



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
‘ Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές’

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ- γ ΓΙΑ *IN-SITU*
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΙΖΗΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ :
ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΣΑΜΠΑΡΗΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ :
ΜΙΧΑΛΗΣ ΚΟΚΚΟΡΗΣ
ΡΟΖΑ ΒΛΑΣΤΟΥ -ΖΑΝΝΗ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ερευνητή Δρ. Τσαμπάρη Χρήστο για την ανάθεση της εργασίας αυτής, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της εργασίας, την καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε στις δυσκολίες που προέκυψαν.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους καθηγητές μου Δρ. Κόκκορη Μιχάλη και Δρ. Βλαστού-Ζάννη Ρόζα για την καθοδήγηση, τη συνεχή στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους Δρ. Πατήρη Διονύση και τον Ελευθερίου Γιώργο για τον χρόνο και την ενέργεια που αφιέρωσαν στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ερευνητή Δρ. Κάλφα Κώστα για την ευγενική χορήγηση του απαραίτητου για την ανάλυση των μετρήσεων προγράμματος SPECTRW.

ABSTRACT

In the present work, the progress in developing a methodology for calculating the detection efficiency of an underwater gamma-ray spectrometer for marine sediment measurements on the seabed is presented.

The experimental work was carried out at the coastal zone of Vasilikos (Cyprus) by deploying the *in-situ* NaI detector system KATEPINA and acquiring data from seawater (4π geometry) and from the seabed (2π geometry). Sediment samples were also collected from the same sites and subsequently measured in the laboratory, by means of high resolution gamma-ray spectrometry. The experimental full-energy peak efficiency of the *in-situ* system in the energy range 1400-2600 keV, was calculated for a specific site (*Site 1*), by combining the *in-situ* measurements with the laboratory reference ones. Furthermore, the efficiency results were reproduced by Monte Carlo (MC) simulations, using the MCNP5 code.

The developed method was subsequently implemented for activity concentration calculations in sediments by analyzing the *in-situ* spectra as acquired from neighboring sites, to the reference point (*Site 1*), in the same region. The activity calculation results were validated using corresponding reference laboratory measurements, by means of a HPGe detector, in the same sites. Comparison results between *in-situ* and laboratory measurements, exhibited satisfactory agreement within statistical uncertainties.

The instrumentation used and the first steps in establishing a methodology for *in-situ* quantitative sediment measurements are presented. Concluding, perspectives of improving experimental data and generalizations in the system efficiency calibration calculations are discussed for future applications by obtaining more data in sea beds with different geological formations.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι απαραίτητη από πλευράς ακτινοπροστασίας λόγω των αρνητικών επιπτώσεων της ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Πηγές φυσικής ραδιενέργειας στο περιβάλλον αποτελούν οι τρεις ραδιενεργές σειρές των ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th με τα θυγατρικά τους στοιχεία καθώς και το ^{40}K . Μέρος της φυσικής ραδιενέργειας οφείλεται επίσης στην κοσμική ακτινοβολία καθώς και σε ραδιονουκλίδια που δημιουργούνται από αλληλεπιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας με τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (π.χ. ^7Be , ^3H). Σε πολλές περιοχές, εμφανίζονται υψηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας που αποδίδονται στην ορυκτολογία της περιοχής λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σε φυσικά ραδιονουκλίδια (Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM) και σχετίζονται με τη γεωμορφολογία της περιοχής (π.χ. κοιτάσματα U). Κατά την βιομηχανική εκμετάλλευση τέτοιων φυσικών πόρων (ορυκτά, βιομηχανική πρώτη ύλη), όπως μονάδες εξόρυξης μεταλλευμάτων και παραγωγής φωσφορικών λιπασμάτων, παράγονται προϊόντα ή παραπροϊόντα πλούσια σε φυσική ραδιενέργεια (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials, TENORM). Η επαύξηση της φυσικής ραδιενέργειας στα παραγόμενα υλικά προκύπτει λόγω της εκλεκτικής εναπόθεσης ορισμένων ραδιονουκλιδίων σε αυτά, και σχετίζεται με τις διεργασίες επεξεργασίας της πρώτης ύλης.

Τις τελευταίες δεκαετίες στη συνεισφορά της ραδιενέργειας στο περιβάλλον έχουν προστεθεί και τεχνητά ραδιενεργά στοιχεία, ενδεικτικά αναφέρονται τα ^{137}Cs , ^{131}I , ^{90}Sr , ^{60}Co , που οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και σχετίζονται με διεργασίες όπως η σχάση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, η παραγωγή ραδιοφαρμάκων σε επιταχυντές, οι πυρηνικές δοκιμές. Η παρουσία τους στο περιβάλλον σχετίζεται με ραδιολογικά ή και πυρηνικά ατυχήματα.

Η μέθοδος της **φασματοσκοπίας-γ** είναι μια τεχνική ευρέως διαδεδομένη που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον (χερσαίο, θαλάσσιο), ενώ παράλληλα βρίσκει και άλλες σημαντικές εφαρμογές σε κλάδους της επιστήμης όπως είναι η Ωκεανογραφία, η Γεωλογία και η Υδρογεωλογία. Ενδεικτικά αναφέρονται η χρήση των ραδιοϊχνηθετών (^{137}Cs , ^{210}Pb) στον προσδιορισμό ρυθμού ιζηματογένεσης σε γεωφυσικές εφαρμογές [Tsabaris C. et al., 2007], η χρήση ραδιονουκλιδίων στον προσδιορισμό υποθαλάσσιων πηγών γλυκού νερού (θυγατρικά του ραδονίου ^{222}Rn) [Tsabaris C. et al., 2012] και στον εντοπισμό υποθαλάσσιων ηφαιστειών [Chabaux F., 1994].

Το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει γύρω από μετρήσεις ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον αναδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης μιας μεθόδου που να παρέχει τη δυνατότητα χαρτογράφησης μεγάλων περιοχών σε μικρό χρονικό διάστημα. Ο μεγάλος όγκος πληροφορίας που βρίσκεται στη βιβλιογραφία αφορά κυρίως μετρήσεις στον αέρα και στο έδαφος (χερσαίο περιβάλλον) [Boson J. et al., 2006 ; K. Agrafiotis et al., 2010] ενώ τα ανεπτυγμένα συστήματα ανίχνευσης για μετρήσεις ραδιενέργειας, μέσω της *in-situ* φασματοσκοπίας-γ στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι λιγοστά.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μία νέα μεθοδολογία εφαρμογής ενός αξιόπιστου συστήματος για υποθαλάσσιες *in-situ* μετρήσεις φασματοσκοπίας-γ στο θαλάσσιο ίζημα. Η *in-situ* μέθοδος επιλέγεται λόγω των πλεονεκτημάτων της, έναντι των ευρέως χρησιμοποιούμενων εργαστηριακών τεχνικών. Το *in-situ* ανιχνευτικό σύστημα **KATEPINA**, που εφαρμόζεται για τις μετρήσεις στο θαλάσσιο ίζημα, είναι ήδη βαθμονομημένο για μετρήσεις στο υδάτινο περιβάλλον και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε μια πληθώρα εφαρμογών [Vlachos D.S. & Tsabaris C.,2005; Tsabaris C., 2008].

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη αναφορά των βασικών αρχών που αφορούν στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με την ύλη καθώς και στην ανίχνευσή της μέσω φασματοσκοπίας-γ. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται ειδικά για την αλληλεπίδρασή της ακτινοβολίας-γ με τα δύο κυρίαρχα υλικά στο θαλάσσιο περιβάλλον, το νερό και το ίζημα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και τα ανεπτυγμένα συστήματα γ-φασματοσκοπίας που εφαρμόζονται σε μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τέλος στην ενότητα 1.4 παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του *in-situ* ανιχνευτικού συστήματος **KATEPINA** και περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Στα δυο επόμενα κεφάλαια (2 και 3) που αποτελούν τον κύριο κορμό της εργασίας περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή του ανιχνευτικού συστήματος στον πυθμένα και για την εύρεση της απόδοσής του για μετρήσεις στο ίζημα (κεφάλαιο 2). Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης της απόδοσης του συστήματος που πραγματοποιήθηκαν μέσω πειραματικών μετρήσεων και θεωρητικών υπολογισμών, δίνονται στο τέλος του κεφαλαίου 3.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου, που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή, για *in-situ* μετρήσεις στον θαλάσσιο πυθμένα στο ίζημα. Αρχικά δίνονται στοιχεία για την περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και για τα χαρακτηριστικά του ιζήματος του πυθμένα στην περιοχή. Τα αποτελέσματα της *in-situ* μεθόδου ελέγχονται ως προς την αξιοπιστία τους μέσω αντίστοιχων μετρήσεων αναφοράς που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα κίνητρα και οι εργασίες που οδήγησαν στην πραγματοποίηση της μελέτης αυτής, δίνονται τα γενικά συμπεράσματα και περιγράφονται οι κύριοι άξονες των μελλοντικών εργασιών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| Ευχαριστίες..... | 1 |
| Abstract..... | 3 |
| Πρόλογος..... | 5 |
| Περιεχόμενα..... | 7 |
| Λίστα Γραφημάτων..... | 9 |
| Λίστα Πινάκων..... | 11 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 12 |
| 1.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ..... | 12 |
| 1.1.1 Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης..... | 13 |
| 1.1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-γ με την ύλη..... | 14 |
| 1.1.3 Εξασθένηση ακτινοβολίας-γ στο νερό και στο θαλάσσιο ιζήμα..... | 16 |
| 1.2 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ – Γ..... | 18 |
| 1.2.1 Ανιχνευτικά συστήματα (NaI(Tl)-HPGe)..... | 20 |
| 1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ-Γ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ..... | 22 |
| 1.3.1 Εργαστηριακή μέθοδος φασματοσκοπίας-γ..... | 22 |
| 1.3.2 In-situ μέθοδοι φασματοσκοπίας-γ..... | 22 |
| 1.4 ΤΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΕΡΙΝΑ..... | 23 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ..... | 27 |
| 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (E_v) ΤΟΥ <i>IN-SITU</i> ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΙΖΗΜΑ..... | 28 |
| 2.1.1 Μεθοδολογία εύρεσης της e_v | 28 |
| 2.1.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του <i>in-situ</i> συστήματος..... | 32 |
| 2.1.3 Μέθοδοι δειγματοληψίας θαλάσσιου ιζήματος..... | 33 |
| 2.1.4 Επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων θαλάσσιου ιζήματος στο εργαστήριο..... | 34 |
| 2.1.5 Εργαστηριακή μέτρηση της ενεργότητας στο ιζήμα..... | 38 |
| 2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ E_v ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO (MC)..... | 40 |
| 2.2.1 Ο κώδικας Monte Carlo N-Particle transport Code (MCNP5)..... | 40 |
| 2.2.2 Ανάπτυξη του μοντέλου του <i>in-situ</i> ανιχνευτικού συστήματος..... | 42 |
| 2.2.3 Εφαρμογή του μοντέλου σε γεωμετρία-4π στο νερό..... | 42 |
| 2.2.4 Εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου MC σε γεωμετρία-2π στο ιζήμα..... | 45 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ..... | 46 |
| 3.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ..... | 46 |
| 3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΤΟΠΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ..... | 47 |
| 3.2.1 Υπολογισμός ρυθμού καταγραφής γεγονότων στο ιζήμα..... | 47 |
| 3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ..... | 50 |
| 3.3.1 Προσδιορισμός φυσικών παραμέτρων ιζήματος..... | 50 |
| 3.3.2 Προσδιορισμός συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) ιζήματος μέσω φασματοσκοπίας-γ στο εργαστήριο..... | 53 |
| 3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ <i>IN-SITU</i> ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΙΖΗΜΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ 350 – 2600 keV..... | 60 |
| 3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ <i>IN-SITU</i> ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΙΖΗΜΑ..... | 65 |
| 3.5.1 Προσδιορισμός του Ενεργού Όγκου Ανίχνευσης..... | 65 |
| 3.5.2 Εκτίμηση της Απόδοσης του Ανιχνευτικού Συστήματος στο νερό και πειραματική επιβεβαίωση..... | 67 |

| | |
|---|----|
| 3.5.3 Εκτίμηση της θεωρητικής (MC) απόδοσης φωτοκορυφής ϵ_ν στο ίζημα..... | 70 |
|---|----|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ 73

| | |
|--|----|
| 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 73 |
| 4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΖΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ | 75 |
| 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΑΙ <i>IN-SITU</i> ΜΕΤΡΗΣΗΣ | 77 |
| 4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ <i>IN-SITU</i> ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΙΖΗΜΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ..... | 81 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 85

| | |
|--|----|
| 5.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ-ΠΥΘΜΕΝΑ | 85 |
| 5.2 ΣΤΑΔΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ | 86 |
| 5.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ <i>IN-SITU</i> ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ..... | 87 |
| 5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 89 |
| 5.5 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ | 91 |
| Παράρτημα Α. Φυσικές ραδιενεργές σειρές..... | 93 |
| Παράρτημα Β. Αναλυτικοί υπολογισμοί της πειραματικής βαθμονόμησης στις ενέργειες ακτίνων-γ 351.9 keV (^{214}Pb), 609.32 keV (^{214}Bi), 1764.5 keV (^{214}Bi) και 2614 keV (^{208}Tl)..... | 95 |
| Βιβλιογραφικές Αναφορές..... | 97 |

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1.1: Η καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος ΚΑΤΕΡΙΝΑ στο θαλάσσιο περιβάλλον

Γράφημα 3.1: Απεικόνιση φασμάτων ιζήματος και νερού όπως λήφθηκαν με το *in-situ* σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ κανονικοποιημένα στον ίδιο χρόνο. Το φάσμα του νερού είναι επιπλέον κανονικοποιημένο στη γεωμετρία μέτρησης 2π του ιζήματος

Γράφημα 3.2 : Καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτικού συστήματος για την εκτεταμένη βαθμονομημένη πηγή $^{152/154}\text{Eu}$ στη γεωμετρία μέτρησης, σε επαφή με τον ανιχνευτή

Γράφημα 3.3: Καμπύλη ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτικού συστήματος για την εκτεταμένη βαθμονομημένη πηγή $^{152/154}\text{Eu}$ (121 – 1408 keV)

Γράφημα 3.4: Καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης (Absolute efficiency) του συστήματος για τη γεωμετρία μέτρησης της εκτεταμένης πηγής στη γεωμετρία μέτρησης, σε επαφή με τον ανιχνευτή, υπολογισμένη από την ανάλυση του φάσματος βαθμονομημένης πηγής $^{152/154}\text{Eu}$ ίδιας γεωμετρίας

Γράφημα 3.5 : Απεικόνιση φάσματος αφυδατωμένου δείγματος ιζήματος (site1) όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο σε χρόνο 24 ωρών

Γράφημα 3.6 : Απεικόνιση φάσματος ακτινοβολίας υποβάθρου όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο σε χρόνο 24 ωρών

Γράφημα 3.7 : Αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών του ενεργού όγκου V συναρτήσει της ενέργειας E_γ

Γράφημα 3.8 : Σύγκριση πειραματικών EXP και θεωρητικών MCNP5 φασμάτων στη δεξαμενή για το ^{40}K αριστερά και ^{137}Cs στη δεξιά εικόνα

Γράφημα 3.9 : Σύγκριση θεωρητικών (MCNP5, GEANT4) εκτιμήσεων της απόδοσης του συστήματος ΚΑΤΕΡΙΝΑ στο νερό

Γράφημα 3.10 : Σύγκριση πειραματικής-θεωρητικής καμπύλης ανιχνευτικής απόδοσης (ϵ_v) του συστήματος ΚΑΤΕΡΙΝΑ για τη γεωμετρία μέτρησης του ιζήματος

Γράφημα 4.1: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 3 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Γράφημα 4.2: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 8 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Γράφημα 4.3: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 2 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Γράφημα 4.4: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 4 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Γράφημα 4.5: Απεικόνιση του φάσματος στο νερό στο σημείο βαθμονόμησης 1 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Γράφημα 4.6: Απεικόνιση των φασμάτων στο ίζημα στα σημεία μέτρησης 1 και 8 όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο σε γραμμική κλίμακα. Σε μεγέθυνση παρουσιάζονται οι κυρίαρχες φωτοκορυφές για τα ραδιονουκλίδια ^{214}Pb (351.9 keV), ^{214}Bi (609.32, 1765 keV) και ^{40}K (1460.8 keV)

Γράφημα 4.7: In-situ φάσματα στο ίζημα στα σημεία site1, site 3 σε χρόνο μέτρησης 20h (72000 sec)

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος KATEPINA

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα ολικού μετρούμενου αριθμού γεγονότων νερού και ιζήματος όπως προέκυψαν από την ανάλυση των φασμάτων που ελήφθησαν με το σύστημα KATEPINA στην τοποθεσία site1.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα (Net cps_s) ‘καθαρού’ μετρούμενου ρυθμού γεγονότων ιζήματος έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων του πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ιζήματος του δείγματος site 1.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτικού συστήματος.

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης ανιχνευτικής ικανότητας του HPGe στη γεωμετρία μέτρησης του ιζήματος χρησιμοποιώντας βαθμονομημένη εκτεταμένη πηγή $^{152/154}\text{Eu}$

Πίνακας 3.6 : Αποτελέσματα μέτρησης ενεργότητας A_{ref} (Bq/L), στο δείγμα αφυδατωμένου ιζήματος στο σημείο βαθμονόμησης site 1

Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά στοιχεία των ραδιονουκλιδίων που συμμετέχουν στο σχηματισμό φωτοκορυφών στο in-situ φάσμα του ιζήματος

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο ίζημα.

Πίνακας 3.9: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών MCNP5 αποτελεσμάτων απόδοσης $\epsilon \cdot V$ του συστήματος KATEPINA στο νερό

Πίνακας 3.10: Φυσικές παράμετροι ιζήματος όπως εισάγονται στο αρχείο εισόδου του κώδικα για την περιγραφή της πηγής και του περιβάλλοντα χώρου

Πίνακας 3.11: Θεωρητική εκτίμηση (MCNP5) της απόδοσης ϵ_V του in-situ συστήματος στο ίζημα

Πίνακας 3.12: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο ίζημα

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα πυκνότητας (gr/cc) και ποσόστωσης νερού (w/w %) στα επιφανειακά δείγματα ιζήματος, στα σημεία των in-situ μετρήσεων

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) στο ίζημα, στα σημεία δειγματοληψιών, με την εργαστηριακή μέθοδο και με την in-situ μέθοδο στα ίδια σημεία

Πίνακας 4.3: Σύγκριση των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) μεταξύ της εργαστηριακής μεθόδου και των μετρήσεων πεδίου στα σημεία πόντισης του συστήματος KATEPINA

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φασματοσκοπίας ακτίνων-γ εργαστηριακής (HPGe) και in-situ (NaI)

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας επιδιώκεται ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσω της φασματοσκοπίας-γ. Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται κάποια θεωρητικά στοιχεία που αφορούν στην πυρηνική αστάθεια (γένεση της ακτινοβολίας-γ), στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με την ύλη και στην ανίχνευση της χρησιμοποιώντας υπάρχοντα ανιχνευτικά συστήματα. Αρχικά (ενότητα 1.1.2) παρουσιάζονται οι κύριοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας-γ με την ύλη και ο τρόπος με τον οποίο η ακτινοβολία-γ εξασθενεί στα δυο συγκεκριμένα υλικά που μας ενδιαφέρουν, το νερό και το ίζημα (ενότητα 1.1.3). Κατόπιν παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας που διέπουν τους χρησιμοποιούμενους ανιχνευτές ακτινοβολίας-γ καθώς και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους (ενότητα 1.2). Έμφαση δίνεται στην περιγραφή των χαρακτηριστικών των ανιχνευτών $NaI(Tl)$ και $HPGe$, που είναι οι επικρατέστεροι σήμερα στη μελέτη της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στην ενότητα 1.3 διακρίνονται μεταξύ τους και περιγράφονται, οι μέθοδοι μέτρησης της ραδιενέργειας μέσω φασματοσκοπίας-γ χρησιμοποιώντας εργαστηριακούς και *in-situ* ανιχνευτές και δίνονται τα κίνητρα που οδήγησαν στην υλοποίηση των μετρήσεων με την *in-situ* μέθοδο. Τέλος στην ενότητα 1.4, παρουσιάζεται το υποθαλάσσιο σύστημα φασματοσκοπίας-γ KATEPINA που χρησιμοποιήθηκε στις *in-situ* μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον και δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

1.1 Στοιχεία θεωρίας

Η ραδιενεργός αποδιέγερση ενός ασταθούς ατομικού πυρήνα είναι η αυθόρμητη έκλυση ενέργειας με την εκπομπή *ιοντίζουσας ακτινοβολίας*. Κατά την αποδιέγερση πραγματοποιείται μεταστοιχείωση του αρχικού πυρήνα (*μητρικός πυρήνας*) σε ένα νέο πυρήνα (*θυγατρικός πυρήνας*) με την εκπομπή από τον πυρήνα ενός σωματιδίου ^4He (ακτινοβολία-α) ή ενός ηλεκτρονίου/ποζιτρονίου (ακτινοβολία β^-/β^+) και συνοδεύεται συνήθως με ταυτόχρονη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνες-γ). Ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί επίσης να είναι ασταθής οπότε μεταστοιχείωνεται με τη σειρά του σε έναν τρίτο πυρήνα ή να μεταπίπτει κατά τη μεταστοιχείωση σε διεγερμένη κατάσταση του θυγατρικού πυρήνα. Και στις δυο περιπτώσεις η αποδιέγερση συνοδεύεται με εκπομπή ακτινοβολίας. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η μετάπτωση καταλήγει σε έναν σταθερό πυρήνα. Με τον μηχανισμό αυτό δημιουργούνται αλυσίδες ασταθών στοιχείων (ραδιονουκλίδια) όπου η αποδιέγερση του ενός προς μια σταθερότερη κατάσταση, οδηγεί στη δημιουργία του άλλου. Οι αλυσίδες αυτές ονομάζονται *ραδιενεργές σειρές*. Στη φύση (φυσικές ραδιενεργές σειρές) απαντώνται τρεις ραδιενεργές σειρές του ^{238}U (*ουράνιου*), ^{232}Th (*θορίου*), ^{235}U (*ακτινίου*) αντίστοιχα. Οι τρεις αυτές φυσικές ραδιενεργές σειρές παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες A1, A2 και A3 του παραρτήματος Α.

1.1.1 Ραδιενέργεια και νόμοι διαδοχικής αποδιέγερσης

Η κατανομή του πληθυσμού των πυρήνων ενός ραδιονουκλιδίου μετά την αποδιέγερση δίνεται από τον εκθετικό νόμο ραδιενέργειας :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.1)$$

Όπου:

N: Ο αριθμός των πυρήνων του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου μετά από χρόνο t

N₀: Ο αριθμός των αδιάσπαστων αρχικών πυρήνων του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου

λ : Η σταθερά διάσπασης που υπολογίζεται από τον χρόνο ημιζωής T_{1/2}, λ =ln2/ T_{1/2}

t : Ο χρόνος που έχει παρέλθει

Ο ρυθμός dN/dt (ενεργότητα A) με τον οποίο αποδιεγείρεται ένα ραδιονουκλίδιο, είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του και βρίσκεται από τη σχέση :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \quad (1.2)$$

Σε ένα κλειστό σύστημα όπου δεν παρατηρούνται προσθήκες και απώλειες των ραδιονουκλιδίων (φυσική ραδιενεργός σειρά) ο πληθυσμός κάθε θυγατρικού πυρήνα της σειράς αυξάνει με τροφοδοσία από τον αμέσως προηγούμενο μητρικό, ενώ παράλληλα μειώνεται καθώς αποδιεγείρεται προς τον αμέσως επόμενο θυγατρικό. Ο ρυθμός μείωσης του πληθυσμού του μητρικού πυρήνα και αύξησης του θυγατρικού για κάθε ραδιονουκλίδιο της σειράς εξαρτάται από την σταθερά αποδιέγερσης λ κάθε πυρήνα. Αν αρχικά υποθέσουμε ότι υπάρχουν μόνο πυρήνες του μητρικού ραδιονουκλιδίου τότε οι συγκεντρώσεις N_n(t) των θυγατρικών μεταβάλλονται σύμφωνα με την σχέση (εξισώσεις Bateman) [Ασημακόπουλος 1981; Evans R.D., 1955; Ehman W.D. and Vance D.E., 1998]:

$$N_n(t) = N_{10} \left[\sum_{k=1}^{n-1} \frac{P_{k \rightarrow k+1} (e^{-\lambda_k t} - e^{-\lambda_n t})}{\lambda_n - \lambda_k} * \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{n-1} \frac{P_{l \rightarrow l+1}}{\lambda_l - \lambda_k} \right] \quad (1.3)$$

Όπου:

N₁₀: Οι αρχικοί πυρήνες του μητρικού ραδιονουκλιδίου

P_{i→j} : Ο ρυθμός παραγωγής του ραδιονουκλιδίου j από το ραδιονουκλίδιο i

λ : Η σταθερά διάσπασης κάθε ραδιονουκλιδίου

Οι διαδοχικές αποδιεγέρσεις ραδιενεργών πυρήνων διακρίνονται σε δυο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη αφορά την περίπτωση όπου ο μητρικός πυρήνας έχει χρόνο ημιζωής μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο του θυγατρικού του. Τότε η πιθανότητα αποδιέγερσης του μητρικού πυρήνα είναι μικρότερη, δηλαδή $\lambda_1 < \lambda_2$. Μετά από αρκετό χρόνο και με δεδομένο ότι $\lambda_1 < \lambda_2$, η παραπάνω εξίσωση για δύο διαδοχικά ραδιονουκλίδια μπορεί να γραφεί ως:

$$N_2 = N_{10} \left[\frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \exp(-\lambda_1 t) \quad (1.4)$$

καθώς $N_1 = N_{10} \exp(-\lambda_1 t)$ καταλήγουμε στο ότι:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (1.5)$$

Στην κατάσταση αυτή η οποία ονομάζεται *μεταβατική ισορροπία* (transient equilibrium) ο λόγος της ενεργότητας A_2/A_1 παραμένει σταθερός, ανεξάρτητος του χρόνου και χαρακτηριστικός των μεγεθών λ_1 και λ_2 . Καθώς μάλιστα $\lambda_2 > \lambda_1 \Rightarrow A_2 > A_1$ δηλαδή η ενεργότητα του θυγατρικού πυρήνα παραμένει σταθερά μεγαλύτερη από αυτή του μητρικού. Στην ειδική περίπτωση όπου ο χρόνος ημιζωής του μητρικού είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του θυγατρικού του πυρήνα, δηλαδή $\lambda_1 \ll \lambda_2$ τότε $(\lambda_2 - \lambda_1) \cong \lambda_2$ και οι ενεργότητες των δύο πυρήνων εξισώνονται $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$. Έτσι μετά από ένα χρονικό διάστημα οι δύο πυρήνες αποδιεγείρονται με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται *κατάσταση διαρκούς ή 'μόνιμης ισορροπίας* (secular equilibrium). Αντίθετα, στην περίπτωση όπου ο αρχικός πυρήνας έχει αρκετά μικρότερο χρόνο ημιζωής η *κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας* δεν επιτυγχάνεται ποτέ.

1.1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-γ με την ύλη

Οι τρεις κύριοι μηχανισμοί με τους οποίους μια ακτίνα-γ χάνει την ενέργειά της όταν διαδίδεται σε ένα μέσο είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η ελαστική σκέδαση Compton και το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης. Κατά το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** (photoelectric effect) η ακτίνα-γ απορροφάται πλήρως (με μια μόνο αλληλεπίδραση) από ένα δεσμευμένο ατομικό ηλεκτρόνιο e^- το οποίο διαφεύγει με ενέργεια $E_\gamma - E_\beta$, που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια E_γ πριν την αλληλεπίδραση μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης του e^- , E_β . Η φωτοηλεκτρική απορρόφηση κυριαρχεί σε χαμηλές ενεργειακές περιοχές $E_\gamma < 200 \text{ keV}$ (Εικόνα 1.2). Η ενεργός διατομή σ_{pe} παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από τον ατομικό αριθμό Z των ατόμων του μέσου:

$$\sigma_{pe} \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (1.6)$$

όπου ο εκθέτης n παίρνει τις τιμές 4 και 5 ανάλογα με το εύρος των ενεργειών των ακτίνων- γ [Knoll 2000; Debertin K. and Helemer R.G.]. Κατά τη **σκέδαση Compton** (Compton Scattering) μέρος της αρχικής ενέργειας E_γ μεταφέρεται σε ένα ατομικό e^- του μέσου. Το φωτόνιο σκεδάζεται σε μια νέα γωνία θ ενώ η διαθέσιμη ενέργεια διαμοιράζεται (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ενέργειας και ορμής) ως εξής:

Η ενέργεια του φωτονίου μετά την αλληλεπίδραση E_γ' δίνεται από τη σχέση:

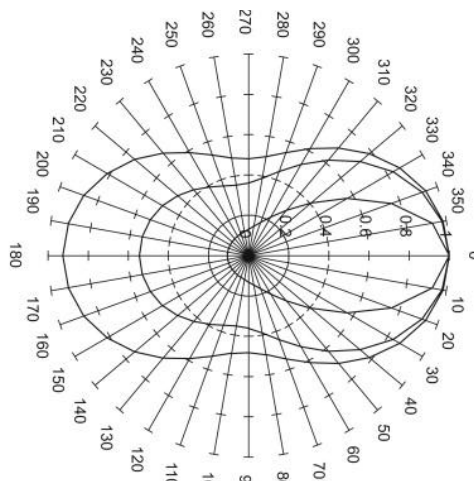
$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma/mc^2) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (1.7)$$

Το ηλεκτρόνιο e^- αποκτά ενέργειες στο συνεχές φάσμα (Compton Continuum) που ορίζονται από τη διαφορά $E_\gamma - E_\gamma'$. Η μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το e^- (σε γωνία $\theta=\pi$) δίνεται από τη σχέση:

$$T_{max} = \frac{2E_\gamma^2}{2 \cdot E_\gamma + mc^2} \quad (1.8)$$

Για μεγάλες ενέργειες E_γ εννοείται η σκέδαση των φωτονίων σε μπροστινές γωνίες (Εικόνα 1.1) όπως υπολογίζεται από την διαφορική ενεργό διατομή της σκέδασης (Klein-Nishina formula):

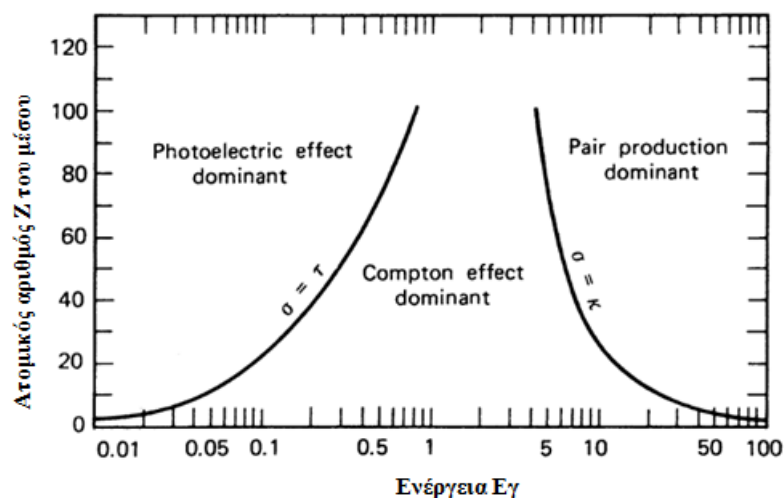
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z \cdot r_0^2 \cdot \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \cdot \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot (1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta) \cdot (1 + \alpha(1 - \cos\theta))} \right) \quad (1.9)$$



Εικόνα 1.1: Εξάρτηση της ενεργού διατομής σκέδασης από τη γωνία σκέδασης για ακτίνες γ ενέργειας 10 (εξωτερική καμπύλη), 100 και 1000 keV (εσωτερική καμπύλη).

