



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

***ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ  
ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ  
ΡΑΔΙΟΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ***

Μάριος Πόστατζης, ΑΕΜ: 9531

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Καΐσας

Θεσσαλονίκη 2023

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα εκ μέρους της καρδιάς μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ιωάννη Καΐσα για την αρωγή του και την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπο μου καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες στον ομότιμο καθηγητή κ. Αλέκο Κλούβα για τις γνώσεις που μου παρείχε ώστε να καταστεί δυνατή η εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, ένα θερμό ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Ομήρου για την υπομονή και την βοήθεια που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια.

## Πρόλογος

Υπάρχουν πάνω από 3000 διαφορετικά ραδιονουκλίδια γνωστά στον κόσμο, εν μέρει προερχόμενα από φυσικές πηγές και εν μέρει παραγόμενα από ανθρώπινες δραστηριότητες (τεχνητά). Τα νουκλίδια που απαντώνται στη φύση είναι 340 και από αυτά τα 70-80 είναι ραδιενεργά.<sup>[7]</sup> Και οι δύο κατηγορίες ραδιενεργών στοιχείων, δηλαδή τεχνητά και φυσικά απαντώνται στο έδαφος. Τα φυσικά ραδιονουκλίδια μπορούν να παραχθούν με τη διέγερση σταθερών ισοτόπων μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας (κοσμογενή ραδιονουκλίδια) ή προήλθαν κατά τη διάρκεια δημιουργίας του σύμπαντος. Τα τελευταία είναι γνωστά ως αρχέγονα ραδιονουκλίδια και σε αυτά ανήκουν και οι τρεις φυσικές σειρές διάσπασης Ουρανίου, Θορίου και Ακτινίου καθώς και το  $^{40}\text{K}$ . Από την άλλη πλευρά, τα τεχνητά ραδιονουκλίδια είναι υπερουράνια στοιχεία (ισότοπα του πλουτωνίου) και μακρόβια προϊόντα σχάσης ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ). Η παρουσία τους στο περιβάλλον είναι συνέπεια της δοκιμής πυρηνικών όπλων και της πυρηνικής βιομηχανίας. Η φυσική ραδιενέργεια εδάφους ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, τη φύση του ορυκτού και την πυκνότητα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η εξόρυξη μπορεί να επιταχύνουν την κυκλοφορία των αρχέγονων ραδιονουκλιδίων στο έδαφος.<sup>[7]</sup>

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μέτρηση και μοντελοποίηση της κατανομής φυσικών και τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε αδιατάραχτο τμήμα του πανεπιστημιακού αγροκτήματος στη Θέρμη και σε μια άλλη αδιατάραχτη περιοχή της βορείου Ελλάδας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι, λαμβάνοντας υπόψη και προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, η μελέτη της δυναμικής της κατανομής της συγκέντρωσης, της κατά βάθους κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$ , αλλά και άλλων φυσικών και τεχνητών ραδιοϊσοτόπων. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$  κατά βάθος πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία εδάφους ανά 5 εκατοστά βάθος, προετοιμασία των δειγμάτων και γ-φασματοσκοπική ανάλυσή τους στο εργαστήριο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια βασική εισαγωγή στη θεωρία της πυρηνικής τεχνολογίας. Γίνεται αναφορά στη γ-φασματοσκοπία, στους ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αλλά και γενικότερα στη μελέτη ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Δίνεται έμφαση στον τρόπο συλλογής του δείγματος καθώς και ανάλυσης στο εργαστήριο. Επίσης παρουσιάζεται ο γενικός τρόπος λειτουργίας του κώδικα MCNP ο οποίος αναλύεται αργότερα στο τέταρτο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των μετρήσεων στο εργαστήριο. Παράλληλα πραγματοποιείται σχολιασμός αυτών των αποτελεσμάτων. Διερευνάται η δυναμική της κατανομής της συγκέντρωσης, αλλά και η κατανομή ανά βάθος του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος που προέκυψε μετά το ατύχημα στο Τσερνομπίλ, καθώς και άλλων ραδιοϊσοτόπων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον κώδικα MCNP με τον οποίο πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση του περιβάλλοντος του αγροκτήματος για εκτίμηση - υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης όσον αφορά το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{40}\text{K}$  ανά βάθος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση στο εργαστήριο. Γίνεται σχολιασμός και σύγκριση με παλαιότερες μελέτες που διεξήχθησαν από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ακολουθεί το Παράρτημα Α όπου παρουσιάζονται ενδεικτικά φάσματα των μετρήσεων που προέκυψαν από την ανάλυση στο εργαστήριο. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Assayer για τη μέτρηση των κορυφών.

Τέλος στο Παράρτημα Β βρίσκεται ο κώδικας MCNP αυτούσιος όπως χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η προσομοίωση του αγροκτήματος για το βάθος 0-5cm. Παραπλήσιος κώδικας με μικροαλλαγές χρησιμοποιήθηκε για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος .....	3
Εισαγωγή.....	8
<b>1.Θεωρία πυρηνικής τεχνολογίας.....</b>	<b>9</b>
Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα στο έδαφος.....	9
Κάλιο-40 ( <sup>40</sup> K) .....	10
Ουράνιο (U).....	10
Θόριο-232 ( <sup>232</sup> Th) .....	10
Τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα.....	11
Καίσιο-134 ( <sup>134</sup> Cs).....	11
Ιώδιο-131 ( <sup>131</sup> I) .....	11
Καίσιο-137 ( <sup>137</sup> Cs).....	12
Τυπικές τιμές συγκεντρώσεων ισοτόπων στο χώμα.....	13
Η γ-φασματοσκοπία .....	14
Τρόποι αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-γ με την ύλη .....	15
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	16
Σκέδαση Compton.....	17
Δίδυμη Γένεση.....	18
Ζώνη σθένους και ζώνη αγωγιμότητας .....	19
Ανιχνευτές υψηλής καθαρότητας (HPGe).....	20
Βασικές αρχές λειτουργίας .....	21
Τρόπος κατασκευής και σύστημα ψύξης.....	22
Σύγκριση ανιχνευτών HPGe και NaI.....	22
Θωράκιση ανιχνευτών HPGe .....	23
Χαρακτηριστικά Ανιχνευτών .....	24
Απόδοση.....	24
Νεκρός χρόνος.....	24
Ενεργειακή διακριτική ικανότητα .....	25
<b>2.Υλικά και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν .....</b>	<b>26</b>

Διαδικασία συλλογής δειγμάτων .....	28
Διαδικασία μέτρησης στο εργαστήριο .....	29
Υλικά και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν .....	30
Κώδικας MCNP.....	35
Γενικές πληροφορίες.....	35
Το αρχείο εισόδου.....	35
Η κάρτα κελιών.....	36
Η κάρτα επιφανειών .....	37
Η κάρτα δεδομένων .....	38
<b>3.Αποτελέσματα μετρήσεων .....</b>	<b>39</b>
<b>4.Προσομοίωση MCNP.....</b>	<b>56</b>
Περιγραφή της πηγής.....	56
Υπολογισμός ρυθμού ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ μέσω προσομοίωσης με κώδικα MCNP.....	57
<b>5.Συμπεράσματα .....</b>	<b>61</b>
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>63</b>
Ενδεικτικά φάσματα μετρήσεων στο εργαστήριο .....	63
<b>Παράρτημα Β.....</b>	<b>65</b>
Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε .....	65
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>68</b>



## Εισαγωγή

Το 1986 δύο τεράστιες εκρήξεις στον αντιδραστήρα 4 του πυρηνικού σταθμού παραγωγής ενέργειας στο Τσερνομπίλ, οδήγησαν σε τεράστια έκλυση ραδιενέργειας και στο σχηματισμό ραδιενεργών νεφών. Τα επίπεδα του ρυθμού δόσης στις χειρότερα πληγείσες περιοχές του κτιρίου του αντιδραστήρα, συμπεριλαμβανομένης της αίθουσας ελέγχου, έχουν εκτιμηθεί σε 300Sv/ώρα, (300.000mSv/ώρα) παρέχοντας μια θανατηφόρα δόση σε λίγο περισσότερο από ένα λεπτό. Η εκπομπή αυτών των ραδιονουκλιδίων κατά τη διάρκεια του ατυχήματος του Τσερνομπίλ ρύπανε και τα Ελληνικά εδάφη και κυρίως τη Βόρεια Ελλάδα και την Πίνδο. Στα πλαίσια έρευνας [9], τα επίπεδα του καισίου  $^{137}/^{134}$  μετρήθηκαν σε ιστούς κατοίκων της Θεσσαλονίκης που έτυχε να πεθάνουν 8 έως 10 μήνες μετά το ατύχημα στον αντιδραστήρα του Τσερνομπίλ. Το υψηλότερο επίπεδο (μέσος όρος  $370 \text{ Bq Kg}^{-1}$  για το  $^{137}\text{Cs}$  και  $160 \text{ Bq Kg}^{-1}$  για το  $^{134}\text{Cs}$ ) βρέθηκε στους μύες επτά μήνες μετά το ατύχημα. Η μέση επιβάρυνση ενός μέσου ανθρώπου (με βάρος 70 Kg) 250 ημέρες μετά το ατύχημα υπολογίστηκε σε  $17.630 \text{ Bq}$  για το  $^{137}\text{Cs}$  και  $7.625 \text{ Bq}$  για το  $^{134}\text{Cs}$ . Οι παραπάνω ενεργότητες προσδίδουν ισοδύναμη δόση  $1 \text{ mSv}$  ( $100 \text{ mrem}$ ) για το πρώτο έτος έκθεσης. Αντίστοιχα στο διάστημα των πρώτων 30 χρόνων προσδίδουν ισοδύναμη δόση  $0.667571 \text{ mSv}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) και  $0.356796 \text{ mSv}$  ( $^{134}\text{Cs}$ ).

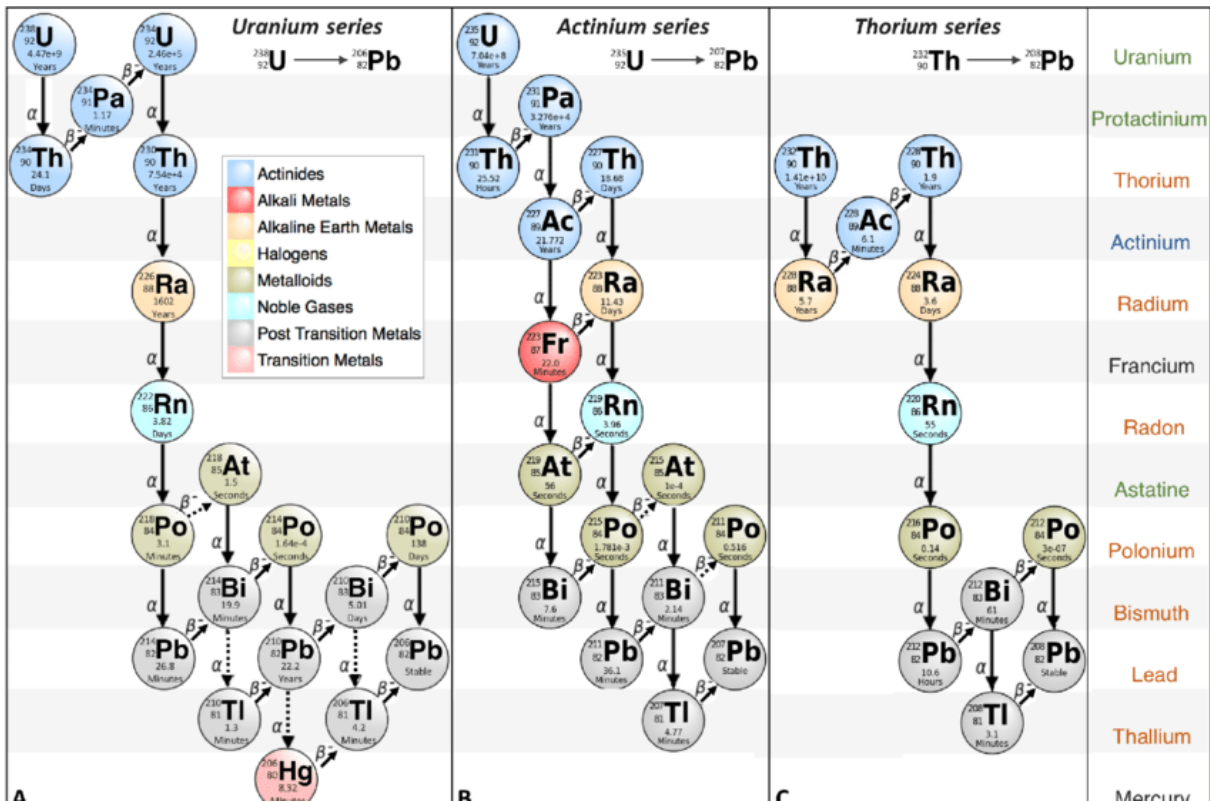
Μετά το ατύχημα, μια έκταση  $\sim 1000 \text{ m}^2$  στο αγρόκτημα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης θεωρήθηκε ως πεδίο δοκιμών για ραδιολογικές μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος το οποίο διατηρείται μέχρι και σήμερα αδιατάρακτο. Ως αδιατάρακτο έδαφος νοείται το έδαφος ή το εδαφικό προφίλ που δεν έχει αλλοιωθεί από επιχλωμάτωση, απομάκρυνση όργανο ή άλλες ανθρωπογενείς μεταβολές, με εξαίρεση τη χαμηλή βλάστηση που εκφύεται φυσικά χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η κατανομή κατά βάθος του  $^{137}\text{Cs}$  αλλά και των άλλων ισοτόπων μετρούνται συστηματικά μέχρι σήμερα. Κατά την περίοδο 1987-2000 η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  ήταν αποτέλεσμα του αθροίσματος δύο εκθετικών συναρτήσεων. Προκειμένου να εξηγηθεί η μορφή του προφίλ, θεωρήθηκε το μοντέλο της καθαρής διάχυσης (pure-diffusion) και της μεταφοράς (advection) της διείσδυσης του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος. Διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο καθαρής διάχυσης δεν μπορούσε να αναπαραγάγει την διπλά εκθετική κλίση, ενώ ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων μπορούσε. Ωστόσο από το 2005 και μετά η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  μπορεί να περιγραφεί επιτυχώς με μια μόνο εκθετική συνάρτηση. Αυτό συμβαίνει γιατί η μια από τις δύο εκθετικές έχει πολύ πιο έντονη κλίση. Το γεγονός ότι η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  μπορεί να προσαρμοστεί από μια απλή εκθετική συνάρτηση δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το συνδυαστικό μοντέλο δεν είναι πλέον έγκυρο. Έχει αποδειχθεί σε παλαιότερες έρευνες [11] ότι για ορισμένες τιμές των παραμέτρων η εξίσωση του συνδυαστικού μοντέλου δίνει μια ενιαία κλίση για το προφίλ του καισίου, πρακτικά εκείνη του μοντέλου καθαρής διάχυσης. Με την πάροδο των χρόνων και εξαιτίας των συνεχόμενων μετρήσεων έχει καταστεί δυνατός ο υπολογισμός της μέσης κατακόρυφης ταχύτητας διείσδυσης του  $^{137}\text{Cs}$  η οποία σύμφωνα με έρευνες που έγιναν το 2013 [11] και επιβεβαιώνονται με την παρούσα εργασία είναι  $0.14 \text{ cm/y}$ .



# Κεφάλαιο 1: Θεωρία πυρηνικής τεχνολογίας

## Φυσικά ραδιενεργά ισότοπα στο έδαφος

Τα ραδιενεργά ισότοπα που απαντώνται στο στερεό φλοιό της γης και φυσικά στο έδαφος (άρα και στο χώμα) είναι αφενός των τριών φυσικών σειρών (σχήμα 1.1), δηλαδή του  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  ως και τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων τους και αφετέρου τα μεμονωμένα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα, δηλαδή το  $^{40}\text{K}$  και το  $^{87}\text{Rb}$ . Στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά στα ισότοπα που θα μας απασχολήσουν για τους σκοπούς αυτής της εργασίας.



Εικόνα 1.1 Σειρά Ουρανίου, Ακτινίου και Θορίου

## Κάλιο-40 (<sup>40</sup>K)

Το κάλιο είναι χημικό στοιχείο με σύμβολο K και ατομικό αριθμό 19. Υπάρχει στο φλοιό της γης, στους ωκεανούς και σε όλα τα οργανικά υλικά. Η συγκέντρωσή του στο φλοιό της γης είναι περίπου 15 γραμμάρια ανά κιλό (g/kg) ή 1,5%. Το κάλιο-40 είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου. Είναι ευρέως διαδεδομένο στη φύση και υπάρχει σε όλους τους φυτικούς και ζωικούς ιστούς. Το κάλιο-40 αποτελεί περίπου το 0,012% του φυσικού καλίου. Είναι το κυρίαρχο ραδιενεργό συστατικό στους ανθρώπινους ιστούς και στα περισσότερα τρόφιμα. Έχει χρόνο ημιζωής 1,3 δισεκατομμύρια χρόνια και εκπέμπει ακτινοβολία βήτα και γάμμα.[7]. Η ενέργεια διάσπασης των φωτονίων του είναι 1461keV και το Fraction Yield (FY) αυτής της ενέργειας είναι 0.1067. Συμπεριφέρεται χημικά στο περιβάλλον όπως και τα άλλα ισότοπα καλίου, αφομοιωμένο στους ιστούς όλων των ανθρώπων, φυτών και ζώων μέσω των συνήθων βιολογικών διεργασιών. Είναι το κυρίαρχο ραδιενεργό συστατικό στους ανθρώπινους ιστούς και στα περισσότερα τρόφιμα. Για παράδειγμα, το γάλα περιέχει περίπου 74 Bq/L φυσικού <sup>40</sup>K.[8]

## Ουράνιο (U)

Το Ουράνιο που υπάρχει στη φύση αποτελείται από τρία ισότοπα με μαζικούς αριθμούς 234, 235, 238. Το <sup>238</sup>U βρίσκεται στο φλοιό της γης σε ποσοστό 99,28% και είναι συνήθως σε ραδιενεργό ισορροπία με το <sup>234</sup>U, το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 0,0058%. Το <sup>235</sup>U, το πατρικό ισότοπο της σειράς του ακτινίου βρίσκεται σε ποσοστό 0,71% και έχει χρόνο ημιζωής  $703,8 \cdot 10^6$  χρόνια. Αντίστοιχα το <sup>238</sup>U έχει χρόνο ημιζωής  $4,5 \cdot 10^9$  χρόνια, ενώ το <sup>234</sup>U έχει  $233 \cdot 10^3$  χρόνια. Το ουράνιο βρίσκεται σε όλα τα πετρώματα και εδάφη σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Η εξέλιξη του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα ο μέσος όρος συγκέντρωσης ουρανίου στο χώμα να είναι μικρότερος από το μέσο όρο συγκέντρωσης ουρανίου σε βραχώδη εδάφη. Οι τυπικές συγκεντρώσεις του κυμαίνονται από 0,03 ppm στα υπερβασικά πυριγενή πετρώματα μέχρι 120 ppm στα φωσφορικά πετρώματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για εμπορική εκμετάλλευση, κυρίως στην παραγωγή λιπασμάτων. Στην αλυσίδα του <sup>238</sup>U ανήκει και ο <sup>214</sup>Pb ο οποίος είναι θυγατρικό ισότοπο του ραδονίου και έχει χρόνο ημιζωής 26.8 λεπτά.[7]

## Θόριο-232 (<sup>232</sup>Th)

Το <sup>232</sup>Th είναι το μόνο ισότοπο του Θορίου που υπάρχει στη φύση. Διασπάται με εκπομπή α σωματιδίου και έχει χρόνο ημιζωής  $14,05 \cdot 10^9$  χρόνια. Το <sup>232</sup>Th βρίσκεται στο φλοιό της γης, τα εδάφη και τα πετρώματα. Η μέση συγκέντρωση του <sup>232</sup>Th στο φλοιό της γης και στα εδάφη είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από εκείνη του Ουρανίου. Ωστόσο, η ειδική ενεργότητα του <sup>232</sup>Th είναι 0,00407 Bq/gr σε σύγκριση με 0,004921 Bq/gr για το <sup>238</sup>U, έτσι

ώστε η ραδιενέργεια που οφείλεται στα δύο νουκλίδια είναι περίπου ίση. Η τυπική περιεκτικότητα πετρωμάτων σε θόριο είναι 8,1 – 33 ppm για τα πυριγενή πετρώματα με γεωμετρικό μέσο τα 12 ppm, 6ppm στους ψαμμόλιθους και 1 ppm στους ασβεστόλιθους.[7]

### **Τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα**

Τα τεχνητά ραδιονουκλίδια έχουν εισέλθει στο ανθρώπινο περιβάλλον ως συνέπεια της δοκιμής πυρηνικών όπλων ή της πυρηνικής βιομηχανίας. Τα ραδιενεργά αυτά νουκλίδια παράγονται ως αποτέλεσμα της σχάσης του  $^{235}\text{U}$  ή  $^{239}\text{Pu}$  ή ως αποτέλεσμα της ενεργοποίησης αρχικώς σταθερών νουκλιδίων μετά από βομβαρδισμό νετρονίων σε αντιδραστήρες ή κατά τη διάρκεια πυρηνικών εκρήξεων.

