επιτυγχάνει υψηλή απόδοση και χαμηλό MDA, με σημαντική μείωση στον όγκο του δείγματος στα 17.9 cm³, σε σχέση με τη μέχρι τώρα μικρότερη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία όγκου 40.0 cm³. Όσον αφορά στην αβεβαιότητα κατά τον προσδιορισμό του ²¹⁰Pb η γεωμετρία αυτή είναι συγκρίσιμη με τις γεωμετρίες Ε, ΣΤ και Ζ που έχουν παραπλήσιο όγκο.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παραμετρική μελέτη των γεωμετριών, όπως παρατέθηκαν στο τέλος του Κεφαλαίου 3, οδήγησαν στην πρόταση υιοθεσίας νέας γεωμετρίας για τις αναλύσεις του ^{210}Pb σε δείγματα χώματος. Συγκεκριμένα, προτάθηκε υιοθέτηση της γεωμετρίας Η, η οποία απαρτίζεται από καπάκι πλαστικού τρυβλίου, το οποίο σφραγίζεται με πλακίδιο από plexiglass 1 mm και σιλικόνη.

Για να γίνει υιοθέτηση μιας νέας γεωμετρίας, είναι απαραίτητη η διάθεσή της σε μεγάλες ποσότητες στο εμπόριο. Σημειώνεται πως, από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, ακόμα και αν η ονομαστική διάμετρος του κυρίως δοχείου του τρυβλίου είναι η ίδια, τίποτε δε διασφαλίζει ότι το καπάκι – το οποίο εν τέλει ενδιαφέρει – θα έχει την ίδια ονομαστική διάμετρο. Αυτό συμβαίνει διότι η πρωταρχική χρήση των τρυβλίων σε μικροβιολογικές/χημικές εφαρμογές, δεν απαιτεί κάποιου είδους αυστηρή συναρμογή. Πρακτικά το καπάκι ακουμπάει χαλαρά στο πάνω χείλος του κυρίως δοχείου.

Αφού εξήχθησαν τα συμπεράσματα της παραμετρικής μελέτης, διαπιστώθηκε ότι το ακριβές τρυβλίο του οποίου το καπάκι αποτελεί τη νέα γεωμετρία προς υιοθέτηση δεν ήταν διαθέσιμο από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, ήταν διαθέσιμος ένας τύπος τρυβλίου με πολύ κοντινές διαστάσεις. Οι ονομαστικές διαστάσεις του κυρίως δοχείου αυτού του τύπου τρυβλίου όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, δεν αποκλίνουν σημαντικά σε σχέση με το αντίστοιχο τρυβλίο που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραμετρική μελέτη. Επομένως, θεωρήθηκε πως επίσης τα καπάκια τους δε θα αποκλίνουν διαστασιολογικά τόσο που να ακυρώνουν τα ποιοτικά συμπεράσματα και τα ωφέλη υιοθέτησης.

Τα δοχεία που ήταν διαθέσιμα στο εμπόριο εν τέλει αγοράστηκαν. Ο Πίνακας 4-1 περιέχει τις διαστάσεις του κυρίως δοχείου (από κατασκευαστή), του καπακιού (μέτρηση με παχύμετρο) και τον όγκο (μέτρηση με απιονισμένο νερό). Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται το δοχείο, το καπάκι του οποίου θα αποτελεί τη νέα γεωμετρία του εργαστηρίου.

Τμήμα δοχείου	Μέση ακτίνα (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm ³)
Κυρίως δοχείο	2.75	1.4	26.8
Καπάκι	2.80	0.76	18.40

Πίνακας 4-1: Διαστάσεις κυρίως δοχείου και καπακιού τρυβλίου.



Σχήμα 4-1: Ένα τεμάχιο από τα δοχεία που αγοράστηκαν.

Το επόμενο βήμα ήταν η χρήση της νέας γεωμετρίας για κατά βάθος αναλύσεις ^{210}Pb σε μια τυπική δειγματοληψία χώματος. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Οι ενέργειες που έγιναν ήταν οι ακόλουθες:

- Εκτιμήθηκε ο αριθμός των σημείων σε μια θέση δειγματοληψίας, τα οποία απαιτούνται για τα τη συλλογή της επιθυμητής ποσότητας χώματος για ένα κατά βάθος δείγμα. Με άλλα λόγια, πόσες φορές θα πρέπει να εισέλθει ο δειγματολήπτης στο έδαφος σε μία θέση.
- Ακολούθησε η δειγματοληψία όπως περιγράφεται στη Δ.Ε. (Πετροβίτσος 2011).
- Έγινε κατανομή της συλλεχθείσας ποσότητας χώματος στα επιμέρους δείγματα για κάθε βάθος.
- Συσκευάστηκαν τα δείγματα χώματος στη νέα γεωμετρία.
- Αναλύθηκαν τα δείγματα στον ανιχνευτή LEGe⁵.
- Υπολογίστηκαν οι ραδιενέργειες των ισοτόπων ^{210}Pb , ^{226}Ra και ^{234}Th για κάθε δείγμα χώματος που λήφθηκε προκειμένου να γίνει η σύγκριση των κατακόρυφων προφίλ των ισοτόπων αυτών με το προφίλ του ^{210}Pb . Αυτό προϋποθέτει τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή LEGe για τη νέα γεωμετρία για τις ενέργειες φωτονίων που εκπέμπουν αυτά τα ισότοπα.

⁵ Όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η γεωμετρία δείγματος που επιλέχθηκε είναι η βέλτιστη και μπορεί πολύ αποτελεσματικά να χρησιμοποιηθεί και στον ανιχνευτή LEGe, αν και αυτός υστερεί ελαφρά έναντι του ανιχνευτή XtRa σε όρους απόδοσης και κατώτερου επίπεδου ανίχνευσης για τον ^{210}Pb

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι ενέργειες που έγιναν και γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη χρήση της συγκεκριμένης γεωμετρίας, καθώς και προτάσεις για βελτίωση σε οποιοδήποτε βήμα της όλης διαδικασίας.

Το χρονοδιάγραμμα χρήσης των ανιχνευτών του ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν επέτρεψε τη χρήση του XtRa σε αυτή τη σειρά αναλύσεων, επομένως χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής LEGe. Σημειώνεται επίσης, πως ο ποσοτικός προσδιορισμός του ^{226}Ra έγινε μέσω του βραχύβιου θυγατρικού του ^{214}Bi ($T_{1/2}=19.8$ λεπτά), με τα δύο ισότοπα να θεωρούνται ότι βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία.

4.1 Δειγματοληψία χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και συσκευασία δειγμάτων στη νέα γεωμετρία

Έπειτα από κατάλληλη προετοιμασία του σχετικού εξοπλισμού, έγινε δειγματοληψία χώματος κατά βάθος, από 2 σημεία μιας θέσης εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, σύμφωνα με τη μέθοδο δειγματοληψίας κατά κατακόρυφου προφίλ χώματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πετροβίτσος, 2011). Στη συνέχεια, το χώμα αυτό διαιρέθηκε με βήμα 2 cm κατά βάθος. Η πρώτη δειγματοληψία έγινε έως βάθους 26 cm, ενώ η δεύτερη ως 24 cm. Η διαφορά στα δύο βάθη δειγματοληψίας οφείλεται στο γεγονός ότι ο δειγματολήπτης εισάγεται στο έδαφος με τη βοήθεια βαριοπούλας, επομένως το τελικό βάθος δεν είναι ακριβώς το ίδιο. Σε κάθε περίπτωση όμως λαμβάνονται τουλάχιστον 20 cm από κάθε εισαγωγή του δειγματολήπτη. Οι ποσότητες χώματος από κάθε βήμα και κάθε εισαγωγή δειγματολήπτη συσκευάστηκαν ξεχωριστά επιτόπου σε πλαστικές σακούλες, με σκοπό τη μεταφορά τους στο εργαστήριο. Έτσι, συλλέχθηκαν 2 κατά βάθος σετ δειγμάτων χώματος, ένα για κάθε εισαγωγή του δειγματολήπτη. Ο λόγος που επιλέχθηκε να ληφθούν δύο κατά βάθος δείγματα, είναι ο έλεγχος του κατά πόσο τα τελικά αποτελέσματα των ραδιενεργειών των ισοτόπων συμφωνούν μεταξύ δύο σημείων της ίδιας θέσης που θεωρητικά θα πρέπει να παρουσιάζουν την ίδια εικόνα μεταξύ τους.

Μέρος της προετοιμασίας των δειγμάτων αποτελεί και η ξήρανση των δειγμάτων χώματος. Η ξήρανση αυτή έγινε σε δύο φάσεις. Αρχικά, τα δείγματα χώματος απλώθηκαν ξεχωριστά ανάλογα με το κατά βάθος βήμα στο οποίο ανήκαν και αφέθηκαν σε επαφή με τον αέρα περίπου 7 μέρες σε θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα, τα δείγματα πέρασαν από κόσκινο 2 mm. Στην αρχή κοσκινίστηκαν ως έχουν,

επομένως συλλέχθηκε μια ωφέλιμη ποσότητα κόκκων ≤ 2 mm. Καθώς παρατηρήθηκε ότι στο κλάσμα >2 mm υπήρχαν αρκετά συσσωματώματα χώματος που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, έγινε προσεκτικό σπάσιμο αυτών με γουδί, και η ποσότητα αυτή περάστηκε ξανά από κόσκινο, με σκοπό να προστεθεί στην ωφέλιμη ποσότητα του πρώτου κοσκινίσματος.

Η δεύτερη φάση περιλάμβανε την ξήρανση σε φούρνο για 24 ώρες, στους 60°C, με σκοπό τον προσδιορισμό της υγρασίας. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ο προσδιορισμός της υγρασίας γίνεται συνήθως σε ειδικό ζυγό προσδιορισμού υγρασίας, με χρήση ποσότητας 10g του δείγματος χώματος, η οποία δε συσκευάζεται στην τελική γεωμετρία. Ωστόσο, λόγω του συνδυασμού της μικρής συλλεχθείσας ποσότητας χώματος και του μικρού όγκου γεωμετρίας, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε αδυναμία πλήρωσης δοχείων των δειγμάτων. Επομένως, έγινε ξήρανση ολόκληρης της ποσότητας κάθε βήματος βάθους δείγματος. Μετρήθηκαν τα μεικτά και υπολογίστηκαν τα καθαρά βάρη για κάθε δείγμα σε όλα τα στάδια αυτής της διαδικασίας, με σκοπό τον προσδιορισμό της υγρασίας και των καθαρών ξηρών και νωπών μαζών συσκευασίας. Συγκεκριμένα ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Ζυγίστηκαν τα απόβαρα των δοχείων στα οποία τοποθετήθηκε όλη την ωφέλιμη ποσότητα του κάθε βάθους για κάθε ένα από τα δύο κατά βάθος δείγματα.
2. Ζυγίστηκαν τα μεικτά βάρη πριν την ξήρανση στο φούρνο.
3. Υπολογίστηκαν τα καθαρά βάρη πριν την ξήρανση στο φούρνο.
4. Ζυγίστηκαν τα μεικτά ξηρά βάρη, μετά την ξήρανση στο φούρνο.
5. Υπολογίστηκαν τα καθαρά ξηρά βάρη, μετά την ξήρανση στο φούρνο.
6. Ζυγίστηκαν τα μεικτά βάρη κατά τη συσκευασία. Μετά την ξήρανση, μέχρι τη στιγμή της συσκευασίας, η υγρασία του χώματος αυξάνεται, επομένως αυτό το βήμα ήταν απαραίτητο.
7. Υπολογίστηκαν τα καθαρά βάρη κατά τη συσκευασία.
8. Υπολογίστηκαν τα ποσοστά της υγρασίας, χρησιμοποιώντας τις μάζες που προέκυψαν από τα βήματα 7 και 5, ως εξής: $(\text{Βάρος}_{\text{καθαρό κατά τη συσκευασία}} - \text{Βάρος}_{\text{καθαρό ξηρό}}) / \text{Βάρος}_{\text{καθαρό κατά τη συσκευασία}}$.
9. Ζυγίστηκαν τα απόβαρα των καπακιών τρυβλίων που αποτελούν τη νέα γεωμετρία.
10. Ζυγίστηκαν τα μεικτά βάρη κατά τη συσκευασία των πληρωμένων πλέον με χόμα καπακιών τρυβλίων, τα οποία αποτελούν τα δείγματα προς

ανάλυση.

11. Υπολογίστηκαν τα καθαρά (νωπά) βάρη των δειγμάτων που συσκευάστηκαν.
12. Υπολογίστηκαν τα καθαρά ξηρά βάρη των δειγμάτων που συσκευάστηκαν, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των βημάτων 11 και 8, ως εξής: $B_{καθαρό} = B_{συσκευασμένου\ δείγματος} \cdot (1 - \text{ποσοστό υγρασίας})$.

Επίσης, έγινε ογκομέτρηση της νέας γεωμετρίας με χρήση απιονισμένου νερού. Ο όγκος προέκυψε 18.40 cm^3 , όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-1. Με γνωστό τον όγκο και τις καθαρές μάζες, έγινε δυνατός και ο προσδιορισμός της πυκνότητας συσκευασίας. Το σφράγισμα της κάθε γεωμετρίας δείγματος έγινε με λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με την προτεινόμενη γεωμετρία δείγματος που έγινε με πλακίδια plexiglass. Τέλος, τα δοχεία καλύφθηκαν εξωτερικά με ρητίνη, έτσι ώστε να μη διαφεύγει το αέριο ^{222}Rn και να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία με το ^{226}Ra ($T_{1/2} = 3.8$ ημέρες). Στο Σχήμα 4-2 φαίνεται η μορφή της συσκευασμένης γεωμετρίας ενός δείγματος.



Σχήμα 4-2: Ένα από τα συσκευασμένα δείγματα που αναλύθηκαν.

Ο Πίνακας 4-2 και ο Πίνακας 4-3 περιλαμβάνουν τους κωδικούς δειγμάτων, τα καθαρά βάρη συσκευασίας, τα ποσοστά υγρασίας, καθώς και τις πυκνότητες, για τα δύο κατα βάθος δείγματα που λήφθηκαν.

Βάθος (cm)	Κωδικός δείγματος	Καθαρό βάρος (gr)	Υγρασία	Πυκνότητα (gr/cm ³)
0-2	MS672	19.91	0.6%	1.082
2-4	MS673	19.72	1.3%	1.072
4-6	MS674	19.18	1.0%	1.043
6-8	MS675	19.19	0.8%	1.043
8-10	MS676	19.65	1.1%	1.068
10-12	MS677	19.85	1.5%	1.079
12-14	MS678	21.28	1.3%	1.157
14-16	MS679	22.34	1.7%	1.214
16-18	MS680	21.25	1.3%	1.155
18-20	MS681	21.33	1.4%	1.159
20-22	MS682	20.88	1.5%	1.135
22-24	MS683	21.82	1.1%	1.186
24-26	MS684	22.62	1.1%	1.230

Πίνακας 4-2: Αντιστοίχιση του πρώτου σετ δειγμάτων με τους κωδικούς τους, τα καθαρά βάρη, υγρασία και πυκνότητα συσκευασίας.

Βάθος (cm)	Κωδικός δείγματος	Καθαρό βάρος (gr)	Υγρασία	Πυκνότητα (gr/cm ³)
0-2	MS685	17.3	1.1%	0.940
2-4	MS686	21.64	0.8%	1.176
4-6	MS687	23.02	0.8%	1.251
6-8	MS688	23.56	1.0%	1.281
8-10	MS689	24.14	1.1%	1.312
10-12	MS690	19.42	1.5%	1.056
12-14	MS691	20.67	1.5%	1.124
14-16	MS692	23.18	1.7%	1.260
16-18	MS693	21.2	1.2%	1.152
18-20	MS694	21.53	1.8%	1.170
20-22	MS695	22.12	1.7%	1.202
22-24	MS696	21.29	1.5%	1.157

Πίνακας 4-3: Αντιστοίχιση του δεύτερου σετ δειγμάτων με τους κωδικούς τους, τα καθαρά βάρη, υγρασία και πυκνότητα συσκευασίας.

4.2 Βαθμονόμηση της νέας γεωμετρίας για χρήση με τον ανιχνευτή LEGe

Τυπικά, η πειραματική βαθμονόμηση μιας νέας γεωμετρίας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, προϋποθέτει την πλήρωση του δοχείου με πιστοποιημένη ραδιενεργό πηγή και την ανάλυση του δείγματος αυτού στο συγκεκριμένο ανιχνευτή για κατάλληλο χρονικό διάστημα. Έπειτα, υπολογίζονται οι αποδόσεις φωτοκορυφής για τις φωτοκορυφές των ισοτόπων του υλικού της πηγής που συμμετέχουν στη βαθμονόμηση, καθώς η ραδιενέργεια του κάθε ισοτόπου είναι γνωστή από τον κατασκευαστή της πηγής.

Κατά την ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, όπως αυτά που εκπέμπει ο ²¹⁰Pb, απαιτείται να γίνουν διορθώσεις αυτοαπορρόφησης. Αυτό γίνεται με χρήση του

συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, ο οποίος υπολογίζεται για κάθε ενέργεια που εξετάζεται. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται και καμπύλες που δίνουν την τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ (cm^{-1}), συναρτήσεως της πυκνότητας συσκευασίας του δείγματος (Αναγνωστάκης, 1998). Με γνωστή πλέον την διορθωμένη λόγω αυτοαπορρόφησης απόδοση για το εξεταζόμενο δείγμα, υπολογίζεται η ραδιενέργεια του δείγματος κατά τη σχέση (2-44).

Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η πλήρωση της γεωμετρίας με πιστοποιημένη ραδιενεργό πηγή βαθμονόμησης, μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Στην περίπτωση αυτή, οι αποδόσεις φωτοκορυφής του εκάστοτε δείγματος που θα χρησιμοποιηθούν στη σχέση (2-44), εκτιμώνται με την τεχνική της μεταφοράς απόδοσης (efficiency transfer), όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.2.1.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης Δ.Ε., έγινε εφαρμογή μόνο της τεχνικής της μεταφοράς απόδοσης για τον υπολογισμό των ραδιενεργειών των δειγμάτων χρώματος, με χρήση του κώδικα PENELOPE.

4.2.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με μεταφορά απόδοσης (efficiency transfer)

Έστω δύο γεωμετρίες δείγματος, οι οποίες πληρώνονται από το ίδιο δείγμα, και αναλύονται από τον ίδιο ανιχνευτή. Εάν εκτιμηθεί η απόδοση φωτοκορυφής μιας ενέργειας μέσω τεχνικών Monte Carlo για τις δύο γεωμετρίες (ίδιο μοντέλο εκτός από τη γεωμετρία δοχείου) και διατίθεται πειραματική τιμή απόδοσης για την ίδια ενέργεια για μια από αυτές, τότε η απόδοση της άλλης γεωμετρίας προσεγγίζεται με μεταφορά απόδοσης (efficiency transfer, Piton et al., 2000).

Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην παραδοχή ότι ο λόγος των αποδόσεων των προσομοιώσεων των δύο γεωμετριών, προσεγγίζει ικανοποιητικά τον αντίστοιχο λόγο των αποδόσεων της γνωστής πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση που προσεγγίζεται με την τεχνική της μεταφοράς απόδοσης. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η (4-1):

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

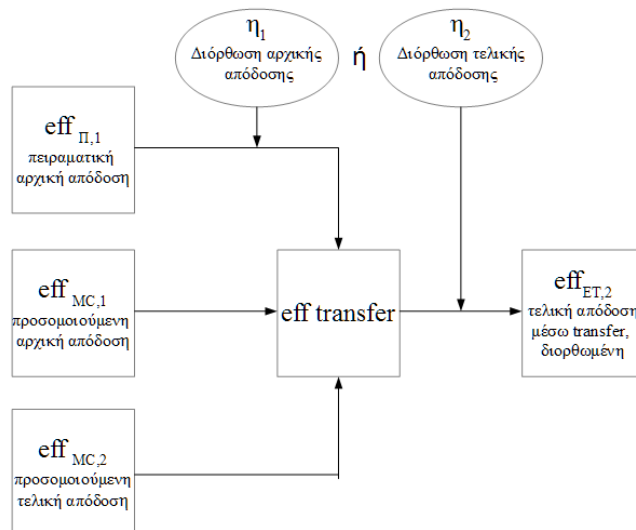
όπου:

- $eff_{2,ET}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 2, η οποία προσεγγίζεται με μεταφορά απόδοσης.
- $eff_{H,1}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 1, η οποία έχει προσδιοριστεί πειραματικά. Αυτό γίνεται είτε μέσω απευθείας πειραματικού σημείου, εάν η ενέργεια της φωτοκορυφής αντιστοιχεί σε φωτόνιο ισοτόπου εντός της πηγής βαθμονόμησης, είτε από προσαρμοσμένη καμπύλη βαθμονόμησης.
- $eff_{MC,1}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 1 όπως προκύπτει μέσω τεχνικών Monte Carlo.
- $eff_{MC,2}$: η απόδοση φωτοκορυφής της γεωμετρίας 2 όπως προκύπτει μέσω τεχνικών Monte Carlo.

4.2.2 Μεθοδολογίες προσδιορισμού της πραγματικής απόδοσης σε δείγματα χρώματος με μεταφορά απόδοσης

Με χρήση της τεχνικής της μεταφοράς απόδοσης, καθώς και κάποια μέθοδο εκτίμησης του συντελεστή αναγωγής απόδοσης, μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση φωτοκορυφής για το υπό εξέταση δείγμα. Υπάρχουν διάφοροι δυνατοί συνδυασμοί εφαρμογής της μεταφοράς απόδοσης και των διορθώσεων απόδοσης. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης ΔΕ εξετάστηκαν συνολικά πέντε πιθανοί συνδυασμοί, με τον καθένα να αποτελεί μια διαφορετική μεθοδολογία.

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται μια γενική αναπαράσταση των μεθοδολογιών που υπολογίζουν την τελική απόδοση μέσω της μεταφοράς απόδοσης. Σημειώνεται πως σε κάθε μεθοδολογία δε γίνεται να εφαρμοστεί πάνω από μία διόρθωση απόδοσης. Ο Πίνακας 4-4 περιλαμβάνει περισσότερες λεπτομέρειες ως προς τα υλικά πηγής και γεωμετρίες που συμμετέχουν σε κάθε μεθοδολογία.



Σχήμα 4-3: Σχηματική αναπαράσταση των μεθοδολογιών υπολογισμού της πραγματικής απόδοσης μέσω μεταφοράς απόδοσης.

	Πειραματική αρχική απόδοση $eff_{PI,1}$	Διόρθωση αρχικής απόδοσης η_1	Προσομοίωση αρχικής απόδοσης $eff_{MC,1}$	Προσομοίωση τελικής απόδοσης $eff_{MC,2}$	Διόρθωση τελικής απόδοσης η_2
A	Γεωμετρία 8, 4M HCl	factor-χώρα SPUNAL	Γεωμετρία 8, χώρα	Νέα γεωμετρία, χώρα	-
B	Γεωμετρία 8, 4M HCl	factor με μ από προσομοίωση	Γεωμετρία 8, χώρα	Νέα γεωμετρία, χώρα	
Γ	Γεωμετρία 8, 4M HCl	-	Γεωμετρία 8, 4M HCl	Νέα γεωμετρία, 4M HCl	factor-χώρα SPUNAL
Δ	Γεωμετρία 8, 4M HCl	-	Γεωμετρία 8, 4M HCl	Νέα γεωμετρία, 4M HCl	factor με μ από προσομοίωση
E	Γεωμετρία 8, 4M HCl	-	Γεωμετρία 8, 4M HCl	Νέα γεωμετρία, χώρα	

Πίνακας 4-4: Οι πέντε μεθοδολογίες εκτίμησης της απόδοσης της νέας γεωμετρίας για υλικό χώρα.