Ο τρίτος τρόπος αλληλεπίδρασης των ακτίνων- γ με άτομα κάποιου υλικού λαμβάνει χώρα μόνο σε ακτίνες- γ υψηλής ενέργειας ($E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$). Κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου του απορροφητικού μέσου, η ακτίνα- γ μετατρέπεται σε ύλη με τη

μορφή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Αυτό το φαινόμενο καλείται *δίδυμη γένεση* ή *παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (pair production)*. Το ποζιτρόνιο, που δημιουργείται με αυτόν το τρόπο, επιβραδύνεται στο απορροφητικό υλικό και τελικά υφίσταται εξάλωση, παράγοντας δύο φωτόνια ενέργειας 0.511 MeV το καθένα. Επειδή ένα ηλεκτρόνιο έχει μάζα ηρεμίας ισοδύναμη με ενέργεια 0.511 MeV, για να γίνει αυτή η μετατροπή απαιτείται ακτινοβολία-γ με ενέργεια τουλάχιστον 1.022 MeV ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας διαμοιράζεται ως κινητική ενέργεια, $T_{pair} = E_\gamma - 2m_0c^2$, στο ζεύγος $e^- - e^+$. Η ενεργός διατομή για την δίδυμη γένεση εξαρτάται από το Z^2 του υλικού και την ενέργεια E_γ της ακτίνας-γ. Έτσι η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μέσω του φαινομένου αυτού είναι μηδενική για ενέργειες μικρότερες από 1.02 MeV (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 : Γράφημα εξάρτησης της συνεισφοράς των τριών μηχανισμών αλληλεπίδρασης ακτίνων-γ από τον ατομικό αριθμό Z του μέσου και την ενέργεια των ακτίνων-γ [Knoll 2000].

1.1.3 Εξασθένηση ακτινοβολίας-γ στο νερό και στο θαλάσσιο ίζημα

Η εξασθένηση της έντασης μιας δέσμης ακτίνων-γ, I_0 , σε ένα μέσο σύμφωνα με τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις κατά τη διάδοσή της στο μέσο αυτό, εξαρτάται από την ενέργεια E_γ και το υλικό του μέσου (ατομικός αριθμός Z, πυκνότητα) και δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1.10)$$

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{coh} + \mu_{pair}$$

Όπου :

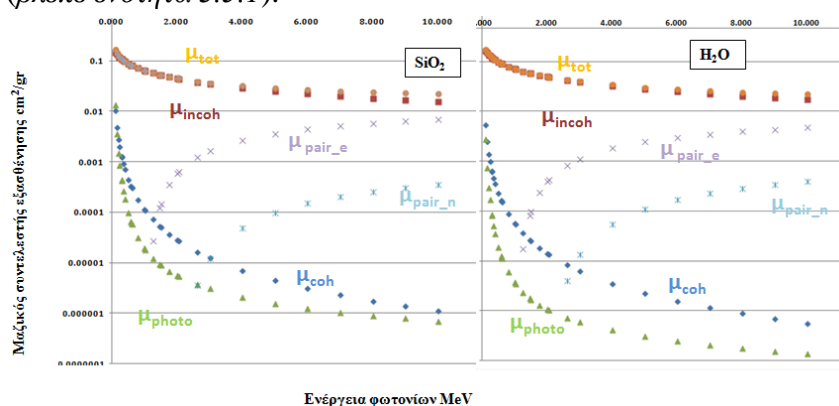
x: Η διανυθείσα απόσταση στο μέσο μετρημένη σε cm

μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης που εκφράζει την συνολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου (με οποιαδήποτε από τις τρεις παραπάνω διαδικασίες) με το υλικό του μέσου ανά μονάδα μήκους διαδρομής, μετρημένος σε μονάδες cm^{-1} . Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως το άθροισμα των γραμμικών συντελεστών

εξασθένησης κάθε επιμέρους διαδικασίας, της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, μ_{photo} , της απορρόφησης λόγω παραγωγής ζεύγους μ_{pair} και της εξασθένησης λόγω σκέδασης Compton μ_{coh} και υπολογίζεται από τις αντίστοιχες ενεργές διατομές για κάθε αλληλεπίδραση. Η ίδια ποσότητα υπολογίζεται και σε μονάδες αντίστροφης επιφανειακής πυκνότητας (cm^2/gr). Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ο ολικός **μαζικός** συντελεστής εξασθένησης και δεν εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού.

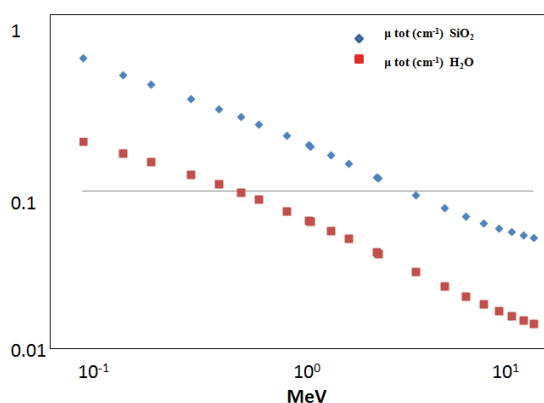
Από τη σχέση 1.10 φαίνεται ότι υπάρχει μια απόσταση x πέρα από την οποία η ακτινοβολία έχει εξασθενήσει πλήρως. Η απόσταση αυτή ορίζεται, σε κάθε διαφορετικό μέσο, ως η απόσταση x_{eff} στην οποία το 999% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ($I=1, I_0=1000$) δεν διαπερνά το μέσο. Αντίστοιχα ως ενεργός όγκος V_{eff} ορίζεται ο όγκος της σφαίρας με ακτίνα την απόσταση πλήρους εξασθένησης της ακτινοβολίας- γ . Για θεωρητικούς υπολογισμούς ποσοτήτων που αφορούν στις παραπάνω αλληλεπιδράσεις των ακτίνων- γ σε κάποιο μέσο έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά προγράμματα και αντίστοιχες βάσεις δεδομένων. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το X-COM [Berger M. J. et al., 2010].

Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα X-COM δίνεται η δυνατότητα αναπαραγωγής των συνολικών ή μεμονωμένων ενεργών διατομών σε μονάδες barn/atom, των συνολικών μαζικών συντελεστών εξασθένησης σε μονάδες cm^2/gr και των επιμέρους συντελεστών που συνεισφέρουν στη συνολική εξασθένηση, που είναι: οι συντελεστές ομοιόμορφης σκέδασης, μ_{coh} , (Rayleigh) και μη ομοιόμορφης σκέδασης, μ_{incoh} , (Compton), ο συντελεστής φωτοηλεκτρικής απορρόφησης μ_{photo} , και οι συντελεστές παραγωγής ζεύγους, στο πεδίο του πυρήνα, μ_{pair_n} , και στο πεδίο των ηλεκτρονίων, μ_{pair_e} , του ατόμου. Στο πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής οποιουδήποτε στοιχείου (π.χ. H), ένωσης (π.χ. H₂O), ή μίγματος (π.χ. SiO₂ 45%, H₂O 55 %) και ενέργειες ακτίνων- γ από 1keV έως 100 GeV. Το πρόγραμμα X-COM χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή για τους υπολογισμούς εξασθένησης των ακτίνων- γ στο ίζημα και μέσω αυτών τον προσδιορισμό της ενεργού ακτίνας για κάθε ενέργεια ακτίνων- γ . Η ενεργός ακτίνα εισάγεται στους υπολογισμούς Monte Carlo (MC) στην περιγραφή της πηγής ως η απόσταση από την οποία ανιχνεύονται γεγονότα στο ίζημα (βλέπε ενότητα 3.5.1).



Εικόνα 1.3.: Συντελεστές μαζικής εξασθένησης φωτονίων (cm^2/gr) συναρτήσει της ενέργειάς τους (MeV) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα X-COM στο νερό H₂O και στο διοξείδιο του Πυριτίου SiO₂

Στην *εικόνα 1.3* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης (cm^2/gr), για ενέργειες φωτονίων 0.1-10 MeV, στο νερό και στο διοξείδιο του Πυριτίου SiO_2 , το οποίο αποτελεί ένα από τα κύρια συστατικά του ιζήματος. Κυρίαρχη αλληλεπίδραση στις ενέργειες που φαίνονται στην *εικόνα* αποτελεί η εξασθένηση λόγω σκέδασης Compton (μ_{incoh}) καθώς ταυτίζεται με τη συνολική εξασθένηση μ_{tot} . Η συνολική εξασθένηση είναι μεγαλύτερη κατά 10% (σχετική % απόκλιση) στο νερό από ότι στο ιζήμα στις μεσαίες ενέργειες 0.2 - 4 MeV. Έντονη διαφορά παρατηρείται στην απορρόφηση μ_{photo} των φωτονίων στα δύο υλικά, όπου στην περίπτωση του SiO_2 υπολογίζεται μεγαλύτερη απορρόφηση κατά μία τάξη μεγέθους. Στους παραπάνω υπολογισμούς (μαζικοί συντελεστές εξασθένησης) δεν έχει συμπεριληφθεί η διαφορετική πυκνότητα των δυο υλικών $\rho=1.022\text{-}1.026 \text{ gr/cc}$ για το θαλασσίνο νερό και $\rho=2.65 \text{ gr/cc}$ για το SiO_2 .



Εικόνα 1.4: Συντελεστές ολικής γραμμικής εξασθένησης στο SiO_2 και στο H_2O

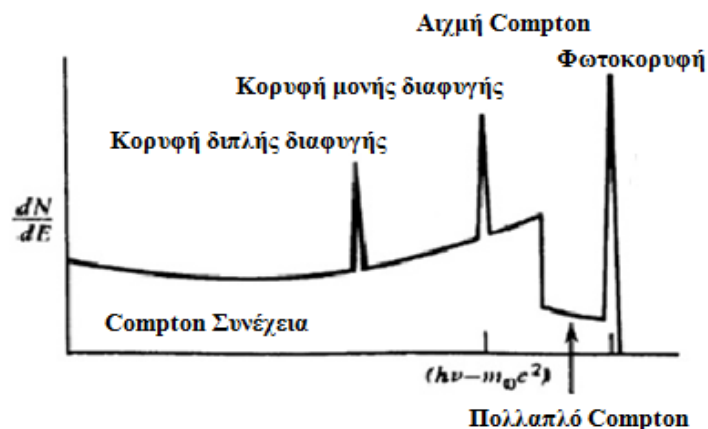
Στην *εικόνα 1.1.4* όπου υπολογίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (cm^{-1}) στα δύο υλικά και στις ίδιες ενέργειες E_γ (MeV) αναδεικνύεται η πολύ εντονότερη εξασθένηση των ακτίνων- γ στο πιο πυκνό υλικό (SiO_2).

1.2 Ανίχνευση Ακτινοβολίας – γ

Η ανίχνευση της ακτινοβολίας- γ στηρίζεται στην αλληλεπίδρασή της με το υλικό του ανιχνευτή μέσω των διαδικασιών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα 1.1.1. Οι αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν μέσα στο υλικό ενός ανιχνευτή δημιουργούν διεγέρσεις/ιονισμούς του υλικού που μετατρέπονται τελικά σε ηλεκτρικό σήμα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία πολλών διαφορετικών ηλεκτρικών σημάτων, ανάλογα με το φαινόμενο αλληλεπίδρασης. Τα σήματα αυτά συλλέγονται, καταμετρώνται και καταγράφονται τελικά σε ένα ιστόγραμμα γεγονότων συναρτήσει της ενέργειας (φάσμα), χρησιμοποιώντας μια σειρά ηλεκτρονικών μονάδων.

Ένα τυπικό φάσμα όπου φαίνονται οι διαφορετικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο υλικό του ανιχνευτή δίνεται στην *εικόνα 1.5*. Στην *εικόνα 1.5* εμφανίζονται τέσσερεις κορυφές καθώς και ένα συνεχές υπόστρωμα κάτω από τις κορυφές. Η τελευταία κορυφή που εμφανίζεται στο φάσμα (φωτοκορυφή) αντιστοιχεί

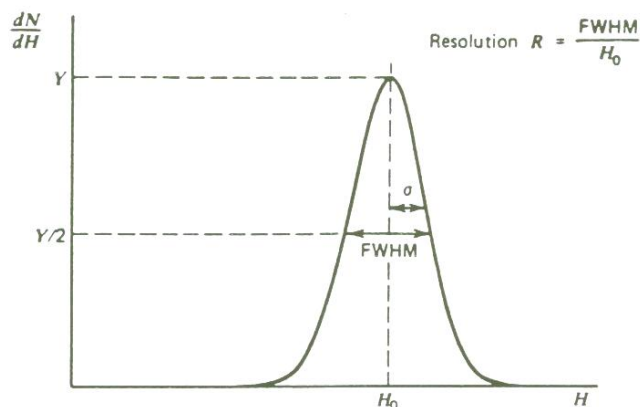
στην πλήρη απορρόφηση της ακτίνας-γ μέσα στο υλικό του ανιχνευτή (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο).



Εικόνα 1.5: Τυπικό φάσμα ανιχνευτή γ- ακτινοβολίας

Όλα τα υπόλοιπα γεγονότα εμφανίζονται στο φάσμα λόγω της διαφυγής κάποιων γεγονότων (π.χ. παραγόμενα e^- , ακτίνες-γ) έξω από τον όγκο του ανιχνευτή. Το συνεχές υπόστρωμα οφείλεται στη διαφυγή μιας ακτίνας-γ έπειτα από μια ή διαδοχικές σκεδάσεις Compton μέσα στον ανιχνευτή ενώ η αιχμή Compton αντιστοιχεί στη μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο κατά τη σκέδαση. Οι δύο άλλες κορυφές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε διαφυγή μιας ή και των δυο ακτίνων-γ (κορυφή μονής και διπλής διαφυγής αντίστοιχα) που δημιουργούνται κατά την αλληλεπίδραση (εξαύλωση) ενός ποζιτρονίου, που παράγεται μέσω του φαινομένου της δίδυμης γένεσης, με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του υλικού του ανιχνευτή.

Σε κάθε τυπικό φάσμα όλες οι κορυφές είναι διευρυμένες, παρουσιάζουν δηλαδή μια στατιστική διακύμανση γύρω από μια κεντρική τιμή (Gaussian μορφή). Η μορφή της κορυφής εξαρτάται από τις στατιστικές διακυμάνσεις στο αρχικό σήμα και οφείλεται σε διάφορους παράγοντες (π.χ. στατιστικές διακυμάνσεις στα ηλεκτρονικά) αλλά κυρίως από τον ίδιο τον ανιχνευτή (υλικό, διαστάσεις) [Devanathan R. et al., 2006]. Για το λόγο αυτό μια βασική ποσότητα που ορίζεται σε κάθε ανιχνευτή είναι η σχετική % ενεργειακή διακριτική ικανότητα R (resolution), αποτελεί μέτρο της ικανότητας του ανιχνευτή να διακρίνει μεταξύ δυο κοντινών φωτοκορυφών και ορίζεται ως το ενεργειακό εύρος (πλάτος) στο μισό του μέγιστου ύψους της κορυφής (Full Width Half Maximum, FWHM) διαιρεμένο με την ενέργεια της φωτοκορυφής H_0 όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6. Η ‘χαμηλή’ διακριτική ικανότητα ενός ανιχνευτή (μεγάλο FWHM) μπορεί να εισάγει αβεβαιότητες κατά τη φασματική ανάλυση.



Εικόνα 1.6 : Υπολογισμός της σχετικής διακριτικής ικανότητας

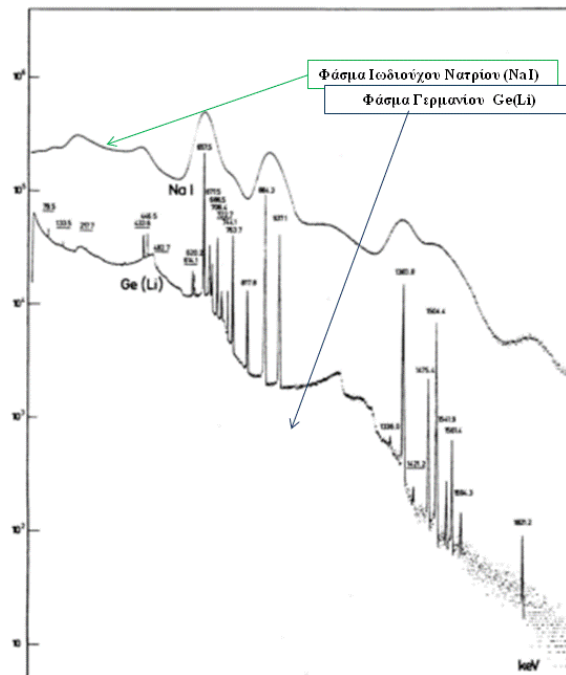
Τέλος μια σημαντική πηγή αβεβαιότητας κατά την επεξεργασία του φάσματος μπορεί να αποτελέσει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence summing effect). Ως πραγματική σύμπτωση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ακτίνες-γ, που ανήκουν στον ίδιο κλάδο διάσπασης, εκπέμπονται διαδοχικά από τον πυρήνα σε χρόνο μικρότερο από τον χρόνο απόκρισης του ανιχνευτή με αποτέλεσμα να εκλαμβάνονται από αυτόν ως ένα μονό γεγονός ενέργειας ίσης με το άθροισμα των δύο φωτονίων. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση στο φάσμα μιας νέας κορυφής που αντιστοιχεί στην αθροιστική αυτή ενέργεια. Πέρα από το φαινόμενο της σύμπτωσης γ-γ (περίπτωση που περιγράφηκε) ορίζονται αντίστοιχα περιπτώσεις άθροισης γεγονότων X-γ και e⁻-γ. Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού είναι εφικτή, υπολογίζοντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης, χρησιμοποιώντας μεθόδους αναλυτικών υπολογισμών [De Felice P. et al., 2000] ή χρησιμοποιώντας MC κώδικες [Lepy M.C. et al., 2010; Vidmar T. et al., 2007].

1.2.1 Ανιχνευτικά συστήματα (NaI(Tl)-HPGe)

Μια μεγάλη κατηγορία ανιχνευτών φασματοσκοπίας-γ είναι αυτή των σπινθηριστών. Η λειτουργία των ανιχνευτών αυτών στηρίζεται στην συλλογή του φωτός που παράγεται από τον ιονισμό και την διέγερση των ατόμων/μορίων του υλικού του σπινθηριστή. Πρακτικά πρόκειται για υλικά (κρυστάλλους) όπου η διέλευση ακτινοβολίας διεγείρει τα μόριά του σε κάποιες διεγερμένες καταστάσεις οι οποίες αποδιεγείρονται μέσω φθορισμού - δηλαδή με εκπομπή φωτός. Στην συνέχεια τα φωτόνια που παράγονται προσπίπτουν στο υλικό της φωτοκαθόδου. Το υλικό της φωτοκαθόδου είναι τέτοιο που να “διευκολύνει” την παραγωγή φωτοηλεκτρονίων. Στην συνέχεια τα ηλεκτρόνια που παράγονται προσπίπτουν σε μία σειρά ηλεκτροδίων (δυνόδοι) μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού. Σε κάθε δυνόδο τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται. Αυξάνοντας συνεχώς το δυναμικό μεταξύ των δυνόδων τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται ώστε τελικά στην άνοδο να έχουμε έναν ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό παλμό. Τα κύρια πλεονεκτήματα σπινθηριστών Ιωδιούχου Νατρίου (NaI(Tl)) έναντι άλλων σπινθηριστών (π.χ. BGO, CsI(Tl)) είναι η καλύτερη

διακριτική ικανότητα (π.χ. σε σχέση με τον BGO) και η μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης.

Οι ανιχνευτές Υπερκαθαρού Γερμανίου (High Purity Germanium, HPGe), ανήκουν στην κατηγορία ανιχνευτών στερεάς κατάστασης (ημιαγωγών). Αποτελούνται από μία επαφή p-n ή p-i-n, που λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης. Η επαφή αυτή κατασκευάζεται από έναν κρύσταλλο Ge υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium, HPGe), ο οποίος εμπλουτίζεται ώστε να γίνει τύπου p⁺ (ή n⁻) από τη μία μεριά και τύπου n⁻ (ή p⁺) από την άλλη. Εφαρμόζοντας τάση στα άκρα του κρυστάλλου, δημιουργείται στο κεντρικό τμήμα μια εκτεταμένη περιοχή χωρίς ηλεκτρόνια ή οπές (περιοχή απογύμνωσης) ενώ ελαχιστοποιούνται οι περιοχές πλειονότητας στα άκρα του κρυστάλλου με μεγάλες συγκεντρώσεις p⁺ και n⁻. Η περιοχή απογύμνωσης αποτελεί και τον ενεργό όγκο του ανιχνευτή, όπου η ιοντίζουσα ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία συλλέγονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στις επαφές p-n. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του είναι απαραίτητο να διατηρείται σε ψυχρή ατμόσφαιρα, διαφορετικά δημιουργείται ποσότητα ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο θόρυβος (λόγω των ελεύθερων φορέων). Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικό εξωτερικό δοχείο (Dewar) το οποίο περιέχει υγρό άζωτο (77 °K) [Canberra 2001, Debertin and Helemer 1988]. Παρότι τα δύο συστήματα δε μπορούν να συγκριθούν άμεσα μεταξύ τους καθώς η δημιουργία σήματος έγκειται στη συλλογή φωτός στην περίπτωση του NaI(Tl) και στη συλλογή ηλεκτρικού φορτίου στην περίπτωση του HPGe, το κύριο μειονέκτημα του NaI(Tl) είναι η χαμηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα (μεγάλο FWHM) και τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η μεγάλη απόδοση ανίχνευσης και το χαμηλό κόστος.



Εικόνα 1.7: Σύγκριση διακριτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή Ge(Li) και ενός ανιχνευτή NaI(Tl) [Philippot J.Cl., 1970]

Η εμφάνιση των διευρυμένων κορυφών στα φάσματα του NaI(Tl) έναντι των αντίστοιχα πολύ στενών κορυφών στα φάσματα του ανιχνευτή Ge (Εικόνα 1.7) οφείλεται στη διαφορετική ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία του σήματος. Στην περίπτωση των ανιχνευτών σπινθηρισμού NaI(Tl) απαιτείται ενέργεια 100 eV για τη συλλογή του φωτός, που οδηγεί σε μεγάλες στατιστικές διακυμάνσεις, ενώ για τη συλλογή φορτίου στους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης απαιτείται πολύ χαμηλότερη ενέργεια, της τάξης των μερικών eV (3 eV στους ανιχνευτές Ge(Li) - HPGe).

1.3 Μετρήσεις μέσω φασματοσκοπίας-γ στο θαλάσσιο περιβάλλον

1.3.1 Εργαστηριακή μέθοδος φασματοσκοπίας-γ

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για μετρήσεις ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι η μέθοδος της φασματοσκοπίας ακτίνων-γ. Τεχνικές έχουν αναπτυχθεί τόσο για μετρήσεις φασματοσκοπίας-γ *in-situ* αλλά πολύ περισσότερη πληροφορία βρίσκεται στη βιβλιογραφία που αφορά σε τεχνικές δειγματοληψίας και μέτρησης των δειγμάτων στο εργαστήριο. Η παραδοσιακή εργαστηριακή ανάλυση είναι μια μέθοδος χρονοβόρα και απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις και τεχνογνωσία για την επεξεργασία των δειγμάτων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Η λήψη των δειγμάτων γίνεται με χρήση βαρέων μηχανημάτων και πολλές φορές απαιτείται η βοήθεια εξειδικευμένου προσωπικού (δύτες). Τα δείγματα μεταφέρονται στο εργαστήριο για μετρήσεις. Οι διεργασίες επεξεργασίας τους που απαιτούνται για τη μέτρηση φασματοσκοπίας-γ, είναι περίπλοκες ενώ ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι τη μέτρηση ξεπερνά τις τρεις εβδομάδες. Η μέτρηση φασματοσκοπίας-γ πραγματοποιείται συνήθως με χρήση ανιχνευτών υψηλής διακριτικής ικανότητας (HPGe). Μια τυπική ανιχνευτική διάταξη φασματοσκοπίας-γ γερμανίου στο εργαστήριο περιλαμβάνει τρία μέρη: το ανιχνευτικό σύστημα, ένα κιβώτιο ηλεκτρικών μονάδων πυρηνικής φασματοσκοπίας υπό μορφή ειδικών πλαισίων (Nuclear Instrument Module, NIM) και το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής των δεδομένων. Στο πλαίσιο NIM προσαρτώνται και τροφοδοτούνται με κατάλληλη τάση το προστατευτικό των ηλεκτρονικών της διάταξης, το τροφοδοτικό υψηλής τάσης, ο ενισχυτής του σήματος εξόδου καθώς και το σύστημα μετατροπής και καταγραφής παλμών (ADC/MCA). Τα δεδομένα τελικά αποθηκεύονται σε μορφή φάσματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y). Λεπτομέρειες για τις μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων στο εργαστήριο δίνονται στο κεφάλαιο 2.

1.3.2 *In-situ* μέθοδοι φασματοσκοπίας-γ

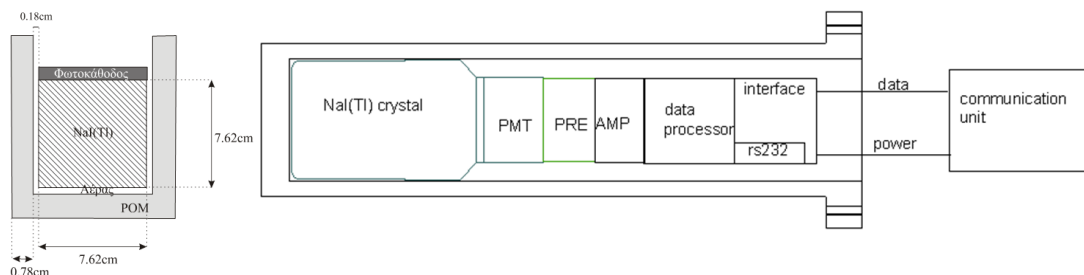
Η πραγματοποίηση των μετρήσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον *in-situ* έναντι των παραδοσιακών τεχνικών δειγματοληψίας και μέτρησης στο εργαστήριο παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα που συνοψίζονται ως εξής:

1. Δυνατότητα συνεχούς καταγραφής και παρακολούθησης συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων σε επιβαρημένες περιοχές (π.χ. πυρηνικά εργοστάσια).
2. Χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών σε μικρό χρονικό διάστημα.
3. Γρήγορο εντοπισμό επιβαρυνμένων σημείων (π.χ. εντοπισμός ‘θαμμένων’ πυρηνικών αποβλήτων) σε μια περιοχή.

Παρά τα πλεονεκτήματα της *in-situ* μεθόδου, τα ήδη ανεπτυγμένα *in-situ* συστήματα ανίχνευσης ακτινοβολίας-γ που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι λιγοστά όσον αφορά στη δυνατότητα εφαρμογής τους στο θαλάσσιο περιβάλλον για μακροχρόνιες μετρήσεις. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες ανιχνευτικές διατάξεις, σε εφαρμογές μακροπρόθεσμων μετρήσεων, στηρίζονται σε κρυστάλλους NaI(Tl). Η χρήση των σπινθηριστών οφείλεται σε κάποια πλεονεκτήματα που συγκεντρώνουν έναντι άλλου τύπου ανιχνευτών και είναι η μικρή κατανάλωση, η καλή απόδοση ανίχνευσης και το χαμηλότερο κόστος της διάθεσης και κατασκευής τους. Τέτοιοι κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται τα τελευταία έτη σε πολλές θαλάσσιες εφαρμογές όπως τις συνεχείς μετρήσεις με τη βοήθεια μετρητικών θαλάσσιων σταθμών [Tsabaris C. and Ballas D., 2005; Tsabaris C., 2008; Wedekind 1999]. Ανιχνευτές HPGe έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης στο υδάτινο περιβάλλον [Povinec P.P. et al., 1996], αλλά η ψύξη του κρυστάλλου δεν θα μπορούσε να καταστήσει ένα τέτοιο σύστημα εφαρμόσιμο για μακροπρόθεσμες μετρήσεις. Τα ανεπτυγμένα συστήματα που βασίζονται σε εναλλακτικές μεθόδους για την ψύξη του κρυστάλλου (μηχανική ψύξη –τεχνολογία peltier), παρουσιάζουν περιορισμούς στο βάθος πόντισης, στην ποιότητα των φασμάτων (μείωση διακριτικής ικανότητας) και η χρήση τέτοιων συστημάτων με κρυστάλλους τυπικών διαστάσεων αυξάνει τις απαιτήσεις σε κατανάλωση ενέργειας, με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους για μακροπρόθεσμες μετρήσεις στο υδάτινο περιβάλλον να παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες.