### **Καίσιο-134 ( $^{134}\text{Cs}$ )**

Το καίσιο-134 (Cs-134) είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο του καισίου. Έχει χρόνο ημιζωής περίπου 2,07 έτη και παράγεται κυρίως ως υποπροϊόν της πυρηνικής σχάσης σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Εκπέμπει σωματίδια  $\gamma$  κατά τη διάσπασή του με ενέργεια 605keV και 796keV και FY 0.98 και 0.86 αντίστοιχα και θεωρείται επίσης εκπομπός  $\beta$ . Το Cs-134 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο πυρηνικών ατυχημάτων ή συμβάντων, όπως η πυρηνική καταστροφή της Fukushima Daiichi το 2011 αλλά και του Τσερνομπίλ το 1986 όπου η παρουσία του υποδηλώνει την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών. Η παρακολούθηση και η διαχείριση των επιπέδων Cs-134 είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής μόλυνσης και των πιθανών κινδύνων για την υγεία. [14]

### **Ιώδιο-131( $^{131}\text{I}$ )**

Το ιώδιο-131 είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο του ιωδίου. Χρησιμοποιείται συνήθως σε ιατρικές, βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται για την επιλεκτική καταστροφή του θυρεοειδικού ιστού σε περιπτώσεις υπερθυρεοειδισμού και καρκίνου του θυρεοειδούς. Το  $^{131}\text{I}$  χρησιμοποιείται επίσης ως ιχνηθέτης στη διαγνωστική απεικόνιση για την αξιολόγηση της λειτουργίας του θυρεοειδούς. Το Iodine-131 παράγεται ως προϊόν πυρηνικής σχάσης και δοκιμών πυρηνικών όπλων. Εμπορικά παράγεται με βομβαρδισμό του φυσικού τελλουρίου με νετρόνια. Έχει χρόνο ημιζωής περίπου 8 ημέρες. Διασπάται με  $\beta$  διάσπαση με ενέργεια φωτονίων 0.606MeV και FY 0.9 και  $\gamma$  διάσπαση με ενέργεια 364keV(FY=0.82) και 637keV(FY=0.0712).

## Καίσιο-137 ( $^{137}\text{Cs}$ )

Το καίσιο είναι χημικό στοιχείο με το σύμβολο Cs και ατομικό αριθμό 55. Το καίσιο-137 είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο του καισίου με χρόνο ημιζωής 30,2 έτη. Παράγεται από την έκρηξη πυρηνικών όπλων και σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Διασπάται με β-διάσπαση στο μετασταθές Βάριο-137m σε ποσοστό περίπου ίσο με 95%. Το υπόλοιπο 5% οδηγεί με β-διάσπαση στη σταθερή βασική στάθμη του Βαρίου-137. Το Ba-137m έχει χρόνο ημιζωής περίπου 153 δευτερόλεπτα. Ένα γραμμάριο Cs-137 έχει ενεργότητα 3, 2 TBq. Η ενέργεια των φωτονίων του μετασταθούς βαρίου είναι ίση με 661,7 keV. Πηγές καισίου χρησιμοποιούνται σε ακτινοβολητές τροφίμων, αίματος και μέχρι πριν μερικές δεκαετίες στην ακτινοθεραπεία του καρκίνου. Επίσης, χρησιμοποιείται ως εκπομπός γάμμα σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως μετρητές υγρασίας και πυκνότητας, μετρητές στάθμης, μετρητές ροής και σε εξοπλισμό αισθητήρων. Είναι υδατοδιαλυτό και εξαιρετικά τοξικό σε ελάχιστες ποσότητες<sup>[12]</sup>. Λόγω της δραστηριότητας του  $^{137}\text{Cs}$ , συνέπεια της χημικής μορφής με την οποία παράγεται και χρησιμοποιείται (σε μορφή άλατος), η διαχείρισή του ενέχει σημαντικούς κινδύνους. Το καίσιο-137 απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα κυρίως από την έκρηξη του Τσερνομπίλ το 1986. Στην παρακάτω εικόνα (1.2) παρουσιάζονται κάποιες βασικές ιδιότητες του  $^{137}\text{Cs}$ , που αφορούν τις ενδεχόμενες δόσεις και την ακτινοπροστασία.<sup>[14]</sup>

## Caesium - 137 / Barium - 137m


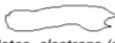



$^{137}\text{Cs}_{55}/^{137\text{m}}\text{Ba}_{56}$

Half life: 30.2 years  
Specific activity:  $3.20\text{E}+12 \text{ Bq.g}^{-1}$

Risk group: 1  
Risk colour: Red


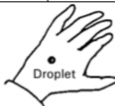
Main emissions (keV)					Exemption levels	
	Gamma or X	Beta (Emax)	Electrons	Alpha	Quantity (Bq)	1E+04
	E %	E %	E %	E %	Concentration (Bq.g <sup>-1</sup> )	1E+01
E1	32 6	512 95	624 8			
E2	36 1	1173 5	656 1			
E3	662 85		660 <1			
% omitted	<1	0	<1			

EXTERNAL EXPOSURE (mSv.h <sup>-1</sup> ) for an activity of 1 MBq or 1 MBq.m <sup>-2</sup> (as appropriate)				
<b>Point source (30 cm)</b>	<b>Infinite plane source</b>	<b>10 ml glass vial</b>	<b>Contact with 50 ml glass beaker</b>	<b>Contact with 5 ml plastic syringe</b>
				
<b>Betas, electrons (skin dose)</b>	<b>Betas, electrons (skin)</b>			
2.13E-1	10 cm 9.0E-02			
	1 m 6.0E-03			
<b>Gammas, X rays (deep tissue dose)</b>	<b>Photons (skin)</b>	100 cm 9.19E-5	3.30E-1	1.66E+0
1.07E-3	10 cm 3.9E-03			
	1 m 2.5E-03			
	<b>Photons (deep dose)</b>			
	10 cm 3.7E-03			
	1 m 2.4E-03			

The values above do not include Bremsstrahlung radiation.

CONTAMINATION			SHIELDING (mm)	
<b>Contamination skin dose (mSv.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Detection</b>	<b>Derived limits (Bq.cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>Betas and electrons (Total absorption)</b>	
Uniform deposit (1kBq.cm <sup>-2</sup> ) 1.57E+0	<b>Recommended probes*</b>	<b>Removable contamination</b>	Glass	2.1
0.05 ml droplet (1 kBq) 7.08E-1	Alpha	4E+1	Plastic	3.8
	Beta ++	<b>Fixed contamination</b>	<b>Gamma and X rays (half and tenth value thickness)</b>	
	Gamma ++	4E+3		
	X rays ++		1/2	1/10
			Lead	8 24
			Steel	29 72

\* If no probes are indicated the recommended technique is to use a wipe test in association with a probe or liquid scintillation technique

INTERNAL EXPOSURE FOR WORKERS						
COMMITTED EFFECTIVE DOSE PER UNIT INTAKE (Sv.Bq <sup>-1</sup> )						
<b>Ingestion</b>	f <sub>1</sub>	<b>Inhalation</b>		1 μm	5 μm	
All compounds	1.000	1.3E-08	All compounds	F	4.8E-09	6.7E-09
				M		
				S		
<b>Highest dose organ</b>	Soft tissues	20 mSv AII <sub>ingestion</sub>	1.5E+06 (Bq)	20 mSv AII <sub>inhalation</sub>	3.0E+06 (Bq)	

MAXIMUM RECOMMENDED ACTIVITIES IN LOW LEVEL OR INTERMEDIATE LEVEL LABORATORIES (Bq)						
PHYSICO-CHEMICAL STATE	Subject to external exposure requirements which may be more restrictive					
	Volatility factor (k)	Supervised area			Controlled area	
		Bench	Fume hood	Bench	Fume hood	Glove box
All compounds	0.01	2E+05	2E+06	8E+05	8E+06	5E+08

Εικόνα 1.2 Πληροφορίες ενδεχόμενων δόσεων και ακτινοπροστασίας για το Καίσιο 137

## Τυπικές τιμές συγκεντρώσεων ισοτόπων στο χώμα

Στον Πίνακα 1.3[7] περιλαμβάνονται τυπικές τιμές των συγκεντρώσεων των φυσικών και τεχνητώς παραγομένων ραδιενεργών ισοτόπων στο χώμα που συνιστούν και το υπόστρωμα της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος, όσον αφορά το έδαφος, μετά το ατύχημα του Chernobyl.

Ισότοπο	$T_{1/2}$ (χρόνια)	Συγκέντρωση ( $Bq\ kg^{-1}$ )
$^{90}Sr$	28.78	10
$^{137}Cs$	30.17	30
$^{239}Pu$	$2.44 \times 10^4$	0.1
$^{241}Pu$	14.7	0.3
$^{241}Am$	432	0.03
$^{238}U$	$4.47 \times 10^9$	20
$^{234}U$	$2.44 \times 10^5$	20
$^{232}Th$	$1.40 \times 10^{10}$	15
$^{235}U$	$7.04 \times 10^8$	1

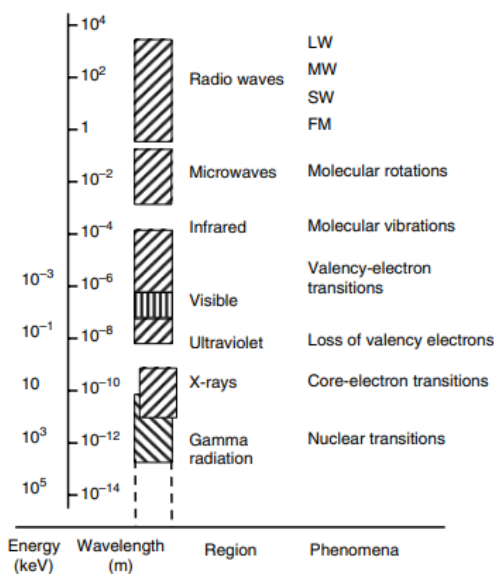
*Πίνακας 1.3 Συγκεντρώσεις των φυσικώς και τεχνητώς παραγομένων ραδιενεργών ισωτόπων του υποστρώματος της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στο χώμα.*

## Η γ-φασματοσκοπία

Η γ-φασματοσκοπία είναι το πιο ισχυρό εργαλείο στον τομέα της ανάλυσης ραδιονουκλιδίων λόγω του ότι οι περισσότερες πυρηνικές αντιδράσεις συνοδεύονται από την εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα, οπότε με αυτή τη μέθοδο γίνεται εύκολη η παρατήρηση και η ποσοτική μέτρηση των προϊόντων της αντίδρασης. Το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας αποτελεί ταυτότητα του ραδιοϊσοτόπου, διότι αυτό εκπέμπει φωτόνια χαρακτηριστικής ενέργειας, διαμορφώνοντας χαρακτηριστικές (του ραδιοϊσοτόπου) κορυφές στο φάσμα. Από αυτό το φάσμα μπορούμε να μετρήσουμε ποσοτικά την παρουσία κάποιου ραδιοϊσοτόπου σε υλικό, ολοκληρώνοντας τις κρούσεις κάτω από την(τις) χαρακτηριστική(-ες) κορυφή(-ές) του ραδιοϊσοτόπου. Ένα σύστημα φασματόμετρου ακτίνων γάμμα αποτελείται από έναν ανιχνευτή, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για το χειρισμό των παλμών (π.χ κύκλωμα προενίσχυσης και ενίσχυσης) και μια εγκατάσταση για την αποθήκευση του πλήθους των παλμών σε κανάλια ανάλογα με το ύψος τους (π.χ. πολύ-καναλικό αναλυτή παλμών Multi-Channel Analyzer MCA), την επεξεργασία δεδομένων και τα δεδομένα απεικόνισης [1].

Η ακτινοβολία γάμμα αποτελεί ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος όπως τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα και το ορατό φως. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι είναι ιοντίζουσα ακτινοβολία και προέρχεται πάντα από πυρήνες ατόμων, δηλαδή είναι πάντα πυρηνικής προέλευσης (ενώ οι ακτίνες X είναι ατομικής προέλευσης). Στο τεράστιο εύρος

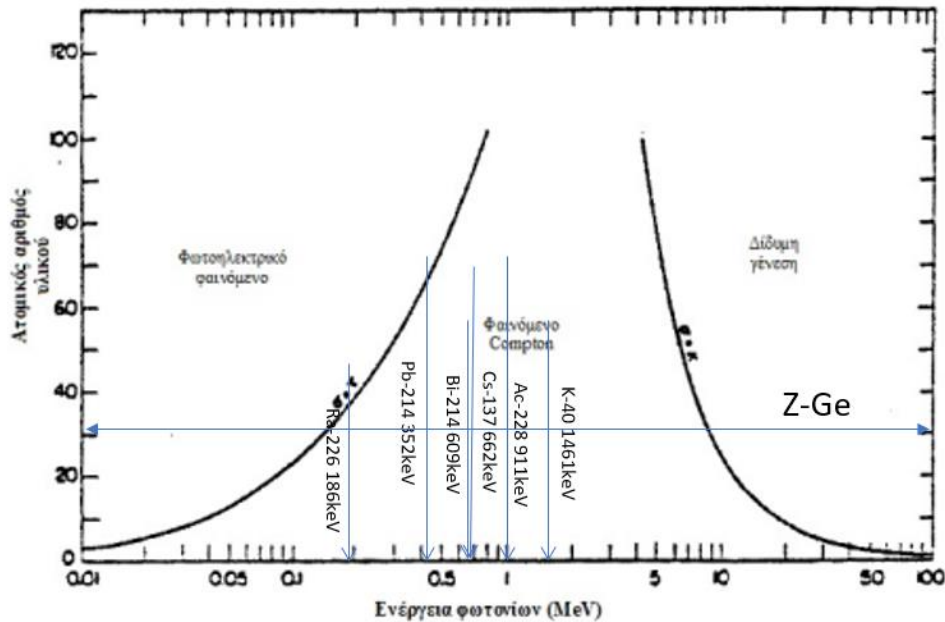
ενεργειών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος οι ακτίνες γάμμα ανήκουν στο υψηλής ενέργειας, δηλαδή μικρού μήκους κύματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

### Τρόποι αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-γ με την ύλη

Γενικά, η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη δεν είναι πολύ πιθανό να συμβεί διότι τα φωτόνια δεν διαθέτουν φορτίο και γι' αυτό παρουσιάζουν διαφορετικούς τρόπους αλληλεπίδρασης με την ύλη σε σύγκριση με τα φορτισμένα σωματίδια. Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι αλληλεπίδρασης φωτονίων γ με την ύλη το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γένεση. Επιπλέον σπανιότεροι τρόποι αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη είναι η σκέδαση Thompson στις μεσαίες ενέργειες και η φωτοδιάσπαση στις υψηλές. Στις χαμηλές ενέργειες, μέχρι 500 keV, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυτό που κυριαρχεί, ενώ στις ενέργειες πάνω από 5MeV επικρατεί η δίδυμη γένεση. Ανάμεσα σ' αυτές τις τιμές η σκέδαση Compton είναι η πιο πιθανή αλληλεπίδραση. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και ο ατομικός αριθμός του υλικού με το οποίο συμβαίνει η αλληλεπίδραση, ασκώντας ισχυρή επιρροή στις σχετικές πιθανότητες μεταξύ των τριών φαινομένων. Στην εικόνα 1.5 φαίνεται η περιοχή επικράτησης του κάθε φαινομένου ανάλογα με τον ατομικό αριθμό και την ενέργεια του υλικού απορρόφησης. Ας σημειωθεί ότι η πιθανότητα εμφάνισης του Compton είναι ευθέως ανάλογη της πυκνότητας ηλεκτρονίων που παρουσιάζει το υλικό.



*Εικόνα 1.5 Περιοχές επικράτησης του κάθε φαινομένου συναρτήσει της ενέργειας και του ατομικού αριθμού του υλικού απορρόφησης*

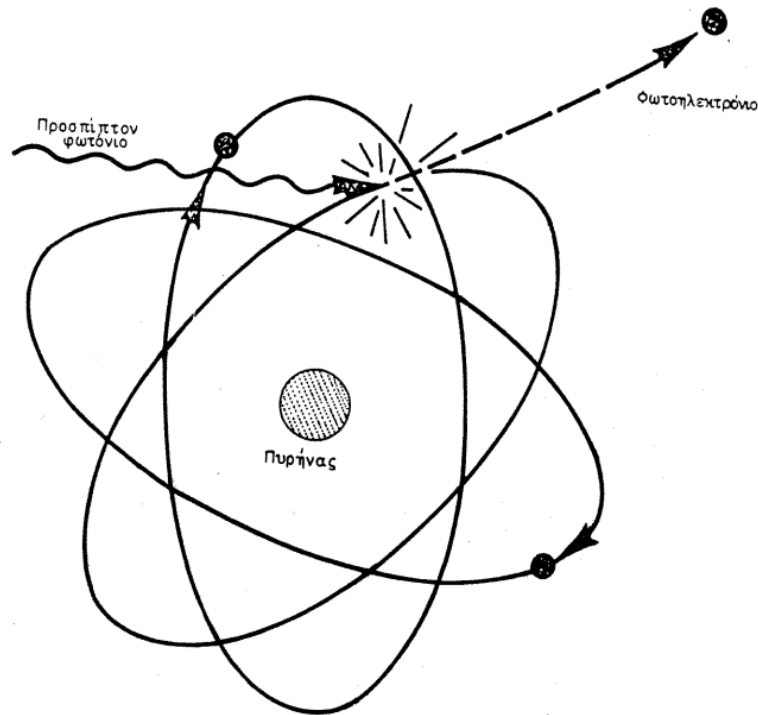
## 1) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια διαδικασία ατομικής απορρόφησης κατά την οποία το άτομο απορροφά εντελώς την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου. Το φωτόνιο εξαφανίζεται και η ενέργεια που απορροφάται χρησιμοποιείται για την απελευθέρωση ενός τροχιακού ηλεκτρονίου του ατόμου. Το απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο καλείται φωτοηλεκτρόνιο. Η κινητική ενέργεια που προσλαμβάνει το φωτοηλεκτρόνιο  $E_{pe}$ , ισούται με τη διαφορά μεταξύ της κβαντικής ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου και της ενέργειας δεσμού της ηλεκτρονικής στοιβάδας από την οποία εκτοπίστηκε το φωτοηλεκτρόνιο σύμφωνα με τον τύπο (1.1). Τα φωτοηλεκτρόνια δεν μπορούν να διαφύγουν από μια ηλεκτρονική στοιβάδα αν η απορροφούμενη ενέργεια των φωτονίων δεν είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια δεσμού που αντιστοιχεί στη στοιβάδα. Όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετά υψηλότερη από τις ενέργειες δεσμού όλων των στοιβάδων του ατόμου, τότε το φωτοηλεκτρόνιο έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να διαφύγει από την πλέον εσωτερική στοιβάδα. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου, λόγω της διαφυγής ενός τροχιακού ηλεκτρονίου, δημιουργείται ένα κενό σε μια ηλεκτρονική στοιβάδα το οποίο αναπληρώνεται από ηλεκτρόνιο εξωτερικότερης στοιβάδας με την ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας  $X_{[10]}$



$$\frac{1}{2} mu^2 = h\nu - E_b \quad (1.1)$$

Όπου  $h$  η σταθερά του Planck,  $\nu$  η συχνότητα του φωτονίου και  $E_b$  η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο.



Εικόνα 1.6 Σχηματική παράσταση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

## 2) Σκέδαση Compton

Η σκέδαση Compton (που ονομάζεται επίσης φαινόμενο Compton), που ανακαλύφθηκε από τον Arthur Holly Compton, είναι η σκέδαση ενός φωτονίου υψηλής συχνότητας μετά από αλληλεπίδραση με ένα φορτισμένο σωματίδιο, συνήθως ένα ηλεκτρόνιο. Εάν έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας (αύξηση του μήκους κύματος) του φωτονίου (το οποίο μπορεί να είναι φωτόνιο ακτίνων X ή ακτίνων γάμμα), ονομάζεται φαινόμενο Compton. Ένα μέρος της ενέργειας του φωτονίου μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο που ανακρούεται.