Η κάθε μεθοδολογία μπορεί να επαναληφθεί για οποιοδήποτε ισότοπο που ενδιαφέρει, με σκοπό τον υπολογισμό των ραδιενεργειών του ισότοπου στα κατά βάθος δείγματα χώματος. Αυτό, ωστόσο, αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία, καθ' ότι προϋποθέτει την εκτέλεση προσομοιώσεων για όλους τους συνδυασμούς:

- Των δύο γεωμετριών που συμμετέχουν στη μεταφορά απόδοσης.
- Του υλικού του δείγματος, λαμβάνοντας υπ' όψιν την υγρασία και πυκνότητα συσκευασίας κάθε ενός από τα δείγματα.
- Του υλικού πηγής βαθμονόμησης.

- Των φωτονίων των ζητούμενων ισοτόπων.

Για αυτόν το λόγο, ήταν αναγκαία η επιλογή μίας μεθοδολογίας, η οποία ακολουθήθηκε για όλα τα ισότοπα των οποίων η ραδιενέργεια ενδιέφερε. Η σύγκριση των μεθοδολογιών έγινε με βάση τις αποδόσεις που προέκυψαν μόνο για το ^{210}Pb . Η πρώτη γεωμετρία που συμμετείχε στη μεταφορά απόδοσης ήταν η τυποποιημένη του ΕΠΤ-ΕΜΠ γεωμετρία 8 (παρουσιάστηκε ως «Θ» στην παραμετρική μελέτη), και η δεύτερη ήταν αυτή που τελικά υιοθετήθηκε. Η γεωμετρία 8, με όγκο 40 cm^3 , επιλέχθηκε ως η κοντινότερη γεωμετρία στο καπάκι τρυβλίου, για την οποία να διατίθεται πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για κάποια πηγή βαθμονόμησης. Η γεωμετρία αυτή έχει βαθμονομηθεί πειραματικά, με πρότυπο μεικτό διάλυμα ραδιοϊσοτόπων σε μορφή διαλύματος 4M HCl .

Οι μεθοδολογίες Α και Β του Πίνακα 4-4 βασίζονται στην εφαρμογή διόρθωσης απόδοσης στην αρχική πειραματική απόδοση, η οποία αναφέρεται σε γεωμετρία 8 και υλικό πηγής 4M HCl . Η διόρθωση της απόδοσης υλοποιείται με τη σχέση (4-2) και η σχέση μεταφοράς απόδοσης που δίνει την τελική απόδοση της νέας γεωμετρίας για υλικό πηγής χώμα είναι η (4-3).

$$eff_{(\Pi,1, 4\text{MHCl})} \cdot \eta_1 = eff_{(\Pi,1, \text{soil})} \quad (4-2)$$

$$eff_{(\text{ET},2, \text{soil})} = eff_{(\Pi,1, \text{soil})} \cdot \frac{eff_{(\text{MC},2, \text{soil})}}{eff_{(\text{MC},1, \text{soil})}} \quad (4-3)$$

όπου:

$eff_{(\Pi,1, 4\text{MHCl})}$: η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για γεωμετρία 8 και υλικό πηγής 4M HCl (πειραματική αρχική απόδοση).

η_1 : ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης, για γεωμετρία 8 (διόρθωση αρχικής απόδοσης).

$eff_{(\Pi,1, \text{soil})}$: η διορθωμένη απόδοση φωτοκορυφής για γεωμετρία 8 και υλικό πηγής χώμα.

$eff_{(\text{ET},2, \text{soil})}$: η απόδοση φωτοκορυφής για υλικό πηγής χώμα, με εφαρμογή της μεταφοράς απόδοσης (τελική απόδοση).

$eff_{(\text{MC},1, \text{soil})}$: η απόδοση φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης για γεωμετρία 8 και υλικό πηγής χώμα (προσομοίωση αρχικής απόδοσης).

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

Οι μεθοδολογίες Γ και Δ του Πίνακα 4-4, βασίζονται στην εφαρμογή διόρθωσης απόδοσης στην τελική πειραματική απόδοση, η οποία αναφέρεται στη νέα γεωμετρία και υλικό πηγής 4M HCl. Η σχέση (4-4) δίνει την απόδοση της νεάς γεωμετρίας προς υιοθέτηση για υλικό πηγής 4M HCl. Η σχέση (4-5) δίνει την τελική απόδοση της νεάς γεωμετρίας προς υιοθέτηση για υλικό πηγής χρώμα.

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

$$eff_{(ET,2 soil)} = eff_{(ET,2, 4M HCl)} \cdot \eta_2 \quad (4-5)$$

όπου:

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

$eff_{(MC,1, 4M HCl)}$: η απόδοση φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης για γεωμετρία 8 και υλικό πηγής 4M HCl (προσομοίωση αρχικής απόδοσης).

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

η_2 : ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης, για τη νέα γεωμετρία προς υιοθέτηση (διόρθωση τελικής απόδοσης).

Η μεθοδολογία Ε παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες:

- Οι προσομοιούμενες αρχικές και τελικές αποδόσεις αναφέρονται σε διαφορετικό υλικό.
- Στον Πίνακα 4-4, δεν καταγράφεται η εφαρμογή χρήση συντελεστή αναγωγής απόδοσης.

Οι παραπάνω ιδιαιτερότητες οφείλονται στο ότι ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης μέσω προσομοίωσης ορίζεται ως ο λόγος δύο αποδόσεων από προσομοίωση. Όταν ο λόγος αυτός εισαχθεί στη σχέση υπολογισμού της μεταφοράς απόδοσης, η σχέση

επιδέχεται απλοποιήσεων. Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης μέσω προσομοίωσης υπολογίζεται από τη σχέση (4-6):

$$\eta_i = \frac{eff_{(MC,i, soil)}}{eff_{(MC,i, 4MHCl)}} \quad (4-6)$$

Όπου i είναι δείκτης που παίρνει την τιμή 1 τη γεωμετρία 8 και 2 για τη νέα γεωμετρία προς υιοθέτηση. Ανάλογα με τον δείκτη η σχέση (4-6) θα δίνει είτε το συντελεστή αναγωγής απόδοσης της αρχικής απόδοσης η_1 , είτε το συντελεστή αναγωγής απόδοσης της τελικής απόδοσης η_2 . Η σχέση (4-7) που δίνει την τελική απόδοση της νέας γεωμετρίας προς υιοθέτηση για υλικό πηγής χόμα προκύπτει με δύο τρόπους:

- Για $i=1$ και λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (4-2), (4-3) και (4-6).
- Για $i=2$ και λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (4-4), (4-5) και (4-6).

$$eff_{(ET,2, soil)} = eff_{(\Pi,1, soil)} \cdot \frac{eff_{(MC,2, soil)}}{eff_{(MC,1, 4MHCl)}} \quad (4-7)$$

4.2.3 Μοντέλα του ανιχνευτή LEGe που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό απόδοσης φωτοκορυφής 46.52 keV μέσω PENELOPE

Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για ένα υλικό μέσω μεταφοράς απόδοσης, προϋποθέτει τη γνώση των προσομοιούμενων αποδόσεων της ίδιας φωτοκορυφής για τις δύο γεωμετρίες, όταν αυτές είναι πληρωμένες με το ίδιο υλικό πηγής. Ως αρχεία εισόδου υλικών πηγής, χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά χόματος, και το διάλυμα 4M HCl. Τα υλικά του χόματος ακολουθούν τη σύσταση του τυπικού χόματος όπως αναλύεται στην παράγραφο (3.2.1), με τη διαφορά ότι οι περιεκτικότητες ανάχθηκαν σε μια τυπική υγρασία 1% και χρησιμοποιήθηκαν τρεις ενδεικτικές πυκνότητες χόματος (δύο ακραίες από τις μετρούμενες κατά τη συσκευασία και η μέση τιμή τους), επομένως προέκυψαν τρία διαφορετικά αρχεία υλικών πηγής χόματος.

Ως αρχεία εισόδου γεωμετρίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο αρχεία γεωμετρίας που μοντελοποιούν τη διάταξη του ανιχνευτή LEGe, με το ένα να περιλαμβάνει την τυποποιημένη γεωμετρία 8, και το άλλο τη νέα προτεινόμενη γεωμετρία που

αγοράστηκε. Η μοντελοποίηση της γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης (εκτός των δοχείων δείγματος) βασίστηκε σε ένα τροποποιημένο αρχείο γεωμετρίας της ΔΕ (Φωτεινάκη, 2012).

4.2.4 Προσδιορισμός *dead layers* στην προσομοίωση *PENELOPE* για τον ανιχνευτή *LEGe*

Ένας τρόπος ακριβέστερης μοντελοποίησης της γεωμετρίας ανιχνευτή-δείγματος, είναι η εκτίμηση του πάχους των νεκρών ζωνών (*dead layers*) του κρυστάλλου του ανιχνευτή. Οι νεκρές ζώνες του ανιχνευτή αποτελούν περιοχές του κρυστάλλου οι οποίες δεν παράγουν ηλεκτρικό σήμα, ακόμα και όταν γίνεται εναπόθεση ενέργειας σε αυτές μέσω αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-ύλης. Στην περίπτωση της προσομοίωσης του κρυστάλλου *LEGe* ορίζονται το πολύ τρεις νεκρές ζώνες: η εμπρόσθια νεκρή ζώνη (*front dead layer*, πιο κοντά στο παράθυρο του ανιχνευτή), η περιφερειακή νεκρή ζώνη (*peripheral ή side dead layer*) και η οπίσθια νεκρή ζώνη (*back dead layer*). Τα πάχη των νεκρών ζωνών ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση μεταξύ της πειραματικής και προσομοιούμενης απόδοσης, για ένα συγκεκριμένο υλικό πηγής και γεωμετρία δείγματος. Αυτό γίνεται με μια επαναληπτική διαδικασία (Βασιλοπούλου, 2008), κατά την οποία, με αρχικές τιμές τις καλύτερες δυνατές εκτιμήσεις που διατίθεται από τη βιβλιογραφία/κατασκευαστή/προηγούμενες εργασίες, γίνονται προσομοιώσεις με διαφορετικά πάχη νεκρών ζωνών, έως ότου η διαφορά της απόδοσης με την πειραματική να ελαχιστοποιηθεί. Σε περιπτώσεις βαθμονόμησης με τεχνικές *Monte Carlo*, είναι επιθυμητή η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση αυτής της απόκλισης με δύο ενέργειες αναφοράς, μια υψηλή, και μια χαμηλότερη.

Ο λόγος που επιλέγονται μια υψηλή και μια χαμηλή ενέργεια, σχετίζεται άμεσα με την ευαισθησία της προσομοιούμενης απόδοσης κάθε ενέργειας στη μεταβολή του εμπρόσθιου (*front*) και του περιφερειακού (*peripheral ή side*) *dead layer*. Συγκεκριμένα, οι υψηλές ενέργειες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία απόδοσης στη μεταβολή του περιφερειακού *dead layer* και μικρότερη στο εμπρόσθιο, λόγω της μικρής πιθανότητας αλληλεπίδρασής τους με το τελευταίο. Το αντίθετο ακριβώς ισχύει στις χαμηλές ενέργειες, τα φωτόνια των οποίων απορροφώνται σε μεγαλύτερο βαθμό στα πρώτα «νεκρά» μμ του κρυστάλλου του ανιχνευτή, με παράλληλη μικρή πιθανότητα αλληλεπίδρασης με το περιφερειακό *dead layer*. Επίσης, έγιναν δοκιμές και με διάφορα πάχη οπίσθιας (*back*) νεκρής ζώνης. Η οπίσθια νεκρή ζώνη επηρεάζει

κυρίως τα φωτόνια υψηλών ενεργειών, ειδικά όταν ο κρύσταλλος του ανιχνευτή έχει μικρό πάχος, κάτι που ισχύει για τον ανιχνευτή LEGe. Σε κάθε περίπτωση, αύξηση πάχους οποιουδήποτε dead layer, συνεπάγεται μικρότερο όγκος κρυστάλλου ανιχνευτή που δύναται να μετρήσει εναπόθεση ενέργειας πλήρους φωτοκορυφής, επομένως και μικρότερη απόδοση.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα ισότοπα του ^{241}Am και ^{137}Cs , που εκπέμπουν στα 59.54 keV και 661.62 keV αντίστοιχα. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι ενέργειες, είναι η γνώση των πειραματικών τους αποδόσεων φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή LEGe και υλικό πρότυπης ραδιενεργού πηγής 4M HCl. Δεν προέρχονται δηλαδή οι τιμές των πειραματικών τους αποδόσεων από προσαρμοσμένη καμπύλη βαθμονόμησης.

Με εφελθέριας τις τελικές τιμές dead layer που χρησιμοποιήθηκαν στο αρχείο γεωμετρίας της Δ.Ε. (Φωτεινάκη, 2012), έγιναν δοκιμές με διαφορετικές τιμές πάχους εμπρόσθιου, περιφερειακού και οπίσθιου dead layer, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές των αποδόσεων του κάθε ισότοπου από τις πειραματικές. Ο Πίνακας 4-5 περιλαμβάνει τις τελικές τιμές dead layers που χρησιμοποιήθηκαν και ο Πίνακας 4-6 τις πειραματικές και προσομοιούμενες αποδόσεις για αυτά τα dead layers.

Front Dead Layer (μm)	Side Dead Layer (μm)	Back Dead Layer (μm)
25	2000	0

Πίνακας 4-5: Τελικές διαστάσεις dead layers που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο του ανιχνευτή LEGe.

Ισότοπο	eff _{PENELOPE}	eff _{πειραματική}	% απόκλιση πειράματος-PENELOPE
^{241}Am	0.08892	0.08999	1.19
^{137}Cs	0.01122	0.01118	-0.36

Πίνακας 4-6: Αποδόσεις φωτοκορυφής για τα τελικά dead layer που χρησιμοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές.

4.2.5 Προσομοιώσεις για τη γεωμετρία δ και τη νέα γεωμετρία

Με πλέον ορισμένες τις νεκρές ζώνες του κρυστάλλου Ge του μοντέλου του ανιχνευτή LEGe, το επόμενο βήμα για την εφαρμογή της μεταφοράς απόδοσης, ήταν η εύρεση των προσομοιούμενων αποδόσεων της γεωμετρίας δ και της νέας γεωμετρίας για τις εξής ενέργειες φωτονίων:

- 46.52 keV του ^{210}Pb .
- 63.29 keV του ^{234}Th .

- 609.32 keV του ^{214}Bi .

Το υλικό πηγής που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις ενέργειες ήταν το 4M HCl. Συγκεκριμένα για το ^{210}Pb , έγιναν και προσομοιώσεις με υλικό πηγής το τυπικό χόμα υγρασίας 1%, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.2. Πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση για κάθε μία από τις τρεις πυκνότητες χόματος.

Ισότοπο	eff _{PENELOPE} 4M HCl		eff _{πειραματική} 4M HCl		% απόκλιση πειράματος-προσομοίωσης	
	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία
^{210}Pb	0.08357	0.13741	0.08228	-	-1.56	-
^{234}Th	0.09034	0.14370	0.09171	-	1.49	-
^{214}Bi	0.01227	0.01799	0.01206	-	-1.78	-

Πίνακας 4-7: Αποδόσεις φωτοκορυφής από προσομοίωση των δύο γεωμετριών και οι αντίστοιχες αποκλίσεις από τις πειραματικές, για τις ενέργειες που εξετάστηκαν και υλικό πηγής 4M HCl.

Πυκνότητα (gr/cm ³)	eff _{PENELOPE} τυπικό χόμα	
	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία
0.940	0.07562	0.12761
1.148	0.07309	0.11997
1.312	0.07067	0.11737

Πίνακας 4-8: Αποδόσεις φωτοκορυφής 46.52 keV του ^{210}Pb από προσομοίωση των δύο γεωμετριών, για 3 πυκνότητες τυπικού χόματος υγρασίας 1% ως υλικό πηγής.

4.2.6 Συντελεστές αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης που υπολογίστηκαν για το ^{210}Pb

Με γνωστές τις προσομοιούμενες από τον κώδικα PENELOPE αποδόσεις τυπικού χόματος υγρασίας 1%, για τρεις πυκνότητες και δύο γεωμετρίες, καθώς και τις αποδόσεις για 4M HCl επίσης για τις δύο γεωμετρίες αυτές, έγινε εκτίμηση των συντελεστών διόρθωσης απόδοσης της φωτοκορυφής 46.52 keV του ^{210}Pb . Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης μέσω προσομοίωσης υπολογίζεται ως απλός λόγος της απόδοσης του δείγματος χόματος, προς την απόδοση της πηγής βαθμονόμησης 4M HCl, κατά την παράγραφο 3.5.

Επίσης, βρέθηκαν οι συντελεστές αναγωγής απόδοσης μέσω του προγράμματος factor (βλέπε παράγραφο 3.6) για τις δύο γεωμετρίες και δύο προσεγγίσεις χόματος. Το πρώτο χόμα αποτελεί το τυπικό χόμα των προσομοιώσεων της παραμετρικής μελέτης, ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm⁻¹) του οποίου βρέθηκε μέσω του προγράμματος tables.exe του κώδικα PENELOPE, για τις τρεις πυκνότητες χόματος, και εισήχθη στο πρόγραμμα factor. Το δεύτερο χόμα, είναι αυτό που

χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης αυτού υπολογίζεται μέσω της καμπύλης $\mu(\rho)$, επομένως με εισαγωγή των ίδιων τριών πυκνοτήτων στο πρόγραμμα factor, προσδιορίστηκαν και οι αντίστοιχες διορθώσεις απόδοσης για το υλικό αυτό.

Ο Πίνακας 4-9 περιλαμβάνει τους συντελεστές αναγωγής απόδοσης που προέκυψαν μέσω προσομοίωσης.

Πυκνότητα (gr/cm ³)	H _{προσομοίωσης} , χόμα προσομοίωσης	
	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία
0.940	0.905	0.929
1.148	0.875	0.873
1.312	0.846	0.854

Πίνακας 4-9: Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης κάθε συνδυασμού γεωμετρίας-πυκνότητας, με χρήση του κώδικα PENELOPE.

Ο Πίνακας 4-10 περιλαμβάνει τους συντελεστές αναγωγής απόδοσης που προέκυψαν μέσω του κώδικα factor.

Πυκνότητα (gr/cm ³)	η _{factor} , χόμα SPUNAL		η _{factor} , χόμα προσομοίωσης	
	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία
0.940	0.954	0.966	0.935	0.952
1.148	0.906	0.930	0.887	0.915
1.312	0.870	0.902	0.851	0.887

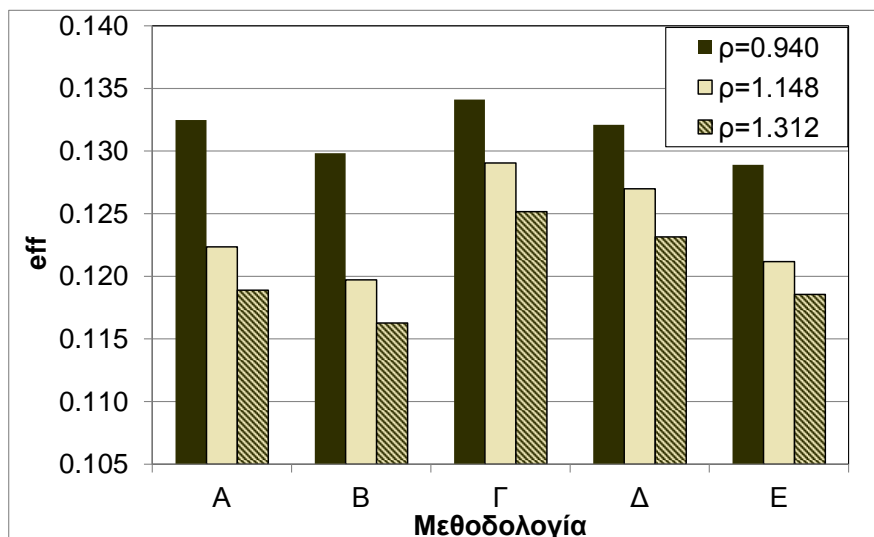
Πίνακας 4-10: Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης κάθε συνδυασμού γεωμετρίας-πυκνότητας, με χρήση του κώδικα factor, για τις δύο προσεγγίσεις χόματος (SPUNAL και προσομοίωσης).

4.2.7 Σύγκριση μεθοδολογιών προσδιορισμού της πραγματικής απόδοσης

Ο Πίνακας 4-11 και το Σχήμα 4-4 περιλαμβάνουν τις τελικές αποδόσεις φωτοκορυφής για το ²¹⁰Pb, για τη νέα γεωμετρία και υλικό πηγής χόμα, σύμφωνα με όλες τις μεθοδολογίες, για τις τρεις ενδεικτικές πυκνότητες δείγματος που επιλέχθηκαν.

	Πραγματικές αποδόσεις νέας γεωμετρίας		
	$\rho=0.940 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$	$\rho=1.148 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$	$\rho=1.312 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$
A	0.13248	0.12236	0.11889
B	0.12983	0.11972	0.11628
Γ	0.13412	0.12905	0.12516
Δ	0.13209	0.12698	0.12315
E	0.12890	0.12118	0.11856

Πίνακας 4-11: Αποδόσεις ενέργειας 46.52 keV νέας γεωμετρίας για υλικό πηγής χλώμα, όπως προκύπτουν από τις πέντε μεθοδολογίες, για τις τρεις ενδεικτικές πυκνότητες.



Σχήμα 4-4: Αποδόσεις ενέργειας 46.52 keV νέας γεωμετρίας για υλικό πηγής χλώμα, όπως προκύπτουν από τις πέντε μεθοδολογίες, για τις τρεις ενδεικτικές πυκνότητες.

Από το Σχήμα 4-4, παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των μεθοδολογιών:

- Ως προς τις αποδόσεις των διαφόρων μεθοδολογιών που προκύπτουν για μια συγκεκριμένη πυκνότητα από τις ενδεικτικές. Εν γένει τις υψηλότερες αποδόσεις παρέχει η μεθοδολογία Γ, ενώ τις χαμηλότερες η Β.
- Ως προς το πόσο απέχουν οι αποδόσεις των διαφορετικών πυκνοτήτων μεταξύ τους από μεθοδολογία σε μεθοδολογία. Ιδιαίτερα στις μεθοδολογίες Α και Β, η απόδοση της μικρότερης πυκνότητας απέχει από τη μέση και τη μέγιστη πυκνότητα περισσότερο σε σχέση με τις μεθοδολογίες Γ και Δ. Η μεθοδολογία Ε παρουσιάζει την ελάχιστη απόκλιση μεταξύ της μέσης και της μέγιστης πυκνότητας.

Τονίζεται ότι όλες οι μεθοδολογίες είναι αποδεκτές, στο βαθμό που δεν είναι δυνατό να γίνει πειραματικός προσδιορισμός της απόδοσης και απαραίτητα θα γίνουν κάποιες προσεγγίσεις. Οι διαφορές που παρατηρούνται, οφείλονται στις διαφορετικές προσεγγίσεις της διόρθωσης απόδοσης. Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε να

εφαρμοστεί τελικά για τον υπολογισμό των πραγματικών αποδόσεων των ισοτόπων που ενδιαφέρουν, ήταν η Γ , διότι:

- Δεν απαιτείται προσομοίωση κάθε πυκνότητας χώματος για κάθε γεωμετρία, παρά μόνο μια προσομοίωση για υλικό πηγής 4M HCl για κάθε γεωμετρία και υπό εξέταση ενέργεια.
- Η διόρθωση αυτοαπορρόφησης γίνεται με βάση προσαρμοσμένες καμπύλες $\mu(\rho)$ που έχουν προκύψει από πραγματικά ελληνικά χώματα (Αναγνωστάκης, 1998) και όχι μια σταθερή τυπική σύσταση που εισάγεται στην προσομοίωση.
- Το πρόγραμμα factor λαμβάνει τις τιμές $\mu(\rho)$ των καμπύλων χώματος SPUNAL αυτόματα. Σε αντίθεση, η διαδικασία εισαγωγής τιμών $\mu(\rho)$ για χώμα προσομοίωσης στο πρόγραμμα factor, είναι επίπονη, καθώς θα πρέπει να εκτελούνται τα προγράμματα material.exe και tables.exe ξεχωριστά για κάθε πυκνότητα χώματος των κατά βάθος δειγμάτων.