1.4 Το ανιχνευτικό σύστημα KATEPINA

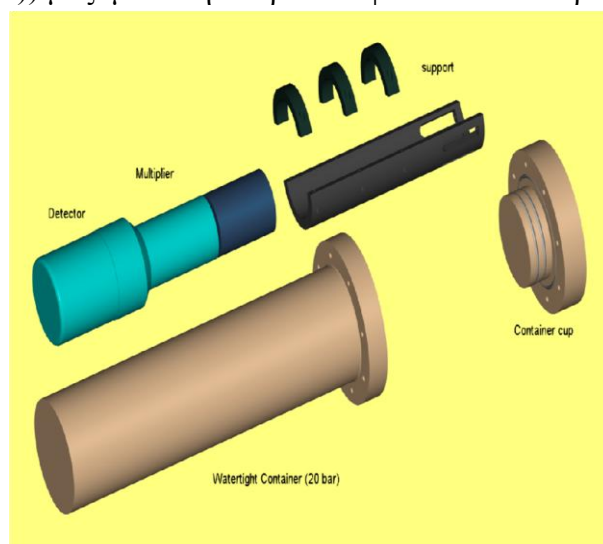
Το ανιχνευτικό σύστημα KATEPINA (καινοτόμος αισθητήρας τεχνητής & φυσικής ραδιενέργειας) χρησιμοποιείται για *in-situ* μετρήσεις ραδιενέργειας στο υδάτινο περιβάλλον και αποτελεί πρωτότυπο σύστημα ανίχνευσης ακτίνων-γ που αναπτύχθηκε στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε [Tsabaris C., 2008b], με σκοπό τη μέτρηση ραδιονουκλιδίων (φυσικών και τεχνητών) χαμηλής συγκέντρωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον, σε εφαρμογές ωκεανογραφίας και ραδιοπροστασίας.



Εικόνα 1.8. Σχηματική αναπαράσταση του περιβλήματος και των επιμέρους μερών του συστήματος KATEPINA [Bagatelas C. et al.,2010; Tsabaris C., 2008b]

Το σύστημα αποτελείται από έναν 3" × 3" κρύσταλλο NaI(Tl), που συνδέεται με ένα φωτοπολλαπλασιαστή (PMT), με προενισχυτή (PRE) και παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, μαζί με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά για την ενίσχυση των σημάτων και την αποθήκευση δεδομένων (Εικόνα 1.8). Η έξοδος του προενισχυτή συνδέεται με ενισχυτή (AMP) διαμόρφωσης σήματος ειδικά σχεδιασμένο για υποβρύχιες εφαρμογές. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή εισάγεται σε πολυδιαυλικό αναλυτή (MCA) και στη συνέχεια, αφού το σήμα μετατραπεί σε ψηφιακό με κατάλληλο μετατροπέα (ADC), αποθηκεύεται σε ειδική μνήμη με μικροελεγκτή που είναι ενσωματωμένος στο σύστημα, ώστε να λειτουργεί αυτόνομα (χωρίς τη βοήθεια υπολογιστή). Στην εικόνα 1.9 δίνεται σχηματική αναπαράσταση των επιμέρους μερών (κρύσταλλος, ηλεκτρονικές μονάδες) του συστήματος KATEPINA όπως τοποθετούνται σε ειδικό στεγανό περίβλημα.

Το στεγανό κυλινδρικό περίβλημα (Container) που στεγάζει το σύστημα του κρυστάλλου (NaI(Tl)) μαζί με τα ηλεκτρονικά φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση του εξωτερικού και του εσωτερικού του συστήματος φασματοσκοπίας-γ KATEPINA. Στο κάτω μέρος της εικόνας φαίνεται το εξωτερικό μέρος (Acetal) και στο πάνω μέρος της εικόνας φαίνονται ο κρύσταλλος ενσωματωμένος με τον φωτοπολλαπλασιαστή και η στήριξή τους [Tsabaris C. and Thanos I., 2004]

Το περίβλημα που χρησιμοποιείται για την στεγανότητα του συστήματος αποτελείται από Ακετάλη ($C_7H_{14}O_2$). Το πολυμερές κυλινδρικού σχήματος ακτίνας 7.8 cm περιβάλλει τον κρύσταλλο, ενώ ανάμεσα στο πολυμερές και στον κρύσταλλο υπάρχει κενός χώρος (αέρας) 1.8 mm. Η επιλογή του υλικού του περιβλήματος έγινε λόγω των χαρακτηριστικών του – χαμηλή πυκνότητα (0.825 gr/cc) και χαμηλό ατομικό βάρος ($Z=6, 8, 1$) – που επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση της απορρόφησης των ακτίνων-γ στο υλικό του περιβλήματος καθώς και λόγω της ανοχής του στις πιέσεις που δημιουργούνται σε μεγάλα βάθη. Το σύστημα δύναται να φτάσει έως και σε βάθος 400 m στη θάλασσα (ονομαστικό βάθος). Οι παράμετροι των διατάξεων στο εσωτερικό του κυλίνδρου (διάμετρος, πάχος, υλικό, ανθεκτικότητα, μέγιστη απόκλιση, κλπ.) υπολογίστηκαν σύμφωνα με το πρόγραμμα Seal Design (Apple Rubber Products Inc.), για βέλτιστη απόδοση και στεγανοποίηση [Tsabaris C. and

Thanos I., 2004]. Τα ηλεκτρονικά είναι κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να εγκατασταθούν μέσα στο προστατευτικό περίβλημα διαστάσεων 85 mm × 550 mm και ώστε η κατανάλωση ισχύος να είναι μικρή (~1.2-1.4 W). Τα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

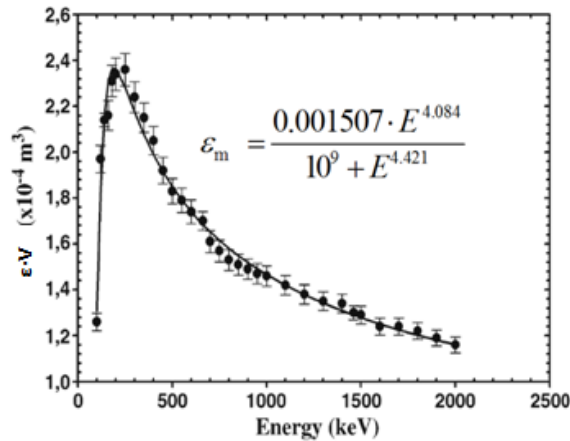
Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονικών που αφορούν στη διαμόρφωση του χρόνου του παλμού (shaping time), στη διόρθωση της μορφής του (pole-zero cancellation) και στην αποκατάσταση του υποβάθρου (base-line restoration) αλλάζουν ανάλογα με την εφαρμογή (χαμηλά, υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας) για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων του συστήματος (βέλτιστη ενεργειακή διακριτική ικανότητα, ενεργειακή απόδοση και νεκρό χρόνο συλλογής δεδομένων).

| | |
|---|---|
| Τύπος αισθητήρων | 3"x3" NaI(Tl) |
| Ενεργειακό εύρος | Διευθετήσιμη μέγιστη και ελάχιστη ενέργεια της ανίχνευσης (με τη μέγιστη τιμή 3000 keV) |
| ADC | Διαδοχική προσέγγιση 10bit |
| Υψηλή τάση | Εσωτερικά ελεγχόμενη 100-1200V |
| Φασματοσκοπία | Διευθετήσιμα 256, 512 ή 1024 κανάλια |
| Ενίσχυση | Εσωτερικά ελεγχόμενη |
| Νεκρός χρόνος | <0.5% στο υδάτινο περιβάλλον |
| Ενεργειακή διακριτική ικανότητα (140.5 keV) | 10% |
| Ενεργειακή διακριτική ικανότητα (661.6 keV) | 6.5 % |
| Θερμοκρασία λειτουργίας | -5°C έως +50°C |
| Κατανάλωση | 1.2-1.4W |
| Εξοδος | Χρόνος, ημερομηνία, cps, φάσμα, νεκρός χρόνος |
| Προστατευτικό κάλυμμα | Σχήμα "κύλινδρος", υλικό "acetal" |

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος KATEPINA

Το σύστημα έχει βαθμονομηθεί ως προς την ενέργεια (energy calibration), την ενεργειακή του διακριτική ικανότητα (FWHM calibration) και την ανιχνευτική του απόδοση (full energy peak efficiency) για μετρήσεις στον αέρα στο εργαστήριο με χρήση σημειακών πηγών σε απόσταση 13.1 cm, που καλύπτουν το ενεργειακό φάσμα λειτουργίας του συστήματος [Tsabaris C., 2008b]. Το σύστημα είναι βαθμονομημένο και για μετρήσεις στο υδάτινο περιβάλλον [Bagatelas C. et al., 2010]. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε στερεά γωνία 4π ποντίζοντας το σύστημα στη θάλασσα σε απόσταση (περίπου 1.2 m) από την επιφάνειά της (γεωμετρία μέτρησης 4π).

Η βαθμονόμηση του συστήματος ως προς την ανιχνευτική του απόδοση για μετρήσεις στο υδάτινο περιβάλλον πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με λήψη φασμάτων στο νερό σε κατάλληλα διαμορφωμένη δεξαμενή χωρητικότητας 5.5.



Γράφημα 1.1: Η καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος KATEPINA στο θαλάσσιο περιβάλλον [Bagatelas C. et al., 2010]

Για τη λήψη των φασμάτων διαλύθηκαν, σε όγκο νερού 4.5 m^3 , στη δεξαμενή 4 ραδιονουκλίδια (^{137}Cs , ^{40}K , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In) γνωστής συγκέντρωσης, ενώ κατόπιν πραγματοποιήθηκαν και προσομοιώσεις με τον κώδικα Monte Carlo, GEANT4, για τον προσδιορισμό της απόδοσης σε όλο το εύρος ενεργειών που λειτουργεί το σύστημα. Από τα πειραματικά και τα θεωρητικά δεδομένα προέκυψε η καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος για μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον (Γράφημα 1. 1). Οι τιμές της ανιχνευτικής απόδοσης $\varepsilon \cdot V$ δίνονται σε m^3 λαμβάνοντας υπόψη τον ενεργό όγκο V_{eff} από τον οποίο καταφθάνουν γεγονότα στον ανιχνευτή σε κάθε ενέργεια. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης (ενεργότητα ανά μονάδα όγκου) ραδιονουκλιδίων r (Bq/m^3) στο υδάτινο περιβάλλον υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$r(\text{Bq}/\text{m}^3) = \frac{\text{CPS}}{\varepsilon \cdot V \cdot I_\gamma} \quad (1.11)$$

Όπου:

CPS: Ο ρυθμός ανίχνευσης γεγονότων (Counts Per Second), από μία ή περισσότερες ακτίνες-γ ενός ραδιονουκλιδίου, σε μια φωτοκορυφή στο *in-situ* φάσμα νερού

$\varepsilon \cdot V$: Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος, σε μονάδες m^3 , για μετρήσεις στο νερό σε στερεά γωνία 4π (γεωμετρία μέτρησης 4π)

I_γ : Η πιθανότητα εκπομπής μιας ακτίνας-γ συγκεκριμένης ενέργειας ανά διάσπαση

Το ανιχνευτικό σύστημα KATEPINA έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για μετρήσεις ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον σε διάφορες εφαρμογές, ενδεικτικά αναφέρονται: Η παρακολούθηση, μέσω της συνεχούς καταγραφής, των συγκεντρώσεων των θυγατρικών ραδιονουκλιδίων του Ραδονίου, ^{222}Rn , σε υπόγεια νερά, για την παρακολούθηση των μεταβολών στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων αυτών και τη συσχέτιση τους με φαινόμενα μικροσεισμικότητας [Tsabaris C. et al., 2011a]. Η παρακολούθηση των θυγατρικών ραδιονουκλιδίων του

Ραδονίου, ^{222}Rn , σε υποθαλάσσιες εκροές υπογείων υδάτων, στη Μεσόγειο (Χαλκίδα, Στούπα, Κόρφος, Cabbe) με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας (εύρεση επιπέδων ραδιενέργειας, ποσοτικοποίηση γλυκού νερού) της υποθαλάσσιας πηγής [Tsabaris C., et al., 2010].

Κεφάλαιο 2 Περιγραφή Μεθοδολογίας

Όπως αναφέρθηκε στον πρόλογο της εργασίας, σκοπός είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας η οποία θα αξιοποιείται για ποσοτικές, *in-situ* μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο ίζημα, με χρήση του υποθαλάσσιου συστήματος φασματοσκοπίας-γ KATEPINA [Tsabaris C., et al., 2008b]. Η μέθοδος της *in-situ* φασματοσκοπίας-γ παρέχει άμεσα αποτελέσματα καθώς και τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών, με χαμηλότερο κόστος σε μικρότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις συνήθεις εργαστηριακές μεθόδους φασματοσκοπίας-γ, όπου απαιτούνται χρονοβόρες διαδικασίες επεξεργασίας και ανάλυσης μεγάλου όγκου δειγμάτων. Με την *in-situ* μέθοδο, είναι δυνατή η άμεση εκτίμηση της ραδιο-οικολογικής κατάστασης του πυθμένα σε μια περιοχή καθώς και η εύρεση πιθανών σημείων υψηλών συγκεντρώσεων (hot-spots). Επιπλέον, το σύστημα KATEPINA έχει βαθμονομηθεί ήδη για ποσοτικές μετρήσεις ραδιονουκλιδίων στο νερό [Bagatelas C., et al., 2010] και έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε σειρά περιβαλλοντικών εφαρμογών.

Το πρώτο βήμα που απαιτείται ώστε να είναι εφικτή η ποσοτική *in-situ* μέτρηση ραδιονουκλιδίων στο ίζημα είναι η βαθμονόμηση του συστήματος ως προς την ανιχνευτική του απόδοση. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλα τα στάδια της μεθόδου τα οποία είναι: Μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες στο πεδίο (ποντίζοντας το σύστημα κατάλληλα στον πυθμένα της θάλασσας), μετρήσεις στο εργαστήριο (χρησιμοποιώντας ανιχνευτή HPGe) καθώς και θεωρητικοί υπολογισμοί με εφαρμογή της μεθόδου MC (κώδικας προσομοίωσης). Στην ενότητα 2.1 περιγράφεται η κύρια σχέση υπολογισμού της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος, εξηγούνται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται και δίνονται λεπτομέρειες των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κάθε παραμέτρου. Στην ενότητα 2.2 δίνεται λεπτομερής περιγραφή των προσομοιώσεων, που υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του κώδικα MCNP5, για την αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος στο ίζημα και την θεωρητική εκτίμησή της σε ενεργειακό εύρος 300-2600 keV.

2.1 Περιγραφή πειραματικού προσδιορισμού της ανιχνευτικής απόδοσης (ϵ_v) του *in-situ* συστήματος στο ίζημα

Η ποσοτικοποίηση αποτελεσμάτων φασματοσκοπίας- γ επιτυγχάνεται αν είναι γνωστή η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος που χρησιμοποιείται στην λήψη φασμάτων για τη συγκεκριμένη μέτρηση. Οι διαδικασίες που υλοποιούνται για την εύρεση της ανιχνευτικής απόδοσης είναι κοινές στα συστήματα φασματοσκοπίας- γ και αφορούν, στη γενικότερη περίπτωση, στην εύρεση της απόδοσης φωτοκορυφής ϵ , στις ενέργειες ακτίνων- γ του ραδιονουκλιδίου για τον προσδιορισμό της ενεργότητάς του. Στην περίπτωση περιβαλλοντικών δειγμάτων, η ποσότητα αυτή χρειάζεται να προσδιοριστεί σε μια ευρεία περιοχή ενεργειών, σε κάθε κορυφή φωτοηλεκτρικής απορρόφησης του φάσματος και πραγματοποιείται, συνήθως, σε ελεγχόμενο περιβάλλον στο εργαστήριο. Για τη βαθμονόμηση λαμβάνονται δεδομένα (φάσμα) από πηγές γνωστής συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (πηγή αναφοράς) ίδιων χαρακτηριστικών (γεωμετρία, πυκνότητα, υλικά). Η διαδικασία αυτή, για τους σκοπούς της εργασίας, θα απαιτούσε την κατασκευή βαθμονομημένης πηγής ιζήματος και υπερκείμενου νερού μεγάλου όγκου. Η επιλογή όμως αυτή καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη και δαπανηρή ενώ εμπλέκει και πρότυπα που αφορούν στον κανονισμό ακτινοπροστασίας (πρότυπα ασφαλείας στη μεταφορά ραδιενεργών πηγών, πρότυπα διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων). Για τους παραπάνω λόγους, η βαθμονόμηση έγινε απευθείας στο πεδίο με τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω.

2.1.1 Μεθοδολογία εύρεσης της ϵ_v

Γενικά, η βαθμονόμηση ενός συστήματος φασματοσκοπίας- γ για μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων έγκειται στον πειραματικό προσδιορισμό της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος συναρτήσει της ενέργειας στην επιλεγμένη γεωμετρία μέτρησης. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η μέτρηση πηγής αναφοράς (π.χ. ^{152}Eu) εκτεταμένου όγκου σύμφωνα με την επιθυμητή στερεά γωνία μέτρησης (Ω). Χρησιμοποιώντας την τιμή της ενεργότητας της πηγής (A) ως τιμή αναφοράς, η απόδοση ϵ (Ω , E_γ) του συστήματος σε μία φωτοκορυφή ενέργειας ακτίνων- γ (E_γ) με πιθανότητα εκπομπής (I_γ), υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\epsilon(\Omega, E_\gamma) = \frac{cps_{net}(\Omega, E_\gamma)}{I_\gamma(E_\gamma) \cdot A} \quad (2.1)$$

Όπου η ποσότητα cps_{net} αναφέρεται στον συνολικό ρυθμό ανίχνευσης γεγονότων που ανιχνεύονται στη εν λόγω φωτοκορυφή και προκύπτει από την ανάλυση των φωτοκορυφών του φάσματος βαθμονόμησης.

Η παρασκευή μίας πηγής αναφοράς των διαστάσεων που απαιτείται για την βαθμονόμηση στη δεδομένη εφαρμογή, περιπλέκεται από το γεγονός ότι οι μετρήσεις γίνονται στο νερό. Η εξομοίωση των συνθηκών αυτών είναι δύσκολο να

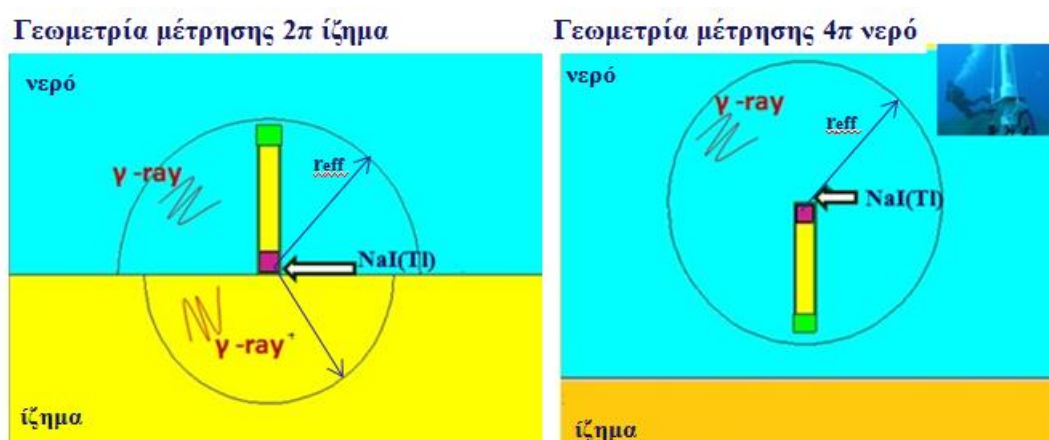
πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο. Για τους παραπάνω λόγους η βαθμονόμηση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες μέτρησης, ποντίζοντας το σύστημα κατάλληλα στον πυθμένα της θάλασσας. Τα πιο βασικά προβλήματα που προκύπτουν κατά την επιλογή αυτή είναι :

1. Δεν είναι γνωστή η συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων στο ιζήμα βαθμονόμησης και έτσι δεν υπάρχουν, εκ των προτέρων, τιμές αναφοράς.
2. Καθώς η μέτρηση γίνεται σε πραγματικές συνθήκες, η γεωμετρία μέτρησης πρέπει να επιλεγεί με γνώμονα την ανίχνευση ακτίνων-γ που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια που βρίσκονται στο ιζήμα και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση εκείνων που ανιχνεύονται από ραδιονουκλίδια που βρίσκονται στο νερό.
3. Επιπροσθέτως η γεωμετρία μέτρησης, πρέπει να επιτυγχάνεται εύκολα κατά την επιχειρησιακή πόντιση του συστήματος, και να μην απαιτεί τεχνικές πολύπλοκες που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο το τεχνικό προσωπικό και το σύστημα.
4. Προαπαιτείται η γνώση των χαρακτηριστικών (πυκνότητα, ποσόστωση νερού και σύσταση) του ιζήματος από τα οποία εξαρτάται η απόδοση του συστήματος.

Η επίλυση του προβλήματος 1 δόθηκε με την αξιοποίηση ήδη βαθμονομημένου, για μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων ιζήματος, εργαστηριακού ανιχνευτή φασματοσκοπίας-γ υψηλής καθαρότητας Γερμανίου (HPGe) για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων στο επιφανειακό δείγμα ιζήματος. Το συγκεκριμένο σύστημα (HPGe) επιλέχθηκε λόγω της υψηλής διακριτικής του ικανότητας ώστε να είναι δυνατή η διάκριση στο φάσμα, μέσω των αντίστοιχων φωτοκορυφών, όλων των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν στο δείγμα και επομένως να μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς στη βαθμονόμηση του *in-situ* συστήματος.

Σε σχέση με το πρόβλημα 2, η ιδανική γεωμετρία μέτρησης θα ήταν η τοποθέτηση του συστήματος εντός του ιζήματος σε βάθος τέτοιο που το υπερκείμενο ιζήμα να απορροφούσε πλήρως τις ακτίνες-γ που εκπέμπονται από ραδιονουκλίδια στο νερό. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα θα μετρούσε (σε γεωμετρία 4π) εντός του ιζήματος γεγονότα που θα προέρχονται αποκλειστικά από το ιζήμα. Ωστόσο, μια τέτοια γεωμετρία απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές διαδικασίες και ειδικό προσωπικό για την πόντιση και την τοποθέτηση του συστήματος κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα. Επιπρόσθετα, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά πυθμένων σκληρού υποστρώματος θα καθιστούσαν μια τέτοια προσπάθεια ακόμα πιο πολύπλοκη και δαπανηρή. Έτσι, ως βέλτιστη λύση των προβλημάτων 2 και 3 επιλέχθηκε η κατακόρυφη τοποθέτηση του συστήματος με τέτοιον τρόπο ώστε το ανιχνευτικό σύστημα να ακουμπά στο ιζήμα χωρίς να εισχωρεί σε αυτό (γεωμετρία επαφής). Η υιοθέτηση μιας τέτοιας γεωμετρίας δεν απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές πόντισης ωστόσο, το σύστημα κατά τη διάρκεια της μέτρησης ανιχνεύει ακτίνες-γ προερχόμενες από ένα όγκο ιζήματος υπό μια ημισφαιρική γεωμετρία (γεωμετρία 2π) αλλά και ακτίνες-γ προερχόμενες από το υπερκείμενο νερό σε μια εξίσου ημισφαιρική γεωμετρία 2π (εικόνα 2.1 αριστερά).

Είναι λοιπόν αναγκαία η εύρεση των γεγονότων που προέρχονται από ραδιονουκλίδια στο νερό, με σκοπό την αφαίρεσή τους από τη μέτρηση στο ίζημα. Αυτό πραγματοποιείται λαμβάνοντας επιπλέον ένα φάσμα και στο νερό (εικόνα 2.1 δεξιά). Για τη μέτρηση στο υπερκείμενο νερό το σύστημα τοποθετείται σε απόσταση από τον πυθμένα έτσι ώστε η συλλογή γεγονότων να γίνεται από έναν όγκο νερού που περιβάλλει τον ανιχνευτή υπό μια σφαιρική γεωμετρία (γεωμετρία 4π). Καθώς, ο συνολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_{tot} στα δυο υλικά (νερό και ίζημα) διαφέρει, η απόσταση που μια ακτίνα- γ διανύει σε κάθε ένα υλικό μέχρι να απορροφηθεί πλήρως (r_{eff}) αλλάζει. Ως αποτέλεσμα οι όγκοι νερού και ιζήματος από τους οποίους συλλέγονται ακτίνες- γ από το σύστημα (ενεργοί όγκοι) **διαφέρουν** λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δυο υλικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν στην πυκνότητα και στη σύσταση του νερού και του ιζήματος.



Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση των *in-situ* μετρήσεων με το σύστημα KATEPINA.

Στην περίπτωση του νερού τα χαρακτηριστικά αυτά είναι σταθερά (π.χ. $\rho=1.026\text{g/cc}$) ενώ παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις στο ίζημα (π.χ. $\rho=1.1-2.9\text{ g/cc}$)· κάποιες φορές ακόμη και στην ίδια περιοχή. Οι διακυμάνσεις στο ίζημα αποδίδονται στις περίπλοκες διαδικασίες διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών των ιζημάτων όπως η αλλαγή των φυσικών αποθέσεων σε αυτό (changing depositional environments) αλλά και η ύπαρξη ισχυρών ρευμάτων στην περιοχή [Preda M. and Cox M.J., 2005]. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών, καθώς και η ύπαρξη ή μη ομοιογένειας του ιζήματος κατά μήκος και κατά βάθος του πυθμένα, είναι απαραίτητα στοιχεία για την βαθμονόμηση. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε δεδομένη η ομοιογένεια του ιζήματος και στο σημείο βαθμονόμησης συλλέχθηκε επιφανειακό δείγμα ιζήματος για τον πειραματικό προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω, στην *υποενότητα 2.1.3*.

Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για μετρήσεις στο νερό $\epsilon \cdot V$, υπολογίζεται ως η απόδοση φωτοκορυφής ϵ πολλαπλασιασμένη επί τον συνολικό ‘ενεργό’ όγκο νερού V (m^3). Έτσι, τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο νερό εκφράζονται σε Bq/m^3 . Στην περίπτωση του ιζήματος η ανιχνευτική απόδοση ϵ_v υπολογίζεται από το γινόμενο της απόδοσης φωτοκορυφής ϵ πολλαπλασιασμένη επί τον συνολικό ‘ενεργό’ όγκο του ιζήματος V (L). Για το λόγο

αυτό τα αποτελέσματα της μέτρησης αναφοράς των συγκεντρώσεων, A_{ref} , του δείγματος ιζήματος στο εργαστήριο υπολογίζονται σε μονάδες ρυθμού διασπάσεων ανά μονάδα όγκου του δείγματος Bq/L και το τελικό αποτέλεσμα της ϵ_V υπολογίζεται σε μονάδες όγκου και συγκεκριμένα, σε λίτρα.

Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για μετρήσεις στο ίζημα με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, ϵ_V , συγκεντρώνονται στην παρακάτω σχέση υπολογισμού όπως σχεδιάστηκε με κατάλληλο μετασχηματισμό της σχέσης 2.1 :

$$\epsilon_V = \frac{cps_s^y - \frac{1}{2} \cdot cps_w^y}{I_\gamma \cdot A_{ref}} \left| \begin{array}{l} KATERINA \\ HPGe \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Όπου:

cps_s^y : Ο ρυθμός ανίχνευσης γεγονότων (από μια ή περισσότερες ακτίνες-γ ενός ραδιονουκλιδίου), σε μια φωτοκορυφή στο *in-situ* φάσμα ιζήματος (γεωμετρία 2π).

cps_w^y : Ο ρυθμός ανίχνευσης γεγονότων (από μια ή περισσότερες ακτίνες-γ ενός ραδιονουκλιδίου), σε μια φωτοκορυφή στο *in-situ* φάσμα νερού (4π γεωμετρία). Σε περίπτωση όπου οι χρόνοι συλλογής δεδομένων (σε νερό και ίζημα) διαφέρουν θα πρέπει να προηγηθεί κανονικοποίηση των γεγονότων ως προς τον ίδιο χρόνο.

A_{ref} : Η συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου στο ίζημα (A_{ref}), όπως προσδιορίστηκε με βαθμονομημένο ανιχνευτή στο εργαστήριο.

Ο παρονομαστής της σχέσης είναι το γινόμενο της πιθανότητας εκπομπής (I_γ), επί τη συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο ίζημα μετρημένη σε μονάδες (Bq/L). Η ποσότητα cps_w^y πρέπει όπως συζητήθηκε παραπάνω να αφαιρεθεί με κάποιο τρόπο από τη μέτρηση του ιζήματος. Η αφαίρεση γίνεται όπως περιγράφεται στη σχέση υπολογισμού πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα cps_w^y με έναν παράγοντα $\frac{1}{2}$. Είναι φανερό ότι τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο νερό, ανιχνεύονται στη μέτρηση του ιζήματος υπό μια γεωμετρία- 2π (εικόνα 2.1). Όμως η μέτρηση στο νερό πραγματοποιείται σε γεωμετρία- 4π . Ο παράγοντας $\frac{1}{2}$ είναι αποτέλεσμα του γεωμετρικού λόγου $2\pi/4\pi$ και αποτελεί την κανονικοποίηση της ποσότητας cps_w^y από τη γεωμετρία μέτρησης 4π του φάσματος νερού (σφαίρα γεγονότων) στη ζητούμενη γεωμετρία μέτρησης 2π (ημισφαίριο γεγονότων). Η κανονικοποίηση αυτή (αφαίρεση των μισών από τα συνολικά γεγονότα που ανιχνεύονται στο φάσμα του νερού) καθίσταται δυνατή, εφόσον η παρουσία ραδιονουκλιδίων στο νερό είναι σταθερή στο χώρο σε μικρές χρονικές περιόδους και επειδή υπάρχει σφαιρική συμμετρία στη μέτρηση των ραδιονουκλιδίων στο νερό.

2.1.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης του *in-situ* συστήματος

Η πειραματική βαθμονόμηση, όπως προαναφέρθηκε, σχεδιάστηκε να γίνει ποντίζοντας το σύστημα στο πεδίο για τη λήψη φασμάτων στο νερό και στο ίζημα. Στην ενότητα αυτή δίνεται η περιγραφή των διατάξεων για τις μετρήσεις *in-situ* με το σύστημα KATERINA στο θαλάσσιο περιβάλλον (ίζημα και νερό). Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της διάταξης όπου τοποθετείται το σύστημα για τη λήψη των δυο φασμάτων δίνονται στην *εικόνα 2.2α* και *2.2β* στο ίζημα και στο νερό αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2α: Πειραματική διάταξη μέτρησης στο ίζημα

Εικόνα 2.2β: Πειραματική διάταξη μέτρησης στο νερό

Στις δυο παραπάνω εικόνες εμφανίζονται το σύστημα, που περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά (μνήμες, φωτοπολλαπλασιαστής) και τον κρύσταλλο NaI θωρακισμένα κατάλληλα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την προστασία του συστήματος από το νερό (Acetal) καθώς και την τροφοδοσία του συστήματος ώστε να λειτουργεί αυτόνομα. Η μεταλλική βάση στήριξης χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της σταθερότητας και της κάθετης πόντισης του συστήματος.