Η σκέδαση Compton αποτελεί παράδειγμα ελαστικής σκέδασης. Η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο (ανάκρουση) αλλά μόνο ως κινητική ενέργεια στο εργαστηριακό πλαίσιο. Το ηλεκτρόνιο δεν κερδίζει εσωτερική ενέργεια, οι αντίστοιχες μάζες παραμένουν ίδιες, το σήμα μιας ελαστικής

σύγκρουσης.[16]. Η ενέργεια του φωτονίου μετά την κρούση μπορεί να βρεθεί από τον τύπο:

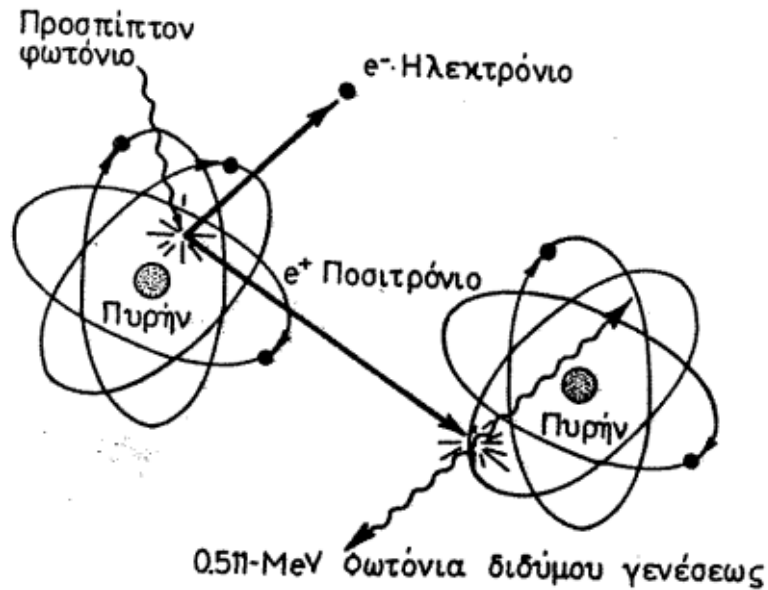
$$E' = hv' = \frac{hv}{1 + \left(\frac{hv}{m_0c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (1.2)$$



Εικόνα 1.7 Σχηματική παράσταση της σκέδασης Compton

### 3) Δίδυμη γένεση

Σε αυτό το φαινόμενο ένα φωτόνιο εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζονται δύο σωματίδια, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Για να γίνει όμως αυτό πρέπει η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου να είναι μεγαλύτερη από 1.022MeV (μάζα των δύο σωματιδίων) ώστε να ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Επίσης πρέπει να ισχύει και η αρχή διατήρησης της ορμής. Η ορμή του φωτονίου θα πρέπει να μεταδοθεί στα δύο σωματίδια, πράγμα ικανό μόνο αν η γένεση λάβει μέρος κοντά στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ενός πυρήνα ατόμου.[10]



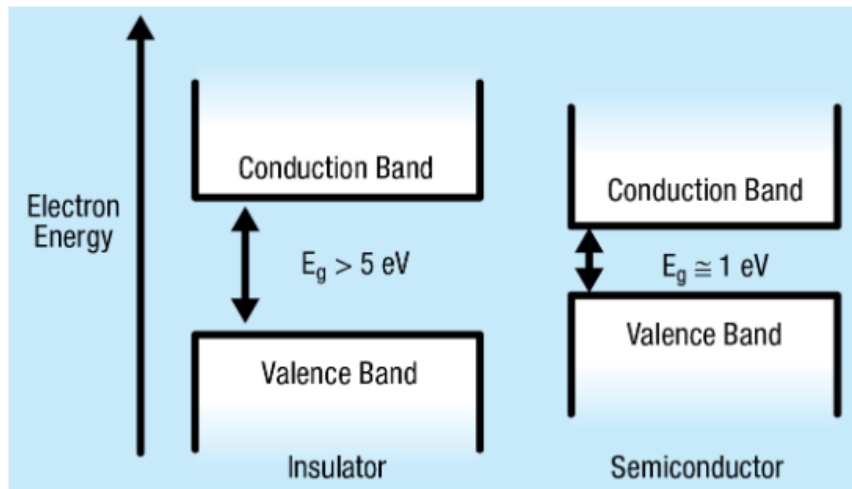
Εικόνα 1.8 Σχηματική παράσταση δίδυμης γένεσης

## Ζώνη σθένους και ζώνη αγωγιμότητας

Η ζώνη σθένους (valence band) είναι η ενεργειακή ζώνη ή το ενεργειακό επίπεδο που περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια σθένους ενός ατόμου. Όπου, τα ηλεκτρόνια σθένους είναι τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού κελύφους του ατόμου. Στο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών, η ζώνη σθένους βρίσκεται συνήθως σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο (δηλαδή στην κάτω πλευρά του διαγράμματος όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.9) σε σχέση με τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ζώνη σθένους είναι γεμάτη με ηλεκτρόνια σθένους που έχουν χαμηλή ενέργεια. Μπορούμε να παρέχουμε ενέργεια στα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό ηλεκτρικό δυναμικό. Αφού πάρουν ενέργεια, τα ηλεκτρόνια σθένους μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας και γίνονται ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Γενικά, τα ηλεκτρόνια είναι πάντα παρόντα στη ζώνη σθένους, επομένως, είναι είτε πλήρως είτε μερικώς γεμάτη με τα ηλεκτρόνια.[16]

Η ζώνη αγωγιμότητας είναι η ενεργειακή ζώνη ή το ενεργειακό επίπεδο που περιλαμβάνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι υπεύθυνα για την αγωγή του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Περιέχει εκείνα τα ηλεκτρόνια σθένους που διεγείρονται σε υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα

από το εξωτερικό δυναμικό στη ζώνη σθένους. Στους ημιαγωγούς και τους μονωτές, τα ηλεκτρόνια περιορίζονται σε έναν αριθμό ενεργειακών ζωνών και απαγορεύονται από άλλες περιοχές επειδή δεν υπάρχουν επιτρεπτές ηλεκτρονικές καταστάσεις για να καταλάβουν. Ο όρος "χάσμα ζώνης" αναφέρεται στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ της κορυφής της ζώνης σθένους και του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας. Προκειμένου ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους να προωθηθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, απαιτείται ένα συγκεκριμένο ελάχιστο ποσό ενέργειας για τη μετάβαση. Αυτή η απαιτούμενη ενέργεια αποτελεί χαρακτηριστικό του στερεού υλικού. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας απορροφώντας είτε ένα φωνόνιο (θερμότητα) είτε ένα φωτόνιο (φως).<sup>[16]</sup>

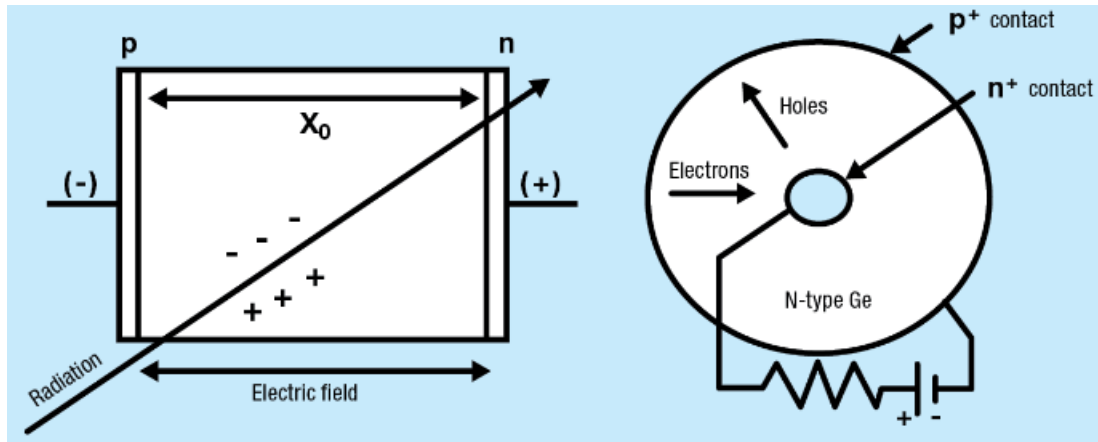


Σχήμα 1.9 Ζώνη σθένους και ζώνη αγωγιμότητας

### Ανιχνευτές υψηλής καθαρότητας (HPGe)

Για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) του εργαστηρίου. Οι ανιχνευτές γερμανίου είναι δίοδοι ημιαγωγών με δομή p-i-n (επαφή τύπου P, ενδογενές στρώμα και επαφή τύπου N), στην οποία η ενδογενής (i) περιοχή είναι ευαίσθητη σε ιονίζουσα ακτινοβολία, ιδίως σε ακτίνες-X και ακτίνες-γ. Υπό αντίστροφη πόλωση, ένα ηλεκτρικό πεδίο εκτείνεται κατά μήκος της ενδογενούς δημιουργώντας μια περιοχή απογύμνωσης. Ονομάζεται απογύμνωσης, διότι η περιοχή αυτή είναι απογυμνωμένη πια από φορείς σήματος, δηλαδή από ηλεκτρόνια και οπές. Όταν τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με το υλικό εντός του απογυμνωμένου όγκου ενός ανιχνευτή, παράγονται φορείς φορτίου (οπές στη ζώνη σθένους και ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας) και μετακινούνται από το ηλεκτρικό πεδίο προς τα ηλεκτρόδια p και n. Αυτό το φορτίο, το οποίο είναι ανάλογο της ενέργειας που εναποτίθεται στον ανιχνευτή από το εισερχόμενο φωτόνιο, μετατρέπεται σε παλμό τάσης από έναν προενισχυτή ευαίσθητο στο φορτίο. Για έναν

ομοαξονικό ανιχνευτή η ανορθωτική επαφή που σχηματίζει την ημιαγωγική επαφή τοποθετείται συνήθως στην εξωτερική επιφάνεια του κρυστάλλου. Έτσι, η εξωτερική επαφή για έναν HPGe τύπου n θα είναι p<sup>+</sup> και η εσωτερική επιφάνεια θα είναι n<sup>+</sup>. Η περιοχή απογύμνωσης για έναν τέτοιο ανιχνευτή αυξάνεται προς τα μέσα καθώς αυξάνεται η τάση.[3]



*Σχήμα 1.10 Ένας τυπικός ανιχνευτής επαφής p-i-n (αριστερά) με αντίστροφη πόλωση. Διατομή ενός ομοαξονικού ανιχνευτή τύπου n κάθετα στον κυλινδρικό άξονα (δεξιά).*

## Βασικές αρχές λειτουργίας

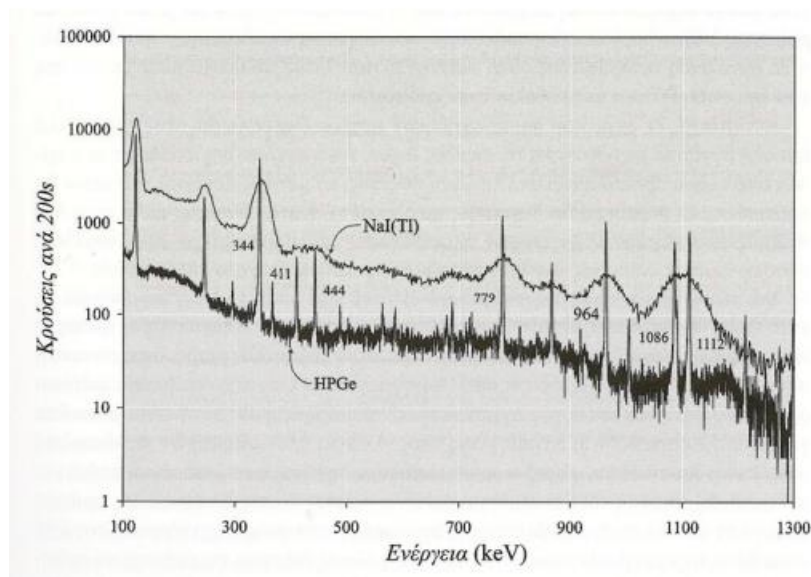
Η ακτινοβολία-γ εισέρχεται στον ευαίσθητο όγκο (κρύσταλλο γερμανίου) του ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με το ημιαγώγιμο υλικό. Το φωτόνιο, ως ιοντίζουσα ακτινοβολία, αλληλεπιδρά με την περιοχή απογύμνωσης και ιονίζει τα άτομα του ημιαγωγού, παράγοντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, των οποίων ο πληθυσμός είναι ανάλογος της ενέργειας του φωτονίου. Ως αποτέλεσμα, ένας αριθμός ηλεκτρονίων μεταφέρεται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και ένας ίσος αριθμός οπών δημιουργείται στη ζώνη σθένους. Δεδομένου ότι το γερμάνιο είναι αρκετά πυκνό υλικό και μπορεί να έχει περιοχή απογύμνωσης πάχους μερικών μm έως 1-2 cm<sub>[17]</sub>, είναι σε θέση να απορροφήσει πλήρως φωτόνια υψηλής ενέργειας περίπου 1,5MeV (μέχρι 3 MeV αν ρίξουμε την ενίσχυση). Υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια και οι οπές ταξιδεύουν προς τα ηλεκτρόδια, όπου δημιουργούν έναν παλμό που μπορεί να μετρηθεί σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτός ο παλμός μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια της αρχικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο αριθμός αυτών των παλμών ανά μονάδα χρόνου δίνει επίσης πληροφορίες για την ένταση της ακτινοβολίας.[3]

## Τρόπος κατασκευής και σύστημα ψύξης

Δεδομένου ότι το γερμάνιο έχει σχετικά χαμηλό ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας, αυτοί οι ανιχνευτές πρέπει να ψύχονται προκειμένου να μειωθεί η θερμική παραγωγή φορέων φορτίου (άρα και το ρεύμα διαρροής) σε αποδεκτό επίπεδο. Διαφορετικά, ο θόρυβος που προκαλείται από το ρεύμα διαρροής καταστρέφει την ενεργειακή ανάλυση του ανιχνευτή. Το υγρό άζωτο, το οποίο έχει θερμοκρασία 77°K, αποτελεί παραδοσιακά το μέσο ψύξης για τέτοιους ανιχνευτές. Το ενεργειακό χάσμα (διαφορά ενέργειας μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας) είναι πολύ χαμηλό για το γερμάνιο ( $E_{\text{gap}} = 0,67 \text{ eV}$ ). Η ψύξη σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (-195,8°C; -320°F) μειώνει τις θερμικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων σθένους, έτσι ώστε μόνο μια αλληλεπίδραση ακτίνων γάμμα μπορεί να δώσει σε ένα ηλεκτρόνιο την ενέργεια που απαιτείται για να διασχίσει το χάσμα ζώνης και να φτάσει στη ζώνη αγωγιμότητας[3]. Ως εκ τούτου, οι ανιχνευτές HPGe είναι συνήθως εξοπλισμένοι με κρυοστάτη. Οι κρύσταλλοι γερμανίου διατηρούνται μέσα σε ένα εκκενωμένο μεταλλικό δοχείο που αναφέρεται ως περίβλημα του ανιχνευτή. Το περίβλημα του ανιχνευτή καθώς και το τελικό κάλυμμα (end-cap) μπορούν να επιλεγούν να είναι τόσο λεπτά ώστε να αποφεύγεται η εξασθένιση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας. Το περίβλημα είναι γενικά κατασκευασμένο από αλουμίνιο και έχει τυπικά πάχος 1 mm. Το end-cap, είναι επίσης γενικά κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Ο κρύσταλλος HPGe βρίσκεται σε θερμική επαφή με μια μεταλλική ράβδο που ονομάζεται ψυχρός δάκτυλος. Ο ψυχρός δάκτυλος μεταφέρει θερμότητα από το συγκρότημα του ανιχνευτή στη δεξαμενή υγρού αζώτου (LN2). Ο συνδυασμός του μεταλλικού περιβλήματος κενού, του ψυχρού δακτύλου και της φιάλης Dewar για το κρυογόνο του υγρού αζώτου ονομάζεται κρυοστάτης. Ο προενισχυτής του ανιχνευτή γερμανίου περιλαμβάνεται συνήθως ως μέρος της συσκευασίας του κρυοστάτη. Δεδομένου ότι ο προενισχυτής πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική χωρητικότητα του κυκλώματός του, ο προενισχυτής εγκαθίσταται μαζί. Η είσοδος του προενισχυτή ψύχεται επίσης. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το ψυχρό δάκτυλο εκτείνεται πέρα από το όριο κενού του κρυοστάτη σε μια φιάλη Dewar που είναι γεμάτη με υγρό άζωτο [4].

## Σύγκριση ανιχνευτών HPGe και NaI

Η χρήση ανιχνευτών ημιαγωγών για την ανίχνευση ακτίνων γάμμα έχει προσφέρει οφέλη στην ενεργειακή διακριτική ικανότητα μέτρησης. Οι κορυφές των ακτίνων γάμμα που λαμβάνονται με ανιχνευτές NaI είναι πολύ ευρείες συγκριτικά, έτσι ώστε δύο κορυφές που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη δεν μπορούν να διαχωριστούν και οι κορυφές χαμηλής ενέργειας μπορεί να μην παρατηρηθούν εύκολα. Οι ανιχνευτές ημιαγωγών από γερμάνιο παρέχουν σημαντικά καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση από τους σπινθηριστές NaI, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.11[4].



*Εικόνα 1.11 Το επάνω φάσμα μετρήθηκε με ανιχνευτή NaI, ενώ το κάτω με ανιχνευτή HPGe. Τα NaI διακρίνονται για την καλύτερη απόδοσή τους και οι HPGe για την καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητά τους.*

Οι ανιχνευτές HPGe έχουν 20-30 φορές καλύτερη ανάλυση σε σύγκριση με τους ανιχνευτές ιωδιούχου νατρίου (NaI). Επιπλέον, οι ανιχνευτές NaI, σε αντίθεση με τους ανιχνευτές HPGe, έχουν αποδειχθεί ότι αποδίδουν χειρότερα σε σενάρια μεικτών ισοτόπων, θωρακισμένων και σε συνθήκες υψηλού υποβάθρου. [5]

Ωστόσο υπάρχουν δύο μειονεκτήματα με τους ανιχνευτές ημιαγωγών. Πρώτον, δεν μπορούν να γίνουν τόσο μεγάλοι όσο το NaI, οπότε δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν ανιχνευτές με την ίδια απόδοση. Δεύτερον, ο ανιχνευτής ημιαγωγών πρέπει να ψύχεται σε θερμοκρασία σχεδόν υγρού αζώτου όταν χρησιμοποιείται, γεγονός που αυξάνει το κόστος, τον όγκο, το βάρος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

### **Θωράκιση ανιχνευτών HPGe**

Η χρήση θωράκισης του ανιχνευτή και του δείγματος επιβάλλεται για τη μείωση της ακτινοβολίας που προέρχεται από τον περιβάλλοντα χώρο. Το πάχος της θωράκισης για έναν ανιχνευτή γερμανίου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και εφαρμογές. Συνήθως, η θωράκιση για έναν ανιχνευτή γερμανίου αποτελείται από πολλαπλά στρώματα διαφορετικών υλικών με διαφορετικό πάχος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη θωράκιση περιλαμβάνουν μόλυβδο, χαλκό και πλαστικούς σπινθηριστές. Το πάχος των στρωμάτων θωράκισης εξαρτάται από παράγοντες όπως το επιθυμητό επίπεδο μείωσης της ακτινοβολίας υποβάθρου, το ενεργειακό εύρος των ακτίνων γάμμα και ο ειδικός

σχεδιασμός του συστήματος ανιχνευτή. Γενικά, το πάχος της θωράκισης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως αρκετά εκατοστά (5-10cm στην περίπτωση του μολύβδου). [1]

## Χαρακτηριστικά Ανιχνευτών

### Απόδοση

Όταν ένα φωτόνιο εισέρχεται στον ανιχνευτή υπάρχει πεπερασμένη πιθανότητα να διασχίσει τον ανιχνευτή και να εξέλθει απ' αυτόν χωρίς αλληλεπίδραση με το υλικό του ανιχνευτή. Ορίζεται ως ενδογενής (intrinsic) ή εσωτερική (internal) απόδοση το μέγεθος:

$$\varepsilon_{\text{int}} \equiv \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρήθηκαν}}{\text{αριθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στον ανιχνευτή}} \quad (1.3)$$

Υπάρχει εξάρτηση της  $\varepsilon_{\text{int}}$  από το υλικό, το είδος και την ενέργεια του σωματιδίου. Κατά την ανίχνευση δεν προσπίπτουν στον ανιχνευτή όλα τα σωματίδια που εκπέμπει η πηγή. Ορίζεται ως απόλυτη απόδοση της μέτρησης το μέγεθος:

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρήθηκαν}}{\text{αριθμός σωματιδίων που εκπεμπονται απο την πηγη}} \quad (1.4)$$

### Νεκρός χρόνος

Ως “νεκρός χρόνος”  $d$   $t$  ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας ορίζεται ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται, μετά από τη διέγερση του ανιχνευτή από σωματίδιο ιονίζουσας ακτινοβολίας, για να επανέλθει ο ανιχνευτής στις αρχικές συνθήκες και να μπορεί να ανιχνεύσει το επόμενο σωματίδιο ως ξεχωριστό γεγονός. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και από την ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος ανίχνευσης (του απαριθμητή). Ο νεκρός χρόνος μετριέται πειραματικά. Σε περιπτώσεις μεγάλου ρυθμού παλμών το σφάλμα από τις απώλειες καταγραφής παλμών μπορεί να είναι σημαντικό και πρέπει να γίνεται σχετική διόρθωση της μέτρησης.[19]