4.3 Πειραματικές κατά βάθος κατανομές του ^{210}Pb που προέκυψαν από την ανάλυση των νέων δειγμάτων χώματος

Ο κύριος στόχος του κεφαλαίου αυτού ήταν ο προσδιορισμός των ραδιενεργειών ορισμένων ισοτόπων στα δείγματα χώματος που ελήφθησαν. Από κάθε ένα από τα φάσματα που λήφθηκαν, προσδιορίστηκε η ραδιενέργεια των ισοτόπων:

- ^{210}Pb (46.52 keV)
- ^{234}Th . (63.29 keV)
- ^{226}Ra , μέσω του θυγατρικού του ^{214}Bi (609.32 keV).

Για τον προσδιορισμό των αποδόσεων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία Γ που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2 για κάθε πυκνότητα δείγματος, επομένως προέκυψε μια απόδοση φωτοκορυφής χώματος για κάθε κλάσμα χώματος, για τις ενέργειες φωτονίων του ^{210}Pb και ^{234}Th . Για το ισότοπο του ^{214}Bi ακολουθήθηκε επίσης η μεθοδολογία Γ , με τη διαφορά ότι η ενέργεια του φωτονίου που εξετάστηκε (609.32 keV), θεωρείται αρκετά μεγάλη (>200 keV) ώστε να μην λαμβάνεται υπ' όψιν το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιήθηκε μόνο η απόδοση για υλικό 4M HCl και τη νέα γεωμετρία, όπως προέκυψε με μεταφορά απόδοσης, δίχως διόρθωση αυτοαπορρόφησης μέσω του προγράμματος factor. Τα παρακάτω δεδομένα ήταν πλέον γνωστά:

- Οι αποδόσεις για κάθε ισότοπο και δείγμα.
- Οι επιφάνειες φωτοκορυφής των αναλύσεων από τον κώδικα SPUNAL.
- Οι καθαρές μάζες κάθε δείγματος.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίστηκαν οι ειδικές ραδιενέργειες κάθε κλάσματος χώματος για κάθε ένα από τα δύο κατά βάθος δείγματα. Οι ραδιενέργειες αυτές συνοδεύονται και από κάποιες αβεβαιότητες. Οι αβεβαιότητες που ελήφθησαν υπ' όψιν, ήταν οι εξής :

- Αβεβαιότητες καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής.
- Συστηματικές και τυχαίες αβεβαιότητες αποδόσεων προσομοίωσης.
- Αβεβαιότητες ζύγισης.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των ειδικών ραδιενεργειών, συνοδευόμενα από τις σχετικές αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-12 και 4-13.

Βάθος (cm)	R (Bq/kg) \pm αβεβαιότητα (% , 1σ)		
	^{210}Pb	^{234}Th	^{226}Ra
0-2	66.04 \pm 8.5%	18.78 \pm 30.6%	13.52 \pm 15.9%
2-4	44.80 \pm 10.5%	13.35 \pm 38.3%	16.20 \pm 12.2%
4-6	35.07 \pm 15.2%	15.13 \pm 39.3%	15.94 \pm 14.1%
6-8	31.92 \pm 11.8%	15.76 \pm 27.0%	13.61 \pm 12.1%
8-10	32.12 \pm 10.9%	15.73 \pm 25.3%	13.73 \pm 11.4%
10-12	23.74 \pm 17.2%	22.33 \pm 21.4%	16.23 \pm 11.4%
12-14	17.17 \pm 21.3%	16.60 \pm 25.6%	14.85 \pm 11.0%
14-16	14.87 \pm 30.1%	12.88 \pm 40.3%	13.09 \pm 14.9%
16-18	15.96 \pm 28.0%	14.03 \pm 37.3%	13.05 \pm 15.4%
18-20	13.33 \pm 29.9%	18.96 \pm 24.8%	16.39 \pm 11.1%
20-22	15.33 \pm 30.8%	16.48 \pm 33.6%	17.24 \pm 12.2%
22-24	16.94 \pm 25.5%	14.53 \pm 22.4%	18.56 \pm 10.7%
24-26	20.18 \pm 19.9%	21.79 \pm 21.4%	16.30 \pm 11.2%

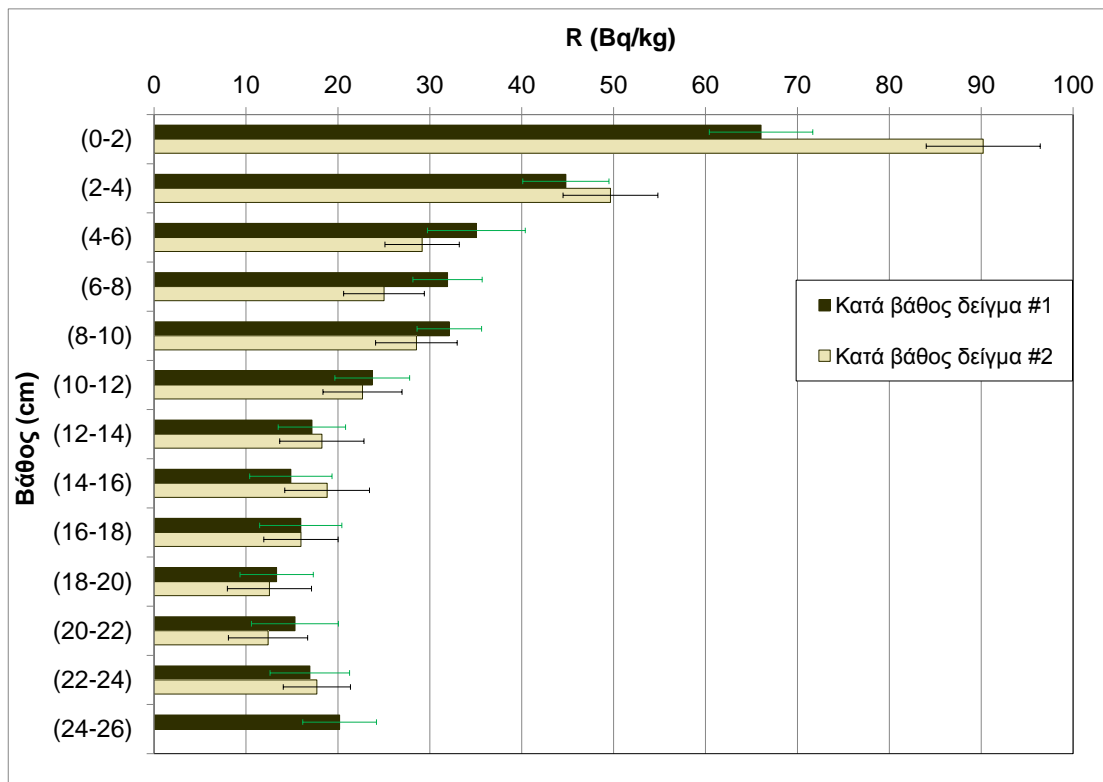
Πίνακας 4-12: Ειδικές ραδιενέργειες του πρώτου κατά βάθος δείγματος χώματος.

Βάθος (cm)	R (Bq/kg) ±αβεβαιότητα (% , 1σ)		
	²¹⁰ Pb	²³⁴ Th	²²⁶ Ra
0-2	90.22 ±6.9%	14.10 ±42.7%	20.17 ±11.9%
2-4	49.65 ±10.4%	20.85 ±26.3%	21.55 ±10.1%
4-6	29.16 ±13.9%	20.82 ±21.9%	21.09 ±8.6%
6-8	25.02 ±17.6%	20.28 ±24.6%	17.45 ±11.1%
8-10	28.55 ±15.6%	13.45 ±37.4%	18.30 ±10.5%
10-12	22.67 ±19.0%	9.06 ±54.9%	16.47 ±12.0%
12-14	18.26 ±25.1%	15.63 ±34.2%	13.46 ±15.0%
14-16	18.83 ±24.5%	14.40 ±37.2%	15.44 ±13.0%
16-18	15.98 ±25.3%	16.55 ±28.5%	14.84 ±12.2%
18-20	12.55 ±36.5%	10.81 ±48.7%	14.66 ±13.7%
20-22	12.40 ±34.8%	15.73 ±31.8%	12.84 ±14.5%
22-24	17.71 ±20.6%	15.74 ±27.3%	13.71 ±12.0%

Πίνακας 4-13: Ειδικές ραδιενέργειες του δεύτερου κατά βάθος δείγματος χόματος.

Στους Πίνακες 4-12 και 4-13 παρατηρούνται μεγάλες αβεβαιότητες της ειδικής ραδιενέργειας του ²³⁴Th. Αυτές οφείλονται τόσο στη χαμηλή ραδιενέργεια του ²³⁴Th στα δείγματα, όσο και στο αυξημένο διακριτό υπόστρωμα του ²³⁴Th, απόρροια της ύπαρξης του ²³⁴Th στη θωράκιση του ανιχνευτή. Προκύπτει συνεπώς το συμπέρασμα ότι ο ανιχνευτής LEGe δεν είναι ο πλέον ιδανικός ανιχνευτής για την ανίχνευση του συγκεκριμένου ισοτόπου στο χώμα με τη γεωμετρία αυτή και τους συγκεκριμένους χρόνους ανάλυσης (2-5 ημέρες).

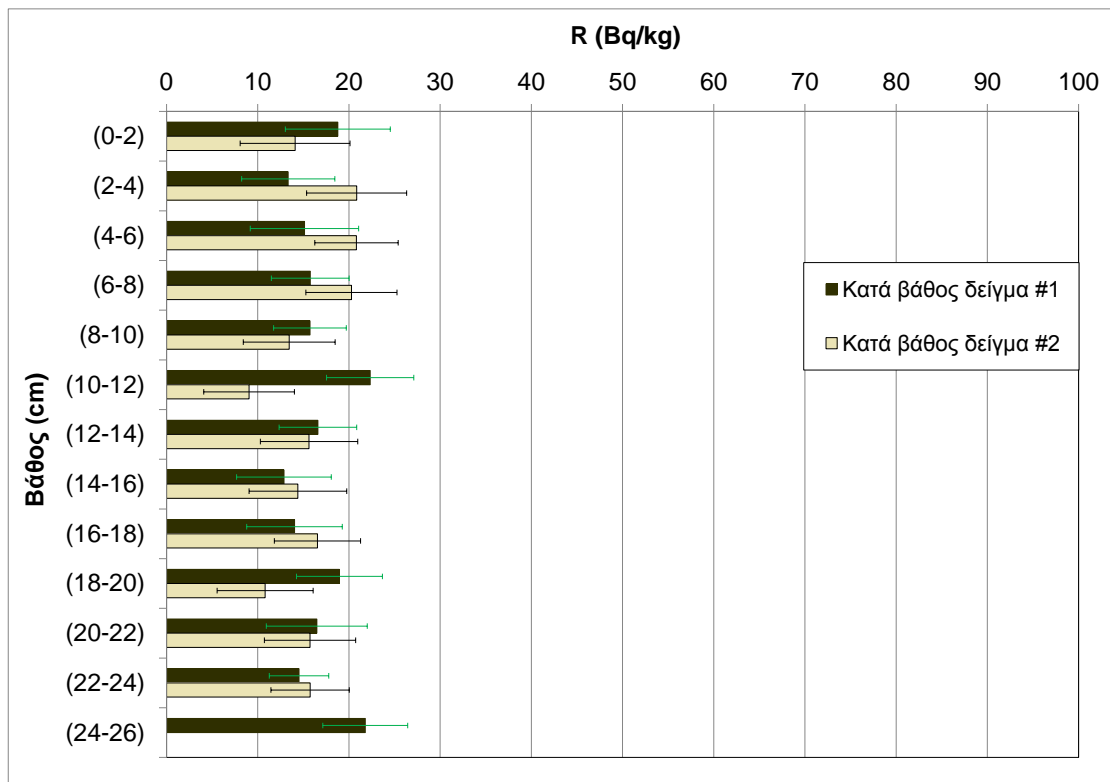
Στο Σχήμα 4-5 παρατίθενται οι ειδικές ραδιενέργειες του ²¹⁰Pb, για τα δύο κατά βάθος δείγματα χόματος. Παρατηρείται πως τα δύο κατακόρυφα προφίλ του ²¹⁰Pb ακολουθούν ικανοποιητικά το θεωρητικό εκθετικό προφίλ (παράγραφοι 2.2.2, 2.2.3). Διαπιστώνεται ότι, με τη μοναδική εξαίρεση του επιφανειακού δείγματος 0-2cm, οι ραδιενέργειες των δύο αντίστοιχων δειγμάτων σε κάθε βάθος πρακτικά συμπίπτουν.



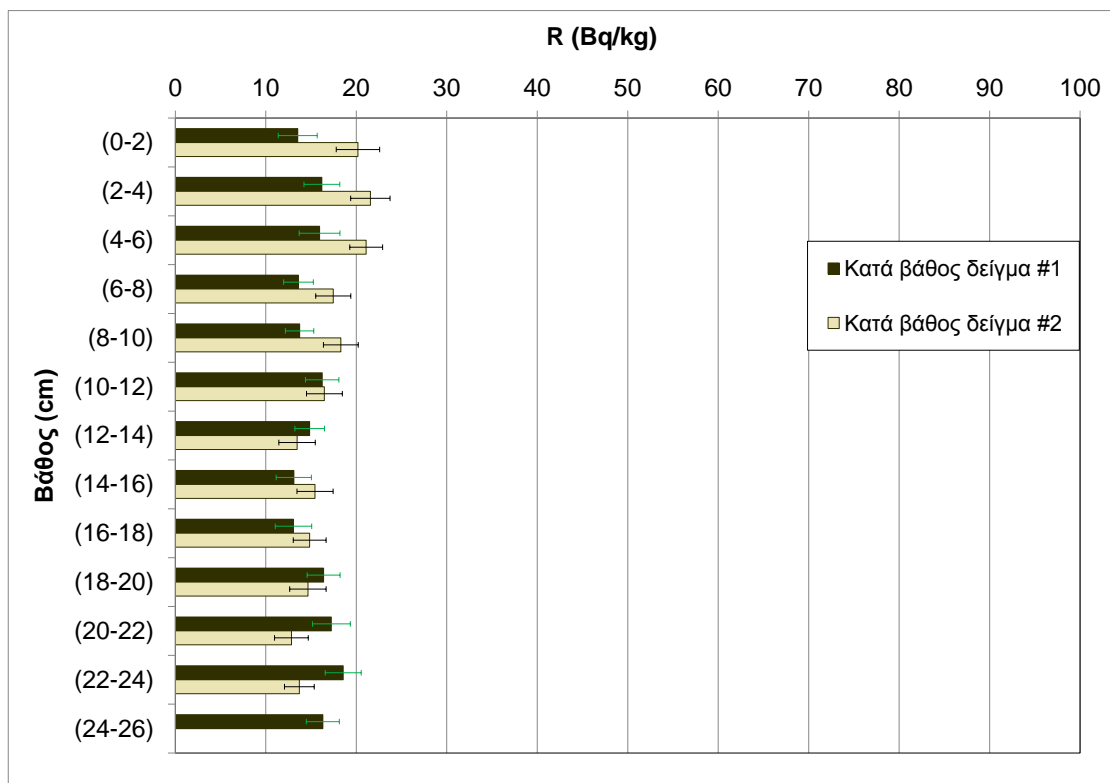
Σχήμα 4-5: Ειδική ραδιενέργεια του ^{210}Pb στα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος.

Στο Σχήμα 4-6 παρατίθενται οι ειδικές ραδιενέργειες του ^{234}Th για τα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος. Παρατηρείται πως οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας του ^{234}Th βρίσκονται μέσα στα αναμενόμενα όρια (Anagnostakis et al., 2002).

Το Σχήμα 4-7 παρατίθενται οι ειδικές ραδιενέργειες του ^{226}Ra στα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος. Το συμπέρασμα που εξάγεται ως προς τις ειδικές ραδιενέργειες του ^{226}Ra στο ελληνικό έδαφος είναι όμοιο με το ^{234}Th , με τη διαφορά ότι οι αβεβαιότητες κινούνται στα ίδια πλαίσια με το ^{210}Pb . Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει έντονη κατά βάθος μεταβολή της συγκέντρωσης του ^{226}Ra – όπως αναμένεται και από τη βιβλιογραφία – με συνέπεια η ραδιενέργεια του είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του ^{210}Pb στα δείγματα κοντά στην επιφάνεια αλλά συγκρίσιμη στα δείγματα μεγαλύτερου βάθους. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει τα θεωρητικά αναμενόμενα για τη συμπεριφορά των δύο ισοτόπων, όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 4-6: Ειδική ραδιενέργεια του ^{234}Th στα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος.



Σχήμα 4-7: Ειδική ραδιενέργεια του ^{226}Ra στα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος.

4.4 Παρατηρήσεις και προτάσεις επί της χρήσης της νέας γεωμετρίας δείγματος

Με την εφαρμογή της νέας γεωμετρίας σε ένα δείγμα χώματος, ακολουθώντας όλη τη διαδικασία δειγματοληψίας, προετοιμασίας, συσκευασίας και ανάλυσης δείγματος, προέκυψαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς και προτάσεις για βελτίωση, ως προς το σχεδιασμό του απαιτούμενου όγκου χώματος προς συλλογή και τις αναλύσεις των δειγμάτων:

1. Η νέα γεωμετρία που υιοθετήθηκε επιτρέπει την αποτύπωση της κατά βάθος κατανομής των ισοτόπων που μελετήθηκαν, αρκετά ικανοποιητικά, με καλή αβεβαιότητα, ακόμα και για τα χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας του χώματος στη περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.
2. Διαπιστώθηκε ότι στα επιφανειακά κλάσματα χώματος (0-2 cm) η ποσότητα χώματος επαρκεί οριακά για την πλήρωση μίας γεωμετρίας δείγματος. Επομένως, προτείνεται η λήψη δύο κατά βάθος δειγμάτων από την ίδια θέση και ανάμειξή τους, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ανεπαρκούς πλήρωσης της γεωμετρίας από χώμα των επιφανειακών εκατοστών.
3. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μελέτη της κατά βάθους κοκκομετρίας, στα δείγματα τα δύο κατά βάθος δείγματα δεν επαρκούν.
4. Η ανάλυση των δειγμάτων με τον ανιχνευτή LEGe μπορεί να είναι αποτελεσματική, ακόμα και για τις χαμηλές ραδιενέργειες των δειγμάτων που αναλύθηκαν. Τα ισότοπα ^{210}Pb και ^{226}Ra ανιχνεύτηκαν με ικανοποιητικές αβεβαιότητες στο δείγμα για χρόνους αναλύσεων 2-5 ημερών. Το ισότοπο του ^{234}Th ενδεχομένως να μην ανιχνεύεται με ικανοποιητικές αβεβαιότητες, λόγω του έντονου διακριτού υποστρώματος. Προφανώς όμως οι αναλύσεις με τον ανιχνευτή XtRa θα δίνουν αποτελέσματα καλύτερης στατιστικής σε μικρότερο χρόνο, ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό του ^{226}Ra .

Προτάσεις και μελλοντικά βήματα:

1. Παράλληλη μελέτη της κατά βάθος κατανομής και της κοκκομετρικής κατανομής των διαφόρων ισοτόπων στα διάφορα κλάσματα του χώματος. Η μελέτη αυτή προφανώς απαιτεί μεγάλης έκτασης δειγματοληψίας. Εκτιμάται ότι σε κάθε θέση δειγματοληψίας θα πρέπει να λαμβάνονται περί τα 10

κατακόρυφα δείγματα.

2. Συσχέτιση της κατά βάθος κατανομής του ^{210}Pb και της εκροής ραδονίου από το έδαφος και μελέτη της κατά βάθος κατανομής σε περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της ενδεχόμενης ανθρωπογενούς απόθεσης ^{210}Pb στο έδαφος.
3. Δημιουργία εμβόλου χειρός με σκοπό τη συμπίεση του υλικού του δείγματος, όπως γίνεται στις τυποποιημένες γεωμετρίες του ΕΠΤ-ΕΜΠ Θ και Ι που εξετάστηκαν στην παραμετρική μελέτη.
4. Επίσπευση του σφραγίσματος των δοχείων με κατάλληλο πιστόλι θερμοκόλλησης, αντί για σιλικόνη. Μάλιστα, έγιναν κάποιες δοκιμές εκτός των πλαισίων αυτής της Δ.Ε. και αποδείχθηκε υποσχόμενη τεχνική σφραγίσματος της νέας γεωμετρίας.
5. Βαθμονόμηση απόδοσης για τον προσδιορισμό και άλλων ισοτόπων φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας. Αυτό θα επιτρέψει τη λεπτομερή μελέτη της κατά βάθος κατανομής ισοτόπων όπως το ^{137}Cs εξαιτίας πυρηνικών ατυχημάτων ή πυρηνικών δοκιμών και του ^{241}Am εξαιτίας ραδιολογικών ατυχημάτων.

5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

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 Δ.Ε. ήταν η αναζήτηση και υιοθέτηση μιας νέας γεωμετρίας μικρού όγκου, για τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις του ισοτόπου ^{210}Pb σε δείγματα χώματος. Η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του ^{210}Pb στο χώμα ενδιαφέρει – εκτός των άλλων – λόγω της χρήσης της στις μελέτες των ρυθμών διάβρωσης και ιζηματογένεσης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μελέτες επωφελούνται από την καλή κατά βάθος ανάλυση της ραδιενέργειας του ισοτόπου στο χώμα, ειδικά αν ληφθεί υπ' όψιν ότι τα επιφανειακά εκατοστά είναι που παρέχουν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Στα πλαίσια της Δ.Ε. έγινε παράθεση ενός από τα μοντέλα που αναφέρεται στο ^{210}Pb . Τα μικρά κατά βάθος βήματα που απαιτούνται για καλή κατά βάθος ανάλυση επιτυγχάνονται στην πράξη με δύο τρόπους: με συλλογή πολλών κατά βάθος δειγμάτων που αναμειγνύονται καταλλήλως, ή με χρήση μικρότερης γεωμετρίας δείγματος και λιγότερα κατά βάθος δείγματα. Η δειγματοληψία χώματος με στόχο τη μελέτη της κατά βάθος κατανομής αποτελεί εν γένει επίπονη και χρονοβόρο διαδικασία. Η χρήση γεωμετριών μικρού όγκου αποτελεί λύση για τη λήψη κατά βάθους δειγμάτων χώματος καλής ανάλυσης με λιγότερο κόπο στο πεδίο της δειγματοληψίας.

Στα πλαίσια της Δ.Ε. έγινε υιοθέτηση νέας γεωμετρίας δείγματος μικρού όγκου που διευκολύνει τη μελέτη της κατά βάθος κατανομής ισοτόπων. Η υιοθέτηση της νέας γεωμετρίας έγινε έπειτα από διεξαγωγή παραμετρικής μελέτης μεταξύ ενός μικρού πλήθους υποψήφιων γεωμετριών, με βάση πειραματικά δεδομένα γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, καθώς και προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση τεχνικών Monte Carlo. Αρχικά, επιλέχθηκε μία σειρά από δοχεία από το εμπόριο με βάση ορισμένα κριτήρια. Οι γεωμετρίες ανάλυσης που προέκυψαν με βάση αυτά τα δοχεία (γεωμετρίες «Α» ως «Η»), μαζί με δύο από τις τυποποιημένες του ΕΠΤ-ΕΜΠ («Θ» και «Ι»), πληρώθηκαν με δύο τυπικά υλικά δειγμάτων, Το πρώτο δείγμα ήταν ένα δείγμα χώματος που είχε αναλυθεί σε παλαιότερη εργασία (Παλαμάρα, 2010). Το δεύτερο ήταν ένα δείγμα ιπτάμενης τέφρας από λιγνιτικό σταθμό με ελαφρώς αυξημένη ραδιενέργεια σε ^{210}Pb για τη διευκόλυνση των αναλύσεων. Κατ' αυτόν τον

τρόπο, δημιουργήθηκαν δύο σετ δειγμάτων (2 υλικά επί 10 γεωμετρίες), τα οποία αναλύθηκαν στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ, λαμβάνοντας γ-φάσματα με και χωρίς τη χρήση του συστήματος Compton Suppression που διαθέτει ο ανιχνευτής. Επιπρόσθετα, τα δείγματα χώματος αναλύθηκαν και στον ανιχνευτή LEGe. Ο χρόνος ανάλυσης σε κάθε περίπτωση ήταν 24 ώρες.