Η μέτρηση του ρυθμού καταγραφόμενων γεγονότων από το νερό γίνεται σε 4π γεωμετρία, δηλαδή στον ανιχνευτή καταφθάνουν ακτίνες-γ από μια σφαίρα νερού γύρω από αυτόν διαμέτρου που εξαρτάται από την ενέργεια των ακτίνων αυτών. Αντίθετα για τη μέτρηση στο ίζημα ο ανιχνευτής στρέφεται ανάποδα ώστε ο κρύσταλλος NaI να είναι χαμηλά στη βάση στήριξης. Αφού βυθιστεί το σύστημα στον πυθμένα της θάλασσας γίνεται μέτρηση σε γεωμετρία-2π, δηλαδή καταγράφονται ακτίνες-γ από μισή σφαίρα ιζήματος και μισή σφαίρα νερού διαφορετικής διαμέτρου για τα δυο διαφορετικά υλικά (βλέπε *εικόνα 2.1*). Τα γεγονότα που καταφθάνουν στον ανιχνευτή από το ημισφαίριο νερού θεωρούνται ως υπόβαθρο στη μέτρηση του ιζήματος και αφαιρούνται από τη μέτρηση του ιζήματος.

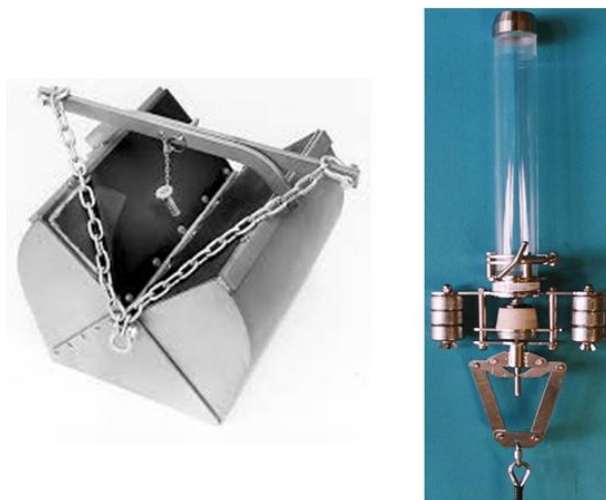
2.1.3 Μέθοδοι δειγματοληψίας θαλάσσιου ιζήματος

Για τις μετρήσεις στο εργαστήριο προαπαιτείται η συλλογή από τον πυθμένα δείγματος ιζήματος. Οι τεχνικές συλλογής ιζήματος από τον πυθμένα της θάλασσας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με το βάθος από το οποίο λαμβάνεται το δείγμα, οι οποίες δίνονται παρακάτω:

1. Η συλλογή κατακόρυφης στήλης (βάθος μέσα στο ιζήμα $> 20\text{cm}$) ιζήματος από τον πυθμένα (coring technique), που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως συλλογή 'πυρήνα' (core) ιζήματος, χρησιμοποιώντας ειδικά σχεδιασμένους κυλινδρικούς σωλήνες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πυρήνων που διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο στην οποία στηρίζεται η συλλογή. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι είναι οι πυρηνολήπτες βαρύτητας (gravity corers). Ο τρόπος λειτουργίας των πυρηνοληπτών βαρύτητας είναι ο εξής: Πλαστικό κυλινδρικό δοχείο, το οποίο στο κάτω άκρο του η διάμετρος είναι πιο μικρή έτσι ώστε να ασφαλιζεται ο πυρήνας και να μη διαφεύγει μέρος του ιζήματος, ενώ στο πάνω άκρο του είναι προσαρτημένο ένα βαρίδι που βοηθά τον πυρηνολήπτη να αποκτήσει την κατάλληλη ταχύτητα έτσι ώστε να βυθιστεί κάθετα στον πυθμένα, στην θέση που έχει προεπιλεχθεί (βλέπε το σχήμα της εικόνας 2.3 δεξιά). Εφόσον είναι σίγουρο ότι η πυρηνοληψία είναι επιτυχημένη επαναφέρεται ο πυρηνολήπτης στην επιφάνεια. Άλλοι χρησιμοποιούμενοι τύποι πυρηνοληπτών είναι οι hydraulically damped corers, box corers, piston corers, freeze corers, vibro corers, και drilling corers και στηρίζονται αντίστοιχα σε αντίστοιχες μεθόδους για τη συλλογή του ιζήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες βρίσκονται σε βιβλιογραφία [IAEA, 2003; Murdoch A. and MacKnight S.D., 1991].

2. Η τεχνική αρπαγής ιζήματος (Grab sampling), που χρησιμοποιείται για συλλογή επιφανειακών ή ημιεπιφανειακών (near surface) ιζημάτων (βάθος μέσα στο ιζήμα $< 20\text{cm}$). Όπου είναι δυνατό προτιμάται η δειγματοληψία να γίνεται από εξειδικευμένο δύτε. Επειδή δεν γίνεται να πραγματοποιηθεί πάντα η συλλογή από δύτε (μεγάλα βάθη, τεχνικές δυσκολίες) έχουν κατασκευαστεί ειδικές διατάξεις αρπαγής για τη συλλογή επιφανειακών ιζημάτων. Οι δειγματολήπτες αρπαγής (grabbers) χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συλλογή πιο πρόσφατων ιζημάτων που εναποτίθενται στα επιφανειακά στρώματα στον πυθμένα. Ειδικά μέτρα μπορούν να ληφθούν στο σχεδιασμό, για την ελαχιστοποίηση της μόλυνσης του ιζήματος κατά τη δειγματοληψία, όπως η χρήση δειγματολήπτη κατασκευασμένου από ανοξείδωτο ατσάλι, με επιστρώσεις τεφλόν σε όλες τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τα ιζήματα καθώς και επικάλυψη πολυαιθυλενίου των καλωδίων που χρησιμοποιούνται στη βύθιση και ανάκτηση του συστήματος. Αν ο δειγματολήπτης έχει σχεδιαστεί σωστά, καμία απώλεια του παγιδευμένου ιζήματος (διαρροή των λεπτόκοκκων ιζημάτων) και το νερού που ενυπάρχει σε αυτό δε θα υπάρχει από την αρπαγή μέχρι και μετά την ανάκτηση από τον πυθμένα της θάλασσας. Φωτογραφία ενός τέτοιου συστήματος δίνεται στην εικόνα 2. 3 (αριστερά). Περισσότερες λεπτομέρειες για τα

υπάρχοντα συστήματα και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά που δίνεται [UNEP, 1995].



Εικόνα 2. 3 : Διατάξεις συλλογής ιζήματος

Και στις δυο περιπτώσεις η προσέγγιση του πυθμένα για τη συλλογή του ιζήματος θα πρέπει να γίνεται με τρόπο που να μη διαταράσσει τη διεπιφάνεια νερού – ιζήματος. Μετά τη συλλογή το δείγμα μεταφέρεται με κατάλληλα δοχεία, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες των χαρακτηριστικών του, στο εργαστήριο. Η ανάλυση του ιζήματος μπορεί να γίνει άμεσα ή μετά από καιρό. Στην δεύτερη περίπτωση τα δείγματα διατηρούνται σε κατάλληλους χώρους (ψυγεία) σε καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

2.1.4 Επεξεργασία και ανάλυση δειγμάτων θαλάσσιου ιζήματος στο εργαστήριο

Οι κύριες φυσικές παράμετροι που μελετώνται στο ίζημα είναι α) η σύσταση του ιζήματος (κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία), β) η κατανομή του κόκκου του ιζήματος (κοκκομετρική ανάλυση), γ) η εύρεση του πορώδους του ιζήματος και δ) ο προσδιορισμός της πυκνότητας του. Τα τελευταία χρόνια, οι φυσικοχημικές ιδιότητες των θαλάσσιων δειγμάτων (νερό, ίζημα) μελετώνται σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων σε αυτά. Ενδεικτικά αναφέρονται η επιλεκτική προσρόφηση, κάποιων ραδιονουκλιδίων όπως τα ^{137}Cs και ^{210}Pb , στους λεπτόκοκκους σχηματισμούς (διάμετρος κόκκου $< 63\mu\text{m}$) [He Q. and Walling D. E., 1996], και των στοιχείων της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{238}U σε λασπώδη ιζήματα (fine grain $< 53\mu\text{m}$) τα οποία βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις έναντι των συγκεντρώσεων που βρίσκονται σε χοντρόκοκκα ιζήματα στην ίδια περιοχή. Τέλος η συγκέντρωση του ^{40}K στο θαλάσσιο ίζημα συσχετίζεται με τα ραδιονουκλίδια της σειράς του Θορίου [Tsabaris C. et al., 2011b].

Στα πλαίσια της μελέτης της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA, απαιτήθηκε ο προσδιορισμός κάποιων φυσικών ποσοτήτων του

ιζήματος, από τις οποίες εξαρτάται η ανίχνευση ραδιονουκλιδίων, και συγκεκριμένα των κύριων στοιχείων στο ίζημα (εύρεση χημικής σύστασης), της ποσόστωσης νερού σε αυτό, όπως αυτή ορίζεται παρακάτω, και της πυκνότητάς του. Απαραίτητη κρίθηκε επίσης και η μελέτη της ομοιογένειας των χαρακτηριστικών αυτών του ιζήματος στον πυθμένα σε μια ευρεία κλίμακα στην υπό μελέτη περιοχή. Οι φυσικές παράμετροι προσδιορίστηκαν σε δείγμα επιφανειακού ιζήματος που συλλέχθηκε στο ίδιο σημείο όπου λήφθηκαν τα *in-situ* φάσματα (σημείο βαθμονόμησης). Τέλος, ένας ακόμη λόγος υλοποίησης των μετρήσεων χαρακτηρισμού του ιζήματος, είναι ότι ο προσδιορισμός αυτών των ποσοτήτων αποτελεί προϋπόθεση για τους θεωρητικούς υπολογισμούς, για τη σωστή περιγραφή του ιζήματος στον κώδικα MCNP5, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 2.3.

Στην υποενότητα αυτή περιγράφονται οι χρησιμοποιούμενοι, στη βιβλιογραφία, μέθοδοι προσδιορισμού κάθε μιας από τις παραμέτρους που προσδιορίστηκαν στο συλλεγμένο ίζημα ξεχωριστά.

Η πρώτη παράμετρος που προσδιορίζεται είναι η **ποσόστωση νερού** και η **πυκνότητα ιζήματος** στο δείγμα, μετρήσεις οι οποίες προηγούνται της μέτρησης φασματοσκοπίας-γ. Αυτό συμβαίνει γιατί για τη μέτρηση της φασματοσκοπίας-γ, το δείγμα θα πρέπει να υποστεί επεξεργασία ώστε να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά (πυκνότητα, κοκκομετρία) της πηγής αναφοράς με την οποία έχει γίνει η βαθμονόμηση του ανιχνευτή και κατά την επεξεργασία αυτή, υπάρχει αλλοίωση του δείγματος ως προς κάποιες παραμέτρους (ποσόστωση νερού, αλλοίωση διαμέτρου κόκκου).

Ο όρος **ποσόστωση νερού** αναφέρεται στον λόγο της μάζας του νερού που υπάρχει στο δείγμα, ως προς συνολική μάζα του δείγματος ιζήματος, το άθροισμα δηλαδή των μαζών του ιζήματος και του νερού που περιέχεται σε αυτό. Για τον υπολογισμό της ποσόστωσης νερού σε ένα δείγμα ιζήματος, όπως φάνηκε από την παραπάνω περιγραφή θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις της μάζας του συνολικού δείγματος, δηλαδή πριν την αφαίρεση της ποσότητας νερού που περιέχεται σε αυτό καθώς και της μάζας του νερού αφού το νερό αφαιρεθεί κατάλληλα από το δείγμα. Η απομάκρυνση του νερού από το ίζημα επιτυγχάνεται με αποξήρανση του δείγματος με τρεις διαφορετικές διαδικασίες, αποξήρανση με τοποθέτηση του δείγματος σε ειδικά σχεδιασμένους κλιβάνους σε θερμοκρασίες 65-70°C (oven drying), με τη μέθοδο της κρυοξήρανσης ή λυοφιλίωσης, όπου το δείγμα ψύχεται σε χαμηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια απομακρύνεται το νερό με (freeze-drying/lyophilization) και με χρήση αέρα (θερμοκρασία περιβάλλοντος). Και στις τρεις περιπτώσεις στο στεγνό δείγμα κατακρατούνται άλατα που αρχικά περιέχονται στο νερό στην περίπτωση όπου το δείγμα ιζήματος προέρχεται από το θαλάσσιο περιβάλλον (θαλάσσιο ίζημα) [UNEP, 1995]. Στον τελικό υπολογισμό της ποσόστωσης νερού θα πρέπει να εισαχθεί ένας παράγοντας διόρθωσης για τα άλατα του νερού. Η αναλυτική σχέση υπολογισμού της ποσόστωσης νερού, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, δίνεται στη σχέση 2.3 όπου η απομάκρυνση του νερού έγινε με τοποθέτηση του δείγματος σε κλίβανο:

$$MC = 100\% \cdot \frac{WWT - WDT}{WWT - WT} \quad (2.3)$$

Όπου:

MC : η ποσόστωση του νερού

WWT : η υγρή μάζα (νερό και ίζημα και αλάτι) του δείγματος με απόβαρο

WDT : η μάζα του ξηρού δείγματος (ίζημα και αλάτι) με απόβαρο

WT : το βάρος του δοχείου (απόβαρο)

Στη σχέση αυτή υπολογισμού δε λαμβάνεται υπόψη παράγοντας διόρθωσης ως προς την αλατότητα, του θαλασσινού νερού σε αντίθεση με άλλες σχέσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία [Winters J.W., 1988; UNEP, 1995]. Η διόρθωση ως προς τη μάζα των αλάτων στο δείγμα μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν τον υπολογισμό της ποσόστωσης νερού [Dadey K. A., et al., 1992] :

$$Ms = M - Mf = \frac{(Md - s \cdot M)}{(1 - s)} \quad (2.4)$$

όπου:

M : η συνολική μάζα του υγρού δείγματος (WWT – Wt)

Ms : η μάζα του ιζήματος (αφού έχει γίνει αφαίρεση του νερού και της μάζας των αλάτων)

Mf = η μάζα του θαλασσινού νερού (συμπεριλαμβάνεται η μάζα των αλάτων)

Md = η στεγνή μάζα του ιζήματος με τα άλατα

s = η αλατότητα του θαλασσινού νερού (εκφρασμένη ως εξής : 35 ppt = 0.035)

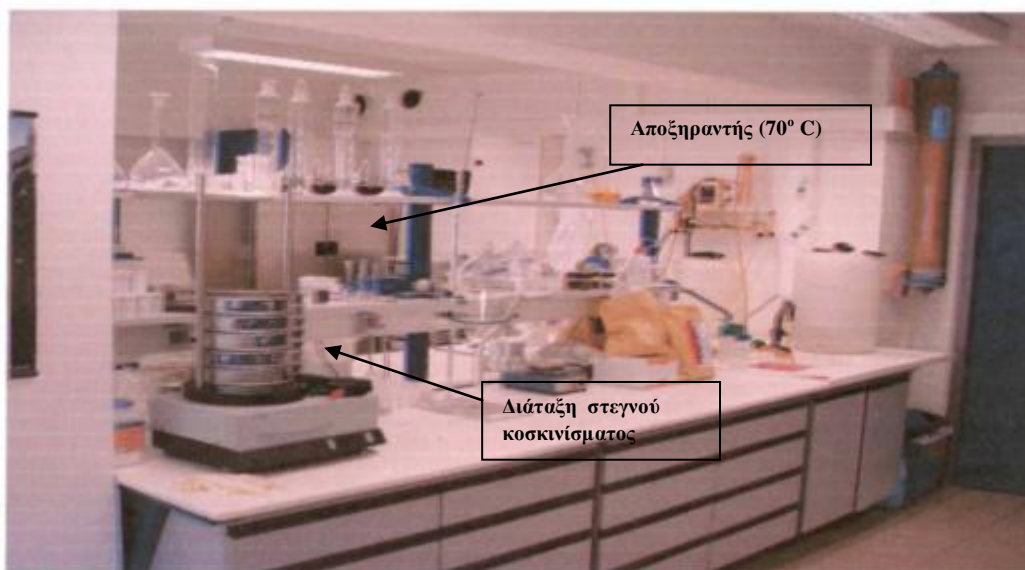
Μια παρεμφερής παράμετρος της ποσόστωσης νερού στο θαλασσινό ίζημα είναι το **πορώδες** ενός ιζήματος που ορίζεται ως ο λόγος του κενού όγκου που υπάρχει σε ένα δείγμα ιζήματος προς τον συνολικό όγκο του δείγματος. Ο κενός όγκος αναφέρεται στην ύπαρξη αέρα τόσο ανάμεσα στους κόκκους του ιζήματος (interporosity), αλλά και στον κενό χώρο (αέρα) που υπάρχει μέσα σε αυτούς (intraporosity) [Breitzke M., 2006]. Στα ιζήματα χερσαίας προέλευσης (χερσογενή) παρατηρείται η πρώτη περίπτωση κατανομής του αέρα ανάμεσα στους κόκκους, ενώ σε ιζήματα πλούσια σε ασβέστιο παρατηρούνται και τα δυο παραπάνω φαινόμενα. Στην περίπτωση όπου μελετάται το πορώδες σε θαλάσσιο ίζημα, η ποσότητα του αέρα ανάμεσα στους κόκκους αντικαθίσταται από νερό, και η μέτρηση του κενού όγκου αντιστοιχεί στην πραγματικότητα στην εύρεση του όγκου που καταλαμβάνει το νερό στο δείγμα. Στην ποσότητα αυτή θα πρέπει να γίνουν διορθώσεις ως προς την αλατότητα του δείγματος, εφόσον αναφερόμαστε σε θαλάσσια δείγματα. Τέλος, με βάση την παραπάνω ανάλυση γίνεται κατανοητό ότι ο προσδιορισμός του πορώδους σε ένα δεδομένο δείγμα ιζήματος μπορεί να γίνει και έμμεσα, αν είναι γνωστή η ποσόστωση νερού και η πυκνότητα στο δείγμα αυτό [Blum P., 1997] ενώ θα πρέπει

να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό κατάλληλος παράγοντας διόρθωσης για την αλατότητα.

Ο προσδιορισμός των παραπάνω ποσοτήτων στο εργαστήριο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί ειδικά όργανα ώστε να υπολογίζονται οι παραπάνω ποσότητες είτε πάνω στο πλοίο (on-site), κατά τη διάρκεια δειγματοληπιών [Mikada H., et al.,2004] ή στο πεδίο (*in-situ*) ποντίζοντας κατάλληλα όργανα στον βυθό [Gealy E. L. ; Evans H. B., 1965].

Η δεύτερη παράμετρος αφορά στα **κύρια στοιχεία του ιζήματος** από τα οποία αυτό αποτελείται. Ο όρος κύρια στοιχεία χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει, τα κύρια σύμπλοκα (σε μορφή οξειδίων) των στοιχείων που βρίσκονται στο ίζημα σε υπολογίσιμα ποσοστά, από τα ιχνοστοιχεία του ιζήματος (κυρίως μέταλλα), τα οποία βρίσκονται σε πολύ μικρότερη ποσότητα στο ίζημα και υπολογίζονται ως αριθμός ευρεθέντων σωματιδίων στα 1000000 σωματίδια (ppm). Η σύσταση των κυρίων στοιχείων στα υποθαλάσσια ιζήματα είναι συνάρτηση των σχετικών αναλογιών των ορυκτών που σχηματίζουν τα ιζήματα αυτά. Τα κύρια ορυκτά είναι τα λεπτόκοκκα αργιλλοπυριτικά ορυκτά (clays), το βιογενές CaCO₃ και το βιογενές SiO₂.

Οι πλέον διαδεδομένες αναλυτικές ορυκτολογικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για χημικές αναλύσεις (προσδιορισμός κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων) στα ιζήματα είναι ο φθορισμός ακτίνων-X (XRF), η περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD) και η μέθοδος ατομικής απορρόφησης (AAS). Η μέθοδος φθορισμού ακτίνων-X (X-Ray Fluorescence) χρησιμοποιείται ευρέως στον προσδιορισμό των κύριων στοιχείων του ιζήματος και της ορυκτής φάσης κάθε στοιχείου στο δείγμα του ιζήματος και χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή. Η ανίχνευση των στοιχείων στηρίζεται στην διέγερση των ατόμων του υλικού με αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X από τα στοιχεία του. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι ένα διάγραμμα (φάσμα) στο οποίο φαίνονται όλα τα στοιχεία που ανιχνεύονται στο δείγμα. Η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με σχετικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας δείγματα αναφοράς. Έτσι από την ανάλυση του φάσματος προσδιορίζονται τα στοιχεία και το ποσοστό κάθε στοιχείου στο δείγμα. Η φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων-X είναι μέθοδος ταχείας πολυστοιχειακής ανάλυσης, έχει όμως μειωμένη ευαισθησία σε σχέση με τις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Οι μέθοδοι XRF και XRD αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες αναλυτικές μεθόδους για χημικές αναλύσεις σε λεπτόκοκκα ιζήματα (silt, clay) και στα ιζήματα πλούσια σε άνθρακα (carbonates), όπου ο χαρακτηρισμός τους δεν μπορεί να γίνει με χρήση άλλων μεθόδων. Αντίθετα, ο προσδιορισμός των κύριων στοιχείων (major components) στο χοντρόκοκκο μέρος του ιζήματος (sand) μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη μέθοδο της μικροσκοπίας [Preda M. and Cox M.E, 2005].

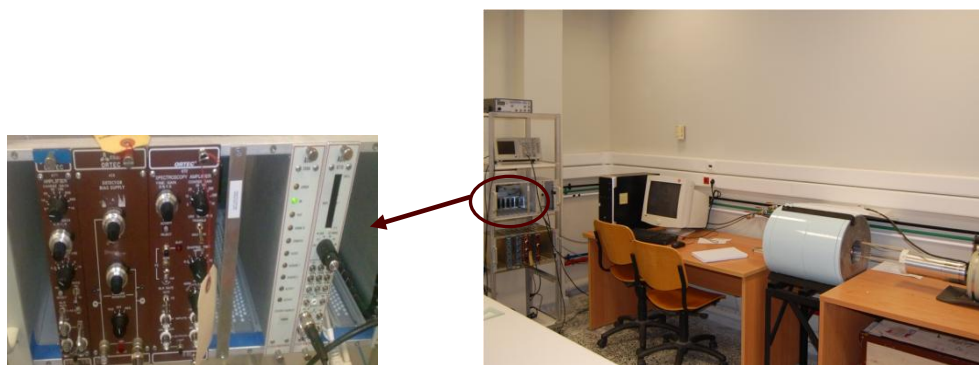


Εικόνα 2.4: Εργαστήριο ιζηματολογίας στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών

2.1.5 Εργαστηριακή μέτρηση της ενεργότητας στο ίζημα

Η πιο σημαντική μέτρηση στο συλλεγμένο ίζημα, στα πλαίσια της εργασίας, ήταν ο **προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων** σε αυτό, που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της εν του *in-situ* συστήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε βαθμονομημένη διάταξη για αυτές τις μετρήσεις (περιβαλλοντικά δείγματα ιζήματος) φασματοσκοπίας-γ. Η διάταξη περιλαμβάνει ανιχνευτή υψηλής καθαρότητας Γερμανίου (HPGe), κατάλληλες ηλεκτρονικές μονάδες επεξεργασίας του σήματος και κυλινδρική θωράκιση Μολύβδου που περιβάλλει τον ανιχνευτή για τη μείωση του υποβάθρου (κοσμική ακτινοβολία, ακτινοβολία δωματίου). Η βαθμονόμηση του ανιχνευτή έγινε χρησιμοποιώντας εκτεταμένη βαθμονομημένη πηγή $^{152/54}\text{Eu}$ που έχει παρασκευαστεί παλαιότερα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής αλλά και οι φυσικές της ιδιότητες (πυκνότητα, σύσταση) τηρούν τις απαιτήσεις της μέτρησης [Tsabaris C. et al., 2007]. Η πηγή τοποθετήθηκε στη γεωμετρία μέτρησης των περιβαλλοντικών δειγμάτων (ειδικά σχεδιασμένα δοχεία για μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων) και δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη σύσταση και την πυκνότητά της. Η μέτρηση του δείγματος ιζήματος στο εργαστήριο, έγινε μετά από την επεξεργασία του ιζήματος ώστε τα χαρακτηριστικά του να βρίσκονται σε συμφωνία με τα χαρακτηριστικά (υφή, πυκνότητα, σύσταση) της πηγής βαθμονόμησης $^{152/54}\text{Eu}$ του ανιχνευτή (HPGe). Κατά την επεξεργασία του ιζήματος δεν υπάρχει αλλοίωση των χαρακτηριστικών του δείγματος ιζήματος, που σχετίζονται με τη συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων σε αυτό. Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονικών συστημάτων έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες μετρήσεων ραδιενέργειας εκτεταμένων περιβαλλοντικών δειγμάτων ιζήματος χαμηλής ενεργότητας. Αυτό σημαίνει ότι έπρεπε να ληφθεί

υπόψη ο μικρός ρυθμός καταγραφής γεγονότων (counting rate), η απώλεια γεγονότων φωτοκορυφής (attenuation losses) και η μείωση της διακριτικής ικανότητας (resolution degradation), λόγω των πολλαπλών σκεδάσεων των φωτονίων μέσα στο ίδιο το υλικό του εκτεταμένου δείγματος και της χαμηλής περιεκτικότητας σε ραδιονουκλίδια. Μετά από έλεγχο στον παλμογράφο, του ηλεκτρικού σήματος εξόδου προ-ενισχυτή και ενισχυτή, ακολουθεί η ρύθμιση των ηλεκτρονικών για τη μέτρηση. Λόγω των περιορισμών της μέτρησης όπως συζητήθηκε παραπάνω, καθορίστηκε μονοπολικός Gaussian παλμός εξόδου, θετικής πόλωσης και χρόνου διαμόρφωσης (shaping time) 6 μ s. Ο βέλτιστος χρόνος μέτρησης καθορίστηκε πειραματικά στις 24 h για κάθε δείγμα, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο 3, ενώ τα 4096 διαθέσιμα κανάλια του πολυδιαυλικού αναλυτή (MCA) καλύπτουν ένα ενεργειακό εύρος από 0 έως 2000 keV περίπου. Το ενεργειακό εύρος επιλέχθηκε κατάλληλα ώστε να ικανοποιηθούν παράλληλα δυο απαιτήσεις: Η ανίχνευση να γίνεται σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο ενεργειακό εύρος και παράλληλα να διαχωρίζονται όλες οι κορυφές στο φάσμα.



Εικόνα 2.5 : Η ανιχνευτική διάταξη μέτρησης του επιφανειακού δείγματος ιζήματος στο Ε.Μ.Π.

Στην τελική διάταξη που υλοποιήθηκε, επιτεύχθηκε ανίχνευση ενεργειών από 40keV (^{210}Pb (45.5 keV)) έως και 1890 keV (^{214}Bi (1764.5 keV)), ενώ ορίστηκε ενεργειακό εύρος 2.93KeV ανά κανάλι. Η πειραματική διάταξη της μέτρησης διακρίνεται στην *εικόνα 2.5*. Στην ίδια εικόνα παρουσιάζονται σε λεπτομέρεια (αριστερά) οι χρησιμοποιούμενες ηλεκτρονικές μονάδες για τη συλλογή και επεξεργασία του σήματος. Η ανάλυση των πειραματικών φασμάτων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος φασματοσκοπίας SPECTRW. Λεπτομέρειες της λειτουργίας του προγράμματος SPECTRW δίνονται στη βιβλιογραφία [Kalfas C., 2011]. Τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης παρουσιάζονται στην *ενότητα 3.3.2*.

2.2 Θεωρητική εκτίμηση της ϵ_v μέσω προσομοίωσης Monte Carlo (MC)

Στην ενότητα αυτή δίνεται η περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθείται για την εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος ϵ_v , μέσω MC προσομοιώσεων και συγκεκριμένα μέσω του κώδικα MCNP5. Αυτό επιτυγχάνεται αναπαράγοντας με τον κώδικα την πειραματική μέτρηση περιγράφοντας λεπτομερώς όλες τις παραμέτρους που μπορεί να επηρεάζουν το θεωρητικό αποτέλεσμα (**πηγή, ανιχνευτικό σύστημα, περιβάλλοντας χώρος**). Λόγω των πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση ϵ_v του συστήματος στο ίζημα και πρέπει να ληφθούν υπόψη, πριν την εφαρμογή του κώδικα στο ίζημα, σχεδιάστηκαν διαφορετικά θεωρητικά ‘πειράματα’ με σκοπό τον έλεγχο της ορθής αναπαράστασης στον κώδικα για κάθε παράμετρο ξεχωριστά, ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη εοπία των θεωρητικών υπολογισμών. Τα θεωρητικά ‘πειράματα’ που σχεδιάστηκαν συνοψίζονται στα εξής βήματα :

1. Κατασκευή του μοντέλου ανιχνευτή στον κώδικα (μοντέλο MC ανιχνευτή) χρησιμοποιώντας τα υλικά και τις διαστάσεις που δίνονται από τον κατασκευαστή και εφαρμογή του, στην αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης του συστήματος στο νερό. Στο θεωρητικό πείραμα αυτό γίνεται έλεγχος της ορθής αναπαραγωγής και παρακολούθησης των γεγονότων στο νερό.
2. Στις πραγματικές συνθήκες μέτρησης τόσο στο νερό όσο και στο ίζημα εισάγεται η έννοια του ενεργού όγκου για την περιγραφή της ανίχνευσης των ραδιονουκλιδίων με το *in-situ* σύστημα. Στο τελευταίο αυτό ‘πείραμα’ ελέγχεται ο σωστός ορισμός της πηγής στον κώδικα μέσω της προσομοίωσης των μετρήσεων σε πραγματικές συνθήκες στο νερό. Μετά τον έλεγχο των θεωρητικών αποτελεσμάτων το μοντέλο προσομοίωσης εφαρμόζεται στην εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος σε ένα μεγαλύτερο εύρος ενεργειών.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά, η ανάπτυξη στον κώδικα κατάλληλου μοντέλου ανιχνευτή, η εφαρμογή του μοντέλου για την αναπαραγωγή προηγούμενων δεδομένων βαθμονόμησης του *in-situ* συστήματος στο νερό, και η μεθοδολογία για την εφαρμογή του μοντέλου στην εκτίμηση της ϵ_v , που αφορά σε μετρήσεις ραδιενέργειας σε θαλάσσιο ίζημα (γεωμετρία-2π).