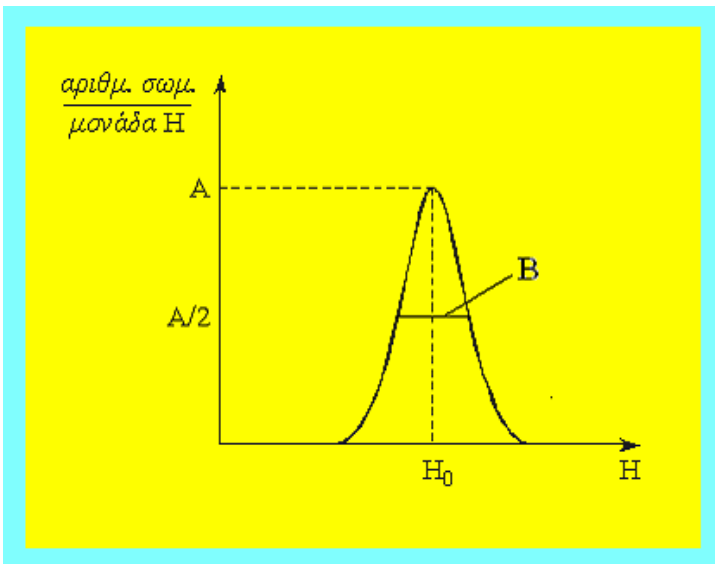


## Ενεργειακή διακριτική ικανότητα

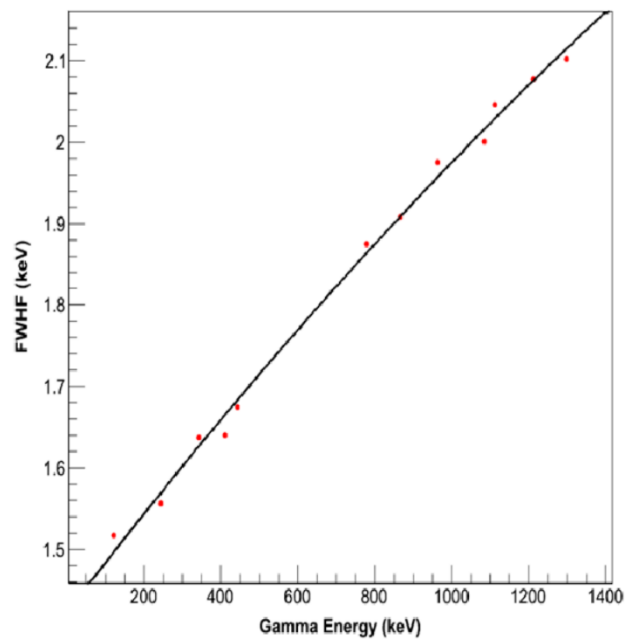
Θεωρούμε μετρητικό σύστημα το οποίο μετρά και καταγράφει τον αριθμό των παλμών  $N(H)$ . Το ύψος  $H$  κάθε παλμού είναι ανάλογο της ενέργειας  $E$  που εναπόθεσε το αντίστοιχο σωματίδιο στον ανιχνευτή. Ας υποθέσουμε ότι στον ανιχνευτή προσπίπτουν μονοενεργειακά σωματίδια, όλα με ενέργεια  $E_0$ . Από ένα “τέλειο ανιχνευτή” θα καταγράφονταν όλοι οι παλμοί με το ίδιο ύψος  $H_0$  που αντιστοιχεί στην ενέργεια  $E_0$ . Στην πράξη όμως καταγράφονται παλμοί με κατανομή ύψους  $H$ , όπως ενδεικτικά παριστάνεται στο σχήμα. Αυτή η διακύμανση οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο το οποίο παράγεται από την εναπόθεση της ενέργειας του σωματιδίου φέρεται από ένα διακριτό αριθμό φορέων φορτίου και ο αριθμός των φορέων φορτίου που συλλέγονται έχει τυχαίες διακυμάνσεις από γεγονός σε γεγονός, ακολουθώντας κανονική κατανομή (Gauss). [17]

$$\text{ενεργειακή διακριτική ικανότητα } R = B / H_0 \quad (1.5)$$

Το  $B$  αντιπροσωπεύει το πλήρες εύρος στο μισό του ύψους της κορυφής FWHM (Full Width half Maximum). Όσο πιο μικρό είναι το εύρος κατανομής τόσο πιο μικρό είναι και το  $R$  και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει δύο παραπλήσιες ενέργειες σωματιδίων  $E_1$  και  $E_2$ . [18] Το τελικό αποτέλεσμα της πράξης πιο πάνω προκύπτει ως ποσοστό (%) εύρους ενέργειας γύρω από την ενέργεια  $H_0$ .



Εικόνα 1.12 Φάσμα από μονοενεργειακά σωματίδια ενέργειας  $E_0$  στην οποία αντιστοιχεί το ύψος  $H_0$



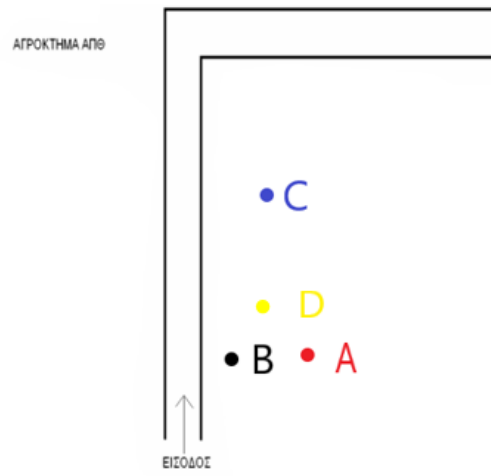
Εικόνα 1.13 Σύγκριση ενέργειας με FWHM

## Κεφάλαιο 2: Υλικά και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν

Κατά την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο χώρο του πανεπιστημιακού αγροκτήματος. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται συστηματικά από το 1987 μέχρι και σήμερα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του εδάφους ( pH 8, πηλός 22 %, λάσπη 37 %, άμμος 41 %, οργανικές ουσίες 1,28 %,  $\text{CaCO}_3$  1,8 %) έχουν παρουσιαστεί σε παλαιότερες αναφορές<sup>[6]</sup>. Η δειγματοληψία εκτελέστηκε σε 4 φάσεις. Η πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε στις 8/11/22 και πήρε μέρος στο σημείο A της εικόνας 2.1. Η δειγματοληψία έγινε από 5 διαφορετικές τρύπες σε απόσταση μερικών εκατοστών μεταξύ τους. Η 2<sup>η</sup> επίσκεψη στο αγρόκτημα έγινε στις 19/12/22 στο σημείο B και η 3<sup>η</sup> στις 1/3/23 στο σημείο C της εικόνας 2.1. Η τελική επίσκεψη έγινε στις 30/4/23 στο σημείο D της εικόνας 2.1. Επίσης έγινε και μια επιπλέον δειγματοληψία στην περιοχή Άγιος Νικόλαος της Νάουσας, όπου η επικάλυψη του καισίου ήταν υψηλότερη μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ, για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτών του αγροκτήματος. Η συλλογή του δείγματος αυτή πραγματοποιήθηκε στις 11/02/22. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις 5 περιπτώσεις ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία, όπως περιγράφεται παρακάτω.



Εικόνα 2.1 Ακριβείς τοποθεσίες μετρήσεων



*Εικόνα 2.2 Ακριβείς τοποθεσίες μετρήσεων*



*Εικόνα 2.3 Περιοχή πρώτης μέτρησης*

## Διαδικασία συλλογής δειγμάτων

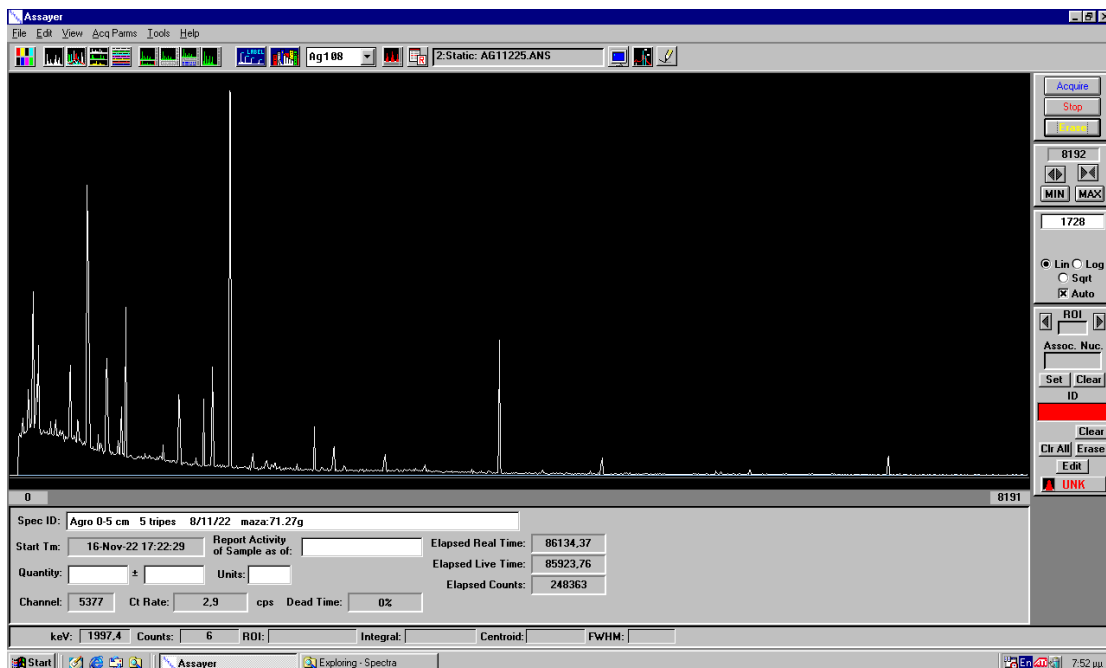
Ένας μεταλλικός, κούφιος σωλήνας τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους όπου γίνεται η μέτρηση. Προηγουμένως ο σωλήνας αυτός έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια ενός μέτρου και ενός μαρκαδόρου ανά 5cm, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9. Με ένα σφυρί ασκούμε πίεση στο σωλήνα μέχρι να φτάσει στο πρώτο βάθος μέτρησης αυτό των 5cm. Ακολουθώντας με μεγάλη προσοχή τραβάμε προς τα έξω το σωλήνα με την ποσότητα του χώματος που σύλλεξε στο κάτω μέρος του και τον τοποθετούμε σε πλαστικές αεροστεγείς σακούλες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τις 5 τρύπες με το χώμα να τοποθετείται στην ίδια σακούλα. Ακολουθώντας τοποθετούμε το σωλήνα με τη σειρά στις ίδιες τρύπες με πριν και με τη βοήθεια του σφυριού φτάνουμε στα 10cm βάθος. Το χώμα αυτό τοποθετείται σε διαφορετική σακούλα. Με τον ίδιο τρόπο προχωράμε μέχρι τα 35cm βάθος όπου και ολοκληρώνουμε τη συλλογή των δειγμάτων μας. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις όπου η συλλογή παρουσίαζε δυσλειτουργία η διαδικασία επαναλαμβανόταν από την αρχή. Στη συνέχεια τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για μέτρηση.



*Εικόνα 2.4 Διαδικασία συλλογής δείγματος*

## Διαδικασία μέτρησης στο εργαστήριο

Η μέτρηση του χόματος κάθε βάθους γίνεται με τη σειρά με την οποία συλλέχθηκαν τα δείγματα. Το χόμα τοποθετείται σε ένα γουδί για να αλεσθεί και να αποκτήσει πιο λεπτή μορφή. Στη συνέχεια το χόμα αυτό μεταφέρεται στο κυάθιο Pbq1 του σχήματος και με μία ζυγαριά μετριέται η μάζα του. Πριν τοποθετηθεί το χόμα στο κυάθιο φροντίζουμε να μετρηθεί και η δική του μάζα. Από την πράξη (2.1) προκύπτει η καθαρή μάζα του χόματος που θα μετρηθεί. Ακολούθως το κυάθιο με το χόμα τοποθετείται στον ανιχνευτή γερμανίου του εργαστηρίου του οποίου ο τρόπος λειτουργίας αναφέρθηκε προηγουμένως. Η διάρκεια μέτρησης του κάθε δείγματος είναι περίπου μια μέρα. Μετά το πέρας της μέτρησης το αποτέλεσμα αποθηκεύεται, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού στον υπολογιστή, για την αρχειοθέτηση και την ποιοτική επεξεργασία του. Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης του κάθε δείγματος στον ανιχνευτή το χόμα μεταφέρεται σε ένα γυάλινο κυάθιο και τοποθετείται στο φούρνο του σχήματος για να ξηραθεί. Η θερμοκρασία ξήρανσης είναι οι 105°C και η διάρκεια παραμονής του δείγματος στο φούρνο μια μέρα. Στη συνέχεια ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως και στη μέτρηση του υγρού δείγματος. Το παρακάτω σχήμα αποτελεί ένα παράδειγμα φάσματος κρούσεων μιας από τις μετρήσεις.



Εικόνα 2.5 Παράδειγμα μέτρησης φάσματος στο εργαστήριο.

$$\text{Καθαρή μάζα χόματος} = \text{Άθροισμα μάζας κυαθίου Pbq1 και χόματος} - \text{Μάζα άδειου κυαθίου} \quad (2.1)$$



*Εικόνα 2.5 Φωτογραφία ανιχνευτή με δείγμα μέσα*

### **Υλικά και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν**

α) **Ανιχνευτής γερμανίου EGPC 50-210-R** της εταιρείας EYRISYS MESURES. Πρόκειται για έναν κυλινδρικό, ομοαξονικό, τύπου-p ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου με απόδοση 50% (σε σύγκριση με έναν ανιχνευτή NaI ίδιου μεγέθους και σχήματος). Αποτελείται από έναν κρύσταλλο γερμανίου διαμέτρου 66.9mm και ύψους 56.3mm με θωράκιση από χαλκό, τέφλον και αλουμίνιο



*Εικόνα 2.6* Ανιχνευτής εργαστηρίου

β) Κυάθιο Pbq1 στο οποίο τοποθετείται το χώμα για να μετρηθεί στον ανιχνευτή



$$R=3.5\text{cm}$$

$$h=2\text{cm}$$

$$V=\pi R^2 h=76.97\text{cm}^3$$

*Εικόνα 2.7* Πλαστικό Κυάθιο Pbq1

γ) Γυάλινο κιάθιο. Αφού μετρηθεί το υγρό δείγμα μεταφέρεται στο γυάλινο κιάθιο για να τοποθετηθεί στο φούρνο



*Εικόνα 2.8 Γυάλινο κιάθιο*

δ) Γουδί και γουδοχέρι για άλεση του χώματος



*Εικόνα 2.9 Γουδί και γουδοχέρι*



ε) Φούρνος για ξήρανση του δείγματος



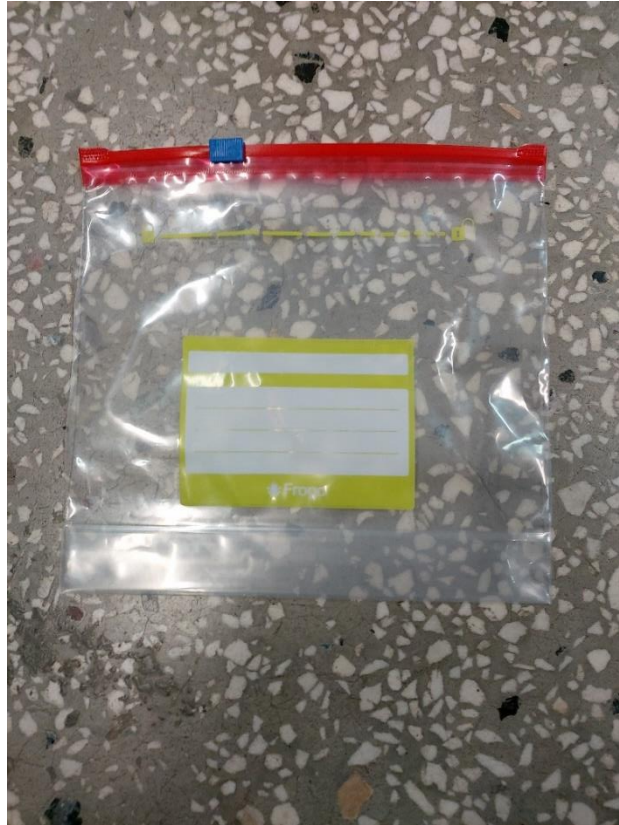
*Εικόνα 2.10 Φούρνος εργαστηρίου*

στ) Κούφιος, μεταλλικός σωλήνας για συλλογή δείγματος βαθμονομημένος ανά 5cm



*Εικόνα 2.11 Σωλήνας μέτρησης*

η) Πλαστικές αεροστεγείς σακούλες στις οποίες τοποθετείται το χώμα για μεταφορά στο εργαστήριο



*Εικόνα 2.12 Πλαστική αεροστεγής σακούλα*

# Κώδικας MCNP

## Γενικές πληροφορίες

Το MCNP είναι ένας κώδικας Monte Carlo γενικής χρήσης με δυνατότητες προσομοίωσης προβλημάτων αλληλεπίδρασης φωτονίων ή νετρονίων ή ηλεκτρονίων ή και συνδυασμό αυτών. Σε ικανό αριθμό προβλημάτων δοσιμετρίας, ακτινοπροστασίας αλλά εν γένει αλληλεπιδράσεων με την ύλη χρησιμοποιούνται Monte Carlo προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων και τον προσδιορισμό του φάσματος ροής σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου. Η μέθοδος MCNP είναι μία κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων τους.

## Το αρχείο εισόδου

Ο κώδικας, δέχεται ως είσοδο ένα αρχείο στο οποίο περιγράφονται:

- Η γεωμετρία του προβλήματος (ορισμός επιφανειών, ορισμός όγκων)
- Τα υλικά και οι ενεργές διατομές που χρησιμοποιούνται
- Η κατεύθυνση και τα χαρακτηριστικά της πηγής νετρονίων, φωτονίων ή ηλεκτρονίων
- Το είδος των απαντήσεων της προσομοίωσης (tallies) και ο τρόπος παρουσίασης των επιθυμητών αποτελεσμάτων
- Οι τεχνικές μείωσης της διακύμανσης των αποτελεσμάτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την ακρίβεια και την ταχύτητα των υπολογισμών.

Οι πληροφορίες αυτές διαβιβάζονται στον κώδικα και με αυτόν τον τρόπο ξεκινά η επεξεργασία. Τα αποτελέσματα (tallies) της επεξεργασίας αποθηκεύονται σε ένα αρχείο εξόδου. Συνήθως είναι η ροή των φωτονίων σε κάποια σημεία του χώρου. Στη συνέχεια από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ζητούμενα μεγέθη. Η μορφή των αποτελεσμάτων, από την εκτέλεση του κώδικα, εξαρτάται από το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται από τον MCNP. Ο MCNP παρέχει 6 είδη μετρητών και είναι οι εξής:

- Άθροισμα ροής σε επιφάνεια (σωματίδια)
- Μέση ροή σε μια επιφάνεια (σωματίδια/cm<sup>2</sup>)
- Μέση ροή σε έναν όγκο (σωματίδια/cm<sup>3</sup>)
- Ενεργειακή κατανομή παλμών (MeV/g)
- Εναπόθεση ενέργειας από σχάση σε μάζα (MeV/g)
- Σημειακή ροή ή ροή σε ανιχνευτή δακτυλίου (σωματίδια/cm<sup>2</sup>)

Για τον υπολογισμό της ροής στις εκτελούμενες προσομοιώσεις, το είδος του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό του σημειακού ανιχνευτή λόγω υψηλής ακρίβειας στα αποτελέσματα.

## Η κάρτα κελιών

Το πρώτο τμήμα του αρχείου εισόδου περιέχει τους ορισμούς των κελιών (cells), που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν το φυσικό χώρο στον οποίο κινούνται τα σωματίδια. Είναι σημαντικό να καταγραφούν όλοι οι όγκοι που απαρτίζουν τη γεωμετρία του προβλήματος, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος σφάλματος στις μετρήσεις, αφού ο MCNP δεν ελέγχει την ορθότητα της γεωμετρίας. Ο ορισμός του κελιού περιλαμβάνει έναν αύξοντα αριθμό, τον αριθμό του υλικού από το οποίο αποτελείται, την πυκνότητα του υλικού και τέλος μια σειρά συντελεστών που ορίζουν τις επιφάνειες από τις οποίες περικλείεται ο όγκος. Επιπλέον στο τέλος της κάθε γραμμής το πρόγραμμα επιτρέπει την προσθήκη σχολίων για την ευκολότερη κατανόηση από τον χρήστη.

```
662 keV
c
c cell cards
c
1 1 -1.3 -3 4 -7 8 -11 12 $ soil source
2 1 -1.3 -3 2 -5 6 -9 10#1 $ soil without source
3 2 -0.001205 -1 2 -5 6 -9 10#1#2 $ air
4 0 1:-2:5:-6:9:-10 $ outside universe
```

*Εικόνα 4.1* Κάρτα κελιών MCNP. Ορίζεται το είδος του υλικού η πυκνότητα και οι επιφάνειες από τις οποίες ορίζεται ο όγκος

## Η κάρτα επιφανειών

Η δεύτερη ενότητα του αρχείου εισόδου περιέχει τις επιφάνειες. Οι επιφάνειες μπορεί να είναι γραμμές, σφαίρες, κύλινδροι, υπερβολές, παραβολές και ελλείψεις. Οι εξισώσεις που ορίζουν τις επιφάνειες φαίνονται στην εικόνα 4.2. Η σύνταξη της κάρτας επιφάνειας αποτελείται από τον αριθμό της επιφάνειας που δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από πέντε ψηφία, τον τύπο της επιφάνειας και τέλος από τους συντελεστές της εξίσωσης της επιφάνειας.