Εκτός από τον ωφέλιμο όγκο του δείγματος, υπάρχουν και άλλες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι σύγκρισης των διαφόρων γεωμετριών. Τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν για τα φωτόνια 46.52 keV του ^{210}Pb . Με τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις που έγιναν, και είναι τα εξής:

- Ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων.
- Η αβεβαιότητα επιφάνειας φωτοκορυφής.
- Οι πειραματικές αποδόσεις φωτοκορυφής.
- Η Κατώτερη Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια (MDA).

Επιπρόσθετα, έγινε προσομοίωση της πειραματικής διάταξης του ανιχνευτή XtRa με τεχνικές Monte Carlo με στόχο τον προσδιορισμό της απόδοσης της διάταξης για τις υπό μελέτη γεωμετρίες, με χρήση του κώδικα PENELOPE. Πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση για κάθε ζεύγος γεωμετρίας-υλικού δείγματος. Το μοντέλο της γεωμετρίας των συνιστωσών της ανιχνευτικής διάταξης λήφθηκε από τη Δ.Δ. (Σάββα, υπό εκπόνηση). Τα υλικά των δειγμάτων που προσομοιώθηκαν είχαν τυπικές συστάσεις από προηγούμενες εργασίες.

Η τελευταία παράμετρος με την οποία συγκρίθηκαν οι γεωμετρίες, ήταν ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης. Το μέγεθος αυτό εκτιμήθηκε τόσο με τεχνικές Monte Carlo, όσο και με χρήση του προγράμματος factor, το οποίο χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Εκτός από τα υλικά χώματος και τέφρας, προσομοιώθηκε για κάθε γεωμετρία και το υλικό πηγής βαθμονόμησης 4M HCl. Εξ' ορισμού, η διόρθωση της απόδοσης εκτιμάται ως ο λόγος της απόδοσης του υλικού δείγματος, προς την απόδοση του υλικού της πηγής βαθμονόμησης. Έτσι, προέκυψαν 2 ομάδες συντελεστών διόρθωσης απόδοσης (2 υλικά επί 10 γεωμετρίες), εκτιμώμενοι μέσω του κώδικα PENELOPE. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τις τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ (cm^{-1}) από το βοηθητικό πρόγραμμα tables.exe του κώδικα PENELOPE εκτιμήθηκε ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης και μέσω του κώδικα factor. Εκτιμήθηκαν με αυτόν τον

τρόπο άλλα 2 σετ συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ώστε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Οι 10 γεωμετρίες συγκρίθηκαν μεταξύ τους σε όρους ωφέλιμου όγκου, ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων, αβεβαιότητας επιφάνειας φωτοκορυφής, απόδοσης φωτοκορυφής (πειραματικής και μέσω προσομοίωσης), Κατώτερης Ανιχνεύσιμης Ραδιενέργειας (Minimum Detectable Activity MDA), καθώς και διόρθωσης απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης (μέσω προσομοίωσης και του μέσω του προγράμματος factor). Η παραμετρική σύγκριση των γεωμετριών, οδήγησε στην υιοθέτηση της γεωμετρίας μικρού όγκου «H», από αυτές που εξετάστηκαν. Η απόδοση του δείγματος χώματος αυτής της γεωμετρίας εκτιμήθηκε σε $0.210 \pm 8.46\%$ (1 σ) για τον ανιχνευτή XtRa-CSS, και $0.122 \pm 8.90\%$ (1 σ) για τον ανιχνευτή LEGe. Τα MDA προέκυψαν 13.01 Bq/kg για τον ανιχνευτή XtRa-CSS και 22.95 Bq/kg για τον ανιχνευτή LEGe.

Το επόμενο βήμα της παρούσης Δ.Ε. που ακολούθησε, ήταν η χρήση της γεωμετρίας αυτής κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων μικρού όγκου που λήφθηκαν από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Συνολικά ελήφθησαν δύο κατά βάθος δείγματα χώματος, από την ίδια θέση δειγματοληψίας. Η δειγματοληψία έγινε σύμφωνα με την τεχνική που έχει εισαχθεί σε προηγούμενη Δ.Ε. (Πετροβίτσος, 2011). Η μικρή συλλεχθείσα ποσότητα χώματος σε κάθε βάθος οδήγησε σε ορισμένες ιδιαιτερότητες στον τρόπο προετοιμασίας του δείγματος. Για μια τυπική κατά βάθος ανάλυση χώματος με βήμα 2 cm, διαπιστώθηκε ότι επαρκεί μια εισαγωγή του δειγματολήπτη στα περισσότερα κλάσματα βάθους. Ωστόσο, στο πρώτο επιφανειακό δείγμα (0-2 cm), η πλήρωση της γεωμετρίας των δειγμάτων είναι οριακή και όχι απαραίτητα επαναλήψιμη λόγω της τυχαίας ύπαρξης λίθων, βλάστησης κτλ στο επιφανειακό χώμα, επομένως συνίσταται η λήψη δεύτερου κατά βάθος δείγματος και ενοποίηση των αντίστοιχων κλασμάτων. Η μικρή συνολικά ποσότητα των κατά βάθος δειγμάτων προϋποθέτει την προσεκτική αφαίρεση λίθων, σπάσιμο των συσσωματωμάτων κόκκων, καθώς και υπολογισμό της υγρασίας με ξήρανση σε φούρνο ολόκληρης της ποσότητας του κάθε κατά βάθος δείγματος, με ζύγιση τόσο των ξηρών μαζών των δειγμάτων όσο και της μάζας συσκευασίας. Τα δείγματα συσκευάστηκαν και αναλύθηκαν στον ανιχνευτή LEGe για χρονικό διάστημα 2-5 ημερών. Ο ανιχνευτής LEGe βαθμονομήθηκε για τα ισότοπα ^{210}Pb , ^{214}Bi και ^{234}Th , μέσω της τεχνικής της μεταφοράς απόδοσης, η οποία κάνει χρήση τεχνικών Monte Carlo. Η μεταφορά απόδοσης έγινε μεταξύ της τυποποιημένης γεωμετρίας «8» του

ΕΠΤ-ΕΜΠ, – για την οποία ήταν διαθέσιμη πειραματική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής – και της νέας γεωμετρίας. Τα βήματα που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό των τελικών αποδόσεων της νέας γεωμετρίας για υλικό δείγματος χόμα ήταν τα εξής:

1. Προσδιορισμός του πάχους των νεκρών ζωνών του μοντέλου γεωμετρίας. Οι προσομοιώσεις έγιναν τροποποιώντας το μοντέλο γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε στη Δ.Ε. (Φωτεινάκη, 2012). Οι τροποποιήσεις αυτές περιελάμβαναν και την εύρεση του πάχους των νεκρών ζωνών (dead layers) του ανιχνευτή, μέσω επαναληπτικής μεθόδου κατά (Βασιλοπούλου, 2008). Με γνωστές πειραματικές τιμές απόδοσης για τα φωτόνια 59.54 keV και 661.62 keV του ^{241}Am και ^{137}Cs αντίστοιχα, έγιναν δοκιμές για τα πάχη των νεκρών ζωνών του μοντέλου γεωμετρίας του ανιχνευτή LEGe, για γεωμετρία «8» και υλικό πηγής 4M HCl, έως ότου η διαφορά προσομοιούμενων-πειραματικών αποδόσεων να ελαχιστοποιηθεί.
2. Προσομοιώσεις για τα φωτόνια 46.52 keV του ^{210}Pb . Ως υλικά δείγματος χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά χόματος, βασισμένα στη σύσταση χόματος της παραμετρικής μελέτης για τρεις ενδεικτικές πυκνότητες από τα συσκευασμένα δείγματα, και το διάλυμα 4M HCl.
3. Εκτίμηση των συντελεστών αναγωγής απόδοσης μέσω του κώδικα PENELOPE και του προγράμματος factor για τις γεωμετρίες «8» και τη νέα γεωμετρία. Οι διορθώσεις απόδοσης μέσω του κώδικα PENELOPE εκτιμήθηκαν ως ο λόγος της απόδοσης χόματος προς την απόδοση πηγής βαθμονόμησης 4M HCl, όμοια με την παραμετρική μελέτη, τόσο για τη γεωμετρία «8», όσο και για τη νέα γεωμετρία. Η εκτίμηση των συντελεστών αναγωγής απόδοσης στο πρόγραμμα factor για τις δύο γεωμετρίες, έγινε τόσο για τους ολικούς γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης του χόματος της προσομοίωσης, όσο και για το χόμα που χρησιμοποιεί ο κώδικας επεξεργασίας γ-φασμάτων SPUNAL για την υπόψη πυκνότητα.
4. Εκτίμηση των τελικών αποδόσεων του ^{210}Pb για τις τρεις πυκνότητες χόματος, με διαφορετικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν τη μεταφορά απόδοσης. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες ορίζονται ανάλογα με το αν οι προσομοιούμενες αποδόσεις που συμμετέχουν στη μεταφορά απόδοσης αφορούν υλικό χόμα ή 4M HCl, αν εφαρμόζεται διόρθωση απόδοσης στην

αρχική γεωμετρία «8» ή στην τελική νέα γεωμετρία, καθώς και αν ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης προσεγγίστηκε μέσω του κώδικα PENELOPE ή του προγράμματος factor.

5. Σύγκριση των μεθοδολογιών εκτίμησης της τελικής απόδοσης και επιλογή μίας από αυτές για να εφαρμοστεί για τα δείγματα χώματος που ελήφθησαν και τις ενέργειες των φωτονίων ^{210}Pb , ^{214}Bi και ^{234}Th . Τα βήματα της μεθοδολογίας παρουσιάζονται στο βήμα 7.
6. Εκτίμηση των συντελεστών αναγωγής απόδοσης μέσω του κώδικα factor για τη νέα γεωμετρία, για όλες τις πυκνότητες δειγμάτων, και το υλικό χώματος του κώδικα SPUNAL.
7. Υπολογισμός των τελικών αποδόσεων των δειγμάτων για τα ισότοπα ^{210}Pb , ^{214}Bi και ^{234}Th . Εφαρμόστηκε η μεταφορά απόδοσης με βάση τη μεθοδολογία που επιλέχθηκε. Η μεθοδολογία αυτή υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας:
 - i. Τις προσομοιώσεις των ενεργειών των ισωτόπων ^{210}Pb , ^{214}Bi και ^{234}Th , για υλικό πηγής 4M HCl, τόσο για τη γεωμετρία «8» όσο και τη νέα γεωμετρία.
 - ii. Τις πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής των ισωτόπων ^{210}Pb , ^{214}Bi και ^{234}Th για γεωμετρία «8» και την πηγή βαθμονόμησης στο διάλυμα 4M HCl.
 - iii. Τις διορθώσεις απόδοσης της νέας γεωμετρίας, μέσω του προγράμματος factor, για όλες τις πυκνότητες δειγμάτων, και το υλικό χώματος του κώδικα SPUNAL. Αυτό το βήμα εφαρμόστηκε μόνο για τα ισότοπα ^{210}Pb και ^{234}Th λόγω των χαμηλών ενεργειών των φωτονίων τους (46.52 keV και 63.29 keV αντίστοιχα). Το ^{214}Bi εκπέμπει φωτόνια υψηλότερης ενέργειας (609.32 keV), τα οποία δεν υπόκεινται σε αυτοαπορρόφηση, επομένως δεν απαιτείται διόρθωση απόδοσης.

Με γνωστές τις τελικές αποδόσεις για τα δύο κατά βάθος δείγματα, εκτιμήθηκαν οι ραδιενέργειες των ισωτόπων ^{210}Pb , ^{226}Ra και ^{234}Th για κάθε κλάσμα βάθους. Η ραδιενέργεια του ^{226}Ra προσδιορίστηκε μέσω του βραχύβιου θυγατρικού του ^{214}Bi ($T_{1/2}=19.8$ λεπτά), με τα δύο ισότοπα να θεωρούνται ότι βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία.

5.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα Δ.Ε., αναφέρονται στην παραμετρική μελέτη των γεωμετριών μικρού όγκου, καθώς και στις αναλύσεις χώματος που έγιναν με χρήση της γεωμετρίας δείγματος που επιλέχθηκε χάρη στη μελέτη αυτή. Τα συγκριτικά συμπεράσματα ισχύουν τόσο για υλικό χώμα, όσο και ιπτάμενη τέφρα, διότι τα αποτελέσματά τους ήταν παρεμφερή για τον ^{210}Pb , και ήταν τα εξής:

- Η έως τώρα μικρότερη γεωμετρία του ΕΠΤ-ΕΜΠ («Θ» στην παραμετρική μελέτη) έχει όγκο 40 cm^3 , ο οποίος είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τα 17.9 cm^3 της νέας γεωμετρίας «Η».
- Διαπιστώθηκε η υπεροχή της γεωμετρίας «Η» έναντι των υπολοίπων που εξετάστηκαν σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής, με παράλληλα ικανοποιητικά αποτελέσματα σε MDA και αβεβαιότητα επιφάνειας, σε σχέση με γεωμετρίες μεγαλύτερου όγκου.
- Σε όρους αβεβαιότητας φωτοκορυφής του ^{210}Pb , η γεωμετρία «Η» είναι συγκρίσιμη με τις γεωμετρίες «Ε», «ΣΤ» και «Ζ» που έχουν παραπλήσιο όγκο.
- Η γεωμετρία «Η» χρειάζεται τη μικρότερη διόρθωση απόδοσης, επομένως η επίδραση της αβεβαιότητας του συντελεστή αναγωγής απόδοσης στο τελικό αποτέλεσμα μειώνεται, οδηγώντας σε ακριβέστερες εκτιμήσεις της ραδιενέργειας ^{210}Pb .
- Οι γεωμετρίες «Θ» και «Ι» με το μεγαλύτερο ωφέλιμο όγκο παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους ρυθμούς καταμέτρησης φωτονίων και τις μικρότερες αβεβαιότητες. Η γεωμετρία «Ι» παρουσιάζει σε κάθε περίπτωση τα χαμηλότερα MDA.
- Ο ανιχνευτής LEGe υστερεί ελαφρώς σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής και ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας σε σχέση με τον ανιχνευτή XiRa-CSS, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα ελαφρώς καλύτερες αβεβαιότητες. Τα συμπεράσματα της πειραματικής σύγκρισης θα ήταν τα ίδια ακόμα και αν η μελέτη γινόταν αποκλειστικά στον ανιχνευτή αυτό.
- Σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής από προσομοίωση, οι σχετικές διαφορές μεταξύ των γεωμετριών ακολουθούν την ίδια τάση με τις πειραματικές αποδόσεις. Επομένως, η σύγκριση των αποδόσεων μεταξύ γεωμετριών

μέσω του κώδικα PENELOPE είναι αξιόπιστη για το επίπεδο λεπτομέρειας στο οποίο μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα, επομένως η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκριτικές αναλύσεις, όταν δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή πειραματικής ανάλυσης δειγμάτων.

Η ανάλυση των δειγμάτων χώματος από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου με χρήση της νέας γεωμετρίας στον ανιχνευτή LEGe απέφερε επίσης σημαντικά συμπεράσματα :

- Ο προσδιορισμός της κατά βάθους κατανομής της ραδιενέργειας των ισοτόπων έγινε με ικανοποιητικό τρόπο και αβεβαιότητες για τα ισότοπα του ^{210}Pb και ^{226}Ra (χρόνος ανάλυσης 2-5 ημέρες για κάθε κατά βάθος βήμα), παρότι το χώμα της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου είναι ασθενές από άποψη φυσικής ραδιενέργειας, με τα δύο κατά βάθος δείγματα χώματος να παρουσιάζουν σχεδόν πανομοιότυπη εικόνα, όπως αναμενόταν.
- Το ^{234}Th παρουσίασε αυξημένες αβεβαιότητες ανάλυσης, οι οποίες αποδίδονται στο έντονο διακριτό υπόστρωμα της θωράκισης της ανιχνευτικής διάταξης, επομένως τουλάχιστον για αυτό το ισότοπο προτείνεται η ανάλυσή του από τον ανιχνευτή XiRa.
- Ως προς τη διαδικασία βαθμονόμησης, η μεθοδολογία που βασίζεται στη μεταφορά απόδοσης και εν τέλει χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς των ραδιενεργειών, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, στα πλαίσια όπου η πειραματική βαθμονόμηση της νέας γεωμετρίας με πιστοποιημένη πηγή δεν είναι εφικτή.
- Σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η μελέτη της κατά βάθους κοκκομετρίας, είναι βέβαιο ότι τα δύο κατά βάθος δείγματα δε θα αποφέρουν σε καμία περίπτωση αρκετή ποσότητα χώματος ώστε να πληρωθούν δείγματα για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα.

5.3 Προτάσεις και μελλοντικά βήματα

Το πρώτο μελλοντικό βήμα που προτείνεται, είναι η εκμετάλλευση της ελάφρυνσης του φόρτου της απαιτούμενης ποσότητας δειγματοληψίας χώματος, για τη διεξαγωγή μελετών που, σε άλλες περιπτώσεις, θα ήταν εξαιρετικά επίπονες. Μια τέτοια μελέτη είναι ο προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής σε συνδυασμό με

την κοκκομετρική κατανομή των διαφόρων ισοτόπων στα διάφορα κλάσματα του χώματος. Εκτιμάται ότι σε κάθε θέση δειγματοληψίας θα πρέπει να λαμβάνονται περί τα 10 κατακόρυφα δείγματα για τη διεξαγωγή μιας μελέτης τέτοιου είδους, ώστε να είναι δυνατή η κοκκομετρική ανάλυση σε κάθε δείγμα βάθους.

Εφόσον διαπιστώθηκε ότι ο ποσοτικός προσδιορισμός του ^{210}Pb γίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια, είναι δυνατή η συσχέτιση του κατακόρυφου προφίλ του ^{210}Pb με την εκροή του ραδονίου από το έδαφος. Επίσης, μπορεί να γίνει μελέτη της κατά βάθος συγκέντρωσης σε περιοχές ενδιαφέροντος με πιθανή ανθρωπογενή απόθεση ^{210}Pb όπως π.χ. λόγω ιπτάμενης τέφρας ή πιθανής διατάραξης της κατά βάθος συγκέντρωσης γύρω από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεως. Τέλος, προτείνεται η δειγματοληψία σε περιοχές όπου λόγω της ύπαρξης θερμών πηγών ή τεκτονικών ρηγμάτων αναμένεται ή και έχει διαπιστωθεί υψηλή απόθεση ^{210}Pb στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. περιοχή Θερμοπυλών).

Πάντως, κρίνεται απαραίτητη η βαθμονόμηση απόδοσης για τον προσδιορισμό και άλλων ισοτόπων φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, θα είναι δυνατή η μελέτη των κατακόρυφων προφίλ σημαντικών ισοτόπων, όπως αυτών που σχετίζονται με πυρηνικά (^{137}Cs) ή ραδιολογικά (^{241}Am) ατυχήματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

Παρατίθενται τα πιστοποιητικά των ανιχνευτών XtRa και LEGe που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της Δ.Ε.

A.1 Πιστοποιητικό XtRa

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Detector Model GX10021 Serial number b 00078
 Cryostat Model 7500SL
 Preamplifier Model 2002CSL
 The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :
 Nominal volume cc Relative efficiency 100 %
 Resolution 2.10 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWTM) at 1.33 MeV
1.20 keV (FWHM) at 122 keV
 keV (FWTM) at
 Peak/Compton 78:1 Cryostat well diameter mm Well depth mm
 Cryostat description or Drawing Number if special Vertical Dipstick, type 7500SL (Carbon Epoxy window) + 4"
CFE

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window
 Diameter 80 mm Active volume cc
 Length 78 mm Crystal well depth mm
 Distance from window (outside) 5 mm Crystal well diameter mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+4000) Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+4500) Vdc
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.1 Vdc

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 6 μs

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	1.03	2.04			
FWTM (keV)		3.99			
Peak/Compton		82.2:1			
Rel. Efficiency		104.5%			

- Test are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996
 - Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by :

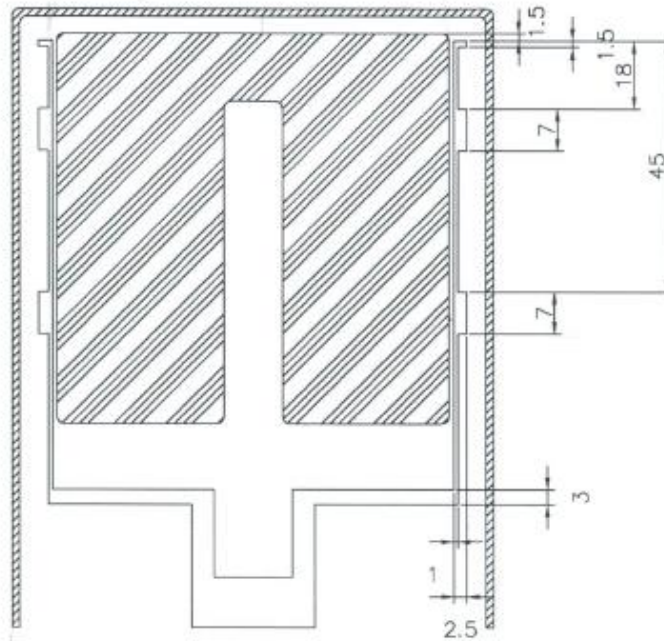
Date : September 7, 1999

Approved by :

Date : September 7, 1999

Docum : GDAME001	Date : 02/02/99
Issue : Spec. Sheet GC	Name : PVE
Revue : D	Page : 1/1
Basis : 0.W001PVE.15	Appr :

S/N 00078



Ge Crystal Details

Entrance Window Thickness: 0.4 μm eq. Ge
 Outer Electrode Thickness: 0.75 mm estimated
 Inner Electrode Thickness: 0.3 μm
 Crystal Diameter: 80 mm
 Crystal Length: 78 mm
 Core Hole Diameter: 11 mm
 Core Hole Depth: 66.5 mm

Detector Chamber Material Details

Ge front to inside of endcap distance: 5 mm
 Cryostat Window Material: Carbon Epoxy Thickness: 0.5 mm
 Endcap Material: Al Thickness: 1.5 mm
 Crystal Holder Material: Al

CONFIDENTIAL

Unauthorized duplication of information herein is strictly prohibited.

INNER DRAWING X tra		Appr.:	
Date: 03/04/07		Doc: MCNPGX-type	
MAT:		Auth.: Mar	
SCALE: not to scale		Bestelnr: b 00078	
TOL:		Aantal:	

A.2 Πιστοποιητικό 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 follow:

Energy	5.9 keV	122 keV	
Resolution [eV (FWHM)]	400	680	

Cryostat Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4" CFE + PHW

7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1988

Actual performance of this detector when tested is given below.

Active Diameter 50.5 mm

Active Area 2000 mm²

Thickness 20 mm

Distance from Window 5 mm

Window Thickness .5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage (-)1500 Vdc.

Recommended Bias Voltage (-)2000 Vdc.

Reset Rate at Recommended Bias / sec. (PO Preamp only)

Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias + .4 Vdc. (RC Preamp only)

RESOLUTION AND EFFICIENCY - With Amp. Time Constant of 4 microseconds.