2.2.1 Ο κώδικας Monte Carlo N-Particle transport Code (MCNP5)

Η τεχνική Monte Carlo είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιεί ακολουθίες τυχαίων αριθμών για να προσομοιώσει τα πιθανά γεγονότα μιας διαδικασίας. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας- γ με την ύλη είναι μια στατιστική διαδικασία και η προσομοίωσή της με την τεχνική αυτή θα μπορούσε να εκληφθεί ως ένα θεωρητικό ‘πείραμα’. Κάθε γεγονός ενός πειράματος θεωρείται ως μια ξεχωριστή ιστορία που παρακολουθείται σε κάθε στάδιο της πορείας του ως την απορρόφησή του. Η πορεία της κάθε ιστορίας καθορίζεται από κατανομές πιθανότητας που επιλέγονται με τυχαίο τρόπο χρησιμοποιώντας δεδομένα που λαμβάνονται από

βιβλιοθήκες. Η μέθοδος προσομοίωσης με τη χρήση υπολογιστικών κωδικών (γενικοί και εξειδικευμένοι κώδικες) αποτελεί μια γρήγορη και ευέλικτη μέθοδο που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

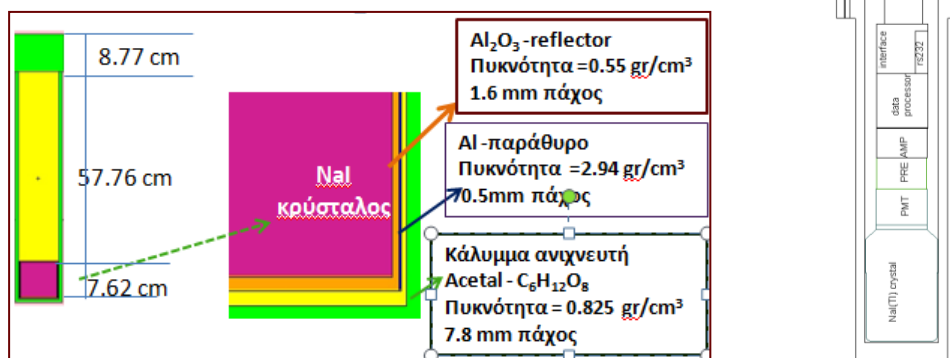
Ο κώδικας MCNP5 μεταφοράς νετρονίων και φωτονίων χρησιμοποιείται για τη διάδοση-μεταφορά νετρονίων, ηλεκτρονίων, φωτονίων ή τη μεταφορά συνδυασμένων φωτονίων/ νετρονίων /ηλεκτρονίων. Τα πλεονεκτήματά του έναντι άλλων διαθέσιμων κωδικών είναι η δυνατότητα δημιουργίας περίπλοκης γεωμετρίας αποτελούμενης από πολλά γεωμετρικά στοιχεία όπως συναντάται συνήθως σε ένα πραγματικό πείραμα, η ευκολία στη χρήση του με την παροχή έτοιμων συναρτήσεων υπολογισμού, και η ευρεία συλλογή βιβλιοθηκών με ενεργές διατομές και άλλα χρήσιμα δεδομένα. Ο κώδικας και οι βιβλιοθήκες δεδομένων προέρχονται από την τράπεζα δεδομένων NEA Data Bank (Γαλλία).

Ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεταφοράς σωματιδίων με ενέργειες από 1 keV μέχρι 100 MeV σε υλικά των οποίων οι παράμετροι όπως επιφάνεια, γεωμετρική έκταση, πυκνότητα, θέση καθορίζονται από τον χρήστη. Ο χρήστης καθορίζει επίσης τα γεωμετρικά στοιχεία του προβλήματος που ορίζονται από επιφάνειες πρώτου και δεύτερου ή ελλειπτικές τετάρτου βαθμού, καθώς και τα δεδομένα της πηγής όπως ενέργεια, χρόνος, έκταση, στοιχείο εκκίνησης (cell), είδος ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που μελετάται η μεταφορά φωτονίων ο κώδικας λαμβάνει υπόψη τη σύμφωνη σκέδαση Rayleigh, τη σκέδαση Compton, τη φωτοηλεκτρική απορρόφηση και το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης που συνοδεύεται με τοπική εκπομπή ακτινοβολίας λόγω εξαύλωσης. Στις χαμηλές ενέργειες φωτονίων $E_\gamma < 200 \text{ keV}$ το κυρίαρχο φαινόμενο είναι η φωτοηλεκτρική απορρόφηση ενώ για ενέργειες $E_\gamma > 8 \text{ MeV}$ επικρατεί η δίδυμη γένεση. Στο ενδιάμεσο ενεργειακό παράθυρο επικρατεί κυρίως η σκέδαση Compton. Για τη μεταφορά ηλεκτρονίων λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα όπως η παραγωγή ποζιτρονίων, η εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-X και η ακτινοβολίας πέδησης. Ο κώδικας χρησιμοποιεί έτοιμες συναρτήσεις όπως είναι οι εικονικοί ανιχνευτές ύψους παλμών (F8 tally), μετρητές μήκους διαδρομής F6, F4 τους οποίους χρησιμοποιεί για να υπολογίσει την ποσότητα που ζητήθηκε από τον χρήστη πχ. ρεύμα σε μια επιφάνεια, ροή σωματιδίων αποτιθέμενη ενέργεια, επαγόμενη θερμότητα σε μια περιοχή και άλλα.

Το αποτέλεσμα του MCNP5 συνοδεύεται από μια ποσότητα σ που αποτελεί το σχετικό σφάλμα της μέτρησης, $\delta x/x$, αφού το αποτέλεσμα υποβληθεί σε δέκα στατιστικούς ελέγχους. Το αποτέλεσμα του κώδικα θεωρείται αποδεκτό εάν η τιμή του σ δεν είναι μεγαλύτερη από 0.05 για σημειακό ανιχνευτή και 0.1 για μη σημειακό ανιχνευτή [Los Alamos, 2003]. Η μείωση της ποσότητας σ επιτυγχάνεται με την αύξηση των γεγονότων N που δημιουργούνται και παρακολουθούνται στον κώδικα.

2.2.2 Ανάπτυξη του μοντέλου του *in-situ* ανιχνευτικού συστήματος

Σε κάθε θεωρητικό 'πείραμα' φασματοσκοπίας- γ το πρώτο σημαντικό βήμα είναι η λεπτομερής περιγραφή στον κώδικα των κύριων στοιχείων από τα οποία αποτελείται το ανιχνευτικό σύστημα (επιφάνειες, γεωμετρική έκταση, πυκνότητα, σύσταση). Με σκοπό την ανάπτυξη μοντέλου MC για το σύστημα KATEPINA, εισάγονται στον κώδικα: ο κρύσταλλος NaI(Tl), ο ανακλαστήρας Al_2O_3 , οι δυο μηχανισμοί στήριξης και προστασίας της διάταξης, το παράθυρο αλουμινίου Al γύρω από τον κρύσταλλο και το υλικό στεγανοποίησης (housing) από Ακετάλη $C_7H_{14}O_2$ (acetal). Τα μέρη της ανιχνευτικής διάταξης που αναπαραστάθηκαν στο MC μοντέλο, παρουσιάζονται στην εικόνα 2.6 καθώς και οι διαστάσεις και οι πυκνότητες των επιμέρους στοιχείων. Για την αναπαραγωγή των υλικών και των διαστάσεων του συστήματος εισάγονται στον κώδικα τα στοιχεία όπως δίνονται από τον κατασκευαστή. Δεξιά στην εικόνα δίνεται αναπαράσταση των ηλεκτρονικών μερών του συστήματος τα οποία ωστόσο δε συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο, καθώς δε θεωρήθηκε ότι η παράλειψη αυτή θα επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ίζημα. Η έκταση που καταλαμβάνουν τα ηλεκτρονικά αντικαθίσταται από κενό χώρο (αέρα) στο μοντέλο MC (κίτρινο χρώμα στην εικόνα).



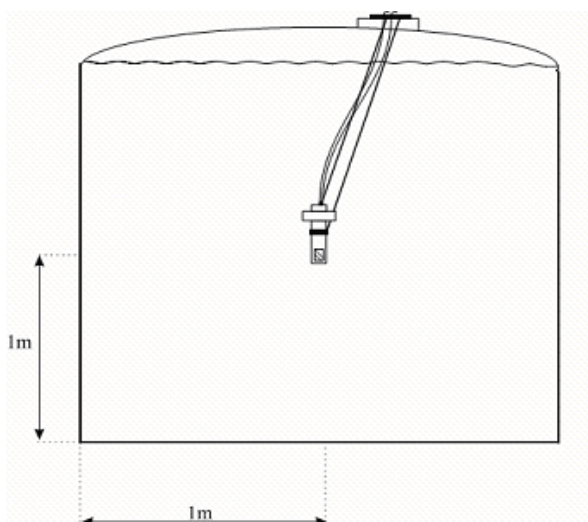
Εικόνα 2.6 : Αριστερά στην εικόνα δίνεται η αναπαραγωγή της ανιχνευτικής διάταξης στον κώδικα MCNP5. Δεξιά δίνεται σχηματική αναπαράσταση όλων των μερών της ανιχνευτικής διάταξης.

2.2.3 Εφαρμογή του μοντέλου σε γεωμετρία-4 π στο νερό

Ο έλεγχος λειτουργίας και ο προσδιορισμός της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο νερό έχει ήδη πραγματοποιηθεί παλιότερα [Tsabaris C. et al., 2008b]. Η πειραματική βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του ΕΜΠ, σε δεξαμενή κατάλληλων διαστάσεων, για την εξομοίωση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν πηγές ^{137}Cs , ^{99}Tc , ^{40}K γνωστής ενεργότητας σε μορφή διαλύματος. Τα πειραματικά φάσματα ελήφθησαν σε όγκο νερού περίπου 4.5 m^3 στην δεξαμενή. Μέσα στην δεξαμενή ποντίστηκε αντλία νερού, ώστε να είναι δυνατή η ανάδευση του νερού πριν από κάθε

μέτρηση για την καλύτερη ανάμιξη των τριών πρότυπων πηγών που προστέθηκαν στο νερό για την βαθμονόμηση του συστήματος. Στην εικόνα 2.7 φαίνεται η δεξαμενή, στο μέσο της οποίας τοποθετήθηκε κατάλληλα το ανιχνευτικό σύστημα. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με προσομοιώσεις MC χρησιμοποιώντας τον κώδικα GEANT4. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης για την επέκταση της βαθμονόμησης του συστήματος σε ενεργειακό εύρος 100-2000 keV [Bagatelas C. et al., 2010].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε ο κώδικας MCNP5, τροποποιώντας κατάλληλα το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη εφαρμογή (βήμα α), για την αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και στη σύγκριση των εκτιμήσεων της ανιχνευτικής απόδοσης $\epsilon \cdot V$ στο νερό μεταξύ των δύο κωδίκων σε όλο το ενεργειακό εύρος. Οι δυο κώδικες ακολουθούν την ίδια συλλογιστική, όπως φαίνεται παρακάτω όπου δίνονται κάποιες λεπτομέρειες για τον κώδικα GEANT4 (όσον αφορά στην ανάπτυξη μοντέλου για τη δεδομένη εφαρμογή) και όλες οι παράμετροι (υλικά, γεωμετρίες, φυσική), εκτός των διαστάσεων του μοντέλου ανιχνευτή, κρατήθηκαν ίδιες και στους δύο κώδικες.



Εικόνα 2.7: Το ανιχνευτικό σύστημα μέσα στη δεξαμενή.

Ο κώδικας GEANT4 δημιουργεί φωτόνια ισοτροπικά σε όλο τον όγκο της δεξαμενής. Η δημιουργία των πηγών σε τυχαίες θέσεις, γίνεται με την βοήθεια μίας συνάρτησης τυχαίων αριθμών (random function). Στη συνέχεια εκπέμπεται φωτόνιο συγκεκριμένης ενέργειας που δίνεται από το χρήστη, σε τυχαία κατεύθυνση, η οποία καθορίζεται με την χρήση της ίδιας συνάρτησης τυχαίων αριθμών. Αφού εκπεμφθεί ένα φωτόνιο το πρόγραμμα παρακολουθεί την πορεία του μέσα στην δεξαμενή, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, έως ότου είτε αυτό να απορροφηθεί (η ενέργειά του γίνει το 10% της αρχικής), είτε φτάσει και αλληλεπιδράσει με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, οπότε και καταγράφεται στο ιστόγραμμα. Η πρώτη διαφορά στην περιγραφή της φυσικής, όπως εφαρμόστηκε στη δεδομένη εφαρμογή, μεταξύ των δύο κωδίκων είναι ότι στην περίπτωση του κώδικα

MCNP5 σταματάει η παρακολούθηση του αρχικού γεγονότος όταν η τελική ενέργεια είναι 1 keV ανεξάρτητα από την αρχική του ενέργεια. Η διαφορά αυτή αναμένεται να παρατηρηθεί πιο έντονα στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο κωδίκων στις χαμηλές ενέργειες. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με τον κώδικα MCNP5 υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης παρακολούθησης δύο ή και περισσότερων φωτονίων στον κώδικα GEANT4. Στην περίπτωση αυτή το πρόγραμμα δημιουργεί σε τυχαία θέση μία πηγή και εκπέμπει δύο ή τρία φωτόνια, διαφορετικών ενεργειών, ταυτόχρονα σε τυχαίες κατευθύνσεις. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική σε περιπτώσεις μελέτης πηγών με περίπλοκα διαγράμματα αποδιέγερσης, όπου η αποδιέγερση γίνεται με εκπομπή πολλών ακτίνων-γ σε σειρά (cascade). Για τη σωστή αναπαραγωγή φαινομένων πραγματικής άθροισης καθώς επίσης και σε περιπτώσεις μελέτης περίπλοκων γεωμετριών πηγής μεγάλης στερεάς γωνίας (όπως στην συγκεκριμένη εφαρμογή όπου η πηγή εκπέμπει γεγονότα σε γεωμετρία- 4π) είναι πιθανό να παρατηρηθούν και φαινόμενα τυχαίας άθροισης, δηλαδή να ανιχνευθούν ταυτόχρονα δύο φωτόνια ίδιας ενέργειας που καταφθάνουν στον ανιχνευτή από αντιδιαμετρικές θέσεις. Για την αναπαραγωγή του φάσματος χρησιμοποιώντας τον κώδικα MCNP5 εφαρμόστηκε η συνάρτηση ύψους παλμών, F8 tally, ενώ στο μοντέλο εισήχθησαν κατάλληλα τα πειραματικά δεδομένα του MCA και η συνάρτηση απόκρισης του συστήματος (FWHM) όπως προέκυψαν για τις μετρήσεις στο νερό. Στην παρούσα εφαρμογή το ενεργειακό εύρος καθορίστηκε στα 2.93 keV και υπολογίστηκε από το διαθέσιμο πλήθος των καναλιών, 1024 κανάλια και τη μέγιστη ανιχνεύσιμη ενέργεια που τέθηκε στα 3000keV.

Το τελευταίο θεωρητικό 'πείραμα' στον κώδικα, πριν την εφαρμογή του για την αναπαραγωγή των μετρήσεων στο ίζημα, ήταν η επέκταση σε μεγάλο εύρος ενεργειών, των εκτιμήσεων της απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο νερό μεταφέροντας παράλληλα το θεωρητικό 'πείραμα' από το εργαστήριο (μοντέλο MC στη δεξαμενή) στο πεδίο (θαλάσσιο περιβάλλον). Η διεργασία αυτή έχει ήδη υλοποιηθεί παλαιότερα με χρήση του κώδικα GEANT4, καθώς ήταν απαραίτητη για την βαθμονόμηση του συστήματος στο νερό. Η επανάληψη του θεωρητικού 'πειράματος' με τον κώδικα MCNP5 επέτρεψε τον έλεγχο της σωστής μεταφοράς της 'άπειρης' πηγής στο πεδίο (νερό, ίζημα) σε πεπερασμένη πηγή φωτονίων καθώς και την έγκυρη αναπαραγωγή των γεγονότων (γένεση φωτονίων, διάδοση). Η πραγματοποίηση του θεωρητικού 'πειράματος' αυτού αποτελεί το τελευταίο βήμα πριν την εφαρμογή του μοντέλου MC στο ίζημα.

Η σωστή περιγραφή της πηγής έγκειται στην εύρεση της απόστασης από την οποία δύναται να φτάσουν στον ανιχνευτή γεγονότα. Εφόσον τα αρχικά φωτόνια 'γεννιούνται' ισοτροπικά στον κώδικα μπορεί να υποθεθεί ότι η απόσταση αυτή θα είναι η ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις (σφαιρική συμμετρία) για μια συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίου, και θα αλλάζει μόνο με την ενέργεια και το μέσο διάδοσης λόγω των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων που θα λαμβάνουν χώρα στα διάφορα μέσα μέχρι να απορροφηθεί. Για το λόγο αυτό η πηγή περιγράφεται στον κώδικα ως ένας σφαιρικός όγκος γύρω από τον ανιχνευτή. Η ενεργός ακτίνα, που ορίζεται ως η απόσταση από την οποία καταφθάνουν γεγονότα στον κρύσταλλο, προσδιορίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος X-COM [Berger M. J. et al., 2010]. Στον κώδικα δηλώνονται ως παράμετροι η ενέργεια του

σωματιδίου και η χημική σύσταση του μέσου αλληλεπίδρασης. Για κάθε διαφορετική ενέργεια φωτονίου που μελετάται, γεννιούνται στον κώδικα MCNP5 γεγονότα σε τυχαίες θέσεις μέσα στον όγκο (σφαίρα) ο οποίος υπολογίζεται κατάλληλα, από τις τιμές συντελεστών εξασθένησης. Ο αριθμός των γεγονότων που δημιουργούνται, σε κάθε εκτέλεση του κώδικα για το εύρος ενεργειών 300-3000 keV, επιλέχθηκε κατάλληλα μετά από δοκιμές ώστε να ικανοποιούνται με τον καλύτερο τρόπο οι παρακάτω απαιτήσεις:

1. η ελαχιστοποίηση του σχετικού σφάλματος $\sigma\%$ των υπολογισμών
2. η σταθεροποίηση του σχετικού σφάλματος $\sigma\%$ σε μια συγκεκριμένη τιμή σε όλους τους υπολογισμούς
3. ο ικανοποιητικός υπολογιστικός χρόνος (computing time)

Η ικανοποίηση της δεύτερης απαίτησης είναι σημαντική στην ομοιομορφία των αποτελεσμάτων και επιτεύχθηκε διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των γεγονότων που δημιουργούνται ανά μονάδα όγκου (N/V) σε όλες τις εκτελέσεις του κώδικα για τις διαφορετικές ενέργειες (και ενεργούς όγκους).

2.2.4 Εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου MC σε γεωμετρία-2π στο ιζήμα

Το τελικό μοντέλο στο οποίο κατέληξαν τα παραπάνω θεωρητικά 'πειράματα', εφαρμόστηκε στην αναπαραγωγή της μέτρησης του ιζήματος με το *in-situ* σύστημα στον κώδικα MCNP5. Ο στόχος ήταν η εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος όπως αυτό εφαρμόστηκε, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για τη μέτρηση ραδιενέργειας στο ιζήμα. Οι τροποποιήσεις που θα πρέπει να γίνουν στο αρχείο εισόδου του κώδικα αφορούν σε διαφοροποιήσεις στα υλικά, εισάγοντας κατάλληλη περιγραφή του ιζήματος, καθώς και στην περιγραφή της πηγής (σύσταση, γεωμετρία). Η λήψη δεδομένων σε γεωμετρία μέτρησης 4π στο νερό περιγράφηκε στον κώδικα MCNP5 με την εισαγωγή σε αυτόν σφαιρικής πηγής για τη δημιουργία των αρχικών φωτονίων και την μετέπειτα παρακολούθηση όλων των γεγονότων. Για την αναπαραγωγή της μέτρησης στο ιζήμα θεωρήθηκε εκτεταμένη πηγή ημισφαιρικού σχήματος (καθώς η μέτρηση γίνεται σε γεωμετρία 2π με τον ανιχνευτή) που βρίσκεται σε επαφή με τον πυθμένα. Για την περιγραφή του ιζήματος ως μέσο απορρόφησης αλλά και ως το μέσο στο οποίο δημιουργούνται τα γεγονότα (πηγή ιζήματος), εισήχθησαν έπειτα από **κατάλληλη επεξεργασία**, τα δεδομένα των μετρήσεων υγρής πυκνότητας, της σύστασης του ιζήματος (μέσω XRF) και της ποσόστωσης νερού που βρέθηκαν στο επιφανειακό ιζήμα. Λεπτομέρειες της περιγραφής του ιζήματος στον κώδικα MCNP5 καθώς και τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων δίνονται στο κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 3 Βαθμονόμηση μεθόδου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη βαθμονόμηση του συστήματος, ως προς την ανιχνευτική του απόδοση, για *in-situ* μετρήσεις στο ιζημα. Η βαθμονόμηση του *in-situ* συστήματος έγκειται στην εύρεση της απόδοσης φωτοκορυφής ανά μονάδα όγκου πηγής, εν, σε όλο το ενεργειακό εύρος του φάσματος και είναι απαραίτητη στην ποσοτικοποίηση (εύρεση ενεργότητας στο ιζημα) των αποτελεσμάτων της φασματοσκοπίας. Τα απαραίτητα εργαλεία στη βαθμονόμηση του συστήματος σε μια δεδομένη μέτρηση είναι η λήψη φάσματος με το σύστημα σε πηγή γνωστής ενεργότητας ίδιων χαρακτηριστικών (γεωμετρία, σύσταση, πυκνότητα) με την άγνωστη πηγή. Η βαθμονόμηση γίνεται συνήθως στο εργαστήριο σε ελεγχόμενο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας βαθμονομημένη πηγή που ικανοποιεί όλα τα χαρακτηριστικά της μέτρησης (γεωμετρία και υλικά). Στην παρούσα εργασία, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε *in-situ*, σε πραγματικές συνθήκες μέτρησης στον πυθμένα, λαμβάνοντας φάσμα ιζήματος με το σύστημα KATEPINA. Η εύρεση της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων στην ‘άγνωστη’ πηγή (ιζημα στον πυθμένα) πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο σε επιφανειακό δείγμα ιζήματος που συλλέχθηκε στο ίδιο σημείο στον πυθμένα της υπό μελέτη περιοχής. Τα αποτελέσματα της πειραματικής βαθμονόμησης εν αναπαράχθηκαν μέσω προσομοιώσεων MC. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί MC παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου.

3.1 Εργασίες πεδίου για τη βαθμονόμηση

Οι εργασίες πεδίου που έλαβαν χώρα για την βαθμονόμηση του *in-situ* ανιχνευτικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν το καλοκαίρι του 2011 στην παράκτια περιοχή κοντά στο λιμάνι του Βασιλικού στην Νότια πλευρά της Κύπρου. Σκοπός των εργασιών πεδίου ήταν :

- A. Η συλλογή φασμάτων με το *in-situ* σύστημα τόσο στο ιζημα όσο και στο νερό
- B. Η συλλογή δείγματος επιφανειακού ιζήματος από το ίδιο σημείο όπου το *in-situ* σύστημα χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των φασμάτων (ιζήματος και νερού)

Πιο συγκεκριμένα, στο σημείο βαθμονόμησης (*site1*) που φαίνεται στον χάρτη όπου και σημειώνονται οι ακριβείς συντεταγμένες (εικ.3.1), πραγματοποιήθηκαν δυο ποντίσεις του συστήματος KATEPINA για τη λήψη φασμάτων στο νερό και στο ιζημα. Το βάθος πόντισης και στις δύο περιπτώσεις ήταν περίπου 10 μέτρα. Το σύστημα ποντίστηκε αρχικά για μέτρηση του ιζήματος σε γεωμετρία 2π με χρόνο συλλογής δεδομένων περίπου 20 ώρες (72000 sec). Η πόντιση πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε ο κρύσταλλος να βρίσκεται κατά το δυνατό κοντύτερα στην επιφάνεια του ιζήματος σε απόσταση μικρότερη από 1cm. Στην διάταξη προστέθηκε βάρος για την

ασφάλεια και σταθεροποίηση του συστήματος. Μετά το πέρας της πρώτης αυτής μέτρησης, το σύστημα ανασύρθηκε ώστε ο κρύσταλλος να τοποθετηθεί σε γεωμετρία 4π μέτρησης νερού (ενότητα 2.2.1.2) και ποντίστηκε ξανά για τη λήψη του φάσματος του νερού. Η διάρκεια συλλογής δεδομένων στο νερό ήταν περίπου 17 ώρες (62953 sec). Η απόσταση του κρυστάλλου από την επιφάνεια του ιζήματος ήταν μεγαλύτερη από 1.5m και περίπου 9m από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η μέτρηση στο νερό να μην επηρεάζεται από συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων τα οποία βρίσκονται στο ίζημα και στον ατμοσφαιρικό αέρα.



Εικόνα 3.1 : Περιοχή των μετρήσεων βαθμονόμησης, *in-situ*, με το σύστημα KATEPINA

Μετά το πέρας των επιτόπιων μετρήσεων στο σημείο της βαθμονόμησης ελήφθη δείγμα επιφανειακού ιζήματος για προσδιορισμό της ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων του ιζήματος με χρήση ήδη βαθμονομημένης μεθόδου στο εργαστήριο [Tsabaris C. et al., 2007]. Για την λήψη του δείγματος χρησιμοποιήθηκε διάταξη “αρπαγής” (grabber) επιφανειακού ιζήματος (εικόνα δεξιά). Η ποσότητα του δείγματος που συλλέχθηκε ήταν περίπου 200 gr. Η ποσότητα αυτή όπως συλλέχθηκε μεταφέρθηκε με κατάλληλα δοχεία στο εργαστήριο ώστε να παραμείνουν αναλλοίωτα τα κύρια χαρακτηριστικά του ιζήματος (πορώδες, πυκνότητα κλπ). Στο εργαστήριο μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά του ιζήματος και η συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων σε αυτό όπως περιγράφεται παρακάτω (ενότητα 3.3).

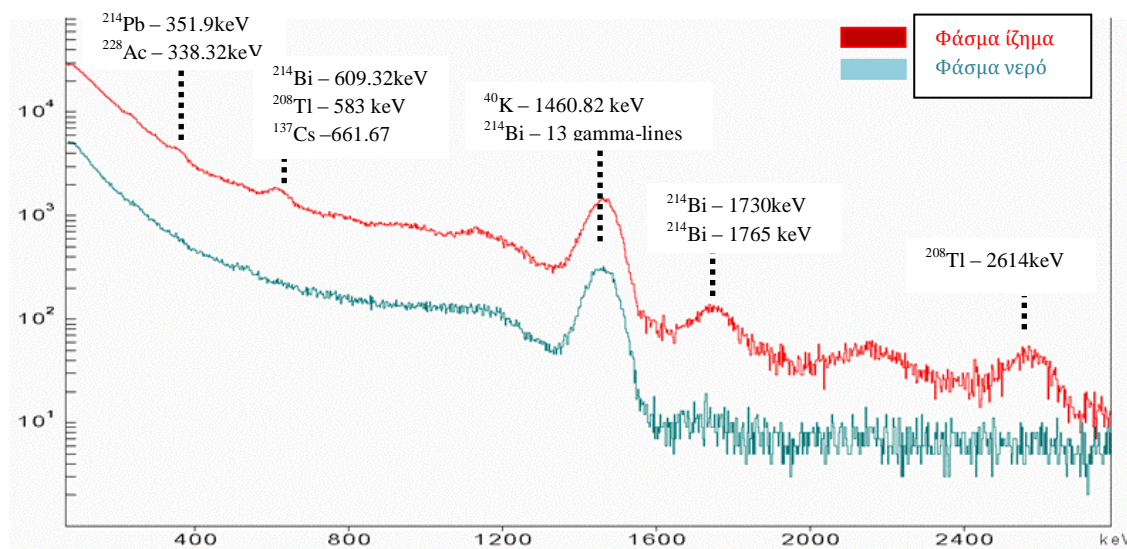


3.2 Αποτελέσματα της επιτόπιας μέτρησης

3.2.1 Υπολογισμός ρυθμού καταγραφής γεγονότων στο ίζημα

Το πρώτο βήμα στις εργασίες της βαθμονόμησης ήταν ο υπολογισμός των γεγονότων ανά μονάδα χρόνου που καταμετρούνται με το *in-situ* ανιχνευτικό σύστημα σε κάθε φωτοκορυφή (ρυθμός γεγονότων φωτοκορυφής) σε όλο το ενεργειακό φάσμα στη μέτρηση του ιζήματος. Για αυτό τον σκοπό ήταν απαραίτητη η ανάλυση των κορυφών των φασμάτων που ελήφθησαν σε νερό και ίζημα η οποία πραγματοποιήθηκε

με χρήση του προγράμματος ανάλυσης φασματοσκοπίας-γ SPECTRW [Kalfas C.A., 2011]. Τα φάσματα νερού και ιζήματος παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς τον ίδιο χρόνο και τη γεωμετρία μέτρησης 2π του ιζήματος στο *γράφημα 3.1*. Η κανονικοποίηση του φάσματος στο νερό ως προς τη γεωμετρία- 2π στο ίζημα πραγματοποιήθηκε με την αφαίρεση των μισών γεγονότων σε όλη την ενεργειακή περιοχή. Στο ίδιο γράφημα παρουσιάζονται επίσης τα ραδιονουκλίδια, μαζί με τις αντίστοιχες εκπεμπόμενες ενέργειες ακτίνων-γ, που συμβάλλουν στη δημιουργία των φωτοκορυφών που διακρίνονται στο φάσμα.



Γράφημα 3.1: Απεικόνιση φασμάτων ιζήματος και νερού όπως λήφθηκαν με το *in-situ* σύστημα KATEPINA κανονικοποιημένα στον ίδιο χρόνο. Το φάσμα του νερού είναι επιπλέον κανονικοποιημένο στη γεωμετρία μέτρησης 2π του ιζήματος

Γεγονότα που προέρχονται από ακτίνες-γ εκπεμπόμενες από ραδιονουκλίδια στο νερό καταγράφονται από το σύστημα και στη μέτρηση ιζήματος. Τα γεγονότα αυτά αποτελούν «υπόβαθρο» στη μέτρηση του ιζήματος και πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να προκύψει ο ‘καθαρός’ ρυθμός γεγονότων ακτίνων-γ που εκπέμπονται αποκλειστικά από ραδιονουκλίδια στο ίζημα.

Στον *πίνακα 3.1* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των κορυφών των μετρήσεων στο νερό και στο ίζημα με το *in-situ* σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο ολικός μετρούμενος αριθμός γεγονότων στο φάσμα νερού (C_w) στον αντίστοιχο χρόνο μέτρησης (62953 sec) του φάσματος, και στο φάσμα ιζήματος (C_s) στον αντίστοιχο χρόνο μέτρησης (72000 sec). Τα ραδιονουκλίδια των οποίων οι ακτίνες-γ συνεισφέρουν σε κάθε κορυφή στο φάσμα σημειώνονται στον ίδιο πίνακα μαζί με τις ενέργειες ακτίνων-γ και τις αντίστοιχες πιθανότητες εκπομπής.