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entries
P PX PY PZ	plane	general normal to $x$ -axis normal to $y$ -axis normal to $z$ -axis	$Ax + By + Cz - D = 0$ $x - D = 0$ $y - D = 0$ $z - D = 0$	$A B C D$ $D$ $D$ $D$
SO S SX SY SZ	sphere	centered at origin general centered on $x$ -axis centered on $y$ -axis centered on $z$ -axis	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$ $(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$R$ $\bar{x} \bar{y} \bar{z} R$ $\bar{x} R$ $\bar{y} R$ $\bar{z} R$
C/X C/Y C/Z CX CY CZ	cylinder	parallel to $x$ -axis parallel to $y$ -axis parallel to $z$ -axis on $x$ -axis on $y$ -axis on $z$ -axis	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$ $(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$ $(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$ $y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + y^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} \bar{z} R$ $\bar{x} \bar{z} R$ $\bar{x} \bar{y} R$ $R$ $R$ $R$

Εικόνα 4.2 Γεωμετρίες για ορισμό επιφάνειας

Στη δική μας περίπτωση από τις διαστάσεις ορίστηκε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο κατασκευάστηκε με τη βοήθεια έξι επιπέδων, δύο κάθετα στον άξονα X και δύο κάθετα στον άξονα Y και δύο κάθετα στον άξονα Z. Το έδαφος προσομοιώνεται με ένα παραλληλεπίπεδο αρκετά μεγάλων διαστάσεων (80m\*80m\*40m). Σε προηγούμενες εργασίες έχει αποδειχτεί γιατί μια τέτοια προσέγγιση αποτελεί μια καλή θεώρηση του απείρου εδάφους<sub>[15]</sub>. Η σύσταση του εδάφους όπως θεωρήθηκε για τις εκτελούμενες προσομοιώσεις φαίνεται στην εικόνα 4.3. Πάνω από το έδαφος θεωρήθηκε στρώμα αέρα ύψους 40m. Ο σημειακός ανιχνευτής τοποθετήθηκε στο 1m πάνω από το έδαφος.

Στοιχείο	Συνεισφορά στην κατά βάρος σύσταση (%)
Al	7.3
C	2.1
Ca	1.4
Fe	3.9
K	0.9
Mg	0.5
N	0.1
Na	0.6
O	50.1
Si	32.7
Ti	0.4

*Εικόνα 4.3 Σύσταση εδάφους αγροκτήματος*

```

c surface cards
c
c
c
c
c $ normal to axis surfaces
1 pz 4000.
2 pz -4000.
3 pz 0.
4 pz -5.
5 py 4000.
6 py -4000.
7 py 2000.
8 py -2000.
9 px 4000.
10 px -4000.
11 px 2000.
12 px -2000.

```

*Εικόνα 4.4 Κάρτα επιφανειών MCNP*

## Η κάρτα δεδομένων

Σε αυτό το σημείο καθορίζεται η φύση του προβλήματος έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η επίλυση του. Η κάρτα δεδομένων συνήθως περιλαμβάνει:

- Τα σωματίδια που θα μελετηθούν (νετρόνια , ηλεκτρόνια , φωτόνια)
- Τη σύσταση των υλικών του προβλήματος
- Τον ορισμό της πηγής του προβλήματος
- Το είδος και τον αριθμό των ανιχνευτών
- Τις συνθήκες τερματισμού και προσομοίωσης
- Λοιπές παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση της προσομοίωσης

### Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα μετρήσεων

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  αλλά και των δύο φυσικών ραδιονουκλιδίων  $^{40}\text{K}$  και  $^{214}\text{Pb}$ , σε 4 διαφορετικά σημεία στο αγρόκτημα και σε 1 σημείο στη Νάουσα για νωπά αλλά και αφυδατωμένα δείγματα.

#### Αγρόκτημα μέτρηση Νοέμβριος 2022 σημείο Α ( Νωπά δείγματα )

Βάθος (cm)	<b>0-5</b>	<b>5-10</b>	<b>10-15</b>	<b>15-20</b>	<b>20-25</b>	<b>25-30</b>	<b>30-35</b>
<b>Cs-137 (Bq/Kg)</b>	46.8	48.9	20.9	10.1	6.5	1.9	0.9
<b>K-40 (Bq/Kg)</b>	260	244	237	229	237	218	190
<b>Pb-214 (Bq/Kg)</b>	11	14	9	10	12	9	8
<b>Ra-226 (Bq/Kg)</b>	13.4	14.34	11.63	13.72	14.67	13.9	9.88
<b>Ac-228 (Bq/Kg)</b>	17	17	16	16	15	16	14

#### Αγρόκτημα μέτρηση Νοέμβριος 2022 σημείο Α ( Αφυδατωμένα δείγματα )

Βάθος (cm)	<b>0-5</b>	<b>5-10</b>	<b>10-15</b>	<b>15-20</b>	<b>20-25</b>	<b>25-30</b>	<b>30-35</b>
<b>Cs-137 (Bq/Kg)</b>	-	54.1	22.3	12.1	6.4	1.9	1.1
<b>K-40 (Bq/Kg)</b>	-	277	258	238	245	227	198
<b>Pb-214 (Bq/Kg)</b>	-	12	10	11	11	11	10
<b>Ra-226 (Bq/Kg)</b>	-	11.85	13.56	11.85	9.65	14.13	10.23
<b>Ac-228 (Bq/Kg)</b>	-	17	17	17	18	16	15

**Αγρόκτημα μέτρηση Δεκέμβριος 2022 σημείο Β ( Νωπά δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	59.7	34.2	12.8	7.7	7.4	-	-
K-40 (Bq/Kg)	268	229	213	211	213	-	-
Pb-214 (Bq/Kg)	9	8	9	7	10	-	-
Ra-226 (Bq/Kg)	10.3	10.63	22.49	9.59	11.52	-	-
Ac-228 (Bq/Kg)	14	15	16	17	14	-	-

**Αγρόκτημα μέτρηση Δεκέμβριος 2022 σημείο Β ( Αφυδατωμένα δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	-	40.4	13.3	8.4	8.8	-	-
K-40 (Bq/Kg)	-	261	241	238	237	-	-
Pb-214 (Bq/Kg)	-	11	11	11	10	-	-
Ra-226 (Bq/Kg)	-	16.16	12.93	13.4	13.51	-	-
Ac-228 (Bq/Kg)	-	20	17	17	16	-	-



**Αγρόκτημα μέτρηση Μάρτιος 2023 σημείο C ( Νωπά δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	44.3	34.3	16.1	8	3.5	2.5	-
K-40 (Bq/Kg)	275	259	226	234	225	213	-
Pb-214 (Bq/Kg)	11	9	9	8	8	8	-
Ra-226 (Bq/Kg)	14.09	10.96	11.97	10.32	10.49	8.99	-
Ac-228 (Bq/Kg)	17	18	15	17	16	19	-

**Αγρόκτημα μέτρηση Μάρτιος 2023 σημείο C ( Αφυδατωμένα δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	48.6	38.7	23.8	10.3	-	2.5	-
K-40 (Bq/Kg)	318	279	276	251	-	213	-
Pb-214 (Bq/Kg)	12	10	11	10	-	8	-
Ra-226 (Bq/Kg)	14.23	13.13	13.18	12.51	-	12.43	-
Ac-228 (Bq/Kg)	21	19	15	17	-	17	-

**Αγρόκτημα μέτρηση Μάιος 2023 σημείο D ( Νοπά δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	31.3	33	23.2	15.1	6.9	3.2	-
K-40 (Bq/Kg)	262	251	246	221	221	213	-
Pb-214 (Bq/Kg)	8	9	8	9	8	8	-
Ra-226 (Bq/Kg)	10.06	12.41	10.53	11.57	10.21	13.62	-
Ac-228 (Bq/Kg)	15	14	16	15	16	15	-

**Αγρόκτημα μέτρηση Μάιος 2023 σημείο D ( Αφυδατωμένα δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	39.1	37.9	26.1	16.7	8.5	3.3	-
K-40 (Bq/Kg)	307	284	276	258	261	249	-
Pb-214 (Bq/Kg)	10	10	9	11	10	11	-
Ra-226 (Bq/Kg)	13.92	11.06	10.16	14.64	10.4	13.94	-
Ac-228 (Bq/Kg)	20	17	18	19	17	18	-

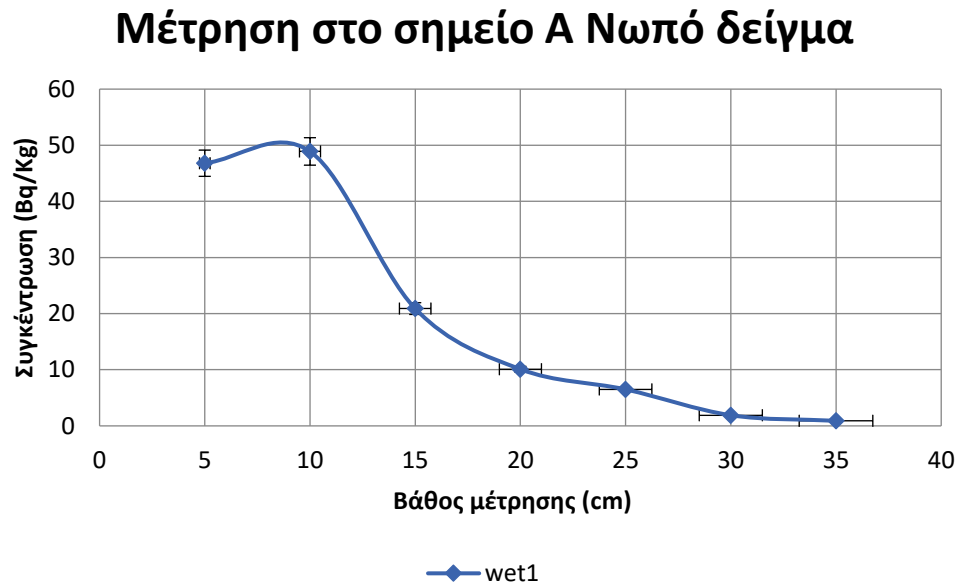
**Μέτρηση στη Νάουσα ( Νωπά δείγματα )**

Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	191.8	274.5	91.5	-	-	-	-
K-40 (Bq/Kg)	192	307	363	-	-	-	-
Pb-214 (Bq/Kg)	11	20	27	-	-	-	-
Ra-226 (Bq/Kg)	13.92	27.7	33.78	-	-	-	-
Ac-228 (Bq/Kg)	15	25	29	-	-	-	-

**Μέτρηση στη Νάουσα ( Αφυδατωμένα δείγματα )**

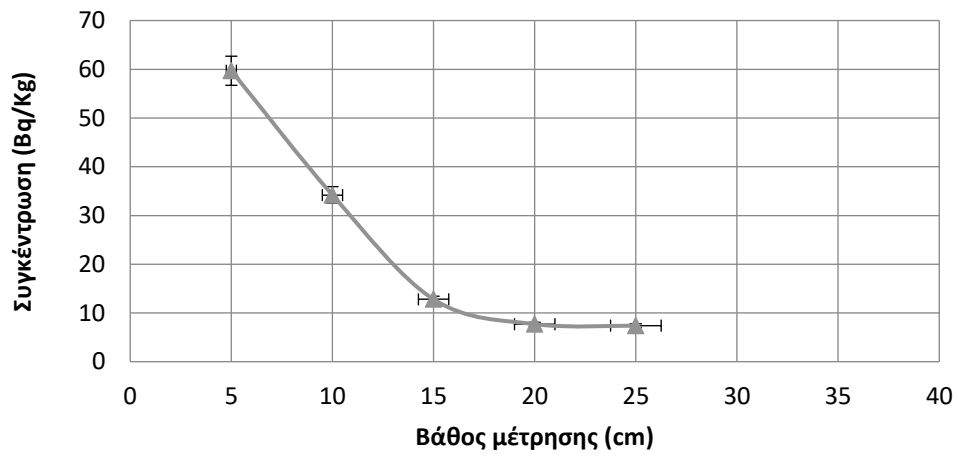
Βάθος (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
Cs-137 (Bq/Kg)	365.9	411.6	133.3	-	-	-	-
K-40 (Bq/Kg)	348	440	522	-	-	-	-
Pb-214 (Bq/Kg)	30	32	37	-	-	-	-
Ra-226 (Bq/Kg)	36.28	39.12	50.96	-	-	-	-
Ac-228 (Bq/Kg)	27	35	40	-	-	-	-


Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να γίνει γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Οι παρακάτω γραφικές παρουσιάζουν την κατά βάθος κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος για κάθε σημείο δειγματοληψίας. Παρατηρούμε ότι κατά τη μέτρηση στο σημείο A και το σημείο D στο αγρόκτημα η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  παρουσιάζει μέγιστο στο βάθος των 5-10 cm. Αυτό συμβαίνει και στην περίπτωση της Νάουσας όπου το μέγιστο στο βάθος 5-10 cm παρουσιάζεται πολύ πιο έντονο λόγω υψηλότερων συγκεντρώσεων  $^{137}\text{Cs}$  στην περιοχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του βάθους που φαίνονται στον άξονα των X αφορούν το μέγιστο όριο της κάθε δειγματοληψίας (πχ το σημείο 10 αφορά το βάθος των 5-10 cm). Σε όλες τις γραφικές έχουν χρησιμοποιηθεί error bars για να εισάγουν τα σφάλματα της κάθε μέτρησης. Η τιμή των σφαλμάτων αυτών είναι στο (+-) 5% και οφείλονται σε ατέλειες των οργάνων μέτρησης, στον ανθρώπινο παράγοντα, ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων καθώς και στα σφάλματα του ανιχνευτή όπου γίνονται οι μετρήσεις.



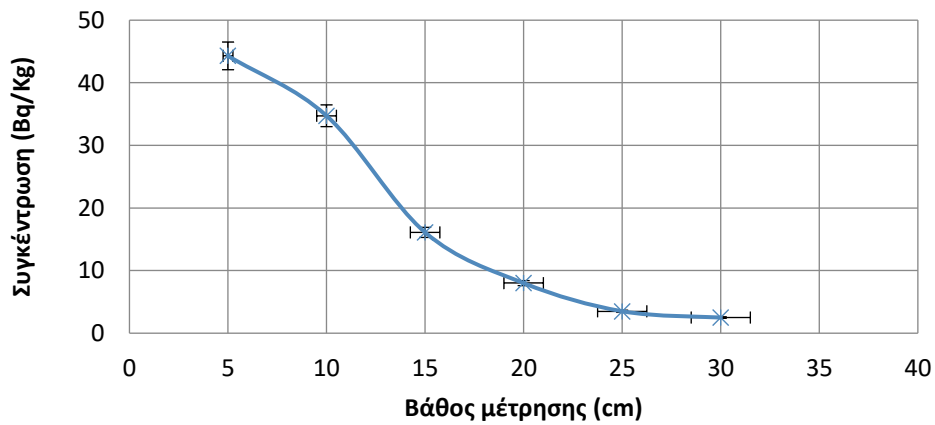
*Εικόνα 3.1 Κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  ανά βάθος για τη μέτρηση στο αγρόκτημα στο σημείο A*


## Μέτρηση στο σημείο Β Νωπό δείγμα



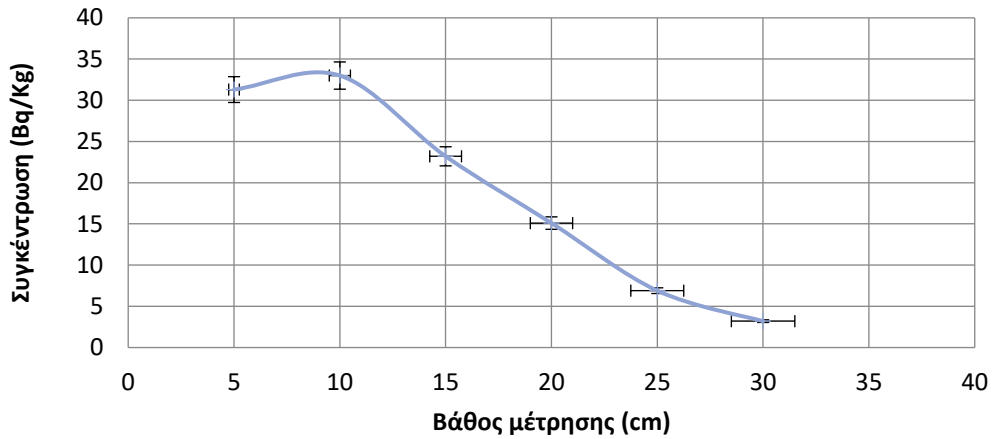
Εικόνα 3.2 Κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  ανά βάθος για τη μέτρηση στο αγρόκτημα στο σημείο Β  wet2

## Μέτρηση στο σημείο C Νωπό δείγμα



Εικόνα 3.3 Κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  ανά βάθος για τη μέτρηση στο αγρόκτημα στο σημείο C  wet3

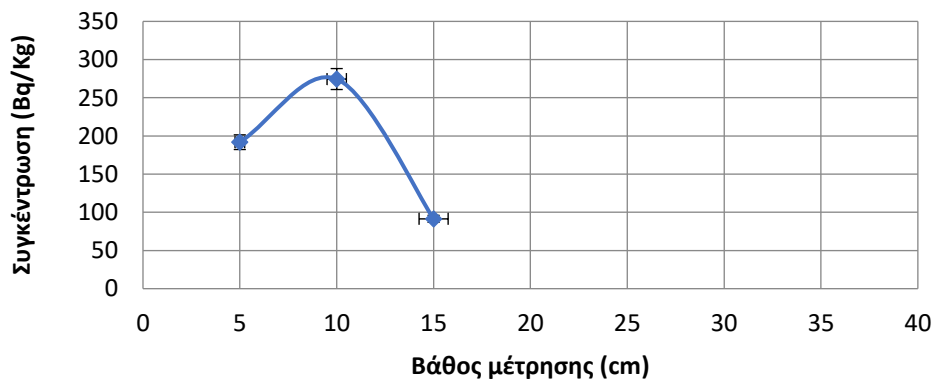
### Μέτρηση στο σημείο D Νωπό δείγμα



Εικόνα 3.4 Κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  ανά βάθος για τη μέτρηση στο αγρόκτημα στο σημείο D

wet4

### Μέτρηση στη Νάουσα Νωπό δείγμα



Εικόνα 3.5 Κατανομή  $^{137}\text{Cs}$  ανά βάθος για τη μέτρηση στη Νάουσα

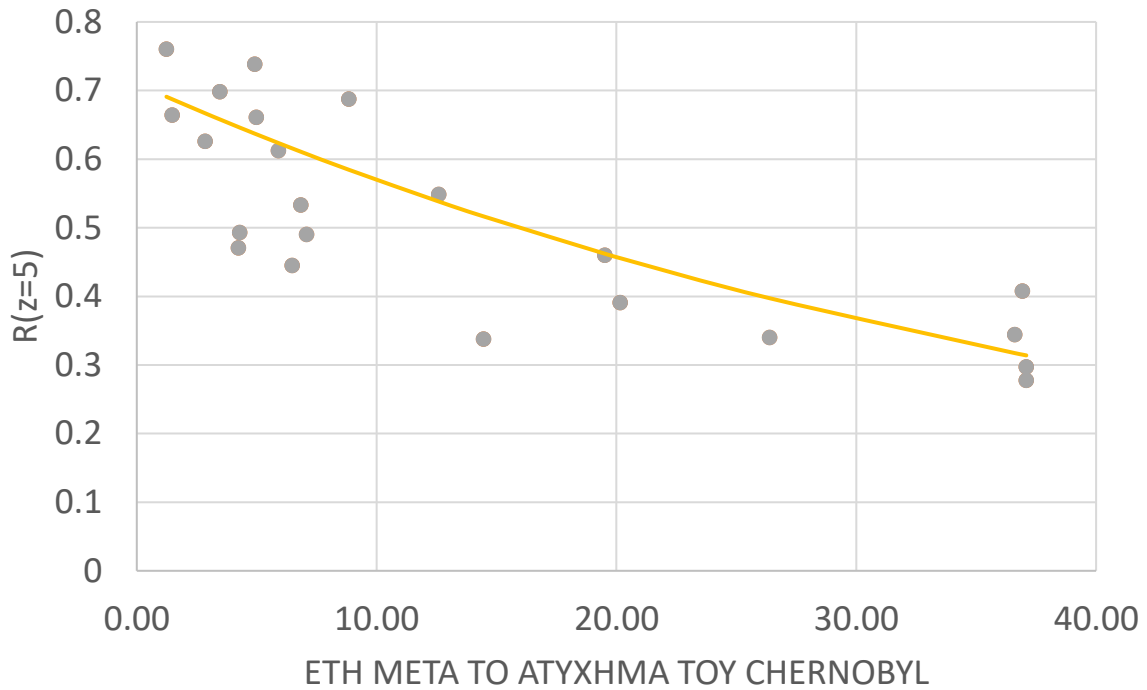
wet\_naoussa

Για τη μελέτη της μέσης κατακόρυφης ταχύτητας διείσδυσης υποθέτουμε τα εξής: Έστω  $z$  το βάθος και  $T(z)$  η ενεργότητα ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα βάθους τότε ο λόγος της συνεισφοράς ενός στρώματος εδάφους (συνεισφορά στη συνολική ενεργότητα) ως προς τη συνολική ενεργότητα, που αποτελεί το άθροισμα όλων των στρωμάτων, ισούται με:

$$R = \frac{\int_{z=5}^z T(z) dz}{\int_0^{30} T(z) dz} \quad (3.1)$$

Ο λόγος των συγκεντρώσεων του  $^{137}\text{Cs}$  και του  $^{134}\text{Cs}$  (από το Μάιο του 1986), όταν το τελευταίο ήταν μετρήσιμο βρέθηκε να είναι 2 σε όλα τα στρώματα<sup>[6]</sup>. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ίδιος λόγος καταγράφηκε στα φίλτρα αέρα αμέσως μετά την άφιξη στην Ελλάδα των ραδιενεργών νεφών και ότι το  $^{134}\text{Cs}$  στο έδαφος οφείλεται μόνο στο ατύχημα του Τσερνομπίλ, μπορούμε να υποθέσουμε ότι πρακτικά όλο το  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος οφείλεται στο ατύχημα του Τσερνομπίλ, δηλαδή η εναπόθεση από δοκιμές πυρηνικών όπλων είναι αμελητέα. Η υπόθεση αυτή υποστηρίζεται επίσης από το γεγονός ότι τα πρώτα χρόνια μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ, όταν το  $^{134}\text{Cs}$  ήταν μετρήσιμο, οι κατανομές συνεισφοράς  $R(z)$  του  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$  ήταν ταυτόσημες<sup>[11]</sup>.