Isotope	Fe ⁵⁵	Co ⁵⁷	Co ⁶⁰		
Energy (keV)	5.9	6.4 *	122		
FWHM (eV)	341		530		
FWTM (eV)			996		

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

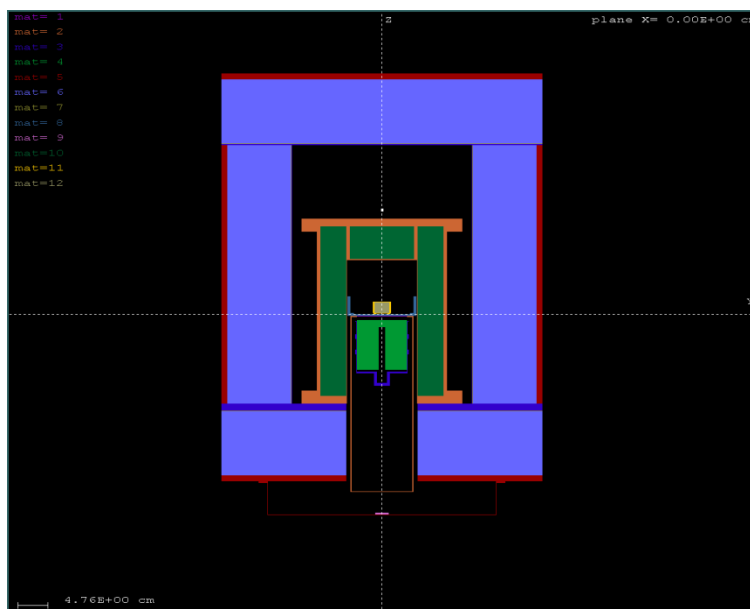
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ PENELOPE

Σε αυτό το παράρτημα δίνονται τα αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, οι τροποποιήσεις που έγιναν στον κώδικα χρήστη για την προσομοίωση πηγών όγκου, καθώς και ο έλεγχος της ομοιογένειας αυτών.

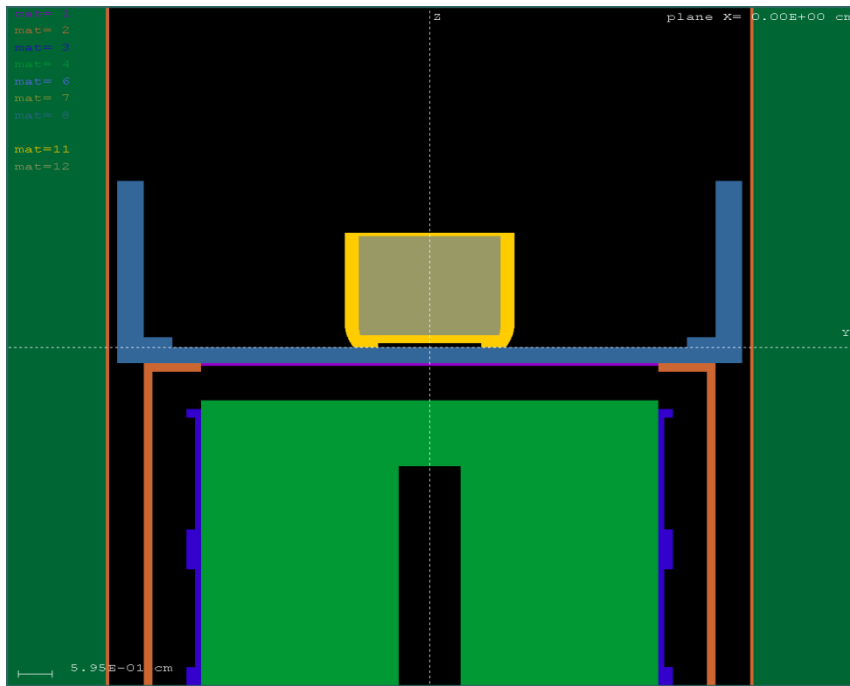
B.1 Αρχεία γεωμετρίας “.geo”

Παρακάτω παρατίθενται τα αρχεία γεωμετρίας με επέκταση “.geo” που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τον ανιχνευτή XtRa (Κεφάλαια 3 και 4), όσο και στον υπολογισμό των ραδιενεργιών των δειγμάτων χώματος που ελήφθησαν στην εφαρμογή της νέας γεωμετρίας (Κεφάλαιο 4). Τονίζεται πως το πλήρες μοντέλο του ανιχνευτή XtRa δίνεται στην παράγραφο B.1.1, το οποίο περιέχει και τις επιφάνειες και σώματα του δείγματος γεωμετρίας «A». Για τις γεωμετρίες «B»-«I», παρατίθενται μόνο οι επιφάνειες και τα σώματα που περιγράφουν το δείγμα της εκάστοτε γεωμετρίας. Για τη γεωμετρία «8», καθώς και τη νέα γεωμετρία που υιοθετήθηκε, παραδίδονται τα πλήρη αρχεία γεωμετρίας του ανιχνευτή LEGe.

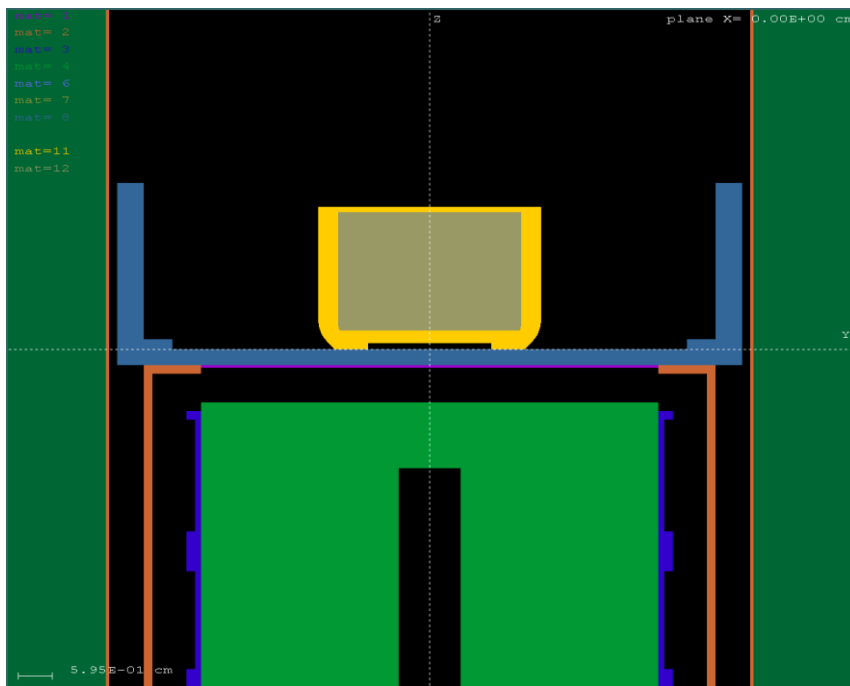
Επίσης, δίνονται τα Σχήματα B.1-B.14 που παράγει το βοηθητικό γραφικό πρόγραμμα “gview2d.exe” όταν λαμβάνει ως είσοδο καθένα από τα αρχεία γεωμετρίας “.geo”.



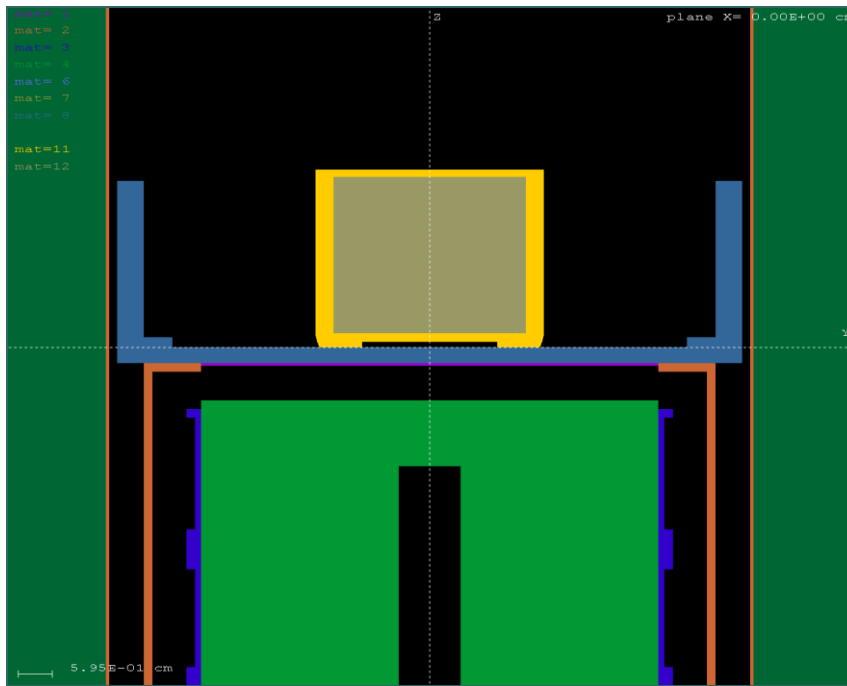
Σχήμα B.1: Το μοντέλο γεωμετρίας του ανιχνευτή XtRa, εφοδιασμένου με το CCS. Εντός της ανιχνευτικής διάταξης περιέχεται δείγμα γεωμετρίας A.



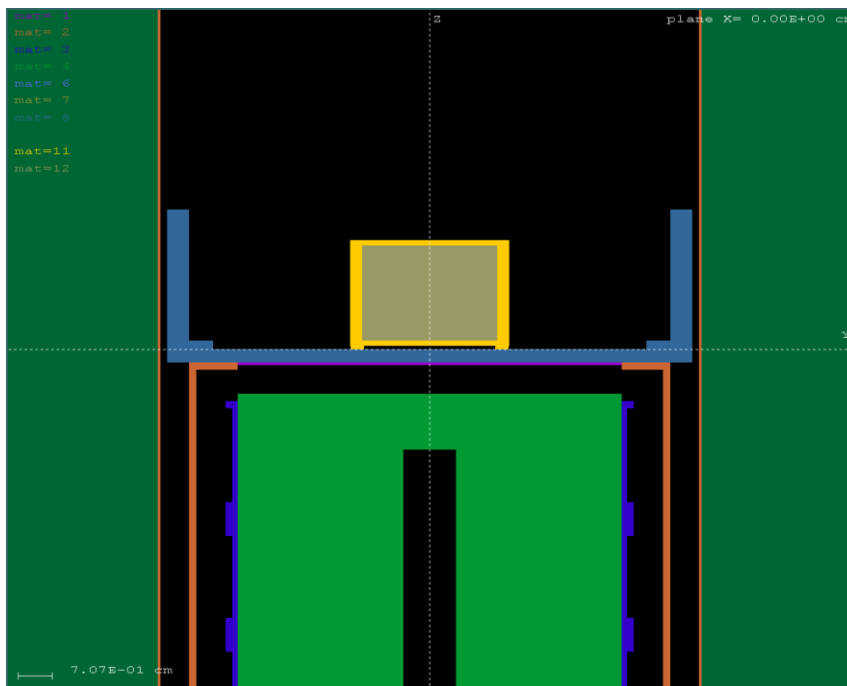
Σχήμα Β.2: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Α εντός της ανιχνευτικής διάταξης XiRa-CSS.



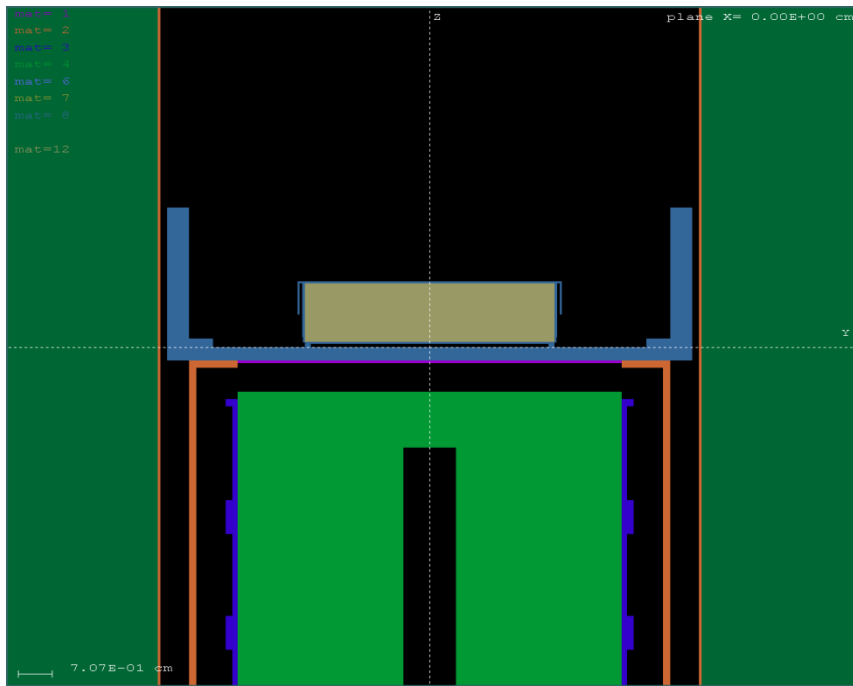
Σχήμα Β.3: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Β εντός της ανιχνευτικής διάταξης XiRa-CSS.



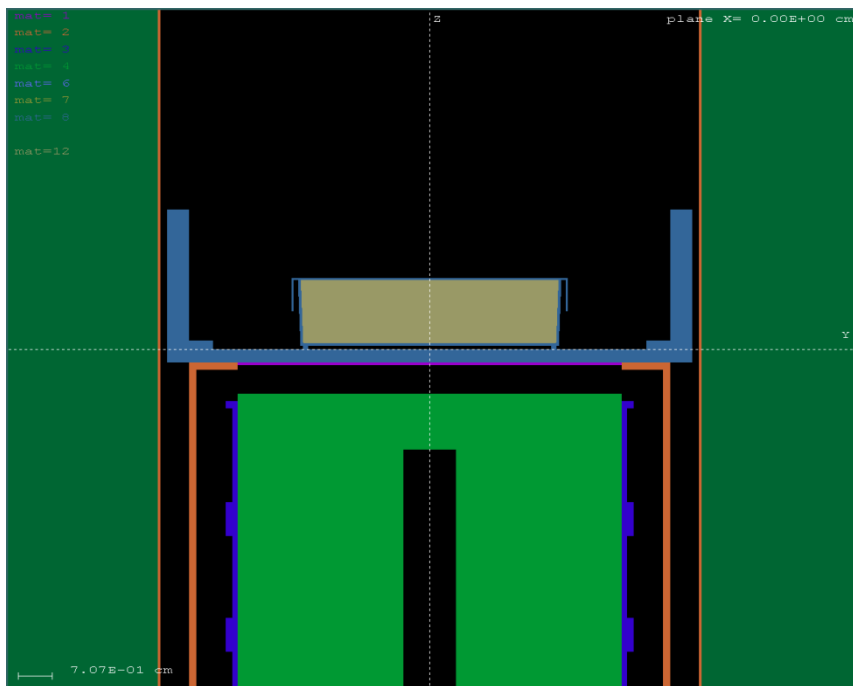
Σχήμα Β.4: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Γ εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



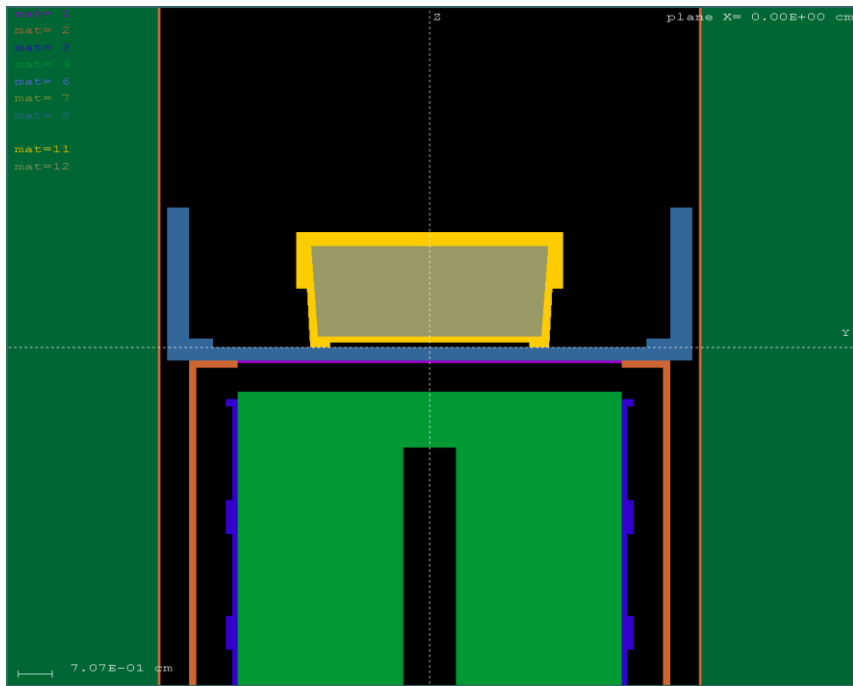
Σχήμα Β.5: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Δ εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



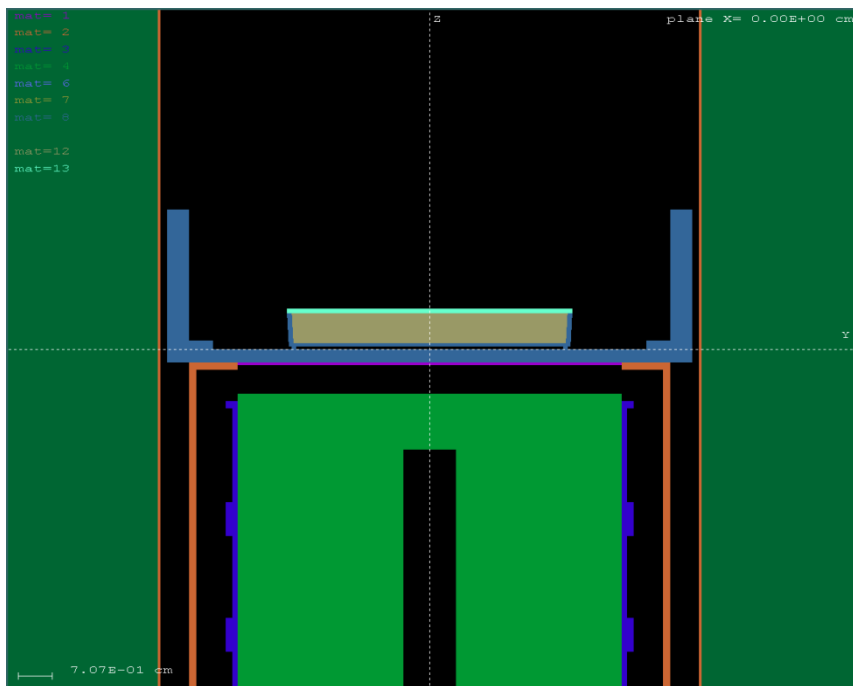
Σχήμα Β.6: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος E εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



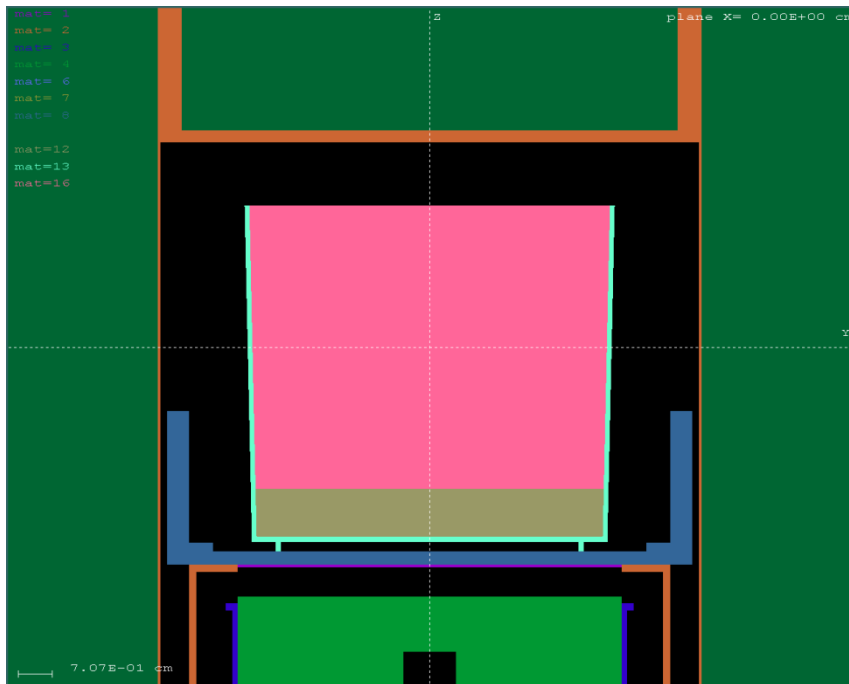
Σχήμα Β.7: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος ΣΤ εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



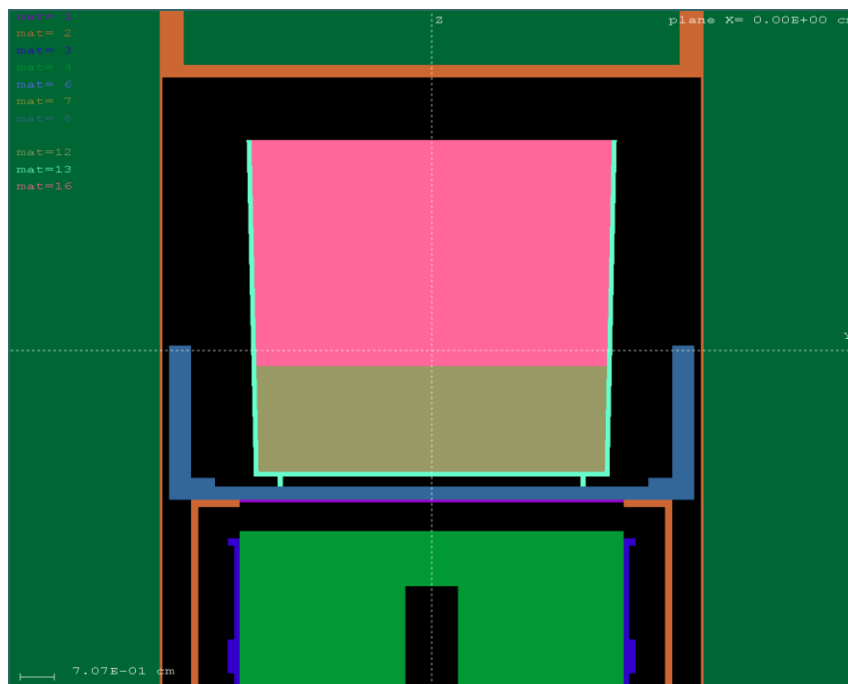
Σχήμα Β.8: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Z εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



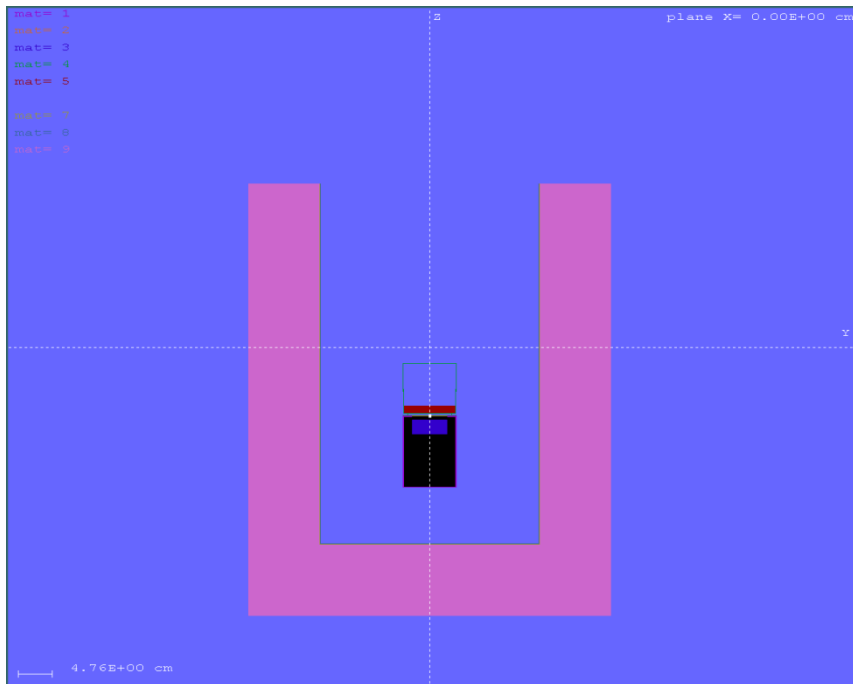
Σχήμα Β.9: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος H εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