Στον *πίνακα 3.2* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του *πίνακα 3.1* μετά από επεξεργασία τους για τον προσδιορισμό του ‘καθαρού’ ρυθμού των γεγονότων (Net cps) που προέρχονται αποκλειστικά από ραδιονουκλίδια στο ίζημα. Ο ‘καθαρός’ ρυθμός γεγονότων από το ίζημα (Net cps_s) που ανιχνεύονται σε κάθε κορυφή χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ανιχνευτικής απόδοσης εν του συστήματος σε κάθε ενέργεια (βλέπε *ενότητα 3.4*).

| Ενέργεια Ακτίνας-γ (keV) | Πιθανότητα Εκπομπής * % | Στοιχείο | Ενέργεια Κορυφής (keV) | Γεγονότα Cs Ίζημα | Σφάλμα | Γεγονότα C _w Νερό | Σφάλμα |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|--------|
| 338.32 | 11.27 | ²²⁸ Ac | 351 | 9200 | 550 | 650 | 350 |
| 351.9 | 37.6 | ²¹⁴ Pb | | | | | |
| 583.19 | 84.5 | ²⁰⁸ Tl | 609 | 9500 | 600 | 450 | 300 |
| 609.31 | 46.1 | ²¹⁴ Bi | | | | | |
| 661.67 | 85.1 | ¹³⁷ Cs | | | | | |
| ** | *** | ²¹⁴ Bi | 1460 | 43700 | 300 | 16700 | 190 |
| 1460.8 | 10.7 | ⁴⁰ K | | | | | |
| 1729.6 | 2.92 | ²¹⁴ Bi | 1750 | 2630 | 150 | 180 | 50 |
| 1764.5 | 15.4 | ²¹⁴ Bi | | | | | |
| 2614 | 99 | ²⁰⁸ Tl | 2614 | 1500 | 80 | < LLD | < LLD |

* The Lund/LBNL Nuclear Data Search Version 2.0, February 1999

** Σύνολο 13 ακτίνων-γ ενεργειών 1377 – 1583 keV

*** Συνολική πιθανότητα εκπομπής 11.6%

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα ολικού μετρούμενου αριθμού γεγονότων νερού και ιζήματος όπως προέκυψαν από την ανάλυση των φασμάτων που ελήφθησαν με το σύστημα KATEPINA στην τοποθεσία site1.

Πιο αναλυτικά, στην δεύτερη στήλη του πίνακα υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος αριθμός γεγονότων του νερού (C_{2π}) σε μια κορυφή. Η κανονικοποίηση γίνεται στα αποτελέσματα του συνολικού αριθμού ανιχνευόμενων γεγονότων στο νερό, C_w, του πίνακα 3.1, αρχικά ως προς τον χρόνο μέτρησης του ιζήματος (72000sec) και στη συνέχεια ως προς την γεωμετρία μέτρησης 2π του ιζήματος. Η κανονικοποίηση στη γεωμετρία μέτρησης 2π του ιζήματος, που πραγματοποιείται σε δεύτερο βήμα επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας με ένα παράγοντα $\frac{2\pi}{4\pi}$, τα γεγονότα κάθε κορυφής.

| Ενέργεια Κορυφής (keV) | Γεγονότα C _{2π} | Σφάλμα | Γεγονότα Net Cs | Σφάλμα | Net cps, Ίζημα | Σφάλμα |
|------------------------------|-----------------------------|------------|--------------------|------------|-------------------|--------|
| 351 | 372 | 200 | 8828 | 585 | 0.123 | 0.007 |
| 609 | 257 | 172 | 9243 | 576 | 0.129 | 0.001 |
| 1460 | 9550 9435* | 109 114 | 34150 34265 | 561 562 | 0.476 | 0.004 |
| 1750 | 103 | 29 | 2527 | 551 | 0.036 | 0.001 |
| 2614 | - | - | 1500 | 80 | 0.021 | 0.001 |

* γεγονότα έχοντας αφαιρέσει τη συνεισφορά του ²¹⁴Bi στην κορυφή (C_{2πnet})

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα (Net cps_s) 'καθαρού' μετρούμενου ρυθμού γεγονότων ιζήματος έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων του πίνακα 3.1.

Ιδιαίτερη επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση της κορυφής στα 1460 keV, στο ίδιο φάσμα (νερό), στην οποία συνεισφέρουν η φωτοκορυφή του ^{40}K (1460.8keV) και 13 συνολικά φωτοκορυφές του ^{214}Bi . Οι προερχόμενες από το ^{214}Bi ακτίνες-γ συνεισφέρουν στη δημιουργία της κορυφής με μια συνολική πιθανότητα εκπομπής 11.6% (πίνακας 3.1). Η επεξεργασία αφορά στην αφαίρεση των γεγονότων που οφείλονται στο ραδιονουκλίδιο ^{214}Bi από τον συνολικό αριθμό γεγονότων (C_w) που ανιχνεύονται στην κορυφή. Τα γεγονότα που αφαιρέθηκαν, προσδιορίζονται μέσω της σχέσης 1.11 χρησιμοποιώντας την ενεργότητα του ίδιου ραδιονουκλιδίου στο νερό, όπως υπολογίζεται από τις δύο φωτοκορυφές του, στα 1730 keV και στα 1764.5 keV(κοινή κορυφή στο φάσμα) χρησιμοποιώντας την αθροιστική πιθανότητα εκπομπής των δύο ακτίνων. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης ($C_{2\pi\text{net}}$) σημειώνεται στην ίδια στήλη του πίνακα με αστερίσκο. Όπως φαίνεται οι δύο τιμές ($C_{2\pi}$), ($C_{2\pi\text{net}}$) στην κορυφή 1460.8 keV, δε διαφέρουν (στα όρια των σφαλμάτων).

Τα ‘καθαρά’ γεγονότα που προέρχονται αποκλειστικά από το ιζήμα (Net C_s) παρουσιάζονται στην τέταρτη στήλη του πίνακα 3.2. Προέκυψαν από την αφαίρεση των γεγονότων $C_{2\pi}$ (νερό) από τα γεγονότα C_s (ιζήμα), στις κορυφές που διακρίνονται στο φάσμα του ιζήματος. Στην ειδική περίπτωση της κορυφής 1460 keV το τελικό αποτέλεσμα (C_s) προέκυψε από την αφαίρεση των γεγονότων $C_{2\pi\text{net}}$ από τα γεγονότα C_s (ιζήμα). Τα αποτελέσματα του ‘καθαρού’ αριθμού γεγονότων ιζήματος (Net C_s) διαιρέθηκαν με τον χρόνο μέτρησης του ιζήματος και προέκυψε ο ‘καθαρός’ ρυθμός γεγονότων ιζήματος (Net C_{ps_s}) ο οποίος φαίνεται στην τελευταία στήλη στον πίνακα 3.2.

3.3 Εργαστηριακές Μετρήσεις

Στο εργαστήριο προσδιορίστηκαν οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του ιζήματος (ποσόστωση νερού, πυκνότητα και σύσταση) καθώς και η κατ’ όγκο συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων του ιζήματος με χρήση ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe). Οι μετρήσεις στο εργαστήριο έγιναν στο επιφανειακό δείγμα ιζήματος που συλλέχθηκε μετά τις *in-situ* μετρήσεις στο πεδίο από το ίδιο σημείο (*site1*). Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά οι εργασίες που έλαβαν χώρα για τις μετρήσεις αυτές καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

3.3.1 Προσδιορισμός φυσικών παραμέτρων ιζήματος

Οι κύριες φυσικές παράμετροι που μετρήθηκαν στο επιφανειακό δείγμα ιζήματος αφορούν στη σύστασή του (κύρια στοιχεία), την ποσόστωση νερού σε αυτό και την πυκνότητά του. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών δίνει πληροφορίες για την προέλευση του ιζήματος, χαρακτηρίζει μια δεδομένη περιοχή και ενδιαφέρει κυρίως για λόγους χαρτογράφησης των πυθμένων. Στην παρούσα εφαρμογή, η γνώση αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητη ώστε να συμπεριληφθούν στην αναπαραγωγή του πυθμένα στο θεωρητικό μοντέλο (προσομοιώσεις MC). Επιπρόσθετα, η γνώση των

παραμέτρων αυτών είναι σημαντική στην ολοκληρωμένη ανάλυση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων αλλά και των γενικών συμπερασμάτων της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Το επιφανειακό δείγμα που συλλέχθηκε στο ίδιο σημείο των ποντίσεων του συστήματος KATEPINA χρειάστηκε να υποστεί επεξεργασία για τη μέτρηση των κύριων φυσικών χαρακτηριστικών του αλλά και για τη μέτρηση της ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων του ιζήματος. Τα βασικά βήματα επεξεργασίας περιλαμβάνουν τις εξής διαδικασίες :

1. Κοσκίνισμα του δείγματος και απομάκρυνση των μη χρήσιμων στοιχείων με κόκκο διαμέτρου μεγαλύτερης των 2.5mm (π.χ. πέτρες, κοχύλια).
2. Μέτρηση της μάζας του εναπομείναντος δείγματος
3. Μέτρηση της πυκνότητας του με χρήση ογκομετρικής φιάλης
4. Αποξήρανση του δείγματος. Το δείγμα παραμένει σε κλίβανο στους 70°C. Τυπικός χρόνος αποξήρανσης ενός δείγματος ιζήματος είναι περίπου 2 ημέρες. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ιζήματος-κόκκος την ποσότητα νερού που περιέχεται σε αυτό και τη θερμοκρασία του φούρνου.
5. Μέτρηση της τελικής στεγνής μάζας του ιζήματος (αφυδατωμένο ίζημα). Ο προσδιορισμός της τελικής μάζας στεγνού ιζήματος επιτυγχάνεται μέσω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων της μάζας του δείγματος. Το δείγμα εξάγεται από το φούρνο προσδιορίζεται η μάζα του και επανεισάγεται σε αυτόν.
6. Μέτρηση της πυκνότητας του στεγνού πλέον δείγματος με χρήση ογκομετρικής φιάλης.

Η παραπάνω διαδικασία αφορά στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών (**μάζα, πυκνότητα και ποσότητα νερού**) του ιζήματος. Στην περίπτωση όπου απαιτείται ο **κόκκο-διαχωρισμός** (προαιρετικά) του ιζήματος διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

7. Στην περίπτωση όπου το δείγμα είναι αμμώδες (χοντρόκοκκο ίζημα όπου οι κόκκοι φαίνονται καθαρά διαχωρισμένοι) επιλέγεται η μέθοδος του ξηρού διαχωρισμού· χωρίζεται το δείγμα σε τρεις κλάσεις (μεγαλύτερη των 2mm, 2mm – 63μm, μικρότερα από 63μm) χρησιμοποιώντας κόσκινα δύο διαφορετικών διαμέτρων (2mm, 63μm). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μετά το βήμα 2. Στην περίπτωση όπου το δείγμα είναι λασπώδες (λεπτόκοκκο ίζημα όπου οι κόκκοι του εμφανίζονται σαν συσσωματώματα) είναι απαραίτητος ο υγρός διαχωρισμός των κόκκων. Σε αυτήν την περίπτωση προστίθεται απιονισμένο νερό στο ίζημα ώστε να είναι εφικτός ο διαχωρισμός των κόκκων κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού με κόσκινα όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιείται μέτρηση της μάζας των στεγνών ποσοτήτων πριν και μετά τον διαχωρισμό του δείγματος.

8. Κορνιοποίηση του δείγματος σε ειδικό μύλο με σκοπό τον θρυμματισμό των κόκκων και τη μείωση του μεγέθους του κόκκου σε διάμετρο μικρότερη των 63μm. Εναλλακτικά η κορνιοποίηση του δείγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας γουδί από αχάτη. Η τελική πυκνότητα του δείγματος μετά την επεξεργασία υπολογίζεται κοντά στο 1gr/cc. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό στη μέτρηση φασματοσκοπίας-γ, ώστε να υπάρχουν ίδια φαινόμενα ενδοαπορρόφησης των ακτίνων-γ του δείγματος σε σχέση με την πηγή που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του εργαστηριακού ανιχνευτικού συστήματος.

Στην περίπτωση του προσδιορισμού της σύστασης ως προς τα κύρια στοιχεία του ιζήματος με τη μέθοδο XRF ακολουθείται αρχικά η πορεία επεξεργασίας που αναφέρθηκε στα βήματα 1-8. Επιπλέον πρέπει να πραγματοποιηθεί κατασκευή τυχαία προσανατολισμένων παρασκευασμάτων σε ειδικούς υποδοχείς σταθερού πάχους (σε μορφή συμπαγούς υαλώδους δισκίου), διαδικασία η οποία αναφέρεται λεπτομερώς παρακάτω:

1. Μετά την κορνιοτοποίηση του δείγματος (βήμα 8) γίνεται ανάμιξη 5.4 gr ιζήματος με 0.6 gr αντιδραστηρίου Lithium Tetraborate $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ σε σκόνη και 0.5 gr Νιτρικού Λιθίου LiNO_3 και μεταφορά του σε ειδικά δοχεία από πλατίνα στα οποία προστίθενται σταγόνες Βρωμιούχου Λιθίου BrLi (6,25gr/25ml).

2. Το δοχείο μεταφέρεται στη Συσκευή Σύντηξης στην οποία πραγματοποιείται καύση του μείγματος, σε θερμοκρασία 1000 °C για 15 λεπτά. Μετά την καύση το δείγμα παίρνει τη σύσταση ύαλου και αναλύεται από τη συσκευή XRF για κύρια στοιχεία.

Η πρώτη παράμετρος που προσδιορίστηκε είναι η ποσόστωση του νερού δηλαδή ο λόγος μαζών του νερού στο δείγμα προς τη συνολική μάζα δείγματος (μη αφυδατωμένο). Η μάζα του νερού υπολογίζεται με την αφαίρεση των μαζών υγρού και στεγνού δείγματος και η ποσόστωση προκύπτει διαιρώντας τη μάζα νερού με την αρχική υγρή μάζα του δείγματος. Η πυκνότητα (υγρού και στεγνού) ιζήματος προσδιορίστηκε με μετρήσεις πριν και μετά την αποξήρανση του δείγματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 3.3. Η συσχέτιση μεταξύ πυκνότητας υγρού δείγματος (wet bulk density) κατανομής κόκκου (grain size distribution) και πορώδους (porosity) του ιζήματος, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συμφωνεί με συνήθεις παρατηρούμενες τιμές στη βιβλιογραφία.

Ο προσδιορισμός των κύριων στοιχείων των δειγμάτων του ολικού κλάσματος των ιζημάτων έγινε με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων-X (XRF) έπειτα από περαιτέρω επεξεργασία του τελικού κονιοποιημένου δείγματος στο εργαστήριο. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας βαθμονομημένο φασματόμετρο φθορισμού ακτίνων-X, μοντέλο της Philips (PW-2400) που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2. Το σύστημα περιλαμβάνει λυχνία παραγωγής ακτίνων-X με άνοδο Ροδίου Rh (3 kW) για την παραγωγή δέσμης κατευθυντήρες και άλλα οπτικά μέσα για την καθοδήγηση της δέσμης, στο σημείο όπου τοποθετείται το δείγμα, β ανιχνευτικούς κρυστάλλους (LiF 200, LiF 220, PE 002, Ge 111, PX1 multilayer, PX2 multilayer, PX4 multilayer, TIAP 100 coated) και ηλεκτρονικές μονάδες για την καταγραφή του φάσματος.



Εικόνα 3.2 : Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις των κύριων στοιχείων στο ιζήμα

Χρησιμοποιώντας το σύστημα δύναται να πραγματοποιηθούν ποσοτικές μετρήσεις σε ένα μεγάλο εύρος στοιχείων από το Βηρύλλιο Be (Z=4) ως το Ουράνιο U (Z=92). Τα αποτελέσματα της μέτρησης των κύριων στοιχείων του ιζήματος με τη μέθοδο XRF δίνονται σαν ποσοστά στον Πίνακα 3.3.

| X-RAY LAB Fused X | | | | | |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Δείγμα | Κύρια στοιχεία ιζήματος | Ποσόστωση νερού ιζήματος (%) | Πυκνότητα υγρού ιζήματος (w/w %) | Πυκνότητα στεγνού ιζήματος (gr/cc) | Πυκνότητα στεγνού ιζήματος (gr/cc) |
| site 1 | L.O.I. | 13.50 | | | |
| | Sum | 99.82 | | | |
| | Al ₂ O ₃ | 6.61 | 26 ± 11 | 2.14 ± 0.33 | 1.58 ± 0.06 |
| | SiO ₂ | 43.92 | | | |
| | P ₂ O ₅ | 0.04 | | | |
| | K ₂ O | 0.28 | | | |
| | CaO | 14.09 | | | |
| | TiO ₂ | 0.47 | | | |
| | Fe ₂ O ₃ | 9.55 | | | |
| | Na ₂ O | 0.85 | | | |
| | MgO | 6.83 | | | |
| | SO ₃ | 3.60 | | | |
| | MnO | 0.08 | | | |

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ιζήματος του δείγματος site 1.

Στον ίδιο πίνακα σημειώνονται επίσης το άθροισμα όλων των ανιχνευόμενων ενώσεων **Sum** όπως προέκυψε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου XRF, καθώς και η μέτρηση της απώλειας μάζας του αρχικού δείγματος, κατά την επεξεργασία του στην τελική μορφή υαλώδους δισκίου, **Απώλεια μάζας λόγω Καύσης (Loss Of Ignition)**. Οι τέσσερις κύριες ενώσεις στοιχείων που ανιχνεύθηκαν στο δείγμα είναι το διοξείδιο του Ψυριτίου SiO₂ (σε ποσοστό 43.92%), το οξείδιο του Ασβεστίου CaO (14.9%) καθώς και τα τριοξείδια των Σιδήρου Fe₂O₃ (9.55%) και Αργιλίου Al₂O₃ (6.61%). Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές ιζημάτων χερσογενούς προέλευσης. Η σύσταση αυτή μπορεί να διαφοροποιείται ελαφρώς ως προς τα ποσοστά σε κοντινά σημεία στην ίδια περιοχή [Covelli S. and Fontolan G., 1995].

3.3.2 Προσδιορισμός συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) ιζήματος μέσω φασματοσκοπίας-γ στο εργαστήριο

Η φασματοσκοπία-γ στηρίζεται στην ανίχνευση των ακτίνων-γ που εκπέμπονται από πηγή ακτινοβολίας-γ μέσω της αλληλεπίδρασής τους με το υλικό του ανιχνευτή και στην αντιστοίχιση των φωτοκορυφών με συγκεκριμένα ραδιονουκλίδια. Για τον ποσοτικό υπολογισμό της συγκέντρωσης ενός ραδιονουκλιδίου απαιτείται η γνώση της ανιχνευτικής ικανότητας του οργάνου μέτρησης (ανιχνευτική απόδοση). Στόχος της μέτρησης του επιφανειακού δείγματος ιζήματος από το σημείο βαθμονόμησης (site1) στο εργαστήριο ήταν ο προσδιορισμός της κατ' όγκο συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων (συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων).

Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως **τιμές αναφοράς** στον υπολογισμό της ανιχνευτικής απόδοσης ϵ_v του *in-situ* συστήματος. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων πραγματοποιήθηκε με χρήση ανιχνευτή υπερ-καθαρού Γερμανίου HPGe (Canberra, 50% relative efficiency). Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο αφυδατωμένο δείγμα έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία και δειγματοποίηση σε κατάλληλη γεωμετρία (εικόνα δεξιά). Στην επεξεργασία και τη δειγματοποίηση ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας



(ΔΟΑΕ) για μετρήσεις φασματοσκοπίας- γ σε περιβαλλοντικά δείγματα εκτεταμένης γεωμετρίας. Σύμφωνα με αυτές, ποσότητα του ιζήματος μετά την επεξεργασία (αποξήρανση, κορνιοτοποίηση κλπ) κλείνεται σε πλαστικά δοχεία όπου σφραγίζεται και παραμένει για διάστημα περίπου τριών εβδομάδων πριν τη μέτρηση. Ο χρόνος αυτός είναι απαραίτητος για την αποκατάσταση της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ των ισοτόπων του ραδίου (^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra) και των θυγατρικών τους προϊόντων στο δείγμα. Για τη μέτρηση είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του δείγματος σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή (γεωμετρία επαφής) με σκοπό την αύξηση της στατιστικής της μέτρησης. Για τον ίδιο λόγο το φάσμα συλλέγεται στην χρονική διάρκεια μιας ημέρας. Οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις μέτρησης επιλέγονται καθώς στα περιβαλλοντικά δείγματα αναμένονται χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας που συνεπάγεται χαμηλό ρυθμό καταγραφής γεγονότων.

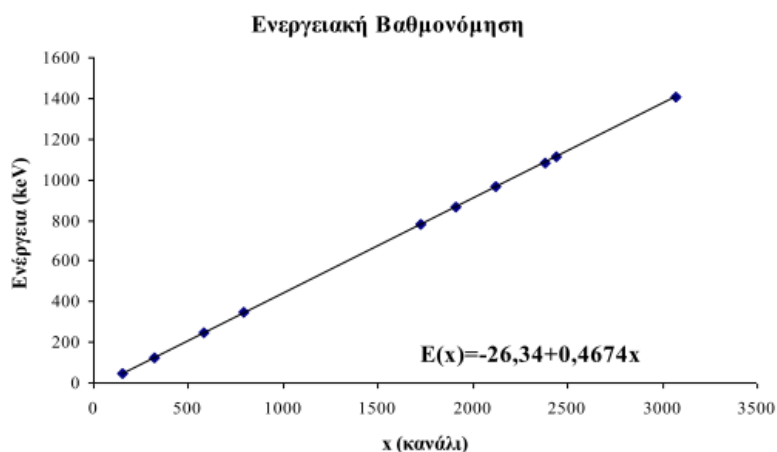
Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ήδη βαθμονομημένος για μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων στη συγκεκριμένη γεωμετρία μέτρησης. Η βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή παραμένει σταθερή εάν δε μεταβληθούν η διάταξη και οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονικών που συμβάλλουν στην επεξεργασία του σήματος. Σε περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί για μεγάλες χρονικές περιόδους γίνεται ανά διαστήματα έλεγχος της σταθερότητάς του επαναλαμβάνοντας τα βήματα της βαθμονόμησης. Στην παρούσα εργασία κρίθηκε επιθυμητό να πραγματοποιηθεί έλεγχος της βαθμονόμησης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας- γ στο επιφανειακό δείγμα.

Οι εργασίες βαθμονόμησης περιλαμβάνουν: την ενεργειακή βαθμονόμηση, τη βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας (FWHM) και τη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας (ϵ) του ανιχνευτή συναρτήσει της ενέργειας στη δεδομένη γεωμετρία μέτρησης. Για την ενεργειακή βαθμονόμηση έγινε χρήση πρότυπων σημειακών πηγών ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , $^{152/154}\text{Eu}$ για την αντιστοίχιση των 4096 καναλιών του πολύ-διαλυτικού αναλυτή MCA σε εύρος ενεργειών από 25 keV έως 1850 keV. Τα αποτελέσματα της ενεργειακής βαθμονόμησης δίνονται στον πίνακα 3.4.

| Κανάλι x | Ενέργεια (keV) |
|----------|-------------------|
| 155 | 45.5 |
| 318 | 121.78 |
| 581 | 244.7 |
| 794 | 344.28 |
| 1723 | 778.9 |
| 1913 | 867.39 |
| 2120 | 964.05 |
| 2381 | 1085.84 |
| 2437 | 1112.09 |
| 3071 | 1408.02 |

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτικού συστήματος.

Η προσαρμογή των πειραματικών σημείων με κατάλληλη γραμμική συνάρτηση, γράφημα 3.2, αναδεικνύει την ικανοποιητική ενεργειακή γραμμικότητα του ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε.

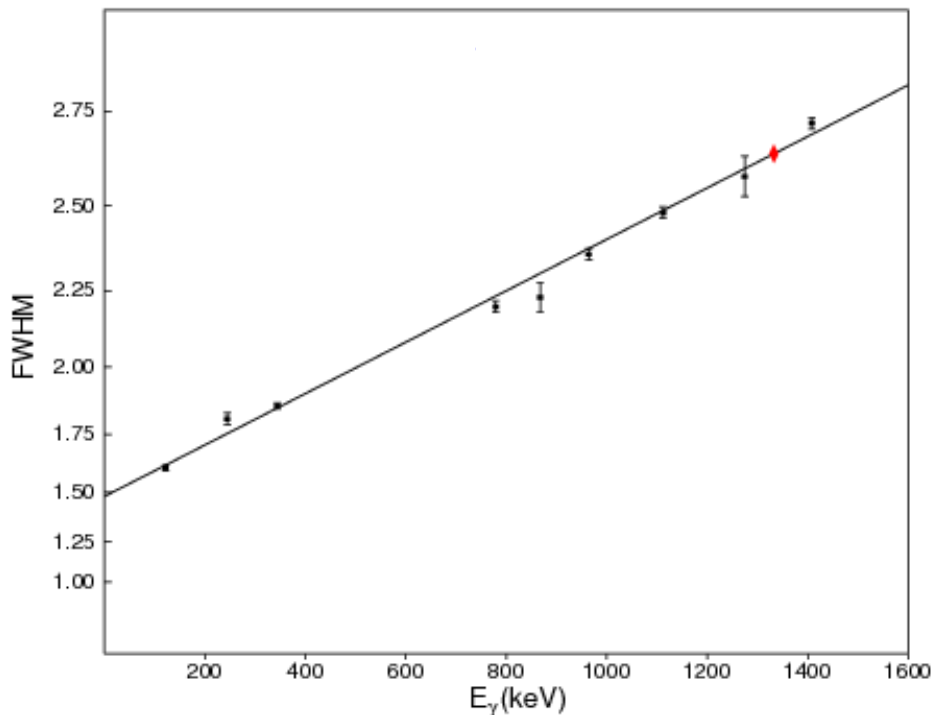


Γράφημα 3.2 : Καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτικού συστήματος για την εκτεταμένη βαθμονομημένη πηγή $^{152/154}\text{Eu}$ στη γεωμετρία μέτρησης, σε επαφή με τον ανιχνευτή

Η διακριτική ικανότητα και η ανιχνευτική απόδοση του ανιχνευτή υπολογίστηκαν ως συνάρτηση της ενέργειας με ανάλυση φάσματος εκτεταμένης βαθμονομημένης πηγής $^{152/154}\text{Eu}$. Στο γράφημα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διακριτικής ικανότητας. Στα πειραματικά δεδομένα έχει προσαρμοστεί γραμμική συνάρτηση της μορφής [Kalfas C.A., 2011]:

$$\text{FWHM} = a + cE$$

όπου a και c σταθερές και E η ενέργεια των ακτίνων-γ.