Η μακροχρόνια μελέτη εξέλιξης της κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος επιτρέπει τη μελέτη του χρόνου εξάρτησης των συνεισφορών  $R(z=5)$ ,  $R(z=10)$ ,  $R(z=15)$ ,  $R(z=20)$ ,  $R(z=25)$  και  $R(z=30)$ . Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της συνεισφοράς  $R(z=5)$ . Παρά τη διασπορά των τιμών, μπορεί κανείς να παρατηρήσει σαφώς μια μικρή μείωση με την πάροδο των ετών της κλασματικής συνεισφοράς του στρώματος 0-5 cm.



*Εικόνα 3.6 Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 0-5cm σε συνάρτηση με τον χρόνο*

Από τη μείωση των τιμών  $R(z=5)$  με την πάροδο του χρόνου μπορούμε να κάνουμε μια πρόχειρη εκτίμηση της μέσης ταχύτητας κατακόρυφης διείδυσης με τη χρήση ενός απλού μοντέλου διαμερισμάτων. Στο μοντέλο διαμερισμάτων, τα στρώματα του εδάφους αντιπροσωπεύονται από διαμερίσματα. Στο απλό μοντέλο της παρούσας μελέτης εξετάζονται μόνο τα τέσσερα πρώτα στρώματα. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του  $^{137}\text{Cs}$  μέσω των διαμερισμάτων είναι οι εξής:

$$\frac{dR_5}{dt} = -kR_5 \quad (3.2)$$

$$\frac{dR_{10}}{dt} = kR_5 - kR_{10} \quad (3.3)$$

$$\frac{dR_{15}}{dt} = kR_{10} - kR_{15} \quad (3.4)$$

$$\frac{dR_{20}}{dt} = kR_{15} - kR_{20} \quad (3.5)$$

$$\frac{dR_{25}}{dt} = kR_{20} - kR_{25} \quad (3.6)$$

$$\frac{dR_{30}}{dt} = kR_{25} - kR_{30} \quad (3.7)$$



$R_5$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{15}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_{25}$  και  $R_{30}$  είναι οι συνεισφορές  $R(z=5)$ ,  $R(z=10)$ ,  $R(z=15)$ ,  $R(z=20)$ ,  $R(z=25)$  και  $R(z=30)$  αντίστοιχα,  $k$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς  $^{137}\text{Cs}$  μεταξύ των διαμερισμάτων. Το έτος του ατυχήματος του Τσερνομπίλ (1986), δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t=0$ , οι αρχικές (οριακές) συνθήκες ήταν  $R_5(t=0)=0,71$ ,  $R_{10}(t=0)=0,1$ ,  $R_{15}(t=0)=0,05$ ,  $R_{20}(t=0)=0,04$ ,  $R_{25}(t=0)=0,03$  και  $R_{30}(t=0)=0,02$ . Αυτές οι τιμές προέκυψαν από τις πρώτες μετρήσεις συγκεντρώσεων  $^{137}\text{Cs}$  που πραγματοποιήθηκαν στο αγρόκτημα το 1986. Στην περίπτωση άμεσης απόθεσης του ραδιενεργού νέφους στο έδαφος από έντονες βροχοπτώσεις, όπως συνέβη στην Ελλάδα τότε, τα ραδιονουκλίδια διηθούνται με το νερό της βροχής και η κατακόρυφη διείδυση μπορεί να είναι πολύ γρήγορη κατά το πρώιμο στάδιο.[11] Αυτός είναι ο λόγος που μόλις ένα χρόνο μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ το  $^{137}\text{Cs}$  μπορούσε να βρεθεί σε ποσότητες ακόμη και σε βάθος 30 cm. Οι λύσεις των διαφορικών εξισώσεων είναι:

$$R_5(t) = R_5(t=0)e^{-kt} \quad (3.8)$$

$$R_{10}(t) = [kR_5(t=0)t + R_{10}(t=0)]e^{-kt} \quad (3.9)$$

$$R_{15}(t) = \left[ \frac{k^2 R_5(t=0)t^2}{2} + kR_{10}(t=0)t + R_{15}(t=0) \right] e^{-kt} \quad (3.10)$$

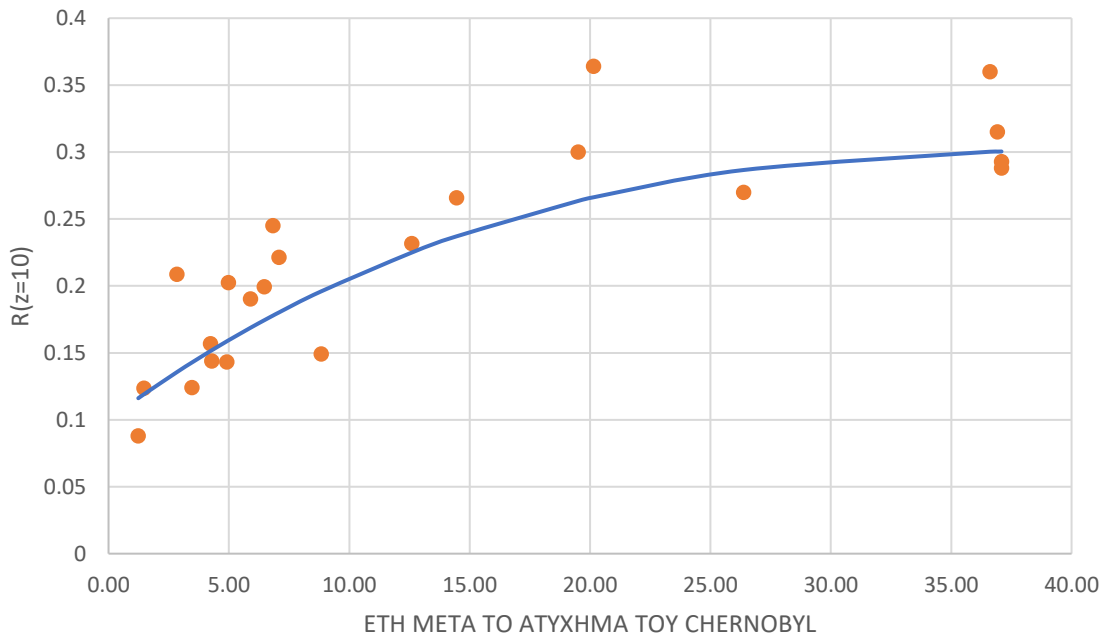
$$R_{20}(t) = \left[ \frac{k^3 R_5(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{10}(t=0)t^2}{2} + kR_{15}(t=0)t + R_{20}(t=0) \right] e^{-kt} \quad (3.11)$$

$$R_{25}(t) = \left[ \frac{k^4 R_5(t=0)t^4}{24} + \frac{k^3 R_{10}(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{15}(t=0)t^2}{2} + kR_{20}(t=0)t + R_{25}(t=0) \right] e^{-kt} \quad (3.12)$$

$$R_{30}(t) = \left[ \frac{k^5 R_5(t=0)t^5}{120} + \frac{k^4 R_{10}(t=0)t^4}{24} + \frac{k^3 R_{15}(t=0)t^3}{6} + \frac{k^2 R_{20}(t=0)t^2}{2} + kR_{25}(t=0)t + R_{30}(t=0) \right] e^{-kt} \quad (3.13)$$

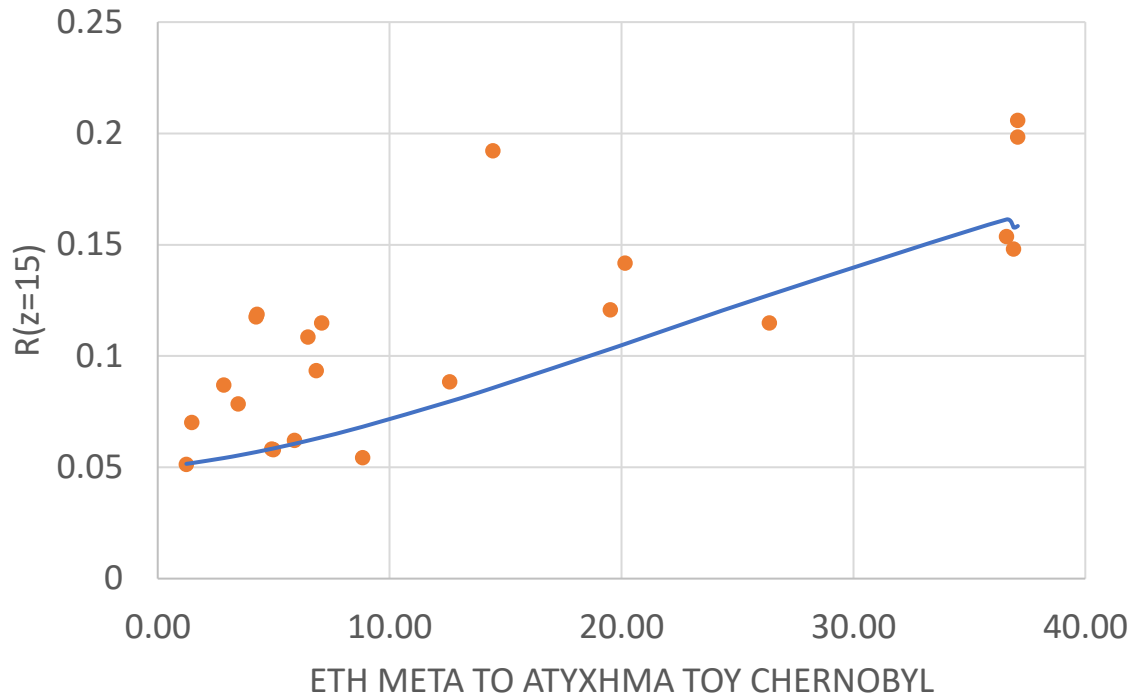
Στις πιο πάνω εξισώσεις η μόνη ελεύθερη (άγνωστη) παράμετρος είναι ο συντελεστής μεταφοράς  $k$ . Από τη μείωση των τιμών του  $R(z=5)$  με την πάροδο του χρόνου μπορούμε να εκτιμήσουμε τη μέση ταχύτητα κατακόρυφης διείδυσης, ως εξής: Από την εκθετική συνάρτηση (3.8) που διέρχεται από τα δεδομένα (εικόνα 3.6) μπορούμε να λύσουμε ως προς τον παράγοντα  $k$  και να βρούμε  $k=0,022 \text{ y}^{-1}$ , τον μέσο χρόνο παραμονής του  $^{137}\text{Cs}$  στο στρώμα 0-5 cm ( $t=45,45 \text{ y}$ ), και από αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση ταχύτητα κατακόρυφης διείδυσης ( $v = 0,11 \text{ cm y}^{-1}$ ) όπως προκύπτει από τον τύπο (3.14). Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του λόγου  $R(z=10)$ . Όπως αναμενόταν, παρατηρείται αύξηση του  $R_{10}$  με το χρόνο. Το ενδιαφέρον σημείο είναι ότι η μπλε γραμμή δεν αποτελεί προσαρμογή στις πειραματικές τιμές αλλά αντιστοιχεί στις προβλέψεις του μοντέλου (3.9). Η σχετικά καλή σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων τιμών  $R_{10}(t)$  υποδεικνύει ότι το μοντέλο απλών διαμερισμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι ρεαλιστικό.

$$(v = \frac{5 \text{ cm}}{45,45 \text{ y}} = 0,11 \text{ cm y}^{-1}) \quad (3.14)$$

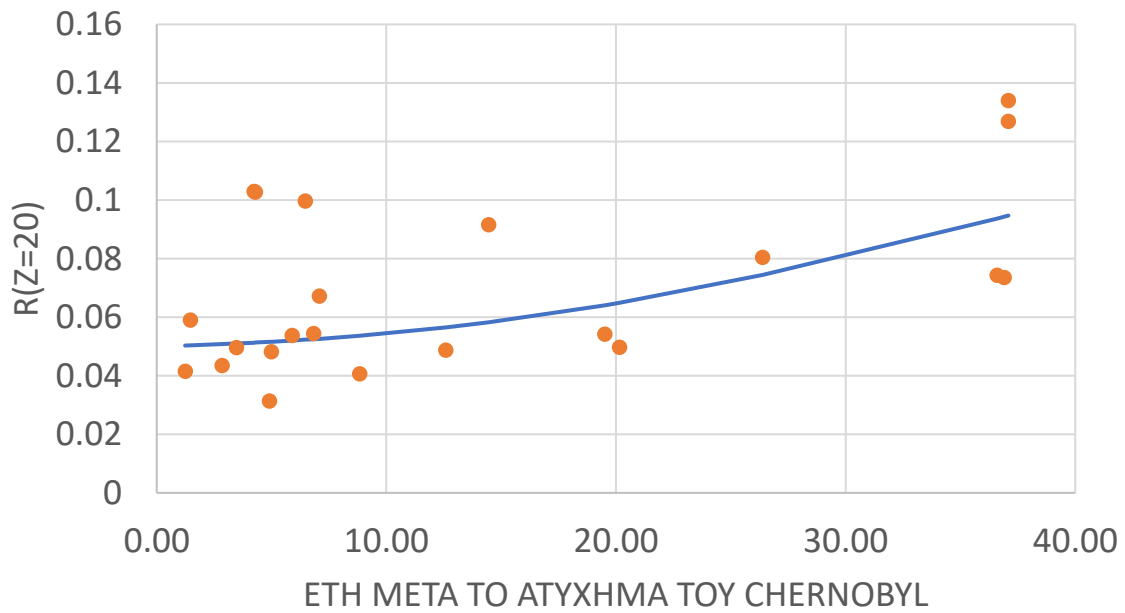


**Εικόνα 3.7** Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 5-10cm σε συνάρτηση με τον χρόνο

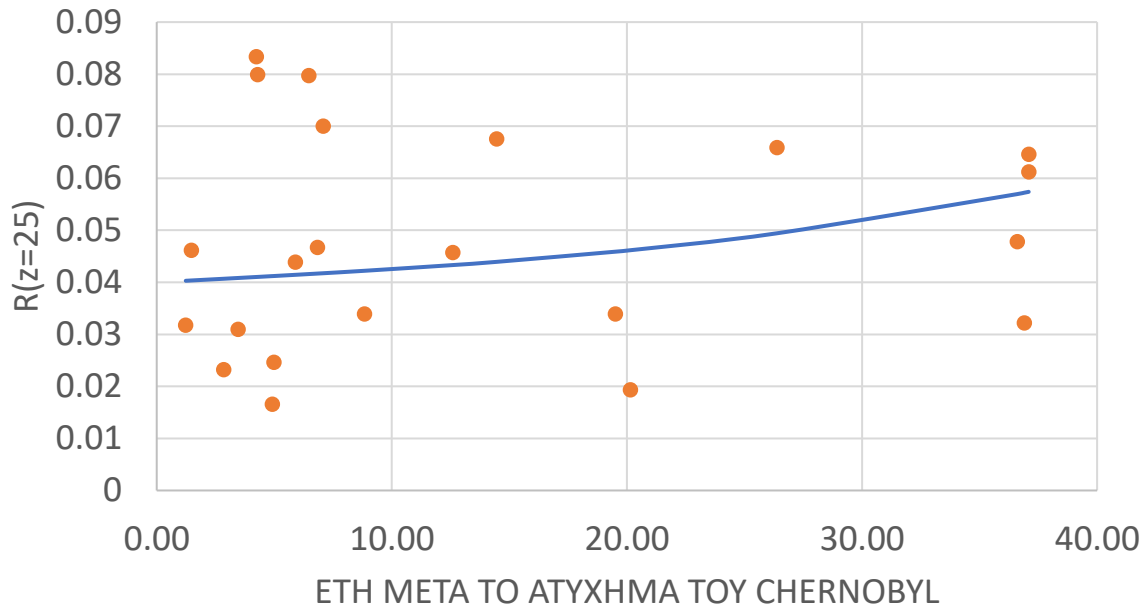
Τέλος στις εικόνες 3.8 , 3.9 , 3.10 και 3.11 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του λόγου  $R(z=15)$ ,  $R(z=20)$  ,  $R(z=25)$  και  $R(z=30)$  αντίστοιχα. Και στις τέσσερις περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση των  $R(z=15)$  ,  $R(z=20)$  ,  $R(z=25)$  και  $R(z=30)$  αντίστοιχα με την μεγαλύτερη να παρατηρείται στο σημείο 10-15cm μεταξύ των τριών. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση για  $R(z=10)$  η μπλε γραμμή δεν αποτελεί προσαρμογή στις πειραματικές τιμές αλλά αντιστοιχεί στις προβλέψεις του μοντέλου με σχετικά καλή σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών.