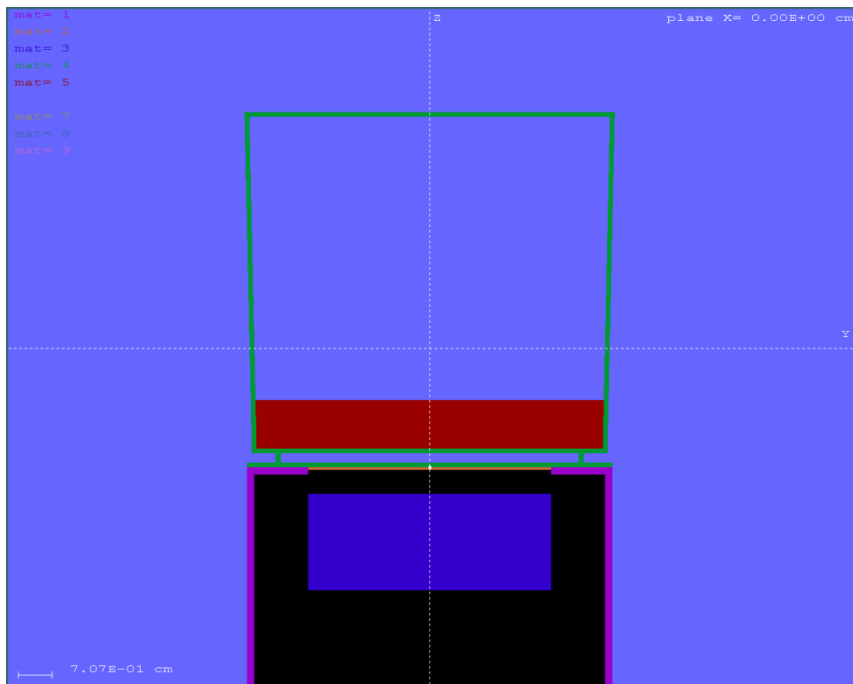
Σχήμα B.10: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Θ (γεωμετρία 8 EIT-EMII) εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



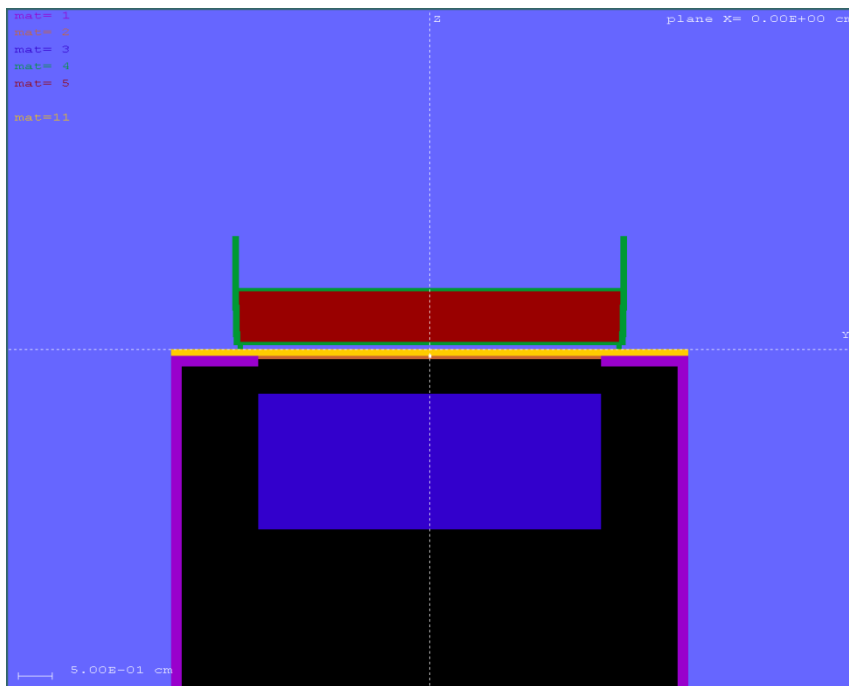
Σχήμα B.11: Το μοντέλο της γεωμετρίας δείγματος Ι (γεωμετρία 5 EIT-EMII) εντός της ανιχνευτικής διάταξης XtRa-CSS.



Σχήμα B.12: Το μοντέλο γεωμετρίας του ανιχνευτή LEGE. Εντός της ανιχνευτικής διάταξης περιέχεται δείγμα γεωμετρίας 8.



Σχήμα B.13: Το μοντέλο γεωμετρίας δείγματος 8 εντός της ανιχνευτικής διάταξης LEGE.



Σχήμα Β.14: Το μοντέλο της νέας γεωμετρίας δείγματος που υιοθετήθηκε εντός της ανιχνευτικής διάταξης LEGe.

B.1.1 Αρχείο γεωμετρίας A, ανιχνευτής XtRa

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XtRa Geometry Data from Canberra
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=-16.6
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6600000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-16.65
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6650000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-16.75
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1675000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-27.6
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.7600000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-17.4
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)

```



```

AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
A0=( 1.80000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 61) PLANE X3=14.5 (29cm/2)
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=(-1.45000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 62) PLANE X4=-14.5
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=( 1.45000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 63) PLANE Z34=-47.72
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 4.77200000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 64) PLANE Z35=-47.82
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 4.78200000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 65) PLANE Y5= 18.1 (1mm paxos tapsiou)
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=(-1.81000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 66) PLANE Y6=-18.1
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=( 1.81000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 67) PLANE X5=14.6 (1mm paxos tapsiou)
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)

```


00
SURFACE (95) INNER PATOS Z=-16.10
INDICES=(0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=(1.610000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (96) PLANE ENARXIS KAMPYLOTHAS Z2=-15.88
INDICES=(0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=(1.588000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (97) OUTER KAMPYLOTHA R=1.49
INDICES=(1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=(1.490000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=(1.490000000000000E+00, 0)
Z-SHIFT=(-1.588000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (98) INNER KAMPYLOTHA R=1.2475
INDICES=(1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=(1.247500000000000E+00, 0)
Y-SCALE=(1.247500000000000E+00, 0)
Z-SHIFT=(-1.588000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (99) TOP PLANE DIXWS KAPAKI Z3=-14.37
INDICES=(0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=(1.437000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (101) CYL PATOURAS R=0.905
INDICES=(1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=(0.905000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=(0.905000000000000E+00, 0)
00
SURFACE (102) PLANE PATOURAS Z=-16.25
INDICES=(0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=(1.625000000000000E+01, 0)
00
SURFACE (103) TOP PLANE ME KAPAKI Z3=-14.32
INDICES=(0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=(1.431000000000000E+01, 0)
00
BODY (1) Cryostat Window
MATERIAL(1)
SURFACE (1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (2) Upper Aluminum
MATERIAL(2)
SURFACE (1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (3) Side Aluminum
MATERIAL(2)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (52), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (7), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (4) Down Aluminum
MATERIAL(2)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (5) Side Cu 1/9
MATERIAL(3)
SURFACE (8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (10), SIDE POINTER=(-1)

```

SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6) Side Cu 2/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7) Side Cu 3/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 8) Side Cu 4/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 9) Side Cu 5/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 10) Side Cu 6/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 11) Side Cu 7/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 12) Side Cu 8/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 13) Side Cu 9/9
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 14) Ge front Dead Layer
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 21), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 15) Ge Crystal Upper
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

```

BODY      ( 16)    Ge Crystal Well
MATERIAL(   4)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 17)    Shield Upper 1/4
MATERIAL(   5)
SURFACE ( 26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 18)    Shield Upper 2/4
MATERIAL(   6)
SURFACE ( 27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 19)    Shield Upper 3/4
MATERIAL(   7)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 20)    Shield Upper 4/4
MATERIAL(   3)
SURFACE ( 29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 21)    Shield Side 1/4
MATERIAL(   5)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 32), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 22)    Shield Side 2/4
MATERIAL(   6)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 32), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 23)    Shield Side 3/4
MATERIAL(   7)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 24)    Shield Side 4/4
MATERIAL(   3)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 25)    Shield Down 1/4
MATERIAL(   3)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 26)    Shield Down 2/4
MATERIAL(   7)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(-1)

```

```

SURFACE ( 38), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 27) Shield Down 3/4
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 38), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 28) Shield Down 4/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 29) Polyprorylene Cap
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 30) Polyprorylene Well
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 89), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 91), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 31) Polyprorylene patoura
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 89), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 90), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 32) Ge Dead Layer peripheral
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 33) patoura tapsiou 1/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 55), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 58), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 34) patoura tapsiou 2/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 56), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 60), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 58), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 35) patoura tapsiou 3/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 61), SIDE POINTER=(+1)

```



```

SURFACE ( 71), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 44) teflon prostateftiko patoura
MATERIAL( 9)
SURFACE ( 74), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 70), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 73), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 63), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 45) Al base of annulus NaI 1/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 75), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 76), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 77), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 46) Al base of annulus NaI 2/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 75), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 78), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 80), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 76), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 47) Al inside annulus cap
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 75), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 77), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 81), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 48) Al outside annulus cap
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 79), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 80), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 75), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 49) NaI annulus
MATERIAL( 10)
SURFACE ( 81), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 79), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 75), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 50) upper Al base of annulus 1/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 83), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 80), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 76), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 51) upper Al base of annulus 2/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 84), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 77), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 76), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 52) Al base of plug 1/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 85), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 86), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 77), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 53) Al base of plug 2/2
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 86), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 87), SIDE POINTER=(+1)

```



```
BODY ( 9)
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 ( 28)
BODY ( 29)
BODY ( 30)
BODY ( 31)
BODY ( 32)
BODY ( 33)
BODY ( 34)
BODY ( 35)
BODY ( 36)
BODY ( 37)
BODY ( 38)
BODY ( 39)
BODY ( 40)
BODY ( 41)
BODY ( 42)
BODY ( 43)
BODY ( 44)
BODY ( 45)
BODY ( 46)
BODY ( 47)
BODY ( 48)
BODY ( 49)
BODY ( 50)
BODY ( 51)
BODY ( 52)
BODY ( 53)
BODY ( 54)
BODY ( 55)
BODY ( 56)
BODY ( 57)
BODY ( 58)
BODY ( 59)
BODY ( 60)
BODY ( 61)
BODY ( 62)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

B.1.2 Τμήμα αρχείου γεωμετρίας B, ανιχνευτής XtRa

Οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωμετρία του δοχείου ήταν:

```
SURFACE ( 92) -GEO DOXEIOU EDW K KATW-OUTER CYLINDER R=1.95
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.9500000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 1.9500000000000000E+00, 0)
```



```

SURFACE ( 97), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 59) YPOLOIPO DOXEIO
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 96), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 60) KAPAKI
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 61) PHGH OGKOU ENTOS "YPOLOIPO DOXEIO"
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 96), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 62) PHGH OGKOU ENTOS ENARXI KAMP WS INNER PATOS
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 96), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 98), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

B.1.3 Τμήμα αρχείου γεωμετρίας Γ, ανιχνευτής ΧiRa

Οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωμετρία του δοχείου ήταν:

```

SURFACE ( 92) -GEO DOXEIOU EDW K KATW-OUTER CYLINDER R=2.0
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.0000000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.0000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 93) INNER CYLINDER R=1.685
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.6850000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 1.6850000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 94) PATOS Z=-16.32
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6320000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 95) INNER PATOS Z=-16.065
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6065000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 97) OUTER KAMPYLOTHHTA R=2.00
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 2.0000000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.0000000000000000E+00, 0)
Z-SHIFT=(-1.6050000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 99) TOP PLANE DIXWS KAPAKI Z3=-13.34
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.3340000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 101) CYL PATOURAS R=1.19
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.1900000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 1.1900000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```



```

000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 96)  PLANE ENARXIS KAMPYLOTHTAS Z2=-16.14
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6140000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 97)  OUTER KAMPYLOTHTA R=1.665
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 1.6650000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 1.6650000000000000E+00, 0)
Z-SHIFT=(-1.6140000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 99)  TOP PLANE DIXWS KAPAKI Z3=-14.155
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.4155000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 101)  CYL PATOURAS R=1.37
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.3700000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 1.3700000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 102)  PLANE PATOURAS Z=-16.245
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6245000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 103)  TOP PLANE ME KAPAKI Z3=-14.045
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.4045000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Τα bodies που απαρτίζουν τη γεωμετρία του δοχείου είναι:

```

BODY ( 57)  PATOS
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 97), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 58)  PATOURA
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 94), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 97), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 59)  YPOLOIPO DOXEIO
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 60)  KAPAKI
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 61)  PHGH OΓKΟΥ ENTOS "ΥΠΟΛΟΙΠΟ ΔΟΧΕΙΟ"
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```



```

      AX=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AY=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AZ=(-0.6598900000000000E+00,  0)
      A0=(-1.6227600000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 93)  INNER CONE
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AXX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AXZ=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AYZ=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AYY=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AZZ=(-0.0067100000000000E+00,  0)
      AX=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AY=( 0.0000000000000000E+00,  0)
      AZ=(-0.6418748700000000E+00,  0)
      A0=(-1.5353500000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 94)  PATOS Z=-16.32
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6320000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 95)  INNER PATOS Z=-16.218
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6218000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 97)  PLANE auti kapaki
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.5515000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 98)  CYL outer egkopis R=2.635
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.6350000000000000E+00,  0)
Y-SCALE=( 2.6350000000000000E+00,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 99)  TOP PLANE DIXWS KAPAKI Z3=-14.875
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.4875000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 101)  CYL PATOURAS R=2.5275
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.5275000000000000E+00,  0)
Y-SCALE=( 2.5275000000000000E+00,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 102)  PLANE PATOURAS Z=-16.245
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6245000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 103)  TOP PLANE ME KAPAKI Z3=-14.775
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.4775000000000000E+01,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 104)  CYL out kapaki R=2.9525
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.9525000000000000E+00,  0)
Y-SCALE=( 2.9525500000000000E+00,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 105)  CYL in kapaki R=2.8525
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.8525000000000000E+00,  0)
Y-SCALE=( 2.8525000000000000E+00,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Τα bodies που απαρτίζουν τη γεωμετρία του δοχείου είναι:

BODY (56) KYRIWS DOXEIO

```
MATERIAL( 08)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 57) PATOS
MATERIAL( 08)
SURFACE ( 92), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 59) PATOURA
MATERIAL( 08)
SURFACE ( 98), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 94), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 60) KAPAKI
MATERIAL( 08)
SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 61) AUTI KAPAKI
MATERIAL( 08)
SURFACE ( 97), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 62) PHGH OGKOU
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

B.1.7 Τμήμα αρχείου γεωμετρίας Z, ανιχνευτής XiRa

Οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωμετρία του δοχείου ήταν:

```
SURFACE ( 92) -GEO DOXEIOU EDW K KATW-OUTER cone
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
Ayy=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZZ=(-0.0029362520000000E+00, 0)
AX=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZ=(-0.3654832680000000E+00, 0)
A0=(-1.1373200000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 93) INNER CONE
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
Ayy=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZZ=(-0.0056846810000000E+00, 0)
AX=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
```



```

00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 60) KAPAKI
MATERIAL( 11)
SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 62) PHGH OGGOU
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 93), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 95), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

B.1.8 Τμήμα αρχείου γεωμετρίας H, ανιχνευτής XtRa

Οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωμετρία του δοχείου ήταν:

```

SURFACE ( 92) -GEO DOXEIOU EDW K KATW-OUTER cone
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
Ayy=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZZ=(-0.0029907230000000E+00, 0)
AX=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZ=(-0.4179150390000000E+00, 0)
AO=(-1.4599563380000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 93) INNER CONE
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
Ayy=( 1.0000000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZZ=(-0.0029907230000000E+00, 0)
AX=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AY=( 0.0000000000000000E+00, 0)
AZ=(-0.4069775390000000E+00, 0)
AO=(-1.3845375880000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 94) PATOS Z=-16.32
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6320000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 95) INNER PATOS Z=-16.20
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.6200000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 98) CYL outer egkopis R=2.87
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.8700000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.8700000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 99) TOP PLANE DIXWS KAPAKI Z3=-15.56
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 1.5560000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 101) CYL PATOURAS R=2.775
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.7750000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.7750000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```



```

AXX=( 1.000000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.000000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
AYY=( 1.000000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
AZZ=(-0.000472590000000E+00, 0)
AX=( 0.000000000000000E+00, 0)
AY=( 0.000000000000000E+00, 0)
AZ=(-0.171663516000000E+00, 0)
A0=(-1.558876389000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Τα bodies που απαρτίζουν τη γεωμετρία του δοχείου είναι:

```

BODY ( 56) patoura
MATERIAL( 13)
SURFACE ( 98), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 103), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 57) patos doxeiou
MATERIAL( 13)
SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 99), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 58) toixoma kirios doxeiou
MATERIAL( 13)
SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 59) pigi ogkou
MATERIAL( 12)
SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 60) aeras ypoloipo doxeio
MATERIAL( 16)
SURFACE ( 106), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

B.1.11 Αρχείο γεωμετρίας γεοδ, ανιχνευτής LEGe

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEGe Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.050000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=2.525
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.525000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 2.525000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15

```



```

SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 15) Cu bottom
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 16) Cu right
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 17) Cu left
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 18) Cu front
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 19) Cu back
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 44), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 20) Sn bottom
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 21) Sn right
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 22) Sn left
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)

```

SURFACE (42), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (46), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 000
 BODY (23) Sn front
 MATERIAL(7)
 SURFACE (41), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (42), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 000
 BODY (24) Sn back
 MATERIAL(7)
 SURFACE (45), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (46), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 000
 BODY (25) Fe bottom
 MATERIAL(9)
 SURFACE (37), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (38), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (47), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (55), SIDE POINTER=(+1)
 000
 BODY (26) Fe right
 MATERIAL(9)
 SURFACE (50), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (47), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (37), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 000
 BODY (27) Fe left
 MATERIAL(9)
 SURFACE (54), SIDE POINTER=(-1)
 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)
 000
 BODY (28) 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)
 000
 BODY (29) 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)
 000
 BODY (30) kapaki


```

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 103)  CYLINDER out patouras
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.820000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.820000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 104)  CYLINDER in patouras
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.750000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.750000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 105)  Konos eksoterikos kyriws doxeiou
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.000000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.000000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AZZ=(-0.000633306000000E-00, 0)
  AX=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AZ=(-0.144993441000000E+00, 0)
  A0=(-8.298955221000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 106)  Konos esoterikos kyriws doxeiou
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
  AXX=( 1.000000000000000E+00, 0)
  AXY=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AXZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AYY=( 1.000000000000000E+00, 0)
  AYZ=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AZZ=(-0.000633306000000E-00, 0)
  AX=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AY=( 0.000000000000000E+00, 0)
  AZ=(-0.139960328000000E+00, 0)
  A0=(-7.732797076000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 107)  zinnerpatoskapaki=1.0107
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.010700000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 108)  CYLINDER out kapaki
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.905000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.905000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 109)  CYLINDER in kapaki
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.805000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 2.805000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 110)  ztopkapaki=1.7657
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.765700000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) Be Cryostat Window
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
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)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3) Al side

```



```
BODY ( 14) Cu bottom
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 15) Cu right
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 16) Cu left
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 17) Cu front
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 18) Cu back
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 44), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 19) Sn bottom
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 20) Sn right
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 21) Sn left
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 53), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
```

SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 00
 BODY (22) Sn front
 MATERIAL(7)
 SURFACE (41), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (42), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 00
 BODY (23) Sn back
 MATERIAL(7)
 SURFACE (45), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (46), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 00
 BODY (24) Fe bottom
 MATERIAL(9)
 SURFACE (37), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (38), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (47), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (55), SIDE POINTER=(+1)
 00
 BODY (25) Fe right
 MATERIAL(9)
 SURFACE (50), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (47), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (37), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
 00
 BODY (26) Fe left
 MATERIAL(9)
 SURFACE (54), SIDE POINTER=(-1)
 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)
 00
 BODY (27) 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)
 00
 BODY (28) 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)
 00
 BODY (29) plexiglass holder
 MATERIAL(11)
 SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)

Τα υλικά των σωμάτων των αρχείων “.geo” ορίζονται από έναν αύξοντα αριθμό, ο οποίος έρχεται σε άμεση αντιστοίχιση με τη σειρά εισαγωγής του κάθε υλικού στο συνολικό αρχείο “.mat” της εκάστοτε προσομοίωσης. Ανάλογα με το υλικό πηγής και του δοχείου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, ο αύξων αριθμός του υλικού για τα bodies που αντιστοιχούν σε υλικό πηγής, δοχείου και καπακιού δοχείου, θα πρέπει να αντιστοιχίζεται σύμφωνα με τους παρακάτω πίνακες. Ο Πίνακας B.2.1 περιλαμβάνει την αντιστοίχιση του αύξοντα αριθμού εισαγωγής υλικών στο συνολικό αρχείο “.mat” που χρησιμοποιεί ο κώδικας PENELOPE για τις προσομοιώσεις του ανιχνευτή XtRa, ενώ ο Πίνακας B.2.2, για τις προσομοιώσεις του ανιχνευτή LEGe.

# υλικού στο .geo	Χώρα προσομοίωσης		Ιπτάμενη τέφρα προσομοίωσης	
	Γεωμετρίες A-H	Γεωμετρίες Θ, Ι	Γεωμετρίες A-H	Γεωμετρίες Θ, Ι
1	Carbon	Carbon	Carbon	Carbon
2	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
3	Copper	Copper	Copper	Copper
4	Germanium	Germanium	Germanium	Germanium
5	Iron	Iron	Iron	Iron
6	Lead	Lead	Lead	Lead
7	Tin	Tin	Tin	Tin
8	Polypropylene	Polypropylene	Polypropylene	Polypropylene
9	Teflon	Teflon	Teflon	Teflon
10	NaI	NaI	NaI	NaI
11	PET	PET	PET	PET
12	Χώρα	Χώρα	Ιπτάμενη τέφρα	Ιπτάμενη τέφρα
13	Plexiglass	Plexiglass	Plexiglass	Plexiglass
14	Water	Water	Water	Water
15	4MHCl	4MHCl	4MHCl	4MHCl
16	-	Air dry sea level	-	Air dry sea level

Πίνακας B.2.1: Αύξοντες αριθμοί εισαγωγής υλικών στα συνολικά αρχεία “.mat” που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του ανιχνευτή XtRa.

#υλικού στο .geo	Χώρα προσομοίωσης		Ιπτάμενη τέφρα προσομοίωσης	
	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία	Γεωμετρία 8	Νέα γεωμετρία
1	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
2	Beryllium	Beryllium	Beryllium	Beryllium
3	Germanium	Germanium	Germanium	Germanium
4	Polystyrene	Polystyrene	Plexiglass	Polystyrene
5	Τυπικό χρώμα	Τυπικό χρώμα	4MHCl	Τυπικό χρώμα
6	Air dry sea level	Air dry sea level	Air dry sea level	Air dry sea level
7	Tin	Tin	Tin	Tin
8	Copper	Copper	Copper	Copper
9	Iron	Iron	Iron	Iron
10	4MHCl	4MHCl	-	4MHCl
11	Plexiglass	Plexiglass	-	Plexiglass

Πίνακας B.2.2: Αύξοντες αριθμοί εισαγωγής υλικών στα συνολικά αρχεία “.mat” που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του ανιχνευτή LEGe.

B.3 Γενικά αρχεία εισόδου “.in”

Σε αυτήν την παράγραφο παρατίθεται ένα παράδειγμα αρχείου εισόδου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Το συγκεκριμένο χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση της γεωμετρίας «A» στον ανιχνευτή XtRa Ανάλογα με την ενέργεια του φωτονίου που εξετάζεται, τα ονόματα των αρχείων εισόδου γεωμετρίας και υλικών, τους εικονικούς ανιχνευτές, τα ονόματα των αρχείων εξόδου, τις παραμέτρους που επηρεάζουν τα αρχεία εξόδου, τα παρακάτω πεδία αλλάζουν (Salvat et. al, 2003).

B.3.1 Παράδειγμα αρχείου εισόδου για ενέργεια 46.52 keV

TITLE Box 1

>>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 4.652e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.

NMAT 15 [Number of different materials, .le.10]
SIMPAN 1 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 2 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 3 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 4 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 5 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 6 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 7 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 8 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 9 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 10 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 11 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 12 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 13 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 14 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 15 4.7e2 4.7e1 4.7e2 0.1 0.1 4.7e2 4.7e1 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencil\ to the working directory.