Γράφημα 3.3: Καμπύλη ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτικού συστήματος για την εκτεταμένη βαθμονομημένη πηγή $^{152/154}\text{Eu}$ (121 – 1408 keV)

Ως δείκτης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή, το FWHM στην ενέργεια 1332 keV (^{60}Co), βρέθηκε ίση με 2.64 keV. Ο θόρυβος στη μέτρηση που προκαλείται από τη χρήση των ηλεκτρονικών μονάδων συλλογής και επεξεργασίας του σήματος (electronic noise) καθώς και ο ποιοτικός παράγοντας (fano factor) της κατάστασης του κρυστάλλου Ge υπολογίζονται από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα ανάλυσης SPECTRW και βρέθηκαν στις τιμές 1.146 keV και 0.182 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος στη δεδομένη γεωμετρία μέτρησης, δίνονται από το πρόγραμμα ανάλυσης SPECTRW. Για τον υπολογισμό αυτό εισάγονται στο πρόγραμμα ως παράμετροι τα καθαρά γεγονότα που ανιχνεύονται σε κάθε φωτοκορυφή, για τις 10 κύριες ακτίνες-γ του ^{152}Eu στην περιοχή ενεργειών 121 – 1408 keV, τα αντίστοιχα ποσοστά εκπομπής κάθε ακτίνης-γ και η ενεργότητα της πηγής κατά τη μέτρηση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στον πίνακα 3.5. Στα πειραματικά δεδομένα προσαρμόζεται κατάλληλη συνάρτηση μέσω της οποίας δύναται να προσδιοριστεί η απόδοση του ανιχνευτή σε όλο το εύρος ενεργειών. Με το τελευταίο αυτό βήμα καθίσταται δυνατός ο ποσοτικός υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων σε οποιοδήποτε δείγμα ίδιων χαρακτηριστικών (γεωμετρία, υλικά, πυκνότητα) στο εύρος ενεργειών της βαθμονόμησης (γράφημα 3.4) και για τις δεδομένες συνθήκες μέτρησης.

| Ενέργεια | I _γ | Εκτεταμένη Πηγή ^{152/154} Eu 6.7 ± 0.2 kBq (20/2/2001) | Απόλυτη Απόδοση Φωτοκορυφής (· E-03) * | |
|----------|----------------|--|--|------|
| (keV) | (%) | Γεγονότα | | |
| 121.78 | 28.40 | 290153 ± 749 | 97.6 ± | 1.3 |
| 244.70 | 7.58 | 62735 ± 365 | 59.2 ± | 0.8 |
| 344.28 | 28.52 | 175863 ± 549 | 46.3 ± | 0.5 |
| 778.92 | 12.95 | 47516 ± 310 | 25.8 ± | 0.5 |
| 867.39 | 4.23 | 14704 ± 203 | 23.9 ± | 0.4 |
| 964.05 | 14.60 | 46167 ± 296 | 22.2 ± | 0.18 |
| 1112.09 | 13.56 | 39309 ± 271 | 20.0 ± | 0.14 |
| 1408.02 | 20.80 | 50432 ± 295 | 16.9 ± | 0.13 |

*τιμές όπως προκύπτουν από τη συνάρτηση προσαρμογής 4.1

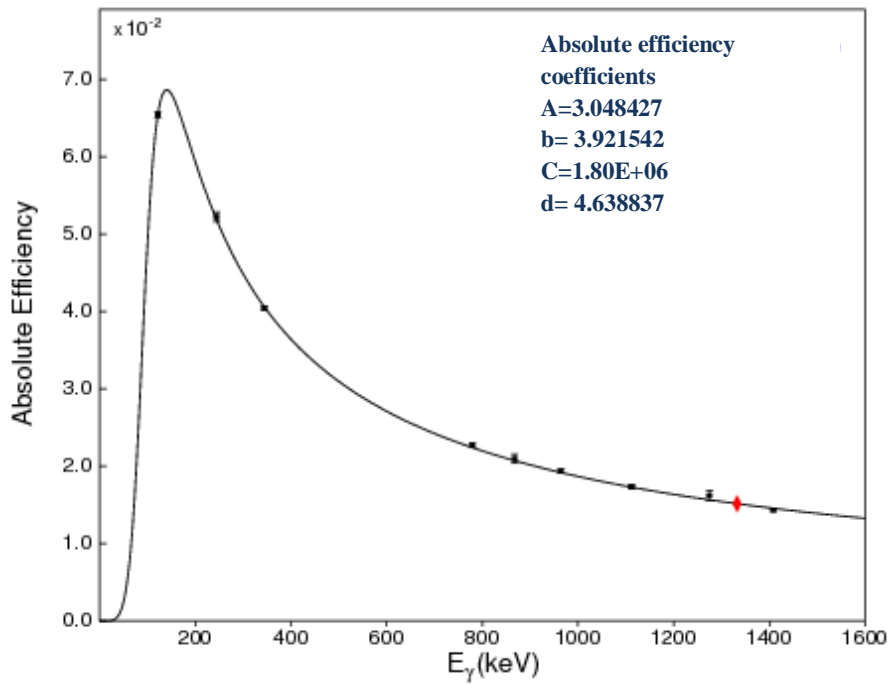
Πίνακας 3.5 : Αποτελέσματα βαθμονόμησης ανιχνευτικής ικανότητας του HPGe στη γεωμετρία μέτρησης του ιζήματος χρησιμοποιώντας βαθμονομημένη εκτεταμένη πηγή ^{152/154}Eu

Η συνάρτηση προσαρμογής που εφαρμόζεται είναι της μορφής:

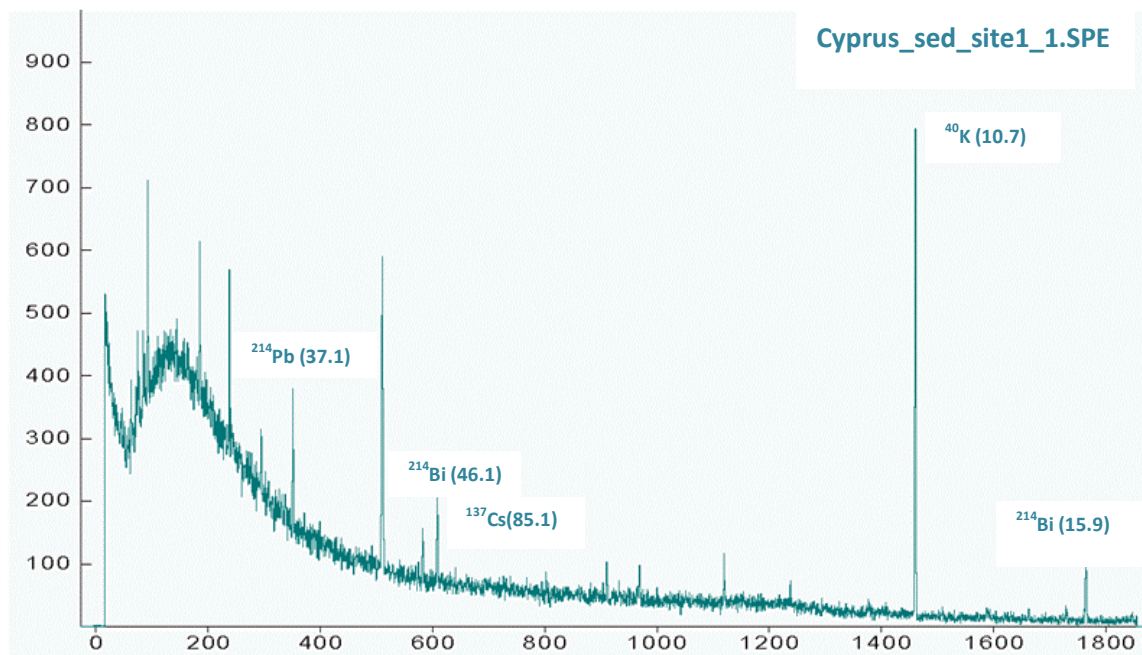
$$\varepsilon = \frac{A \cdot E^b}{C + E^d} \quad (4.1)$$

Όπου E η ενέργεια των ακτίνων-γ μετρούμενη σε keV και A, b, C και d σταθερές. Η μορφή της συνάρτησης στηρίζεται σε βιβλιογραφικές αναφορές [Debertin K. and Helmer R.G., 1988].

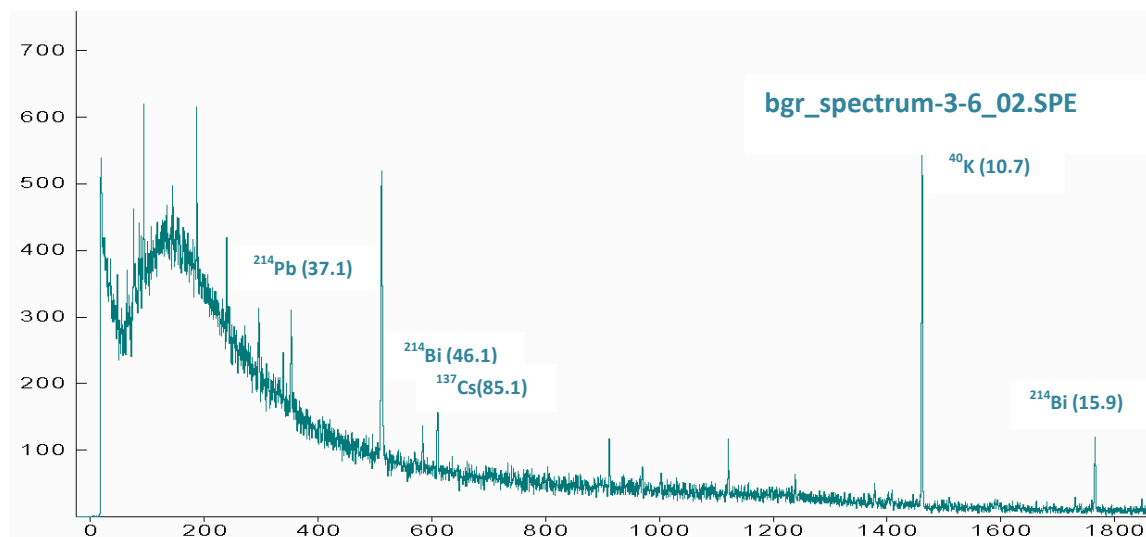
Στο *γράφημα 3.4* παρουσιάζεται η καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης (Absolute efficiency) του συστήματος στο μετρούμενο εύρος ενεργειών της πηγής ^{152/154}Eu (121-1408 keV) καθώς και οι σταθερές της συνάρτησης προσαρμογής που επιτρέπουν την επέκταση της βαθμονόμησης στο εύρος ενεργειών 1408-1850 keV. Οι εργασίες της βαθμονόμησης του συστήματος ακολουθούνται από τη μέτρηση του δείγματος. Το φάσμα του ιζήματος όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο, κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, δίνεται στο *γράφημα 3.5* όπου σημειώνονται τα ραδιονουκλίδια που συμμετέχουν στη δημιουργία κάθε φωτοκορυφής και οι αντίστοιχες πιθανότητες εκπομπής. Στο *γράφημα 3.6* δίνεται το φάσμα ακτινοβολίας υποβάθρου (κοσμική, περιβάλλοντα χώρου) που λήφθηκε στον ίδιο χρόνο και αφαιρέθηκε από τη μέτρηση του ιζήματος. Η ανάλυση των φασμάτων έγινε με χρήση του λογισμικού SPECTRW [Kalfas C.A., 2011]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον *πίνακα 3.6* όπου οι τιμές της συγκέντρωσης ενεργότητας κάθε στοιχείου στο ίζημα δίνονται σε μονάδες Bq/L. Η επιλογή αυτής της μονάδας έγινε ώστε να πραγματοποιείται άμεση χρήση των τιμών αυτών (ως τιμές αναφοράς) στη σχέση υπολογισμού (εξ. 3.10) της ανιχνευτικής απόδοσης $\varepsilon_i(L)$ του *in-situ* συστήματος (δες ενότητα 3.4) για μετρήσεις στο ίζημα.



Γράφημα 3.4: Καμπύλη ανιχνευτικής απόδοσης (Absolute efficiency) του συστήματος για τη γεωμετρία μέτρησης της εκτεταμένης πηγής στη γεωμετρία μέτρησης, σε επαφή με τον ανιχνευτή, υπολογισμένη από την ανάλυση του φάσματος βαθμονομημένης πηγής $^{152/154}\text{Eu}$ ίδιας γεωμετρίας



Γράφημα 3.5 : Απεικόνιση φάσματος αφυδατωμένου δείγματος ιζήματος (site1) όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο σε χρόνο 24 ωρών



Γράφημα 3.6 : Απεικόνιση φάσματος ακτινοβολίας υποβάθρου όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο σε χρόνο 24 ωρών

Στον πίνακα 3.6 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης για τα ραδιονουκλίδια των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών που ανιχνεύθηκαν καθώς και οι τιμές για το Κάλιο ^{40}K και το ανθρωπογενές Καίσιο ^{137}Cs .

| Ραδιενεργός Σειρά | Ραδιονουκλίδιο | Ενέργεια (keV) | Ιγ (%) | Ενεργότητα A_{ref} (Bq/L) |
|-------------------|-------------------|----------------|--------|-----------------------------|
| ^{238}U | ^{214}Pb | 351.9 | 37.1 | 4.1 ± 0.29 |
| | ^{214}Bi | 1764.5 | 15.9 | 6.4 ± 1.7 |
| ^{232}Th | ^{208}Tl | 583.19 | 30.36 | 2.4 ± 0.3 |
| | ^{228}Ac | 911 | 26.6 | 2.75 ± 0.5 |
| | ^{212}Pb | 238.63 | 43.5 | 2.32 ± 0.19 |
| | ^{224}Ra | 241 | 4.05 | 3.3 ± 0.9 |
| ^{235}U | ^{235}U | 185.71 | 57.2 | 0.36 ± 0.03 |
| - | ^{137}Cs | 661.67 | 85.1 | 0.34 ± 0.07 |
| - | ^{40}K | 1460.82 | 10.7 | 158.4 ± 9.4 |

Πίνακας 3.6 : Αποτελέσματα μέτρησης ενεργότητας A_{ref} (Bq/L), στο δείγμα αφυδατωμένου ιζήματος στο σημείο βαθμονόμησης site 1

Για τα ραδιονουκλίδια που ανιχνεύονται σε περισσότερες από μία φωτοκορυφές, οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας σταθμισμένους μέσους όρους ως προς την πιθανότητα εκπομπής κάθε ακτίνας. Οι τιμές σε όλα τα ραδιονουκλίδια βρέθηκαν σε χαμηλά επίπεδα. Οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις για τα ραδιονουκλίδια της σειράς του ^{232}Th είναι μικρές και η τιμή υπολογίζεται κατά μέσο όρο στα 2.5 Bq/L. Μεγαλύτερες τιμές βρέθηκαν για τα ραδιονουκλίδια της σειράς του ^{238}U . Η μέση τιμή από όλα τα ραδιονουκλίδια της σειράς υπολογίστηκε στα 6 Bq/L. Η μέγιστη τιμή βρέθηκε για το ^{40}K στα 158 Bq/L, ενώ η ελάχιστη για το ^{137}Cs στα 0.3 Bq/L. Τα επίπεδα ραδιενέργειας που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία συμφωνούν με δεδομένα στη βιβλιογραφία για τα ραδιονουκλίδια ^{40}K και ^{137}Cs από παλιότερες μετρήσεις (έτη 2006-2009) στην ίδια περιοχή [ΚΥΠΡΙΑΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ, 2010].

3.4 Πειραματική βαθμονόμηση του *in-situ* συστήματος στο ίζημα στην περιοχή ενεργειών 350 – 2600 keV

Η βαθμονόμηση του *in-situ* συστήματος για μετρήσεις στο ίζημα σε γεωμετρία-2π έγκειται στον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής σε μονάδες όγκου, εν συναρτήσει της ενέργειας της ακτινοβολίας-γ. Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά οι απαραίτητες για τη βαθμονόμηση εργασίες στο εργαστήριο και στο πεδίο καθώς και τα αποτελέσματά τους. Στην ενότητα αυτή, τα παραπάνω αποτελέσματα συνδυάζονται για τον υπολογισμό της εν του συστήματος KATERINA στο ίζημα. Αρχικά, αναφέρονται τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται. Αμέσως μετά δίνονται αναλυτικά οι υπολογισμοί της εν σε κάθε κορυφή του φάσματος. Τα τελικά αποτελέσματα της πειραματικής βαθμονόμησης συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.8.

Η βαθμονόμηση του *in-situ* συστήματος πραγματοποιήθηκε για τα φυσικά ραδιονουκλίδια ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{40}K , ^{208}Tl από τις φωτοκορυφές τους στις ενέργειες 351, 609, 1460, και 2614 keV αντίστοιχα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στηρίχθηκε στη χρήση ενός ήδη βαθμονομημένου ανιχνευτή (HPGe) για την εύρεση της ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων ανά μονάδα όγκου στο ίζημα.

Τα δύο βασικά μεγέθη (cps, A_{ref}) που χρειάζονται στους υπολογισμούς της ανιχνευτικής απόδοσης στο ίζημα προσδιορίστηκαν από μετρήσεις στο πεδίο και στο εργαστήριο και περιλαμβάνουν :

- A. Τον υπολογισμό του ρυθμού γεγονότων (cps) όπως ανιχνεύονται στα *in-situ* φάσματα νερού (cps_w^γ) και ιζήματος (cps_s^γ) σε μία συγκεκριμένη φωτοκορυφή (και οφείλονται στην εκπομπή ενός ραδιονουκλιδίου).
- B. Την εύρεση των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων (A_{ref}) στο επιφανειακό ίζημα, που συλλέγεται στο σημείο βαθμονόμησης του *in-situ* συστήματος, οι οποίες αποτελούν τιμές αναφοράς.

Η σχέση 3.2 περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού της απόδοσης εν χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη. Στον αριθμητή οι ποσότητες cps_s και cps_w αναφέρονται στον αριθμό ανά μονάδα χρόνου γεγονότων μιας φωτοκορυφής στο φάσμα ιζήματος και νερού αντίστοιχα. Ο παρονομαστής της σχέσης είναι το γινόμενο της πιθανότητας εκπομπής της αντίστοιχης ακτίνας-γ του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου (I_γ), επί την συγκέντρωσή του στο ίζημα, A_{ref} , έτσι όπως προσδιορίστηκε στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας τον βαθμονομημένο ανιχνευτή (HPGe).

$$\epsilon_V = \frac{\text{cps}_s^\gamma - \frac{1}{2} \times \text{cps}_w^\gamma \Big|_{\text{KATERINA}}}{I_\gamma \times A_{\text{ref}} \Big|_{\text{HPGe}}} \quad (3.2)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό της ϵ_V , στην περίπτωση όπου στη συγκεκριμένη κορυφή συνεισφέρει ένα μόνο ραδιονουκλίδιο (με μια ή περισσότερες φωτοκορυφές). Στην περίπτωση όπου στην ίδια κορυφή ενός φάσματος του *in-situ* συστήματος συνεισφέρουν περισσότερες από μία φωτοκορυφές οι οποίες αντιστοιχούν σε **διαφορετικά** ραδιονουκλίδια και δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός τους, η παραπάνω σχέση δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει. Ο διαχωρισμός στην περίπτωση δύο μερικώς αλληλεπικαλυπτόμενων φωτοκορυφών, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω προσαρμογής διπλής Gaussian συνάρτησης στην κορυφή με χρήση του προγράμματος ανάλυσης φασματοσκοπίας- γ SPECTRW. Στην περίπτωση πλήρους αλληλοεπικάλυψης μπορεί να προσδιοριστεί θεωρητικά ο αριθμός γεγονότων της κορυφής που αντιστοιχεί σε ένα εκ των δύο ραδιονουκλιδίων εάν η ενεργότητά του προσδιοριστεί από άλλη (μη αλληλεπικαλυπτόμενη) φωτοκορυφή στο φάσμα. Για να είναι εφικτό αυτό απαιτείται το σύστημα να είναι ήδη βαθμονομημένο και να παρέχει ποσοτικά αποτελέσματα, το οποίο στην παρούσα εργασία είναι το ζητούμενο. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε να αναπτυχθεί ειδική μεθοδολογία.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε διαφοροποιείται μερικώς σε κάθε κορυφή. Η περιγραφή της μεθοδολογίας δίνεται παρακάτω ειδικά για την εύρεση της ϵ_V στα 1460 keV. Τα συνολικά γεγονότα, ανά μονάδα χρόνου, της κορυφής στα 1460 keV στο νερό cps_w και στο ίζημα cps_s , ($cps_{s,w}$), οφείλονται στις επιμέρους φωτοκορυφές του ^{40}K (1460.8keV) και του ^{214}Bi (6 φωτοκορυφές, 1377-1543 keV) όπως φαίνεται στη σχέση 3.3. Οι δυο αυτές ποσότητες $cps_{s,w}$ έχουν ήδη προσδιοριστεί (*ενότητα 3.2.1*) από την ανάλυση των *in-situ* φασμάτων (στο νερό και στο ίζημα).

$$cps_{s,w} = cps_{|40K\ s,w} + cps_{|214Bi\ s,w} \quad (3.3)$$

$$cps_{|40K\ s,w} = cps_{s,w} - cps_{|214Bi\ s,w} \quad (3.4)$$

Η σχέση 3.4 προκύπτει λύνοντας την παραπάνω σχέση 3.3 ως προς την ποσότητα $cps_{|40K\ s,w}$.

Σύμφωνα με την αρχική σχέση 3.2 η απόδοση ϵ_V σε μια ενέργεια, προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τα ‘καθαρά’ γεγονότα ανά μονάδα χρόνου μιας φωτοκορυφής (ίζημα) και τη συγκέντρωση του αντίστοιχου ραδιονουκλιδίου στο ίζημα. Στην ενέργεια στα 1460keV η ϵ_V μπορεί να προσδιοριστεί είτε χρησιμοποιώντας την φωτοκορυφή του ^{40}K ή αντίστοιχα τις φωτοκορυφές του ^{214}Bi . Για την περίπτωση του ^{40}K η σχέση 3.2 μετασχηματίζεται στη σχέση 3.5, όπου :

$$\epsilon_V = \frac{cps_{s\ |40K} - \frac{1}{2} \cdot cps_{w\ |40K}}{I_\gamma \cdot A_{ref\ |40K}} \quad (3.5)$$

ϵ_V : Η ανιχνευτική απόδοση στο ίζημα στα 1460keV

I_γ : Η πιθανότητα εκπομπής (10.7%) της ακτίνας-γ του ^{40}K (1460.8 keV)

$cps_s|_{40K}$: Τα γεγονότα (νερό και ίζημα) ανά μονάδα χρόνου στην κορυφή (1460 keV) **στο φάσμα του ιζήματος**, που οφείλονται αποκλειστικά στην εκπομπή της ακτίνας του ^{40}K στα 1460.8 keV.

$cps_w|_{40K}$: Τα γεγονότα (νερό) ανά μονάδα χρόνου στην κορυφή (1460) **στο φάσμα του νερού**, που οφείλονται αποκλειστικά στην εκπομπή της ακτίνας του ^{40}K στα 1460.8 keV.

$A_{ref}|_{40K}$: Η συγκέντρωση (ενεργότητα ανά μονάδα όγκου του δείγματος) του ^{40}K όπως προσδιορίστηκε στο επιφανειακό δείγμα (ενότητα 3.3.2)

Αντικαθιστώντας την ποσότητα $cps_s|_{40K}$ στην παραπάνω σχέση 3.5 από το ισοδύναμό της (σχέση 3.4 για το ίζημα), η άγνωστη ποσότητα, $cps_w|_{40K}$, αντικαθίσταται από τις δυο ποσότητες της σχέσης 3.4. Ο συνδυασμός των δυο σχέσεων 3.4 και 3.5 δίνουν την παρακάτω εξίσωση 3.6 :

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s - cps_s|_{214Bi} - \frac{1}{2} \cdot cps_w|_{40K}}{I_\gamma \cdot A_{ref}|_{40K}} \quad (3.6)$$

Η ποσότητα $cps_s|_{214Bi}$ αποτελεί το άθροισμα των γεγονότων ανά μονάδα χρόνου στις φωτοκορυφές (6 ακτίνες-γ) του ^{214}Bi , στο ενεργειακό εύρος 1377-1543 keV, που συμβάλλουν στην κορυφή (1460 keV) στο φάσμα του ιζήματος. Στην περίπτωση όπου επιλεγόταν ο προσδιορισμός της στη ζητούμενη ενέργεια (1460 keV) χρησιμοποιώντας το ^{214}Bi αντί του ^{40}K θα προέκυπτε η παρακάτω σχέση 3.7 :

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s|_{214Bi} - \frac{1}{2} \cdot cps_w|_{214Bi}}{I'_\gamma \cdot A_{ref}|_{214Bi}} \quad (3.7)$$

Όπου:

ε_V : Η ανιχνευτική απόδοση στο ίζημα στα 1460 keV.

I'_γ : Η συνολική πιθανότητα εκπομπής (11.6%) των ακτίνων-γ (1377-1543 keV) του ^{214}Bi , και του οποίου οι φωτοκορυφές συγκεντρώνονται στην κορυφή στα 1460 keV.

$cps_s|_{214Bi}$: Τα γεγονότα (νερό και ίζημα) ανά μονάδα χρόνου στην κορυφή (1460 keV) **στο φάσμα του ιζήματος**, που οφείλονται αποκλειστικά στην εκπομπή των ακτίνων του ^{214}Bi και αθροίζονται στην κορυφή στα 1460 keV.

$cps_w|_{214Bi}$: Τα γεγονότα (νερό) ανά μονάδα χρόνου στην κορυφή (1460) **στο φάσμα του νερού**, που οφείλονται αποκλειστικά στην εκπομπή των ακτίνων του ^{214}Bi και αθροίζονται στην κορυφή στα 1460 keV.

$A_{ref|40K}$: Η συγκέντρωση του ^{214}Bi όπως προσδιορίστηκε στο επιφανειακό δείγμα από την φωτοκορυφή του στα 1764.5 keV (ενότητα 3.3.2).

Οι σχέσεις 3.5 και 3.7 περιγράφουν τον προσδιορισμό της ε_V στην ενέργεια 1460 keV. Λύνοντας τη σχέση 3.7 ως προς την ποσότητα $cps_s|_{214Bi}$ (σχέση 3.8) και αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα στη σχέση 3.6 προκύπτει η παρακάτω σχέση υπολογισμού της ε_V (σχέση 3.9) :

$$cps_s|_{214Bi} = \varepsilon_V \cdot I'_\gamma \cdot A_{ref|214Bi} + \frac{1}{2} \cdot cps_w|_{214Bi} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s - \frac{1}{2} \cdot cps_w|_{40K} - \frac{1}{2} \cdot cps_w|_{214Bi}}{I'_\gamma \cdot A_{ref|214Bi} + I_\gamma \cdot A_{ref|40K}} \quad (3.9)$$

Στη σχέση 3.9 εμφανίζονται οι συγκεντρώσεις των δυο ραδιονουκλιδίων που ανιχνεύονται στην κορυφή στα 1460 keV καθώς και **τα συνολικά γεγονότα** ανά μονάδα χρόνου της κορυφής 1460 keV στα δυο φάσματα (νερό ($(cps_w|_{40K} + cps_w|_{214Bi})$) και ίζημα (cps_s)). Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται καλύτερα στην τελική σχέση υπολογισμού της ε_V στα 1460 keV (σχέση 3.10), η οποία προκύπτει με εισαγωγή της σχέσης 3.3 (περίπτωση νερού w) στην παραπάνω σχέση 3.9 :

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s - \frac{1}{2} \cdot cps_w}{I'_\gamma \cdot A_{ref|214Bi} + I_\gamma \cdot A_{ref|40K}} \quad (3.10)$$

Ο αριθμητής της σχέσης 3.10 είναι η ποσότητα Net cps_s που υπολογίστηκε στην ενότητα 3.2.1 (πίνακας 3.2). Στην παραπάνω ανάλυση (σχέση 3.7) γίνεται μια παραδοχή που θα πρέπει να αναφερθεί. Στην περίπτωση του υπολογισμού της ε_V μέσω της σχέσης 3.7 χρησιμοποιώντας τα γεγονότα του ^{214}Bi , έχει γίνει η εξής υπόθεση: Οι ακτίνες-γ του ^{214}Bi στην κορυφή αυτή (1460 keV) εκτείνονται σε ένα ενεργειακό εύρος μεταξύ 1377-1583 keV. Στον υπολογισμό θεωρείται ότι στο ενεργειακό εύρος αυτό η ε_V παραμένει σταθερή, δηλαδή στην ενέργεια 1377 keV η ε_V έχει την ίδια τιμή που έχει και στην ενέργεια 1543 keV. Στην περίπτωση του φάσματος νερού η σχετική απόκλιση (%) μεταξύ των τιμών της απόδοσης στις δυο ακραίες ενέργειες (1377 και 1583 keV) υπολογίζεται (βαθμονομημένο σύστημα στο νερό) στην τιμή 4%. Όμως δεν είναι γνωστό πως αλλάζει η ε_V στο ίζημα συναρτήσει της ενέργειας. Η υπόθεση λοιπόν της σταθερής τιμής της για το ίζημα στο εύρος ενεργειών 1377-1583 keV μένει να ελεγχθεί. Ο έλεγχος της υπόθεσης πραγματοποιείται σε επόμενη ενότητα με τη βοήθεια της προσομοίωσης MC (ενότητα 3.5.3).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την περίπτωση του ^{40}K , είναι κοινή για τον προσδιορισμό της ϵ_V σε όλες τις κορυφές (ενέργειες) του φάσματος ιζήματος, στη δημιουργία των οποίων συμμετέχουν πάνω από ένα ραδιονουκλίδια. Οι κορυφές αυτές, όπως παρουσιάζονται στο φάσμα του ιζήματος, (στις οποίες ανιχνεύονται πολλές ακτίνες- γ ενός ή και περισσότερων ραδιονουκλιδίων) καθώς και οι ακτίνες- γ , κάθε ραδιονουκλιδίου, με τα αντίστοιχα ποσοστά % εκπομπής τους παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.7. Στον πίνακα 3.8 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της πειραματικής βαθμονόμησης στο ενεργειακό εύρος 350-2600 keV. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί της βαθμονόμησης για τα αποτελέσματα του πίνακα 3.8 δίνονται στο Παράρτημα Β.

| Ενέργεια Κορυφής (keV) | Ενέργεια Ακτίνας- γ (keV) | Πιθανότητα Εκπομπής * (%) | Στοιχείο |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------|
| 351 | 338.32 | 11.27 | ^{228}Ac |
| | 351.9 | 37.6 | ^{214}Pb |
| 609 | 583.19 | 84.5 | ^{208}Tl |
| | 609.31 | 46.1 | ^{214}Bi |
| | 661.67 | 85.1 | ^{137}Cs |
| 1460 | * | * | ^{214}Bi |
| | 1460.8 | 10.7 | ^{40}K |
| 1750 | 1729.6 | 2.92 | ^{214}Bi |
| | 1764.5 | 15.4 | ^{214}Bi |
| 2614 | 2614 | 99 | ^{208}Tl |

* Σύνολο 13 ακτίνων- γ ενεργειών 1377 – 1583 keV (11.6%)

Πίνακας 3.7 : Συγκεντρωτικά στοιχεία των ραδιονουκλιδίων που συμμετέχουν στο σχηματισμό φωτοκορυφών στο *in-situ* φάσμα του ιζήματος

Τα σχετικά σφάλματα της ϵ_V υπολογίστηκαν στις τιμές 25%, 22%, 7%, 8% και 13% στα ραδιονουκλίδια ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{40}K , ^{208}Tl στις ενέργειες 351, 609, 1460, 1765 και 2614 keV αντίστοιχα. Στον υπολογισμό της ϵ_V στα 609 keV χρησιμοποιήθηκε η τιμή της A_{ref} που προσδιορίστηκε για το ^{214}Bi στα 1764.5 keV. Ο λόγος των μεγάλων σφαλμάτων στις χαμηλές ενέργειες (351, 609 keV) είναι η χαμηλή στατιστική των μετρήσεων. Το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων μικραίνει στις μεγαλύτερες ενέργειες (>1460keV) όπου το υπόβαθρο Compton του ^{40}K δεν επηρεάζει τις φωτοκορυφές.

| Ενέργεια Κορυφής (keV) | Στοιχείο | $I_\gamma \cdot A_{ref}$ (HPGe) (Bq/L) | Net cps, Ίζημα (sec ⁻¹) | ϵ_V (L) |
|------------------------------|-------------------|--|---|---------------------|
| 351 | ²²⁸ Ac | 0.39 ± 0.07 | 0.123 ± 0.007 | 0.044 ± 0.011 |
| | ²¹⁴ Pb | 2.38 ± 0.64 | | |
| 609 | ²⁰⁸ Tl | 0.74 ± 0.10 | 0.129 ± 0.001 | 0.032 ± 0.007 |
| | ²¹⁴ Bi | 2.96 ± 0.80 | | |
| | ¹³⁷ Cs | 0.29 ± 0.06 | | |
| 1460 | ²¹⁴ Bi | 0.77 ± 0.21 | 0.476 ± 0.004 | 0.027 ± 0.002 |
| | ⁴⁰ K | 16.95 ± 1.01 | | |
| 1750 | ²¹⁴ Bi | 1.35 ± 0.36 | 0.036 ± 0.001 | 0.026 ± 0.007 |
| 2614 | ²⁰⁸ Tl | 0.87 ± 0.12 | 0.021 ± 0.001 | 0.024 ± 0.003 |

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο ίζημα.

3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την απόδοση του *in-situ* συστήματος στο ίζημα

Η χρήση κωδικών MC σε προβλήματα διάδοσης και παρακολούθησης σωματιδίων, στα πλαίσια της πυρηνικής φυσικής, είναι ευρέως διαδεδομένη. Αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα γρήγορα και απλά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MCNP5 για τους θεωρητικούς υπολογισμούς της απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο ίζημα. Αυτό επιτεύχθηκε αναπαράγοντας κατάλληλα στον κώδικα τη μέτρηση στο ίζημα με το *in-situ* σύστημα. Στην ενότητα αυτή δίνεται η περιγραφή των παραμέτρων που εισάγονται στον κώδικα, τα βήματα ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν στα διάφορα στάδια ανάπτυξης του μοντέλου MC και τα τελικά αποτελέσματα του κώδικα για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος για μετρήσεις στον πυθμένα.