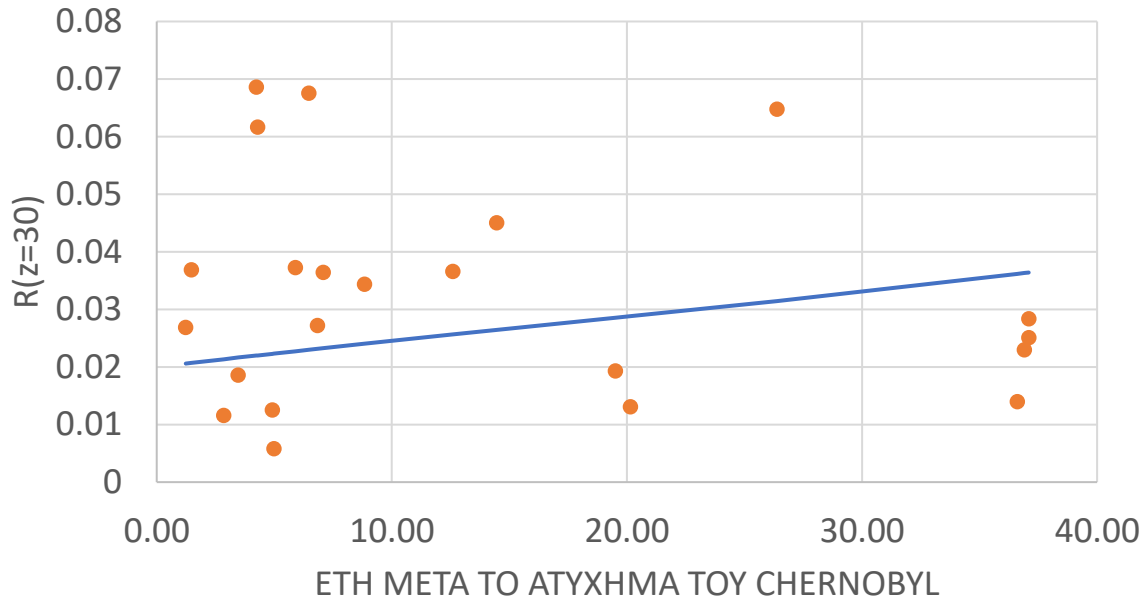
*Εικόνα 3.8 Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 10-15cm σε συνάρτηση με τον χρόνο*



*Εικόνα 3.9 Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 15-20cm σε συνάρτηση με τον χρόνο*

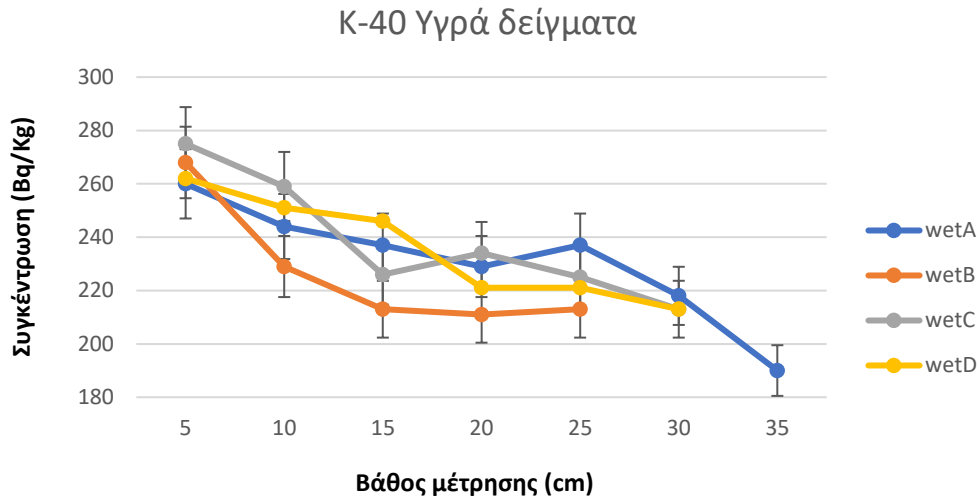


*Εικόνα 3.10 Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 20-25cm σε συνάρτηση με τον χρόνο*



*Εικόνα 3.11 Μέση κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  για το στρώμα 25-30cm σε συνάρτηση με τον χρόνο*

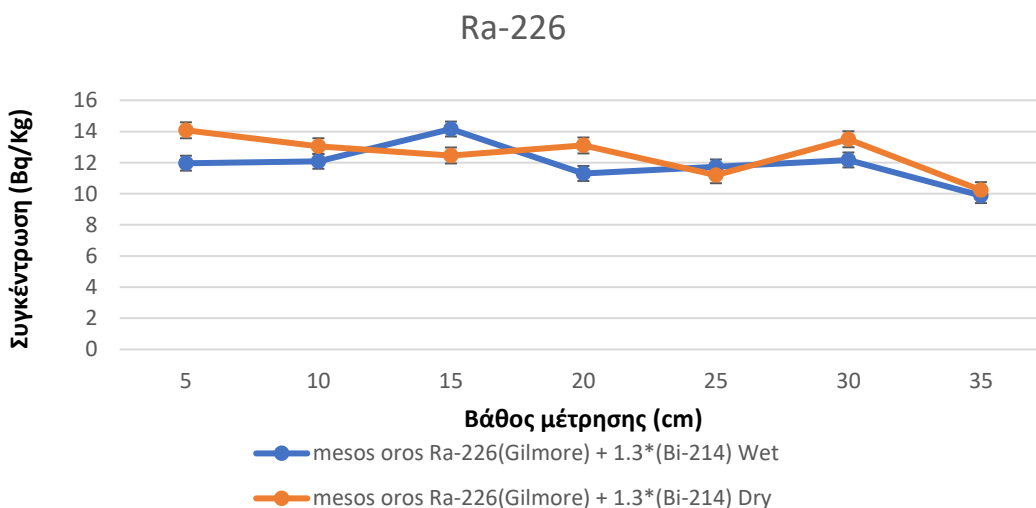
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο είδαμε ότι και οι συγκεντρώσεις του  $^{40}\text{K}$  παρουσιάζουν ενδιαφέρον για αυτό κρίθηκε σκόπιμο να παρασταθούν γραφικά.



Εικόνα 3.12 Μέση κατανομή του  $^{40}\text{K}$  στο έδαφος ανά βάθος

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του Καλίου-40 βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνονται όσο αυξάνεται το βάθος, ακολουθώντας μια διαφανόμενη εκθετική μείωση. Ωστόσο είναι προφανές από το σχήμα ότι απαιτείται περαιτέρω σειρά μετρήσεων ώστε να επιβεβαιωθεί αυτή η εκθετική μείωση.

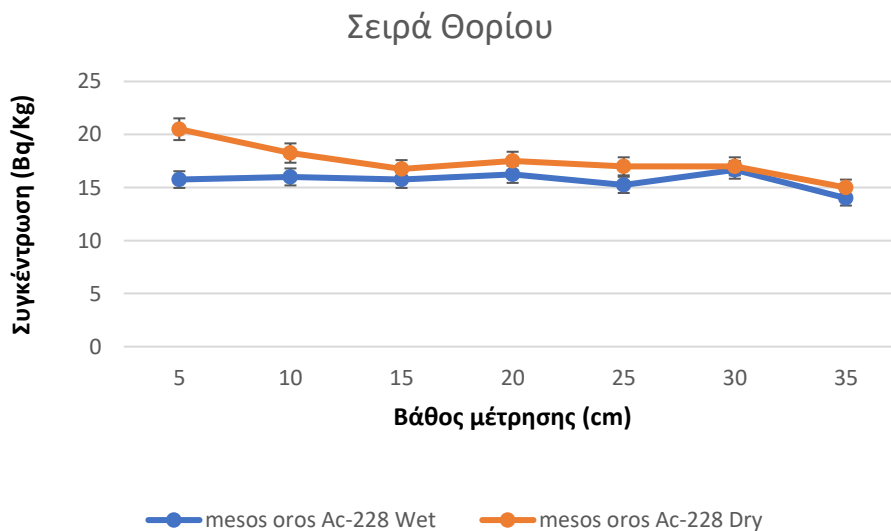
Ακολουθώς γραφικές παραστάσεις έγιναν για να παρουσιαστούν και οι συγκεντρώσεις στο έδαφος όσο αφορά το  $^{226}\text{Ra}$  και τη σειρά Θορίου.



Εικόνα 3.14 Μέση κατανομή του  $^{226}\text{Ra}$  στο έδαφος ανά βάθος

Όσον αφορά το  $^{226}\text{Ra}$  τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από επεξεργασία. Συγκεκριμένα αρχικά αφού βρέθηκαν οι συγκεντρώσεις του  $^{214}\text{Bi}$  πολλαπλασιάστηκαν επί ένα σταθερό συντελεστή 1.3. Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της μέτρησης το  $^{226}\text{Ra}$  δεν βρίσκεται σε ραδιενεργό ισορροπία με τα θυγατρικά του  $^{214}\text{Bi}$  λόγω της διαφυγής του ραδονίου(αέριο) από το δείγμα. Μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από το εργαστήριο προέκυψε ο συντελεστής 1.3 με τον οποίο εάν πολλαπλασιαστεί η ενεργότητα του  $^{214}\text{Bi}$  προκύπτει η ενεργότητα του  $^{226}\text{Ra}$ . Αρχικά υπολογίστηκε η ενεργότητα του  $^{226}\text{Ra}$  θεωρώντας ότι όλοι οι κτύποι στην ενέργεια 186keV οφείλονταν στο  $^{226}\text{Ra}$ . Στην πραγματικότητα όμως οι συνολικοί κτύποι στην ενέργεια 186keV οφείλονται και στους κτύπους που προέρχονται από το  $^{226}\text{Ra}$  αλλά και σε κτύπους που προέρχονται από το  $^{235}\text{U}$ . Σύμφωνα με τον Gilmore οι κτύποι που προέρχονται από το  $^{226}\text{Ra}$  αποτελούν 57.1% των συνολικών στην 186keV. Επομένως η ενεργότητα που υπολογίστηκε από το σύνολο των κτύπων πολλαπλασιάστηκε επί 0.571 για να μας δώσει την πραγματική ενεργότητα του  $^{226}\text{Ra}$ . Από τις 2 μεθόδους υπολογισμού του  $^{226}\text{Ra}$  προέκυψε ο μέσος όρος.

Από τη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις όσον αφορά το  $^{226}\text{Ra}$  σε νωπά και αφυδατωμένα δείγματα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις με την αύξηση του βάθους. Ωστόσο είναι προφανές από το σχήμα ότι απαιτείται περαιτέρω σειρά μετρήσεων ώστε να επιβεβαιωθεί αυτό το συμπέρασμα.



**Εικόνα 3.13** Μέση κατανομή του  $^{228}\text{Ac}$  στο έδαφος ανά βάθος

Παράλληλα όσον αφορά τη σειρά του Θορίου η μελέτη βασίστηκε στη συγκέντρωση του Ac-228. Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του Ac-228 στην περίπτωση των αφυδατωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη από των νωπών. Αυτό εξηγείται διότι μετά την αφυδάτωση το νερό που υπήρχε στο δείγμα εξατμίζεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η καθαρή μάζα και έτσι να αυξάνεται το ποσοστό της συγκέντρωσης Ac-228 στο δείγμα. Όσον αφορά την κατανομή που ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν εξάγεται κάποιο συμπέρασμα στην παρούσα εργασία και απαιτείται περαιτέρω μελέτη σε μελλοντική εργασία.

Επιπλέον βάσει των αποτελεσμάτων των μετρήσεων υπολογίστηκε η εναπόθεση του Καισίου-137 ανά μονάδα επιφάνειας ( Bq/m<sup>2</sup>) για την περίοδο άφιξης του το 1986.

Αρχικά υπολογίστηκε η συνολική ενεργότητα του Καισίου-137 αθροίζοντας τις συγκεντρώσεις του για όλα τα στρώματα μέτρησης η οποία βρέθηκε στα 136 Bq/Kg. Πολλαπλασιάζοντας τη συνολική ενεργότητα με την πυκνότητα του χώματος και το βάθος του κάθε στρώματος υπολογίστηκε η ανά μονάδα επιφάνειας ενεργότητα στην περίπτωση που το Καισίο-137 έφτανε την παρούσα περίοδο στην Ελλάδα ( $\alpha[t=36.6y]$ ) όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha[t=36.6y] = 136 \frac{Bq}{Kg} * 1300 \frac{Kg}{m^3} * 0.05m = 8840 \frac{Bq}{m^2} \quad (3.15)$$

Στη συνέχεια έγινε αναγωγή της πιο πάνω τιμής στην περίοδο έλευσης του Καισίου στην Ελλάδα το 1986 μέσω της σχέσης:

$$\alpha_0 = \alpha[t = 36.6y] * e^{0.693 * \frac{36.6}{30}} = 20588.8 \frac{Bq}{m^2} \quad (3.16)$$

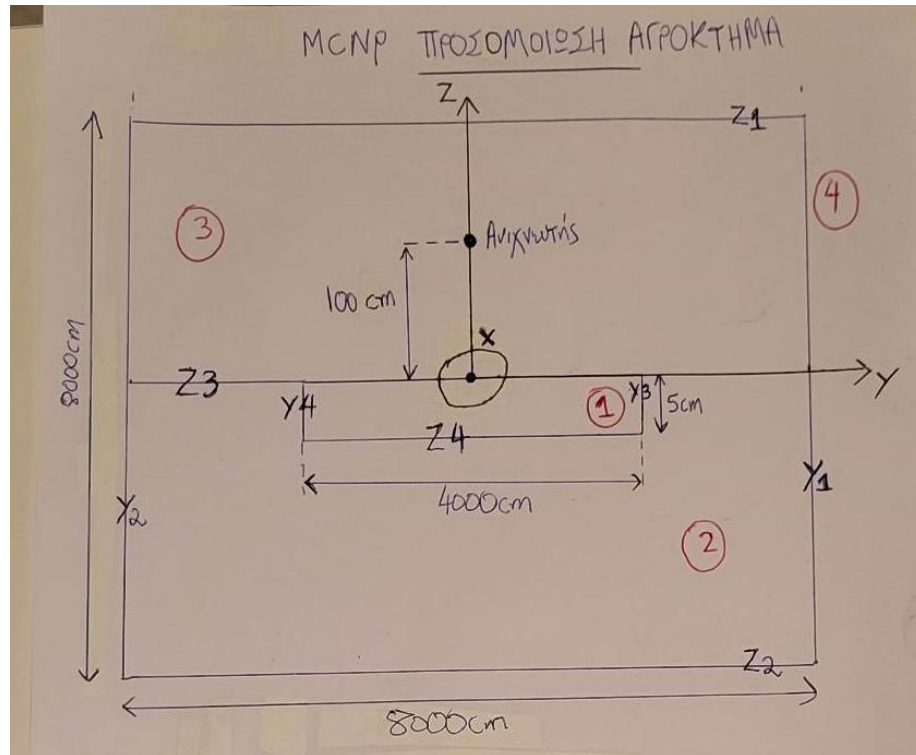
Παρατηρούμε ότι η τιμή για την εναπόθεση Καισίου-137 που υπολογίστηκε πιο πάνω συμφωνεί με την τιμή που υπολογίστηκε στα πλαίσια προηγούμενης εργασίας που πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο πυρηνικής τεχνολογίας η οποία είχε βρεθεί στα 20kBq/m<sup>2</sup><sub>[23]</sub>.

## Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση MCNP

### Περιγραφή της πηγής

Για την προσομοίωση του εδάφους χωρίσαμε το παραλληλεπίπεδο ως το βάθος των 30 cm σε στρώματα των 5 cm. Δηλαδή σε στρώματα παρόμοια με αυτά που δημιουργήσαμε κατά τη δειγματοληψία του εδάφους, όπως αυτή περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τοποθετήθηκε σημειακός ανιχνευτής στο 1m πάνω από το έδαφος. Κατά την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι σε κάθε ξεχωριστό στρώμα χώματος υπήρχε μια ομοιογενής πηγή είτε κασίου είτε καλίου. Η ενέργεια της πηγής προέκυπτε κάθε φορά από το νουκλίδιο του οποίου τη ροή θέλαμε να προσομοιάσουμε. Ομοίως η κατανομή της πιθανότητας να εκπεμφθεί φωτόνιο από κάθε στρώμα ακολουθούσε τα δεδομένα της προσομοίωσης. Αν παραδείγματος χάριν θέλαμε να προσομοιάσουμε την πραγματική ροή του  $^{137}\text{Cs}$  τότε η κατανομή της πιθανότητας ήταν ανάλογη της κατανομής της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος, όπως αυτή μετρήθηκε πειραματικά και παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση που προσομοιώνουμε την εκπομπή για κάποιο φυσικό ραδιονουκλίδιο τότε αυτή η πιθανότητα παρέμενε σταθερή για όλα τα στρώματα του κυλίνδρου με τον οποίο προσομοιώνουμε το έδαφος, καθώς η συγκέντρωση των φυσικών ραδιονουκλιδίων παραμένει σταθερή στο έδαφος. Σε κάθε προσομοίωση τοποθετούσαμε πηγή μόνο μιας ενέργειας έτσι ώστε κάθε φορά να προκύπτει η κορυφή μόνο ενός ραδιονουκλιδίου. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε αφορούσαν το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{40}\text{K}$  και αναφέρονταν σε διάφορες κατανομές τους στο έδαφος.





Εικόνα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση προσομοίωσης MCNP

### Υπολογισμός ρυθμού ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ μέσω προσομοίωσης με κώδικα MCNP

Μέσω της προσομοίωσης με κώδικα MCNP υπολογίστηκε ο ρυθμός περιβαλλοντικής ισοδύναμης δόσης  $H^*(10)$  από τη συνολική ροή φωτονίων. Ο όρος συνολική αναφέρεται στην ροή των φωτονίων που περιλαμβάνει και τα φωτόνια που φτάνουν «παρθένα» αλλά και αυτά που έχουν αλληλεπιδράσει με κάποιο υλικό (εν προκειμένου τα διάφορα στρώματα του εδάφους) και έχουν χάσει ενέργεια. Ο κώδικας MCNP παρέχει ως αποτέλεσμα το πλήθος των φωτονίων που φτάνουν στον ανιχνευτή ανά φωτόνιο συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπεται από την πηγή (στρώμα χώματος). Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να οριστεί και ως απόδοση. Γνωρίζοντας την ενεργότητα (Bq/Kg) κάθε ραδιονουκλιδίου ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) σε κάθε στρώμα η οποία υπολογίστηκε μέσω της  $\gamma$  φασματοσκοπίας και πολλαπλασιάζοντας με τον αριθμό των κιλών χώματος που αντιστοιχούν σε κάθε στρώμα και με την πιθανότητα εκπομπής του εκάστοτε φωτονίου ανά διάσπαση (FY) υπολογίζονται τα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο που εκπέμπονται από την πηγή (στρώμα χώματος).

$$\frac{\text{Φωτόνια}}{s} (\text{που φεύγουν από κάθε στρώμα χώματος}) = \text{ενεργότητα} \left( \frac{\text{Bq}}{\text{Kg}} \right) * \text{κιλά στον όγκο στρώματος χώματος} * \text{FY} \quad (4.1)$$

Γνωρίζοντας την απόδοση που υπολογίστηκε μέσω MCNP υπολογίσαμε τη ροή των φωτονίων στο 1m πάνω από το έδαφος που φτάνουν στον ανιχνευτή από κάθε στρώμα και για κάθε συγκεκριμένη ενέργεια μέσω της σχέσης:

$$\frac{\text{φωτόνια}}{\text{cm}^2\text{s}} = \text{Απόδοση} * \frac{\text{φωτόνια}}{\text{s}} \text{ (που φεύγουν από κάθε στρώμα χώματος)} \text{ (4.2)}$$

Ακολούθως υπολογίστηκε ο ρυθμός Air kerma μέσω της σχέσης 4.3:

$$\text{Ρυθμός Air Kerma} = (\text{Ροή παρθένων φωτονίων σε απόσταση r από την πηγή}) * \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{αέρα}} *$$

$$E_{\text{φωτονίων}} = \frac{\text{φωτόνια}}{\text{sec} * \text{cm}^2} * \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} * \text{keV} = \frac{\text{keV}}{\text{g} * \text{sec}} \implies 5.76 * 10^{-10} \frac{\text{J}}{\text{Kg}} = \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \text{ (4.3)}$$

Τέλος, υπολογίστηκε ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης H\*(10) της συνολικής ροής φωτονίων μέσω κατάλληλων συντελεστών μετατροπής του air kerma σε H\*(10) οι οποίοι βρέθηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των ενεργειών του κάθε νουκλιδίου και των σταθερών συντελεστών H\*(10)/Kerma (Sv/Gy)<sub>[20]</sub>

<b>ΡΥΘΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΔΟΣΗΣ H*(10) ΑΠΟ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΡΟΗ ΓΙΑ <sup>137</sup>Cs</b>	
<b>Βάθος στο έδαφος (cm)</b>	<b>Σύνολο (nSv/h)</b>
0-5	3.579184
5-10	0.86243
10-15	0.177834
15-20	0.047217
20-25	0.014051
25-30	0.003038
Total	4.683754

<b>ΡΥΘΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΔΟΣΗΣ H*(10) ΑΠΟ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΡΟΗ ΓΙΑ <sup>40</sup>K</b>	
<b>Βάθος στο έδαφος (cm)</b>	<b>Σύνολο (nSv/h)</b>
0-5	5.971748172
5-10	2.068855631
10-15	0.996921672
15-20	0.547067173
20-25	0.32560323
25-30	0.191242963
Total	10.101439

Στο ρυθμό ισοδύναμης δόσης συνεισφέρουν και ισότοπα από τις σειρές ουρανίου και θορίου. Αρχικά από τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε λάβαμε ως μέσο όρο συγκέντρωσης τα 13Bq/Kg για το  $^{226}\text{Ra}$  και τα 16 Bq/Kg για τη σειρά θορίου θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή τους στο έδαφος. Στη συνέχεια αυτές οι τιμές πολλαπλασιάστηκαν με τους συντελεστές που αναφέρει σε έρευνά του ο Lemercier<sup>[21]</sup> για μετατροπή της ενεργότητας σε ρυθμό ισοδύναμης δόσης. Από τις πράξεις προκύπτουν τα εξής:

$$\text{Ρυθμός ισοδύναμης δόσης που οφείλεται στο } ^{226}\text{Ra} = 13 * 0.564 = 7.332 \text{ nSv/h (4.4)}$$

$$\text{Ρυθμός ισοδύναμης δόσης που οφείλεται στη σειρά θορίου} = 16 * 0.749 = 11.984 \text{ nSv/h (4.5)}$$

Προσθέτοντας το άθροισμα του ρυθμού ισοδύναμης δόσης του  $^{226}\text{Ra}$  και της σειράς θορίου που προέκυψαν από τον Lemercier με το άθροισμα του ρυθμού ισοδύναμης δόσης που προέκυψε μέσω της προσομοίωσης με κώδικα MCNP προέκυψε ο συνολικός ρυθμός ισοδύναμης δόσης στο 1m πάνω από το έδαφος ίσος με 34.1 nSv/h.