PFNAME css_box1.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.

GEOMFN box1_css.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.

NBE 1e3 4.7e4 100 [E-interval and no. of energy bins]
 NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
 NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).

ENDDET 1e3 4.7e4 1000 [Energy window and number of channels]
 EDBODY 15 [Active body; one line for each body]
 EDBODY 16 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties

RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
 DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
 DUMPP 300 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 1.0e9 [Desired number of simulated showers]
 TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

B.4 Τροποποίηση κώδικα “renmain.f” για πηγή όγκου

Στις παραγράφους B.4.1 ως B.4.12, δίνονται οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα χρήστη “renmain.f” ώστε να γίνει προσομοίωση πηγής όγκου αντί για σημειακής, για όλες τις προσομοιώσεις γεωμετριών που έγιναν στους ανιχνευτές XtRa και LEGe. Η λογική των αλλαγών αυτών για κυλινδρικά, κωνικά και ημισφαιρικά τμήματα πηγών όγκου περιγράφεται στην παράγραφο 3.4. Οι εσωτερικές καμπυλότητες των γεωμετριών «A» και «B» μοντελοποιήθηκαν με ημισφαιρικά τμήματα. Επειδή η λήφθηκαν υπ’ όψιν στην τροποποίηση του κώδικα για αυτές τις δύο γεωμετρίες, δίνεται η σχέση (B-1) που χρησιμοποιήθηκε. Για το σφαιρικό τμήμα της πηγής όγκου που θεωρήθηκε, η ακτίνα του κύκλου είναι μεταβλητή ανάλογα με το τυχαίο ύψος Z:

$$r_{\text{καμπύλου τμήματος}}(Z) = \cos\left(\sin^{-1} \frac{Z_{\text{έναρξης καμπυλότητας}} - Z}{R_{in}}\right) \cdot R_{in} \quad (\text{B-1})$$

όπου:

$Z_{\text{έναρξης καμπυλότητας}}$: Το ύψος στο οποίο το δοχείο από κυλινδρικό γίνεται καμπύλο.

Z : Ύψος που επιλέγεται με γεννήτρια τυχαίων αριθμών, και βρίσκεται μεταξύ του εσωτερικού πάτου και του ύψους έναρξης καμπυλότητας.

R_{in} : Η ακτίνα του εσωτερικού κυλίνδρου του κυλινδρικού τμήματος της γεωμετρίας. Ισούται με την ακτίνα της σφαίρας που θεωρήθηκε ότι έχει κέντρο στο ύψος της έναρξης της καμπυλότητας.

B.4.1 Γεωμετρία A, ανιχνευτής XtRa

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX1
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI_CYL.DAT')
OPEN (99,FILE='OR_TOMI_SPH.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.73D0-16.10D0
IF ((Z.LE.-14.37D0).AND.(Z.GE.-15.88D0)) THEN
  X=(1-2*RAND(2.0D0))*1.2475D0
  Y=(1-2*RAND(3.0D0))*1.2475D0
  RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
  RR2=1.2475**2.0D0
  IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
ELSE
  rkamp=COS(ASIN((-15.88D0-Z)/1.2475D0))*1.2475D0
  X=(1-2*RAND(4.0D0))*rkamp
  Y=(1-2*RAND(5.0D0))*rkamp
  RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
  RR2=rkamp**2.0D0
  IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
ENDIF
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-14.802D0.AND.Z.LE.-14.800D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-16.001D0.AND.Z.LE.-15.999D0) THEN
  WRITE (99,*) X,Y,Z
ENDIF
```

B.4.2 Γεωμετρία B, ανιχνευτής XtR

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX2
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI_CYL.DAT')
OPEN (99,FILE='OR_TOMI_SPH.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.70D0-15.98D0
IF ((Z.LE.-13.92D0).AND.(Z.GE.-15.80D0)) THEN
  X=(1-2*RAND(2.0D0))*1.6075D0
  Y=(1-2*RAND(3.0D0))*1.6075D0
  RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
  RR2=1.6075D0**2.0D0
  IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
ELSE
  rkamp=COS(ASIN((-15.80D0-Z)/1.6075D0))*1.6075D0
  X=(1-2*RAND(4.0D0))*rkamp
  Y=(1-2*RAND(5.0D0))*rkamp
  RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
  RR2=rkamp**2.0D0
  IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
ENDIF
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-14.501D0.AND.Z.LE.-14.499D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.901D0.AND.Z.LE.-15.899D0) THEN
  WRITE (99,*) X,Y,Z
ENDIF
```

B.4.3 Γεωμετρία Γ, ανιχνευτής XtRa

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX3
      OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
      OPEN (98,FILE='OR_TOMI_CYL.DAT')
4444  Z=RAND(1.0D0)*2.725D0-16.065D0
      X=(1-2*RAND(2.0D0))*1.685D0
      Y=(1-2*RAND(3.0D0))*1.685D0
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=1.685D0**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
        WRITE (97,*) X,Y,Z
      ENDIF
      IF (Z.GE.-14.501D0.AND.Z.LE.-14.499D0) THEN
        WRITE (98,*) X,Y,Z
      ENDIF
```

B.4.4 Γεωμετρία Δ, ανιχνευτής XtRa

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX4
      OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
      OPEN (98,FILE='OR_TOMI_CYL.DAT')
4444  Z=RAND(1.0D0)*1.985D0-16.14D0
      IF((Z.LE.-14.155D0).AND.(Z.GE.-16.14D0)) THEN
        X=(1-2*RAND(2.0D0))*1.41D0
        Y=(1-2*RAND(3.0D0))*1.41D0
        RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
        RR2=1.41D0**2.0D0
        IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      ENDIF
      IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
        WRITE (97,*) X,Y,Z
      ENDIF
      IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
        WRITE (98,*) X,Y,Z
      ENDIF
```

B.4.5 Γεωμετρία Ε, ανιχνευτής XtRa

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX5
      OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
      OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444  Z=RAND(1.0D0)*1.20D0-16.19D0
      R=0.004198153D0*Z+2.657968094D0
      X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
      Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=R**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
        WRITE (97,*) X,Y,Z
      ENDIF
      IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
        WRITE (98,*) X,Y,Z
      ENDIF
```

B.4.6 Γεωμετρία ΣΤ, ανιχνευτής XtRa

```
C ---- Initial position ...
C **** BOX6
```

```

OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.343D0-16.218D0
R=0.08190618D0*Z+3.91835443D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.7 Γεωμετρία Z, ανιχνευτής XtRa

```

C ---- Initial position ...
C **** BOX7
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.89D0-16.10D0
R=0.075396825D0*Z+3.538888889D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.8 Γεωμετρία H, ανιχνευτής XtRa

```

C ---- Initial position ...
C **** BOX8
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*0.64D0-16.20D0
R=0.0546875D0*Z+3.7209375D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.801D0.AND.Z.LE.-15.799D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.9 Γεωμετρία Θ, ανιχνευτής XtRa

```

C ---- Initial position ...
C **** BOX9
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.00D0-16.02D0
R=0.02173913D0*Z+3.94826087D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R

```

```

Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.10 Γεωμετρία I, ανιχνευτής XtRa

```

C ---- Initial position ...
C **** BOX10
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*2.20D0-16.02D0
R=0.02173913D0*Z+3.94826087D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.-15.501D0.AND.Z.LE.-15.499D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.11 Γεωμετρία 8, ανιχνευτής LEGe

```

C ---- Initial position ...
C **** geo8
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*1.00D0+0.4D0
R=0.02173913D0*Z+3.591304348D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
  WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.0.803D0.AND.Z.LE.0.805D0) THEN
  WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

B.4.12 Νέα γεωμετρία που υιοθετήθηκε, ανιχνευτής LEGe

```

C ---- Initial position ...
C **** box11
OPEN (97,FILE='KATHETI_TOMI.DAT')
OPEN (98,FILE='OR_TOMI.DAT')
4444 Z=RAND(1.0D0)*0.755D0+0.207D0
R=0.025165563D0*Z+2.780790728D0
X=(1-2*RAND(2.0D0))*R
Y=(1-2*RAND(3.0D0))*R
RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
RR2=R**2.0D0
IF (RRT.GT.RR2) GOTO 4444
IF (X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN

```