Κατά τις περιόδους των μετρήσεων στο αγρόκτημα έγιναν μετρήσεις με τον RIIDEYE MG-3 ο οποίος έδειξε ρυθμό ισοδύναμης δόσης 40-45 nSv/h. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με μελέτη που έγινε από το εργαστήριο πυρηνικής τεχνολογίας<sup>[22]</sup> ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δίνει τιμές κατά 16% μεγαλύτερες από τις πραγματικές. Εάν λάβουμε υπόψη αυτή την υπερεκτίμηση έχουμε:

$$40/1.16 = 34.82 \text{ nSv/h (4.6)} \quad 45/1.16 = 38.79 \text{ nSv/h (4.7)}$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε συνδυασμό με τους υπολογισμούς του Lemercier είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές που μετρήθηκαν με τον RIIDEYE MG-3, αν συνυπολογίσουμε την υπερεκτίμηση του ανιχνευτή, κάτι που δείχνει την εγκυρότητα των προσομοιώσεων μέσω MCNP και των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν μέσω των συντελεστών του Lemercier.

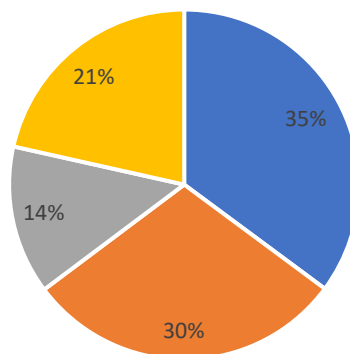
Επιλέον κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του MCNP με τους υπολογισμούς του Lemercier όσον αφορά το  $^{40}\text{K}$ . Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε λάβαμε ως μέσο όρο συγκέντρωσης τα 250 Bq/Kg. Πολλαπλασιάζοντας με το συντελεστή 0.0512 για μετατροπή σε ρυθμό ισοδύναμης δόσης σύμφωνα με τον Lemercier<sup>[21]</sup> έχουμε:

$$\text{Ρυθμός ισοδύναμης δόσης που οφείλεται στο } ^{40}\text{K} = 250 * 0.0512 = 12.8 \text{ nSv/h (4.8)}$$

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (10.101439 nSv/h) είναι πολύ κοντά στους υπολογισμούς του Lemercier (12.8 nSv/h) κάτι που δείχνει την εγκυρότητα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

## Συνεισφορά στο ρυθμό ισοδύναμης δόσης

■ Σειρά θορίου ■ K-40 ■ Cs-137 ■ Σειρά ουρανίου



*Εικόνα 4.2* Σχηματική αναπαράσταση συνεισφοράς στο ρυθμό ισοδύναμης δόσης

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

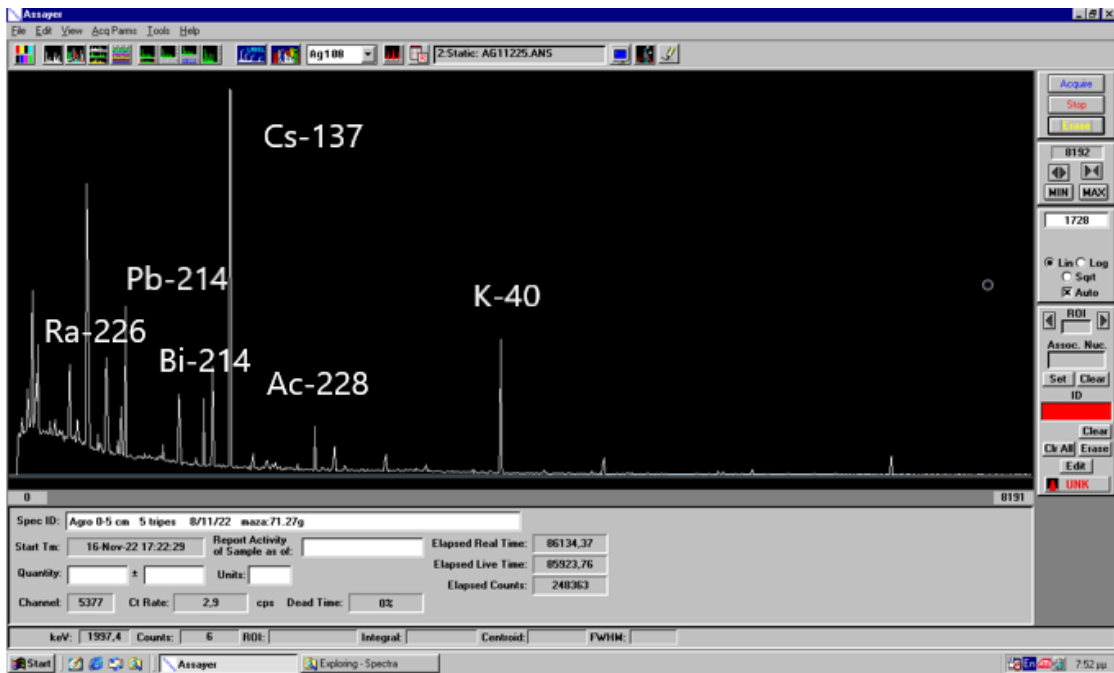
Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της κατανομής κατά βάθος της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$ , αλλά και άλλων φυσικών και τεχνητών ραδιοϊσοτόπων. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μακροχρόνια μελέτη της εξέλιξης της κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος επιτρέπει την εξαγωγή (με τη χρήση ενός απλού μοντέλου διαμερίσματος) της μέσης ταχύτητας κατακόρυφης διείσδυσης του  $^{137}\text{Cs}$ .
- Η κατακόρυφη διείσδυση του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος είναι μια πολύ αργή διαδικασία. Η μέση ταχύτητα κατακόρυφης διείσδυσης εκτιμάται ότι είναι  $0,11 \text{ cm y}^{-1}$ .
- Η σχετικά καλή σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων τιμών λόγου συνεισφοράς του κάθε στρώματος εδάφους στη συνολική συγκέντρωση (π.χ.  $R_{10}$ ) δείχνει ότι το απλό μοντέλο διαμερίσματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ρεαλιστικό.
- Η μοντελοποίηση εξέλιξης της κατανομής του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος έχει αλλάξει με τα χρόνια. Κατά την περίοδο 1987-2000 η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  ήταν αποτέλεσμα του αθροίσματος δύο εκθετικών συναρτήσεων. Ωστόσο, τουλάχιστον από το 2005 η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  μπορεί να προσαρμοστεί επιτυχώς με μία μόνο εκθετική συνάρτηση.
- Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του Καλίου-40 βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνονται όσο αυξάνεται το βάθος, ακολουθώντας μια διαφανόμενη εκθετική μείωση. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω σειρά μετρήσεων ώστε να επιβεβαιωθεί αυτή η εκθετική μείωση.
- Οι συγκεντρώσεις του ραδίου σε νωπά και αφυδατωμένα δείγματα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις με την αύξηση του βάθους. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω σειρά μετρήσεων ώστε να επιβεβαιωθεί αυτό το συμπέρασμα.
- Η συγκέντρωση του Ac-228 σε αφυδατωμένα δείγματα είναι μεγαλύτερη από ότι στα νωπά, κάτι που είναι λογικό αφού με την αφυδάτωση απομακρύνθηκε η υγρασία που δεν περιέχει ραδιοϊσότοπα. Όσον αφορά την κατανομή που ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν εξάγεται κάποιο συμπέρασμα στην παρούσα εργασία και απαιτείται περαιτέρω μελέτη σε μελλοντική εργασία.
- Οι τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε συνδυασμό με τους υπολογισμούς μέσω των συντελεστών του Lemercier είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές που

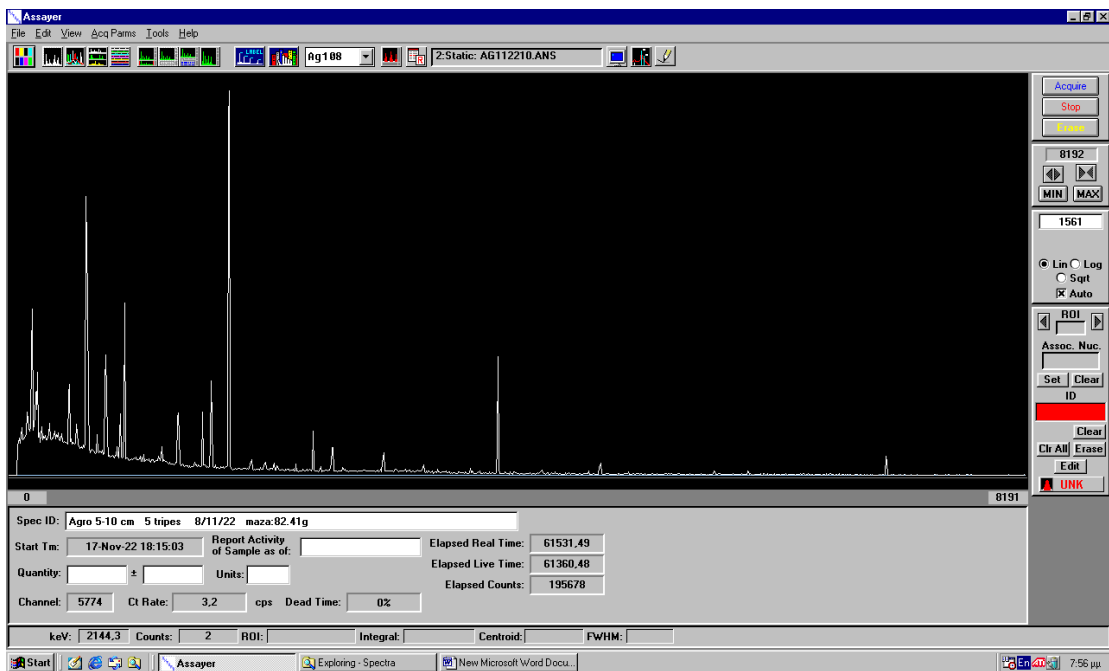
μετρήθηκαν όσον αφορά το ρυθμό ισοδύναμης δόσης κάτι που δείχνει την εγκυρότητα των προσομοιώσεων μέσω MCNP και των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν μέσω των συντελεστών του Lemercier.

- Παρατηρούμε ότι η τιμή για την εναπόθεση Καισίου-137 για την περίοδο άφιξης του το 1986 που υπολογίστηκε πιο πάνω συμφωνεί με την τιμή που υπολογίστηκε στα πλαίσια προηγούμενης εργασίας που πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο πυρηνικής τεχνολογίας η οποία είχε βρεθεί στα 20kBq/m<sup>2</sup><sub>[23]</sub>.

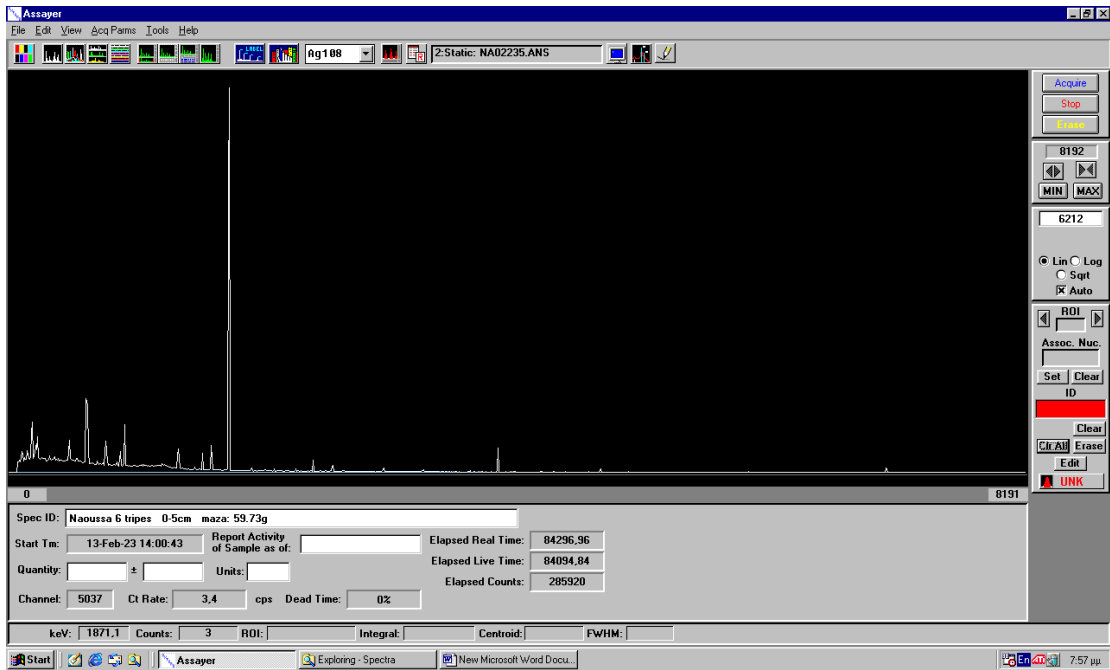
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ενδεικτικά φάσματα μετρήσεων στο εργαστήριο



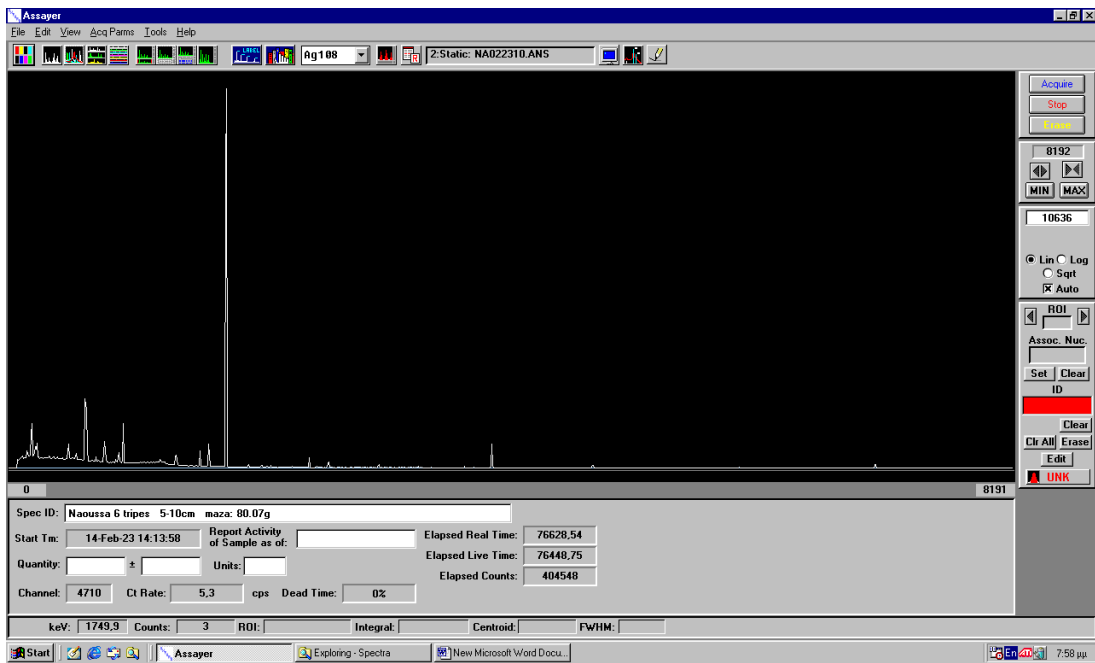
Σχήμα 1 Μέτρηση στο σημείο A 0-5cm υγρό δείγμα



Σχήμα 2 Μέτρηση στο σημείο A 5-10cm υγρό δείγμα



Σχήμα 3 Μέτρηση στη Νάουσα 0-5cm υγρό δείγμα



Σχήμα 4 Μέτρηση στη Νάουσα 5-10cm υγρό δείγμα



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας MCNP που χρησιμοποιήθηκε

662 keV

c

c cell cards

c

```
1 1 -1.3 -3 4 -7 8 -11 12 $ soil source
2 1 -1.3 -3 2 -5 6 -9 10#1 $ soil without source
3 2 -0.001205 -1 2 -5 6 -9 10#1#2 $ air
4 0 1:-2:5:-6:9:-10 $ outside universe
```

c

c surface cards

c

c

c

c \$ normal to axis surfaces

1 pz 4000.

2 pz -4000.

3 pz 0.

4 pz -5.

5 py 4000.

6 py -4000.

7 py 2000.

8 py -2000.

9 px 4000.

10 px -4000.

11 px 2000.

12 px -2000.

c

c data cards

c

mode p

imp:p 1 1 1 0

c

c source specification

c

sdef X=d1 Y=d2 Z=d3 ERG=0.662 PAR=2

SI1 -2000. 2000.

SP1 0 1

SI2 -2000. 2000.

SP2 0 1

SI3 -5. 0.

SP3 0 1

c

c tallies specification

f5:p 0. 0. 100. 1.

e5 0. 69i 0.7

c

c material cards

c

m1 8000 -0.501 \$O

13000 -0.073 \$A1

26000 -0.039 \$Fe  
14000 -0.327 \$Si  
6000 -0.021 \$C  
20000 -0.014 \$Ca  
19000 -0.009 \$K  
12000 -0.005 \$Mg  
7000 -0.001 \$N  
11000 -0.006 \$Na  
22000 -0.004 \$Ti  
m2 6000 -0.000151 \$C  
7000 -0.755268 \$N  
8000 -0.231781 \$O  
18000 -0.012827 \$Ar

c

c problem cut-offs

c

nps 100000000

print

ctme 5000

## **Βιβλιογραφία**

[1] Practical gamma-ray spectrometry – 2nd edition Gordon r. Gilmore © 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7

[2] Encyclopedia of analytical science, 2019 (second edition)

[3]<https://www.mirion.com/learning-center/lab-experiments/high-resolution-gamma-ray-spectroscopy-with-hpge-detectors-lab-experiments>

[4]<https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-high-purity-germanium-detector-hpge-definition/>

[5]<https://www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectortechnologiesisotopeidentification.pdf?la=en>

[6] Antonopoulos-Domis, M., Clouvas, A., Hiladakis, A. and Kadi, S. radiocesium distribution in undisturbed soil: measurements and diffusion-advection model. Health Phys. 69, 949–953 (1995).

[7] Συγκεντρώσεις  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{235}\text{U}$  σε δείγματα χώματος από την Αλγερία :  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{235}\text{U}$  concentrations in Algerian soil samples ( Ανεσιάδου Αικατερίνη , διπλωματική εργασία )

[8] <http://hpschapters.org/northcarolina/nsds/potassium.pdf>

[9] Environment International volume 14, issue 2, 1988, pages 145-148

[10]<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/phy1916/%ce%91%ce%ba%cf%84%ce%b9%ce%bd%ce%bf%ce%b2%ce%bf%ce%bb%ce%af%ce%b1-%ce%8e%ce%bb%ce%b7.pdf>

[11] Measurements and modelling of  $^{137}\text{Cs}$  distribution on ground due to the Chernobyl accident: a 27-y follow-up study in northern Greece A. Clouvas,\* , S. Xanthos<sup>1,2</sup>, S. Kadi<sup>1</sup> and M. Antonopoulos-Domis department of electrical and computer engineering, nuclear technology laboratory, Aristotle university of Thessaloniki

[12] Καταγραφή και μελέτη κατακόρυφης διασποράς  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$  στην περιοχή Reggane της Αλγερίας  
vertical profiling for  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  from the sampling location of Reggane, Algeria Ψάλτης Ελευθέριος ( διπλωματική εργασία )

[13] K. W. Nicholson, UK (IAEA 1995) international atomic energy agency publications

[14] Radionuclide and radiation protection data handbook 2002 d. Delacroix\* J. P. Guerre\*\* P. LeBlanc\*\* C. Hickman

[15] Ξανθός Στέλιος, διδακτορική διατριβή, ανάπτυξη μεθόδων in-citu γ-φασματοσκοπίας για μετρήσεις ραδιενέργειας σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους : εφαρμογή τους στον προσδιορισμό της ραδιολογικής επιβάρυνσης από γ-ακτινοβολία του ελληνικού πληθυσμού (1999).

[16] <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-valance-band-and-conduction-band>

[17] Radioisotopes and radiation methodology 8-1 (chapter 8 hyper-pure germanium detector)

[18] Wissmann, f. variations observed in environmental radiation at ground level radiat. prot. dosim., 118, 3-10, (2006)

[19] Διαφάνειες μαθήματος “εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία”

[20] ICRP, 1996. conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP publication 74. ann. ICRP 26 (3-4)

[21] Specific activity to h\*(10) conversion coefficients for in situ gamma spectrometry m. Lemercier\*, R. Gurriaran, P. Bouisset and X. Cagnat institut de radioprotection et de su^rete´ nucle´aire, laboratoire de mesure de la radioactivite´ de l’environment, ba^t. 501, bois de rames, 91400 Orsay, France

[22] Performance of handheld nai(tl) spectrometers as dosimeters by laboratory and field dose rate measurements a. clouvas1,\*, s. xanthos2, a. boziari3, f. leontaris1, i. kaissas3 and m. omirou1 1department of electrical and computer engineering, Aristotle university of Thessaloniki

[23] Radiocesium distribution in undisturbed soil: measurements and diffusion-advection model m. Antonopoulos-Domis, A. Clouvas, A. Hiladakis, and S. Kadi\*