```

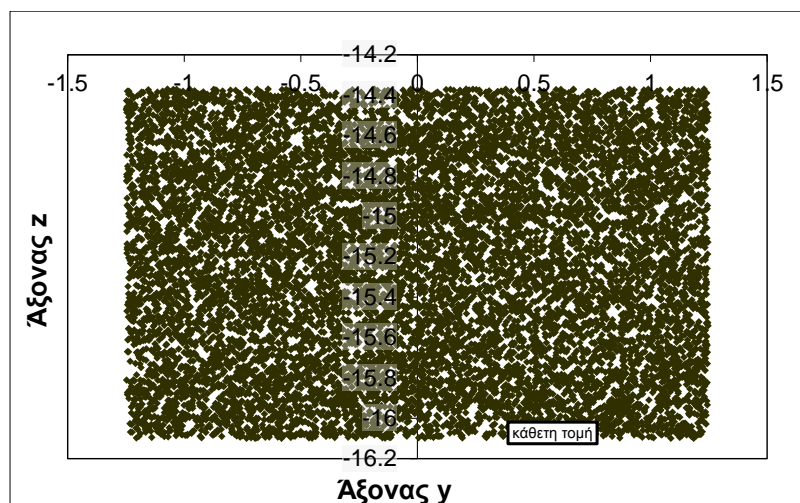
WRITE (97,*) X,Y,Z
ENDIF
IF (Z.GE.0.583D0.AND.Z.LE.0.585D0) THEN
WRITE (98,*) X,Y,Z
ENDIF

```

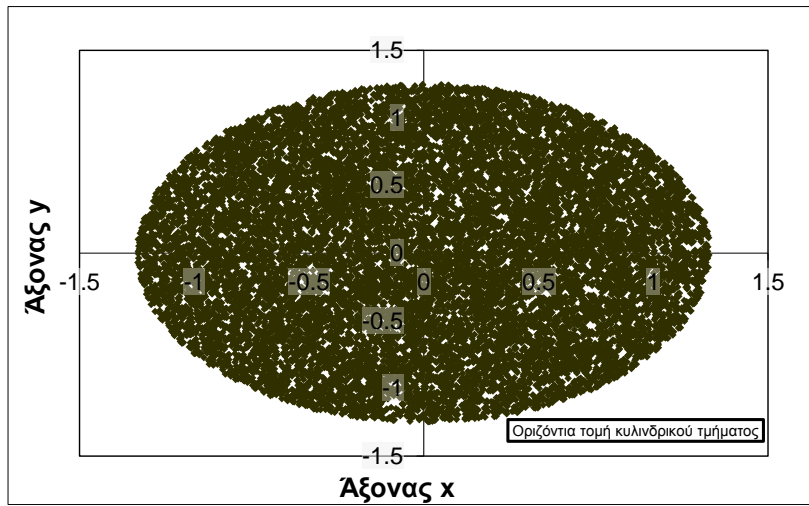
B.5 Έλεγχος ομοιομορφίας πηγής όγκου

Στις παραγράφους B.5.1 ως B.5.8 (Σχήματα B.15 ως B.31), παρουσιάζεται ο έλεγχος ομοιομορφίας της πηγής όγκου που έγινε για ορισμένες από τις γεωμετρίες. Ο λόγος για τον οποίο δεν έγινε σε όλες, είναι διότι ορισμένες γεωμετρίες μοιράζονται τις ίδιες σχέσεις επιλογής τυχαίου σημείου έναρξης της ιστορίας του φωτονίου, απλά με αλλαγμένα αριθμητικά δεδομένα που να αντιστοιχούν στο/στα σώμα/σώματα πηγής όγκου του εκάστοτε αρχείου “.geo”. Όλες οι κάθετες τομές που παρουσιάζονται έγιναν περί το $x=0$, ενώ οι οριζόντιες σε τυχαίο ύψος εντός των ορίων του ύψους της πηγής. Για τη γεωμετρία A συγκεκριμένα που μοντελοποιήθηκε η εσωτερική καμπυλότητα, έχουν οριστεί δύο οριζόντιες τομές, μία για το κυλινδρικό τμήμα της πηγής όγκου και μία για το τμήμα της εσωτερικής καμπυλότητας.

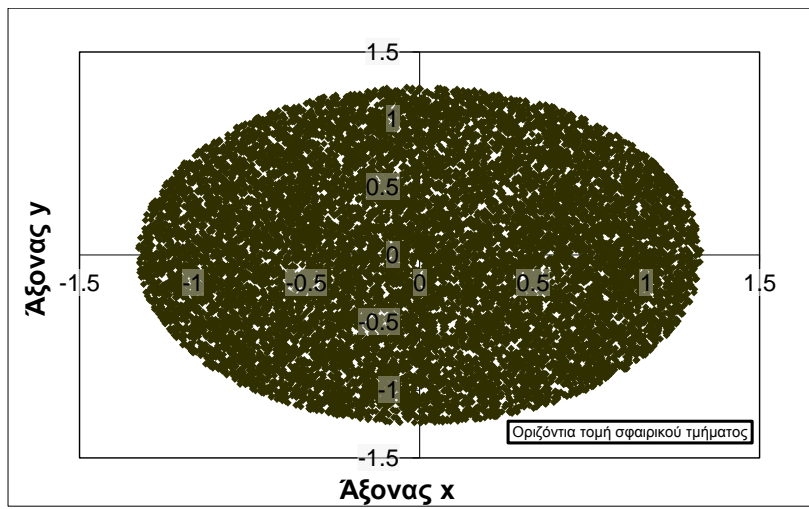
B.5.1 Γεωμετρία A, ανιχνευτής XtRa



Σχήμα B.15: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας A.

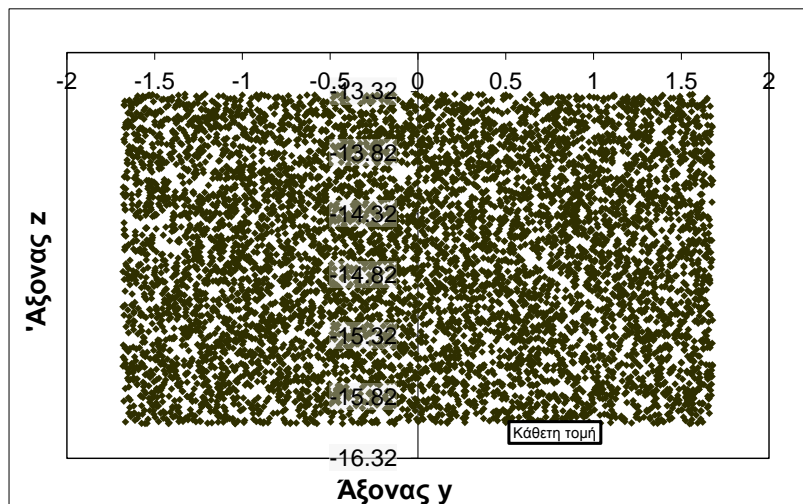


Σχήμα B.16: Οριζόντια τομή κυλινδρικού τμήματος της πηγής όγκου της γεωμετρίας A.

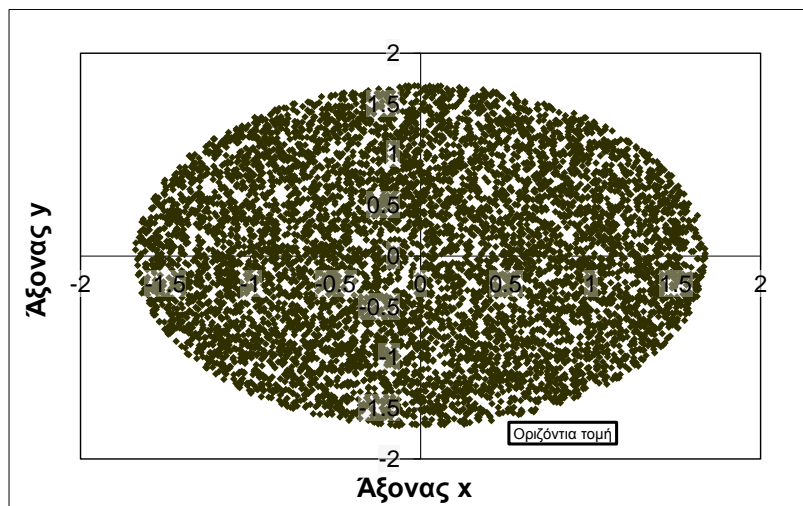


Σχήμα B.17: Οριζόντια τομή του σφαιρικού τμήματος της πηγής όγκου της γεωμετρίας A.

B.5.2 Γεωμετρία Γ, ανιχνευτής XtRa

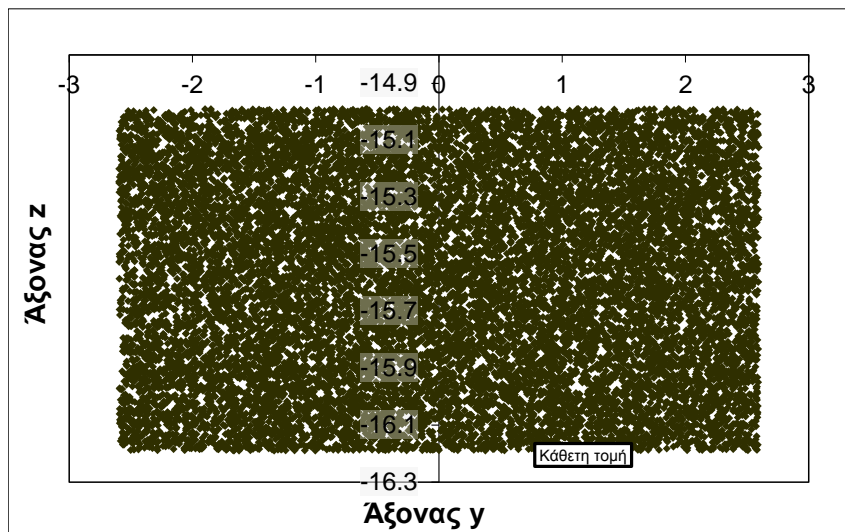


Σχήμα B.18: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Γ.

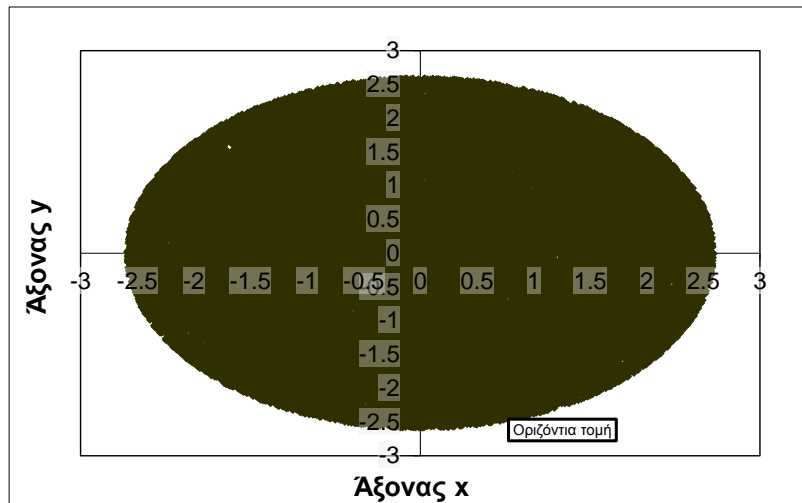


Σχήμα B.19: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Γ

B.5.3 Γεωμετρία E, ανιχνευτής XtRa

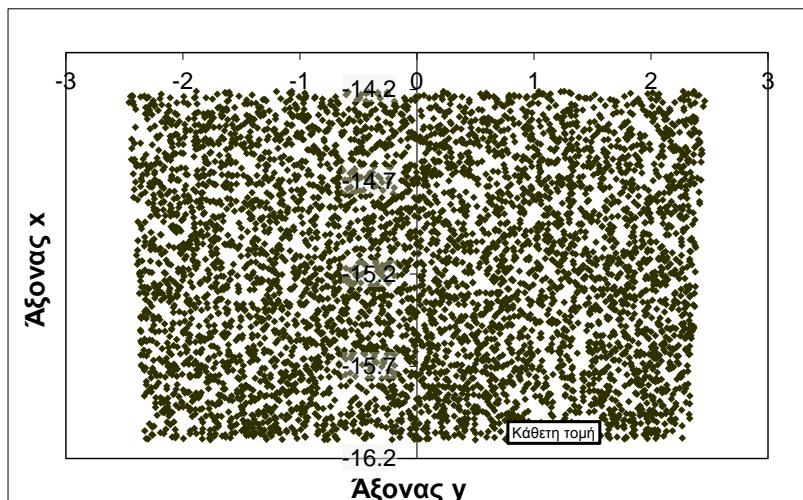


Σχήμα B.20: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας E.

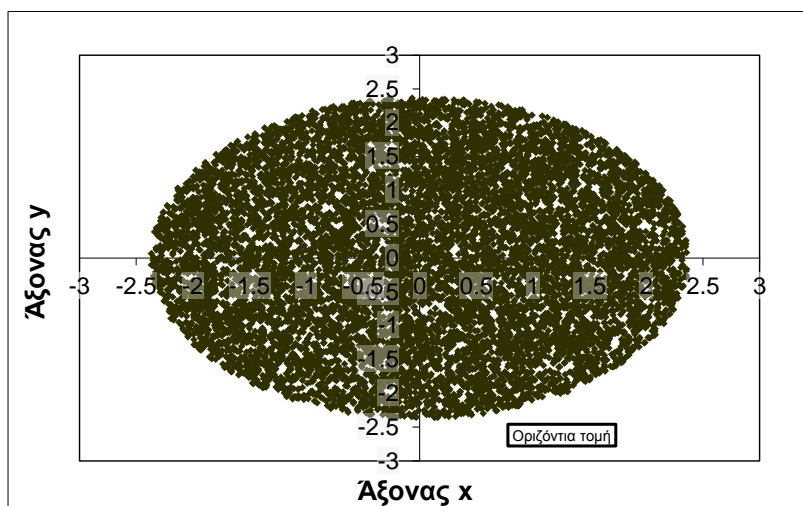


Σχήμα B.21: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας E.

B.5.4 Γεωμετρία Z, ανιχνευτής XtRa

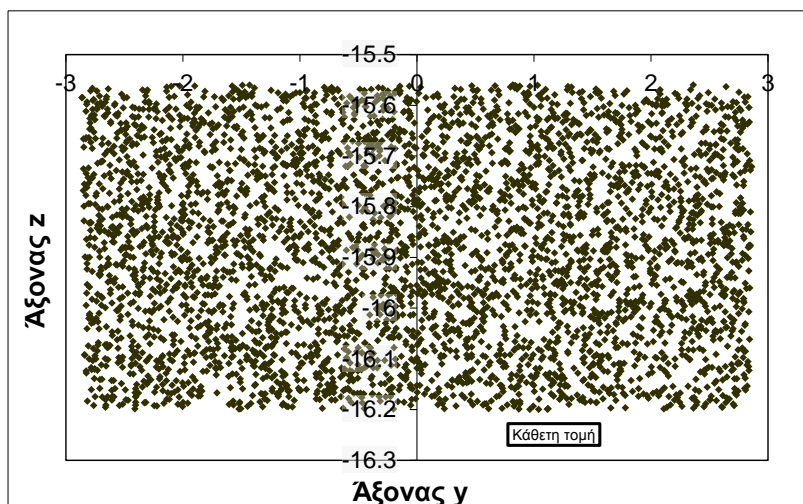


Σχήμα B.22: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Z.

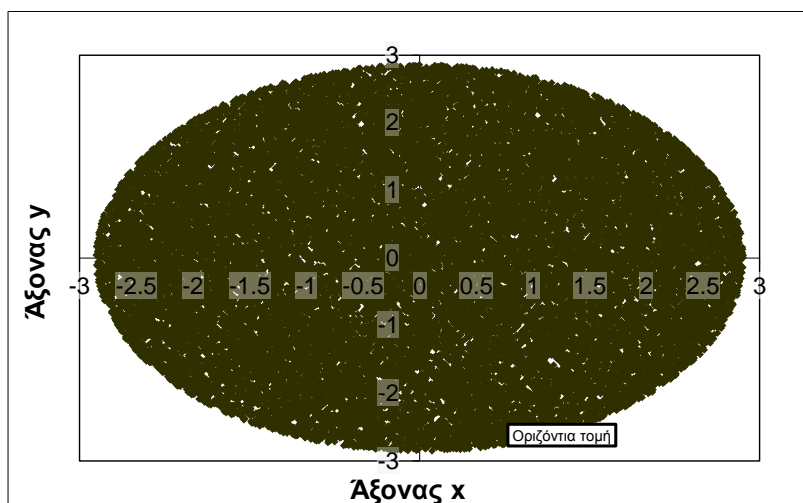


Σχήμα B.23: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Z.

B.5.5 Γεωμετρία H, ανιχνευτής XtRa

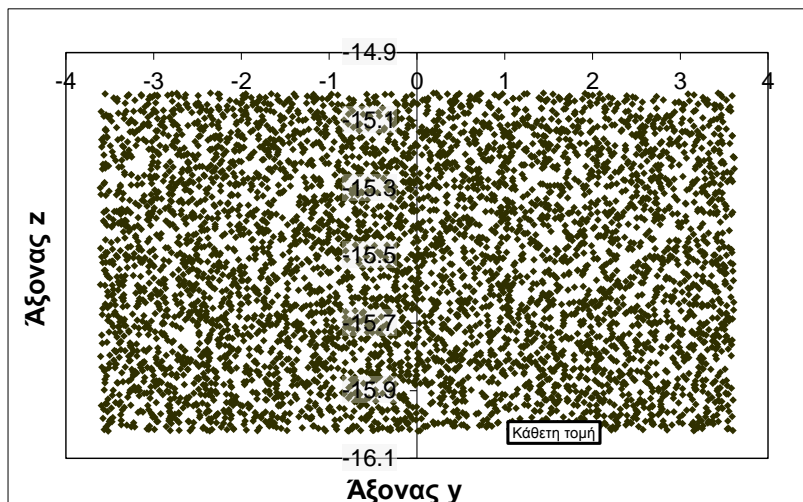


Σχήμα B.24: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας H.

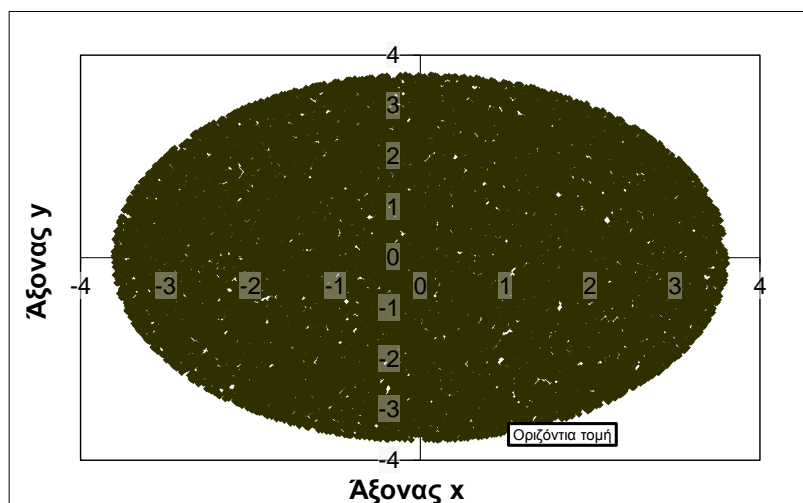


Σχήμα B.25: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας H.

B.5.6 Γεωμετρία Θ , ανιχνευτής XtRa

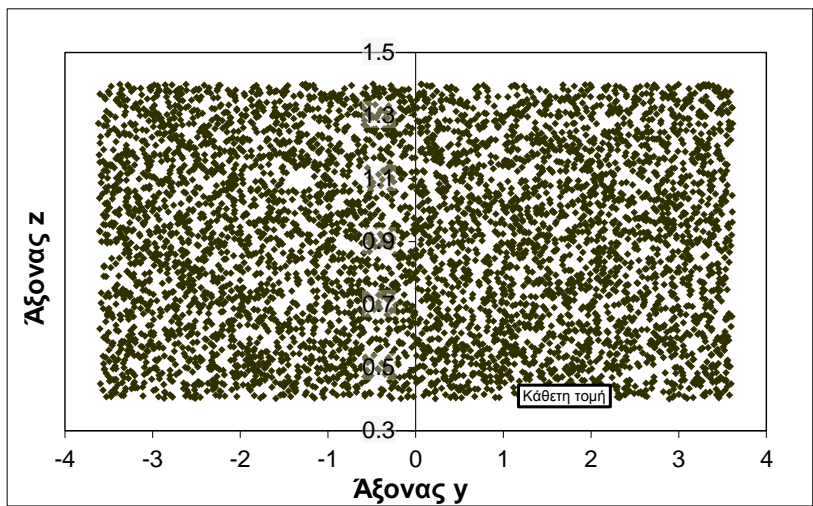


Σχήμα B.26: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Θ .

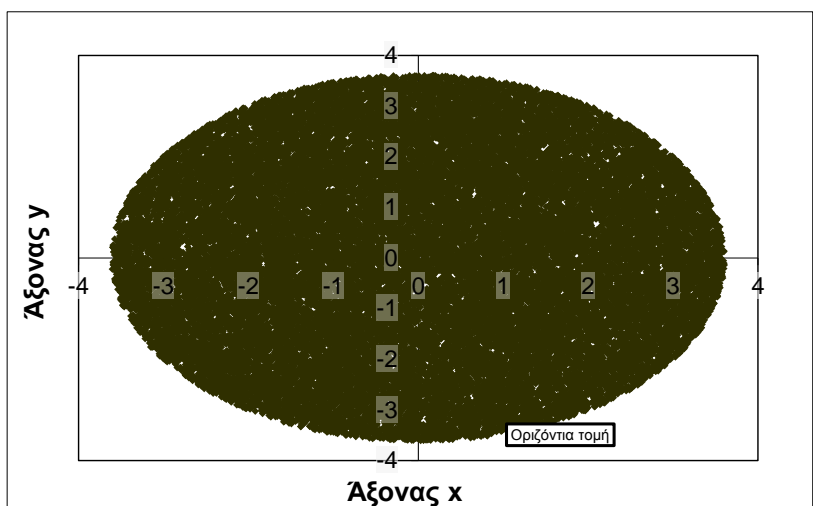


Σχήμα B.27: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας Θ .

B.5.7 Γεωμετρία δ , ανιχνευτής LEGe

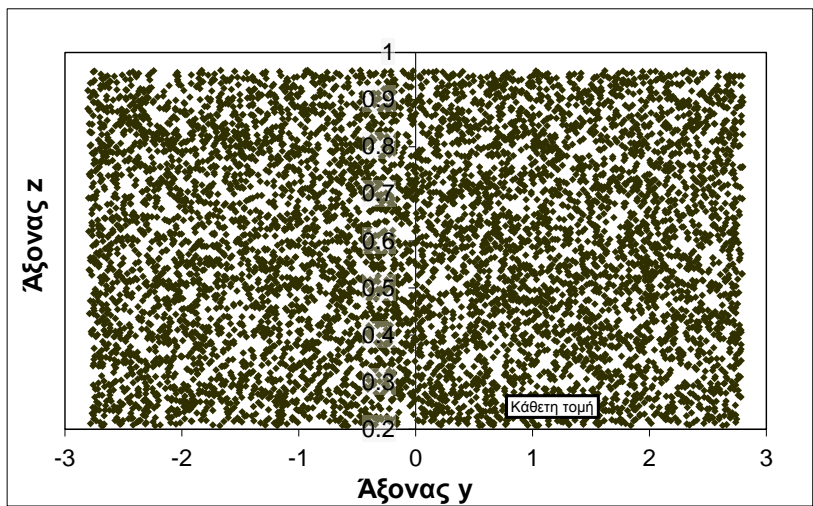


Σχήμα B.28: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας δ .

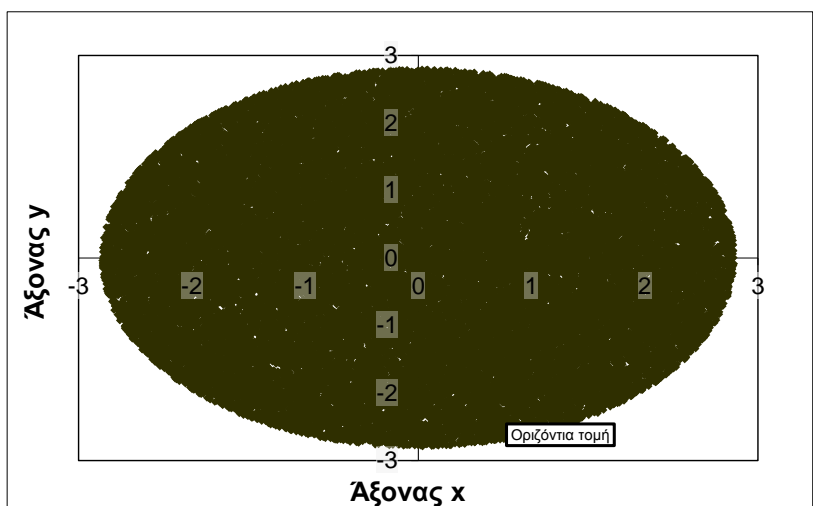


Σχήμα B.29: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της γεωμετρίας δ .

B.5.8 Νέα γεωμετρία που υιοθετήθηκε, ανιχνευτής LEGe



Σχήμα B.30: Κάθετη τομή της πηγής όγκου της νέας γεωμετρίας που υιοθετήθηκε.



Σχήμα B.31: Οριζόντια τομή της πηγής όγκου της νέας γεωμετρίας που υιοθετήθηκε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΖΥΓΙΣΕΩΝ

Η αβεβαιότητα της ζύγισης γενικά δεν αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής (ενδεικτικά αναφέρεται πως η αβεβαιότητα της αναλογικής ζυγαριάς που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.029 gr σε επίπεδο 1σ), ωστόσο για λόγους πληρότητας λαμβάνεται υπ' όψιν.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της ζύγισης λαμβάνεται υπ' όψιν η ακρίβεια του ζυγού, 0.1gr (Ρούνη, 2008) για την αναλογική ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε, και 0.01gr για την ψηφιακή. Κατά τη ζύγιση ενός δείγματος, αν m είναι η ένδειξη του ζυγού, η πιθανότητα η πραγματική μάζα του δείγματος να έχει οποιαδήποτε τιμή εντός του διαστήματος $[m \pm (\text{ακρίβεια ζυγού}/2)]$ παραμένει σταθερή. Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της μέτρησης χρησιμοποιήθηκε η ορθογωνική κατανομή (ISO-GUM, 1995). Στην κατανομή αυτή η τυπική απόκλιση είναι ίση με την αβεβαιότητα διαιρεμένη με την ποσότητα $2 \cdot \sqrt{3}$. Επομένως, οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε ζυγαριά προκύπτουν:

$$\sigma = \frac{\text{ακρίβεια ζυγού}}{2\sqrt{3}} \quad (\Gamma-1)$$

Για την αναλογική ζυγαριά:

$$\sigma_{an} = 0.029 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (\Gamma-2)$$

Για την ψηφιακή:

$$\sigma_{dig} = 0.0029 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (\Gamma-3)$$

Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε και η ψηφιακή ζυγαριά (όλα τα δείγματα χόματος εκτός των ΣΤ, Θ και Ι), χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 μετρήσεις του κάθε δείγματος. Σε αυτή την περίπτωση, η μέση τιμή του βάρους, καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες πρέπει να σταθμιστούν κατάλληλα ανάλογα με την αβεβαιότητα κάθε ζυγαριάς. Όπως προαναφέρθηκε, η αβεβαιότητα της ζύγισης είναι μικρή για οποιαδήποτε από τις δύο ζυγαριές που χρησιμοποιήθηκαν, επομένως η στάθμιση αυτή ήταν καθαρά προαιρετική.

Σταθμισμένη μέση τιμή παραμέτρου κατά Gilmore και Hemingway:

$$a_w = \frac{\sum(a_i \times w_i)}{\sum w_i} \quad (\Gamma-4)$$

Όπου οι παράγοντες στάθμισης w_i για τις μετρήσεις:

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (\Gamma-5)$$

Επομένως η σταθμισμένη καθαρή μάζα κάθε δείγματος υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$m_w = \frac{(m_{an} \times w_{an}) + (m_{dig} \times w_{dig})}{w_{an} + w_{dig}} \quad (\Gamma-6)$$

Οι αντίστοιχοι παράγοντες στάθμισης για κάθε ζυγαριά:

Για την αναλογική ζυγαριά:

$$w_{an} = \frac{1}{\sigma_{an}^2} = 1.189 \times 10^9 \text{ kg}^{-2} \quad (\Gamma-7)$$

Για την ψηφιακή:

$$w_{dig} = \frac{1}{\sigma_{an}^2} = 1.189 \times 10^{11} \text{ kg}^{-2} \quad (\Gamma-8)$$

Για την εύρεση της αβεβαιότητας της σταθμισμένης μάζας, απαιτείται ο υπολογισμός της εσωτερικής και της εξωτερικής μεταβλητότητας. Η εσωτερική μεταβλητότητα λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες της κάθε μέτρησης (στην περίπτωση αυτή κάθε ζυγαριάς), ενώ η εξωτερική μεταβλητότητα λαμβάνει υπόψη την κατανομή των μετρήσεων γύρω από τη σταθμισμένη μέση τιμή.

Εσωτερική μεταβλητότητα:

$$intvar = \frac{1}{\sum w_i} \quad (\Gamma-9)$$

Αντικαθιστώντας τους παράγοντες στάθμισης για κάθε ζυγαριά προκύπτει:

$$intvar = \frac{1}{w_{an} + w_{dig}} = 8.327 \times 10^{-12} \text{ gr}^2 \quad (\Gamma-10)$$

Εξωτερική μεταβλητότητα:

$$extvar = \frac{\sum (w_i (a_i - a_w)^2)}{\sum w_i} \quad (\Gamma-11)$$

Η οποία γράφεται στην περίπτωση της ζύγισης με τις 2 ζυγαριές για κάθε δείγμα ως:

$$extvar = \frac{w_{an}(m_{an} - m_w)^2 + w_{dig}(m_{dig} - m_w)^2}{w_{an} + w_{dig}} \quad (\Gamma-12)$$

Η αβεβαιότητα της σταθμισμένης μέσης τιμή προτείνεται να λαμβάνεται η μεγαλύτερη από τις δύο αυτές μεταβλητότητες (Gilmore and Hemingway, 1995). Η απόλυτα αβεβαιότητα τότε θα γράφεται:

$$\sigma_{scale} = \sqrt{\max(intvar, extvar) + \sigma_k^2} \quad (\Gamma-13)$$

Όπου σ_k η συνολική αβεβαιότητα που προκύπτει από το σύνολο των λοιπών κοινών αβεβαιοτήτων μεταξύ των δύο μετρήσεων. Στην περίπτωση της ζύγισης ισούται με 0, ωστόσο εάν π.χ έπρεπε να σταθμιστούν οι μετρήσεις της ραδιενέργειας ενός δείγματος από δύο ανιχνευτές, θα έπρεπε να ληφθούν υπ' όψιν αβεβαιότητες όπως αυτές που φαίνονται στην παράγραφο 2.9.7, όπου υπολογίζεται η ολική αβεβαιότητα της ειδικής ραδιενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου Ν. “Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE - εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2006).
- Αναγνωστάκης Μ.Ι., “ γ -φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (1998).
- Αναγνωστάκης Μ.Ι., “Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολίας και ύλης”, Διαφάνειες μαθήματος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Βασιλοπούλου Θ., “Προσδιορισμός Συντελεστών Διόρθωσης Απόδοσης Ανιχνευτή HPGe Λόγω Του Φαινομένου της Πραγματικής Σύμπτωσης μέσω Προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2008).
- Καρφόπουλος Κ.Λ., “Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και της τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2012).
- Μαρούδη Α., “Ανάπτυξη μεθοδολογίας προσδιορισμού του ρυθμού δόσης εξαιτίας του Cs-137 στο έδαφος με τη μέθοδο της προσομοίωσης Monte-Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2009).
- Παλαμάρα Ε., “Διερεύνηση της επίδρασης της μεθοδολογίας προετοιμασίας δειγμάτων χρώματος, στον προσορισμό της φυσικής και τεχνητής τους ραδιενέργειας” Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2010).
- Πετροβίτσος Ε., “Εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης επιφανειακών εδαφών με χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2011).
- Ρούνη Π.Κ., “Ανίχνευση ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας, με χρήση μεθόδων Πυρηνικής Τεχνολογίας”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2008).

- Σάββα Μ., “ *Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης Γερμανίου για τον προσδιορισμό του ισότοπου Be-7 στα ατμοσφαιρικά αερολύματα με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo*”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2009).
- Σάββα Μ.Ι., “*Τεχνικές προσδιορισμού πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας*”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (υπό εκπόνηση, ανάθεση 2010).
- Σιμόπουλος Σ.Ε., “*Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*”, Δεύτερη Έκδοση , Βιβλιοθήκη Ε.Μ.Π., (1989).
- Τραμπίδου Γ., Σταματελάτος Ι., Κρητίδης Π., Φλώρου Ε., “*Εκτίμηση εξωτερικών δόσεων από την έκθεση στη γάμμα ακτινοβολία του εδάφους με συγκριτική χρήση διαφόρων μεθόδων*”, e-Περιοδικό Επιστήμης & Τεχνολογίας 1 (2), 79-85, (2006).
- Φωτεινάκη Κ., “*Προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης φωτονίων μ με χρήση πειραματικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo*”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2013).
- Anagnostakis M.J, Hinis E.P. & Simopoulos S.E. “*Uranium-238 and its daughter products in Greek surface soils*” NRE VII, International Symposium May 20-2, Rhodes, Greece (2002).
- Bachhuber, H., Bunzl K., & Schimmack, W. “*The migration of Sr-90 and Cs-137 in multilayered soils: results from batch, column, and fallout investigations.*”, Nuclear Technology, 59, p. 291–301, (1982).
- Baró J., Sempau J., Fernández-Varea J.M., Salvat F., “*PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 100, p. 31-46, (1995).
- Bé, M.-M., Chisté, V. Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V.; Kuzmenko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schoenfeld, E.; Dersch, R., “*Tables des Radionucléides*”, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres (2004).
- Currie L.A., “*Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination: Application to Radiochemistry*”, Analytical Chemistry 40(3),

p. 586-593, (1968).

- Dabous A. “*A Lead-210 Geochronology and Trace Metal Geochemistry of Sediment Cores from Lake Overstreet and Upper Lake Lafayette, Leon County, Florida*” *Environmental Geosciences*, v. 9, no. 2, p. 51-65, (2002).
- Debertin K. & Helmer R.G., “*Gamma - And X-ray spectrometry with semiconductor detectors*”, (1988).
- Gilmore G. & Hemingway J.D, “*Practical Gamma-ray Spectrometry*”, John Wiley & Sons, Chichester, (1995).
- He Q. & Walling D.E., “*Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments*”, *J. Environ. Radioactivity*, v. 30, issue 2, p. 117-137, (1996)
- He Q. & Walling, D.E. “*The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils*” *Applied Radiation and Isotopes*, 48, p. 677–690, (1997).
- Knatko V.A., Skomorokhov A.G., Asimova V.D., Strakh L.I., Bogdanov A.P., & Mironov V.P., “*Characteristics of ^{90}Sr , ^{137}Cs , and $^{239,240}\text{Pu}$ migration in undisturbed soils of Southern Belarus after the Chernobyl accident*” *J. Environ. Radioactivity*, 30, p. 185–196, (1996).
- Lépy M.C., Bé M.M., Piton F., “*ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements) Software for efficiency transfer and coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry*”, Note Technique LNHB/01/09/A, (2001).
- Luca A., “*Some considerations about MDA and ISO 11929-3(2000)*”, 17th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Bratislava, Slovakia, (Σεπτέμβριος 2009).
- Matthews K.M. & Potipin K. “*Extraction of Fallout ^{210}Pb from Soils and its Distribution in Soil Profiles*”, *J. Environ. Radioactivity* 2 , p. 319-331, (1985)
- Osmond J.K., Dabous A.A. & Dawood Y.H. “*U series age and origin of two secondary uranium deposits, central Eastern Desert, Egypt*” *Economic Geology*, v. 94, p. 273-280, (1999).
- Owens P.N.; Walling D.E.; Qingping H., “*The Behaviour of Bomb-Derived Caesium-137 Fallout in Catchment Soils*” *J. Environ. Radioactivity*, v. 32, n. 3, p. 169-191(23), (1996)

- Owens P.N. & Walling D.E., “*The use of a numerical mass-balance model to estimate rates of soil redistribution on uncultivated land from ¹³⁷Cs measurements*”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 40, issue 2, , p. 185-203, (1998).
- Pegoyev A.N., & Fridman, S.D., “*Vertical profiles of cesium-137 in soils (English translation)*”, *Pochvovetleniye* 8, p. 77–81, (1978).
- Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Simopoulos S.E., “*Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials*”, *J. Environ. Radioactivity*, 61, p. 257–269, (2001).
- Porto P., Walling D.E., Callegar G. & Catona F. “*Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion in three small catchments in southern Italy*”, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 6, p. 657–667, (2006).
- Reynolds W.D., Gillham R.W., & Cherry, J.A. “*Evaluation of distribution coefficients for the prediction of strontium and cesium migration in a uniform sand*”, *Canadian Geotechnology Journal*, 19 , p. 92–103, (1982).
- Robbins, J.A. “*Geochemical and geophysical applications of radioactive lead*”, *The biogeochemistry of lead in the environment*, J. O. Nriagu (ed) Elsevier Press. p. 285-393, (1978).
- Salomons W. & Förstner U. “*Sediments and the “System”: from site-specific to regional-scale research*” *J Soils Sediments*, 10 , p. 1436–1439, (2010)
- Savva M.I., Karfopoulos K.L., Karangelos D.J., Anagnostakis M.J. & Simopoulos S.E. “*Installation and performance testing of an XtRa – NaI(Tl) Compton Suppression System at the NED-NTUA*”, *Appl. Radiat. Isotopes*, (2013).
- Skodras G., Grammelis P., Kakaras E., Karangelos D., Anagnostakis M., Hini E., “*Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses*”, *Fuel Processing Technology*, 88, p. 77-85, (2007).
- Sutherland R.A., “*Spatial variability of and the influence of Cs sampling on estimates of sediment redistribution*”, *Catena*, 21, p. 57–71, (1994).
- Wallbrink P.J. & Murray A.S., “*Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes hydrological processes*”, v. 7, p. 297-304, (1993).
- Wallbrink P.J. & Murray A.S., “*Distribution and variability of ⁷Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes*”, *Water Resources Research*, v. 32, n. 2, p. 467-476,

(1996).

- Walling D.E., & Quine T.A., “*The use of fallout radionuclides in soil erosion investigations*”, Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation, IAEA Publication ST1/PUB/947, p. 598–619, Vienna: IAEA, (1995).
- Walling D.E., & He Q. “*Models for converting measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils*”, Report to the IAEA as a contribution to the IAEA Co-ordinated, (1997)
- Walling D.E. & He Q., “*Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land*”, Soil Sci. Am. J. 63, p. 1404-1412, (1999).
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P. “*RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation*”, J. Soil and Water Conservation, 46(1), p. 30-33, (1991).
- Wischmeier W.H. & Smith D.D., “*Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*”, Agriculture Handbook 282, U.S. Department of Agriculture, (1965).
- Zheng Jin-Jun, HE Xiu-Bin, Walling D.E., Zhang Xin-Bao, Flanagan D., QI Yong-Qing, “*Assessing Soil Erosion Rates on Manually-Tilled Hillslopes in the Sichuan Hilly Basin Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex*” Pedosphere, v. 17, issue 3, p. 273-283, (2007).
- http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/default_gr.html, (ημερομηνία πρόσβασης: Φεβρουάριος 2015).
- <http://www.ornl.gov/ptp/PTP%20Library/library/DOE/bnl/nuclidedata/MIRPB210.html>, (ημερομηνία πρόσβασης: Δεκέμβριος 2014).