3.5.1 Προσδιορισμός του Ενεργού Όγκου Ανίχνευσης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ϵ_V του *in-situ* συστήματος σε μετρήσεις θαλάσσιου ιζήματος, απαιτείται να μελετηθεί η ενδο-απορρόφηση της ακτινοβολίας- γ στο ίζημα συναρτήσει του όγκου. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται θεωρητικά ο ενεργός όγκος ανίχνευσης δηλαδή, ο όγκος του ιζήματος από τον οποίο εάν εκπεμφθούν ακτίνες- γ έχουν μη μηδενική πιθανότητα να ανιχνευθούν προτού απορροφηθούν πλήρως στο ίζημα. Ακολουθήθηκε παρόμοια μεθοδολογία στον υπολογισμό του ενεργού όγκου με εκείνη της βαθμονόμησης του *in-situ* συστήματος για μετρήσεις στο νερό με τη διαφορά (σε σχέση με τους υπολογισμούς στο νερό) ότι η γεωμετρία μέτρησης στο ίζημα είναι διαφορετική (γεωμετρία- 2π) και στο ίζημα υπάρχει εξάρτηση του ενεργού όγκου όχι μόνο από την ενέργεια αλλά και από τα κύρια χαρακτηριστικά του ιζήματος S (κύρια στοιχεία, πυκνότητα, ποσότητα νερού). Με τη βοήθεια του προγράμματος X-COM υπολογίστηκε ο ολικός μαζικός

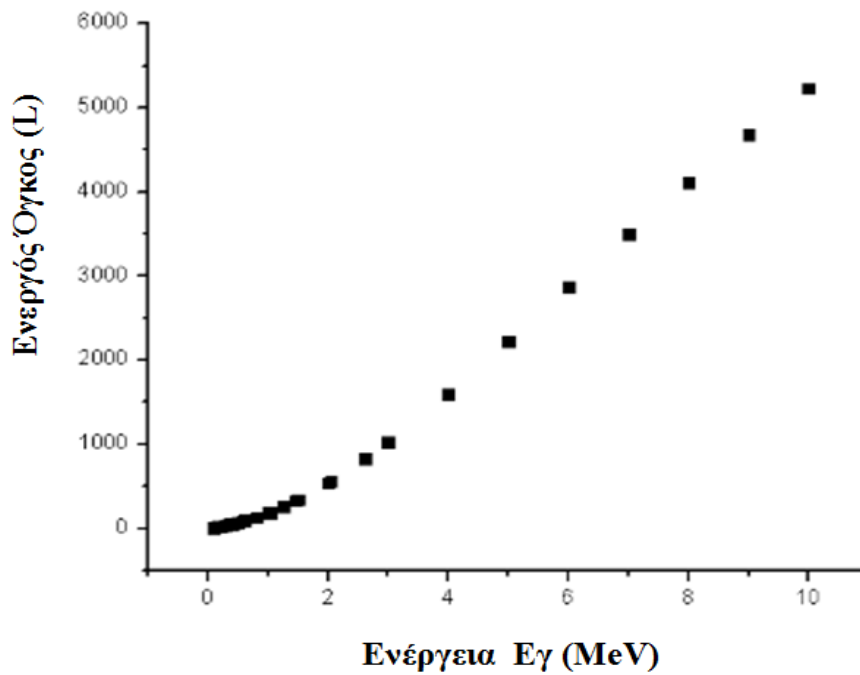
συντελεστής εξασθένησης (total mass attenuation coefficient) μ_{tot} σε cm^2/gr για τα χαρακτηριστικά του δεδομένου ιζήματος (site1), για ενέργειες φωτονίων από 0.1 – 10 MeV [Berger M. J. et al., 2010]. Πριν τη χρήση του προγράμματος X-COM, ελέγχθηκε η σύγκλιση (εντός του 5%) των τιμών συντελεστών εξασθένησης που χρησιμοποιεί το λογισμικό X-COM με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιεί ο κώδικας MC προσομοίωσης MCNP5 [Israel H.I. and Storm E., 1970] για όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση και στο αντίστοιχο εύρος ενεργειών που μας ενδιαφέρει. Η σύσταση του ιζήματος που εισήχθη στον κώδικα για τους υπολογισμούς προήλθε από κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (πίνακας 3.11). Η απόσταση που μπορεί να διανύσει μία ακτίνα- γ ενέργειας E_γ μέσα στο ίζημα έως ότου απορροφηθεί πλήρως ονομάζεται ενεργός ακτίνα (effective radius x_{eff}). Καθορίζεται μέσω της εξίσωσης 3.11, συναρτήσεως του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης $\mu(Z,E)$ για ένα συγκεκριμένο υλικό :

$$x_{\text{eff}} = \ln(1000)/\mu = 6.91/\mu. \quad (3.11)$$

Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης $\mu(Z,E)$ για το συγκεκριμένο υλικό βρέθηκε πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα του X-COM με την υγρή πυκνότητα του ιζήματος. Υπολογίζοντας την ενεργό ακτίνα (συναρτήσεως της ενέργειας) και υποθέτοντας ημισφαιρική συμμετρία μπορεί να βρεθεί ο ενεργός όγκος ιζήματος (effective volume) που εισάγεται στον κώδικα ως ‘πηγή’ σε γεωμετρία 2π . Ο ενεργός όγκος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$V(E,S) = \frac{1}{2} * V_{\text{σφαιράς}} = 4 * \pi * x_{\text{eff}}^3(E,S) / 6 \quad (3.12)$$

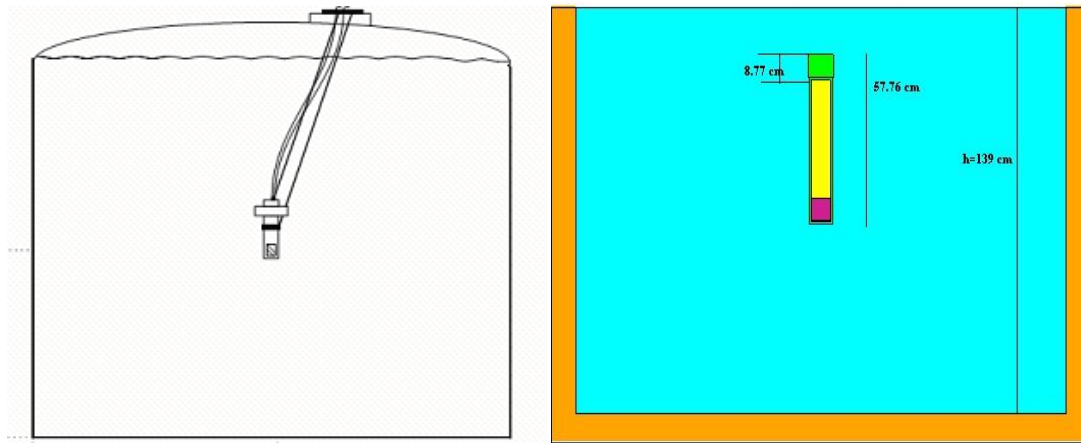
Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ενεργός όγκος είναι ο ελάχιστος όγκος πέραν του οποίου το γινόμενο της απόδοσης ϵ επί τον όγκο της ‘πηγής’ V (ανιχνευτική απόδοση ϵ_V), παραμένει σταθερό. Η ενεργός ακτίνα όπως επίσης και ο ενεργός όγκος στο ίζημα υπολογίστηκαν για ενέργειες φωτονίων από 100 – 3000 keV, για τη σύσταση του ιζήματος που συλλέχθηκε στο σημείο βαθμονόμησης (site1) λαμβάνοντας υπόψη και την ποσόστωση νερού σε αυτό. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών του ενεργού όγκου V_{eff} , υπολογισμένος σε λίτρα L , συναρτήσεως της ενέργειας E_γ , σε MeV χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.12 και τις υπολογισμένες τιμές της ενεργής ακτίνας x_{eff} (X-COM) φαίνονται στο γράφημα 3.7.



Γράφημα 3.7 : Αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών του ενεργού όγκου V συναρτήσει της ενέργειας E_γ

3.5.2 Εκτίμηση της Απόδοσης του Ανιχνευτικού Συστήματος στο νερό και πειραματική επιβεβαίωση

Το πρώτο βήμα για την εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος ήταν να αναπτυχθεί κατάλληλο μοντέλο MC του συστήματος και να ελεγχθεί η σωστή αναπαραγωγή προηγούμενων αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης του *in-situ* συστήματος στο νερό. Η πειραματική βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε δεξαμενή βαθμονόμησης στις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π. (βλέπε ενότητα 2.3.2.2). Στην εικόνα 3.3 δίνεται σκιαγράφημα της δεξαμενής βαθμονόμησης (αριστερά) και το πώς αναπαραστάθηκε στον MCNP5 κώδικα η μέτρηση (δεξιά), τοποθετώντας το μοντέλο MC του συστήματος στο μέσο της δεξαμενής. Στην ίδια εικόνα σημειώνονται οι διαστάσεις του μοντέλου του συστήματος και το βάθος νερού της δεξαμενής κατά τις μετρήσεις βαθμονόμησης. Στο μοντέλο αναπαράχθηκε το πειραματικό φάσμα για τη μέτρηση του ^{40}K (1460.8 keV) και του ^{137}Cs (661.67 keV) ξεχωριστά. Στον κώδικα εισήχθησαν ως παράμετροι η ενεργειακή βαθμονόμηση και η διακριτική ικανότητα του συστήματος, έτσι όπως μετρήθηκαν πειραματικά. Τα φάσματα του MC μοντέλου παρουσιάζονται στο γράφημα 3.8 και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.



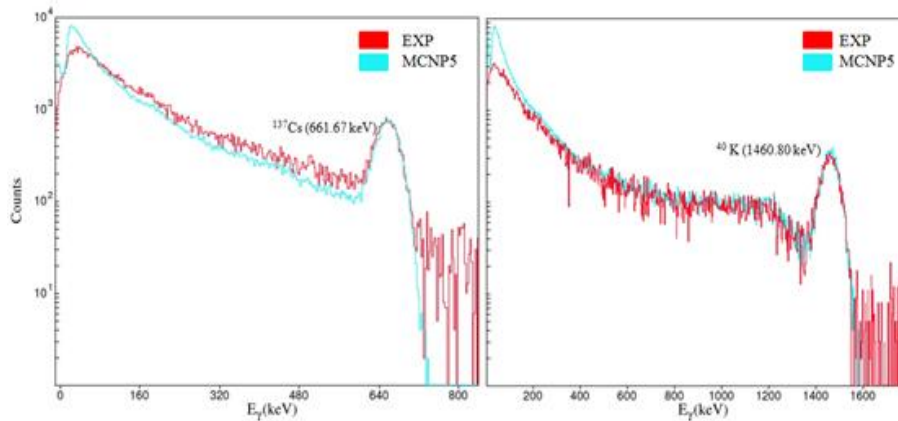
Εικόνα 3.3 : Περιγραφή της πειραματικής διάταξης βαθμονόμησης του συστήματος KATEPINA στο νερό και αναπαράσταση (δεξιαμενή, μοντέλο ανιχνευτή) στον κώδικα MCNP5.

Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος σε μια μεγάλη ενεργειακή περιοχή στο φάσμα. Στις χαμηλές ενέργειες παρατηρείται υπερεκτίμηση των ανιχνευόμενων γεγονότων στα φάσματα της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς είναι γνωστή η μη καλή περιγραφή στους χρησιμοποιούμενους κώδικες MC της μεταφοράς φωτονίων ενέργειας χαμηλότερης των 100 keV. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί μέσω προσομοίωσης για την εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης στο νερό $\epsilon \cdot V$, συγκρίνονται με τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα [Bagatelas C., et al., 2010], για τα ραδιονουκλίδια ^{40}K , ^{137}Cs καθώς και για το ^{99}Tc (141 keV) στον πίνακα 3.10. Σε όλους τους θεωρητικούς υπολογισμούς ορίστηκε στατιστικό σχετικό σφάλμα μικρότερο από 10% (τιμή που δίνει ο κώδικας ως μέγιστη τιμή) έτσι ώστε να προκύπτουν κατά το δυνατό πιο αξιόπιστα αποτελέσματα [Los Alamos, 1993]. Η συμφωνία μεταξύ αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος κρίνεται ικανοποιητική καθώς η σχετική απόκλιση μεταξύ τους δεν ξεπερνά το 7% και στις τρεις υπό μελέτη ενέργειες.

| Ραδιονουκλίδιο | MCNP5 $\epsilon \cdot V$ | *EXPERIMENTAL $\epsilon \cdot V$ | |
|-------------------|------------------------------|----------------------------------|---|
| | (m^3) | (m^3) | % |
| ^{40}K | $1.35 \cdot 10^{-4}$ (8.98%) | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | 4 |
| ^{137}Cs | $1.92 \cdot 10^{-4}$ (6.73%) | $1.8 \cdot 10^{-4}$ | 7 |
| ^{99}Tc | $2.17 \cdot 10^{-4}$ (7.07%) | $2.07 \cdot 10^{-4}$ | 5 |

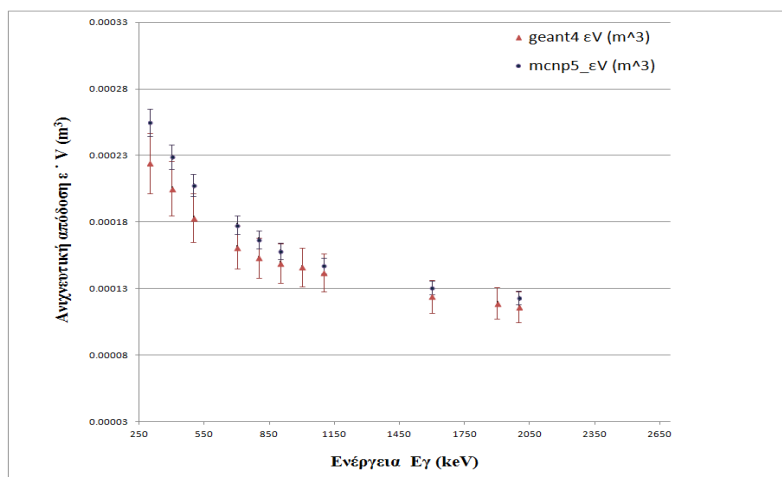
* [Bagatelas C. et al., 2010]

Πίνακας 3.9 : Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών MCNP5 αποτελεσμάτων απόδοσης $\epsilon \cdot V$ του συστήματος KATEPINA στο νερό



Γράφημα 3.8 : Σύγκριση πειραματικών EXP και θεωρητικών MCNP5 φασμάτων στη δεξαμενή για το ^{40}K αριστερά και ^{137}Cs στη δεξιά εικόνα

Τελευταίο βήμα πριν την εφαρμογή του μοντέλου MC στο ίζημα ήταν η επαλήθευση των τιμών της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος στο νερό (GEANT4) σε μια ευρεία περιοχή ενεργειών 300-2000 keV. Τα MCNP5 αποτελέσματα συγκρίνονται με θεωρητικά αποτελέσματα της βαθμονόμησης του συστήματος στο νερό που πραγματοποιήθηκε παλαιότερα χρησιμοποιώντας τον κώδικα GEANT4. Η σχετική απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων MCNP5 και GEANT4 βρέθηκε μικρότερη του 10% σε ενέργειες μεγαλύτερες από 350 keV και έως 20% για ενέργειες μικρότερες από 200 keV (γράφημα 3.9). Ο λόγος για τον οποίο ο κώδικας MCNP5 εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές είναι η διαφορετική προσέγγιση που λαμβάνεται στους δυο κώδικες σε ότι αφορά την εξασθένηση των ακτινών-γ σε ένα μέσο. Στον κώδικα MCNP5 το φωτόνιο παρακολουθείται έως ότου αποκτήσει ενέργεια 1keV, ενέργεια στην οποία θεωρείται ότι έχει απορροφηθεί πλήρως. Στον κώδικα GEANT4 η ενέργεια στην οποία θεωρείται ότι το φωτόνιο έχει απορροφηθεί πλήρως δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την αρχική ενέργεια (υπολογίζεται στο 10% αυτής).



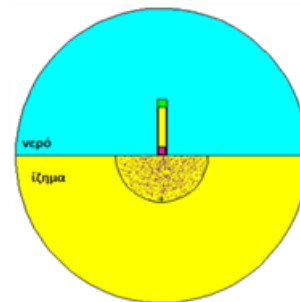
Γράφημα 3.9 : Σύγκριση θεωρητικών (MCNP5, GEANT4) εκτιμήσεων της απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο νερό

Μετά το πέρας των παραπάνω διαδικασιών αξιολόγησης και βελτιστοποίησης του μοντέλου MCNP5, κρίθηκε ότι μπορεί να εφαρμοστεί για τους θεωρητικούς

υπολογισμούς της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος για μετρήσεις ιζήματος, τροποποιώντας κατάλληλα τον κώδικα, περιγράφοντας δηλαδή σε αυτόν κατάλληλα την γεωμετρία μέτρησης (2π) του ιζήματος καθώς και τα χαρακτηριστικά της πηγής και του περιβάλλοντα χώρου (ιζήμα).

3.5.3 Εκτίμηση της θεωρητικής (MC) απόδοσης φωτοκορυφής ϵ_v στο ιζήμα

Η περιγραφή στον κώδικα MCNP5 της μέτρησης του ιζήματος με το *in-situ* σύστημα φαίνεται στην εικόνα 3.4. Το σύστημα τοποθετείται σε επαφή με το ιζήμα έτσι ώστε ο κρύσταλλος NaI(Tl) να βρίσκεται σε πολύ κοντινή απόσταση από αυτό. Τα γεγονότα που προέρχονται από το ιζήμα καταφθάνουν και ανιχνεύονται από έναν ημισφαιρικό όγκο ('πηγή') διαμέτρου η οποία εξαρτάται από την ενέργεια της ακτίνας-γ. Η 'πηγή' περιβάλλεται από ιζήμα ίδιας σύστασης και ίδιων χαρακτηριστικών και από νερό (περιβάλλοντα χώρος). Οι διαστάσεις του περιβάλλοντα χώρου (universe) είναι αρκετά μεγάλες (2 m ακτίνα) ώστε να μην υπάρχουν απώλειες στην παρακολούθηση των γεγονότων.



Εικόνα 3.4: Αναπαράσταση της μέτρησης στο ιζήμα στον κώδικα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραμέτρων του ιζήματος (ενότητα 3.3.1) εισάγονται στο αρχείο εισόδου του κώδικα για τη λεπτομερή περιγραφή του υλικού του ιζήματος σε αυτόν. Η σύσταση του ιζήματος (%) όπως εισάγεται στον κώδικα ως παράμετρος καθώς και οι μετρήσεις σύστασης και ποσόστωσης νερού στο δείγμα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.10. Η σύσταση του ιζήματος που εισάγεται στον κώδικα έχει υπολογιστεί από τα δεδομένα της μέτρησης κύριων στοιχείων (μέτρηση XRF) στο επιφανειακό δείγμα ιζήματος (*site1*) λαμβάνοντας υπόψη την ποσόστωση νερού 25% και κανονικοποιώντας τα αποτελέσματα ώστε το άθροισμα όλων των στοιχείων να δίνει μονάδα (100%). Η ανιχνευτική απόδοση του *in-situ* συστήματος στο ιζήμα ϵ_v (L), εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την έτοιμη συνάρτηση ύψους παλμών F8 tally, αρχικά για τις ενέργειες ακτίνων-γ των ραδιονουκλιδίων (^{40}K , ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{208}Tl) που ανιχνεύθηκαν στο πειραματικό φάσμα. Στους υπολογισμούς ορίστηκε σταθερό στατιστικό σχετικό σφάλμα ίσο με 5% διατηρώντας σταθερό τον αριθμό γεγονότων ανά μονάδα όγκου N/V που παράγονται στην 'πηγή' (βλέπε πίνακα 3.11).

| Σύσταση ιζήματος που εισάγεται στον κώδικα | | Ποσόστωση νερού ιζήματος στον κώδικα | Πυκνότητα υγρού ιζήματος στον κώδικα | Σύσταση αφυδατωμένου ιζήματος από μέτρηση XRF | Μετρημένη Ποσόστωση νερού ιζήματος |
|--|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| | | (w/w %) | (gr/cc) | | (w/w %) |
| | | | | L.O.I. | 13.50 |
| | | | | Sum | 99.82 |
| O | 54.290 | 25 | 2.1 | | 26 ± 11 |
| H | 16.667 | | | | |
| Al | 2.297 | | | Al₂O₃ | 6.61 |
| Si | 12.719 | | | SiO₂ | 43.92 |
| P | 0.010 | | | P₂O₅ | 0.04 |
| K | 0.163 | | | K₂O | 0.28 |
| Ca | 6.123 | | | CaO | 14.09 |
| Ti | 0.136 | | | TiO₂ | 0.47 |
| Fe | 3.317 | | | Fe₂O₃ | 9.55 |
| Na | 0.493 | | | Na₂O | 0.85 |
| Mg | 2.968 | | | MgO | 6.83 |
| S | 0.782 | | | SO₃ | 3.60 |
| Mn | 0.036 | | | MnO | 0.08 |

Πίνακας 3.10: Φυσικές παράμετροι ιζήματος όπως εισάγονται στο αρχείο εισόδου του κώδικα για την περιγραφή της πηγής και του περιβάλλοντα χώρου

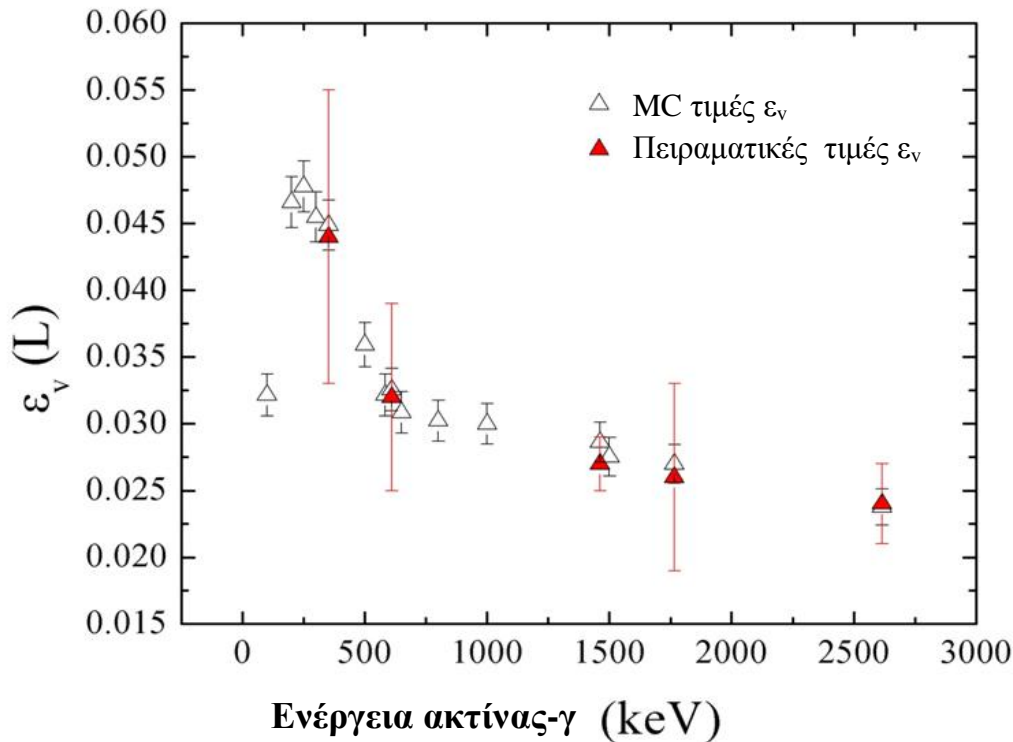
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.11 όπου δίνονται αναλυτικά η ενέργεια των ακτίνων-γ, ο υπολογισμένος ενεργός όγκος χρησιμοποιώντας το X-COM, ο αριθμός γεγονότων N που ζητείται να αναπαραχθούν στον κώδικα, η απόδοση φωτοκορυφής ϵ σε κάθε ενέργεια χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ύψους παλμών F8 tally και τέλος η ανιχνευτική απόδοση ϵ_V του συστήματος στο ιζημα ως το γινόμενο της απόδοσης φωτοκορυφής ϵ και του ενεργού όγκου. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της πειραματικής βαθμονόμησης του συστήματος στον πίνακα 3.12.

| Ενέργεια φωτονίου | V | Γεγονότα N | Πυκνότητα γεγονότων N/V | ϵ (F8 tally) | ϵ_V ($\epsilon \cdot V$) |
|-------------------|----------------|------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| keV | m ³ | | | | L L |
| 351.9 | 46173.5 | 598588 | 12.96389174 | 9.72 ± 0.40 | 0.045 ± 0.002 |
| 609.32 | 92361.2 | 1197361 | 12.96389174 | 3.52 ± 0.17 | 0.033 ± 0.002 |
| 1460.8 | 328328 | 4256409 | 12.96389174 | 0.87 ± 0.05 | 0.029 ± 0.001 |
| 1764.5 | 441619 | 5725101 | 12.96389174 | 0.61 ± 0.03 | 0.027 ± 0.001 |
| 2614 | 826193 | 10710677 | 12.96389174 | 0.29 ± 0.02 | 0.024 ± 0.002 |

Πίνακας 3.11 : Θεωρητική εκτίμηση (MCNP5) της απόδοσης ϵ_V του in-situ συστήματος στο ιζημα

| Ραδιονουκλίδιο | Ενέργεια (keV) | ϵ_v (L) | |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | Θεωρητική Τιμή | Πειραματική Τιμή |
| ^{214}Pb | 351.9 | 0.045 ± 0.002 | 0.044 ± 0.011 |
| ^{214}Bi | 609.32 | 0.033 ± 0.002 | 0.032 ± 0.007 |
| ^{40}K | 1460.8 | 0.029 ± 0.001 | 0.027 ± 0.002 |
| ^{214}Bi | 1764.5 | 0.027 ± 0.001 | 0.026 ± 0.007 |
| ^{208}Tl | 2614 | 0.024 ± 0.002 | 0.024 ± 0.003 |

Πίνακας 3.12: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA στο ιζήμα



Γράφημα 3.10 : Σύγκριση πειραματικής-θεωρητικής καμπύλης ανιχνευτικής απόδοσης (ϵ_v) του συστήματος KATEPINA για τη γεωμετρία μέτρησης του ιζήματος

Η % σχετική απόκλιση των θεωρητικών υπολογισμών από τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές βρέθηκε 2%, 2%, 6%, 4%, 1% στις ενέργειες 351.9 (^{214}Pb), 609.32 (^{214}Bi), 1460 (^{40}K), 1764.5 (^{214}Bi), 2614 (^{208}Tl) keV, αντίστοιχα. Μετά την επιτυχή αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων στις ενέργειες που μελετήθηκαν (351.9, 609.32, 1460.8, 1764.5, 2614 keV) μέσω των ραδιονουκλιδίων που μετρήθηκαν στο φάσμα βαθμονόμησης (^{40}K , ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{208}Tl), το μοντέλο MC εφαρμόστηκε για την

εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος σε ολόκληρο το φάσμα ενεργειών από 200 keV έως 2600 keV.

Όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στο γράφημα 3.10 όπου σημειώνονται και οι πειραματικές τιμές με τα αντίστοιχα σφάλματα. Όπως φαίνεται στο γράφημα οι θεωρητικοί υπολογισμοί MC συγκλίνουν με τις κεντρικές τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων, σε όλο το εύρος ενεργειών. Τα μεγάλα πειραματικά σφάλματα οφείλονται στη χαμηλή στατιστική των μετρήσεων. Λόγω της καλής σύγκλισης θεωρητικών υπολογισμών – πειραματικών τιμών, οι θεωρητικές τιμές MC της ανιχνευτικής απόδοσης ϵ_v επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν στους ποσοτικούς υπολογισμούς συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στον πυθμένα της θάλασσας στην ίδια περιοχή, χρησιμοποιώντας την *in-situ* μέθοδο σε γειτονικά σημεία στο σημείο βαθμονόμησης *site 1* όπως συζητείται αναλυτικά στο 4^ο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4 Εφαρμογή και Επαλήθευση της μεθόδου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της *in-situ* μεθόδου χρησιμοποιώντας το σύστημα KATEPINA για ποσοτικές μετρήσεις ραδιενέργειας μέσω φασματοσκοπίας- γ στον θαλάσσιο πυθμένα. Η εφαρμογή αυτή υλοποιήθηκε ποντίζοντας το σύστημα στην ίδια περιοχή όπου έγινε η βαθμονόμηση. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν παράλληλα με τις μετρήσεις βαθμονόμησης του συστήματος για την εύρεση της ανιχνευτικής του απόδοσης ϵ_v . Τα ποσοτικά αποτελέσματα των *in-situ* μετρήσεων στο ίζημα συγκρίνονται με αντίστοιχες μετρήσεις φασματοσκοπίας- γ στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας ανιχνευτή υψηλής ενεργειακής διακριτικής ικανότητας και δείγματα επιφανειακών ιζημάτων που συλλέχθηκαν από τα ίδια σημεία. Στην ενότητα 4.1 δίνονται η περιγραφή της περιοχής μελέτης και στην ενότητα 4.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών του ιζήματος στην περιοχή αυτή. Στην ενότητα 4.3 παρουσιάζονται τα πειραματικά φάσματα των μετρήσεων στο ίζημα, όπως συλλέχθηκαν από το πεδίο και όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο (*in-situ* και εργαστηριακή μέθοδος). Τέλος, στην ενότητα 4.4, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ποσοτικοποίηση των *in-situ* μετρήσεων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 3 και δίνονται τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο ίζημα για τις δύο μεθόδους (*in-situ*, εργαστήριο).

4.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης και των μετρήσεων

Οι *in-situ* μετρήσεις στο ίζημα έγιναν στην παράκτια ζώνη κοντά στο λιμάνι του Βασιλικού στην Κύπρο που βρίσκεται περίπου 25 χιλιόμετρα ανατολικά της Λεμεσού. Στην περιοχή αυτή λειτουργούσε έως και το 1995 εργοστάσιο (εικόνα 4.1.1 δεξιά) που περιελάμβανε τρεις κύριες μονάδες παραγωγής, φωσφορικών λιπασμάτων,

αμμωνίας και θεικού οξέος. Οι εργασίες αποσυναρμολόγησης του εργοστασίου ξεκίνησαν τον Οκτώβρη του 2006 και ολοκληρώθηκαν το Μάιο του 2007.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 11/10/10 έως 14/10/10 στα πλαίσια του προγράμματος RER7003/04/01 (Marine Environmental Assessment of the Mediterranean Sea) του ΔΟΑΕ (ΙΑΕΑ). Στην εικόνα 4.1 φαίνεται η περιοχή μελέτης (εικόνα πάνω δεξιά) και ο χάρτης της περιοχής (αριστερά) στον οποίο σημειώνονται τα σημεία όπου πραγματοποιήθηκαν *in-situ* μετρήσεις στο ίζημα σε γεωμετρία-2π (συγκεκριμένα τα σημεία **2, 3, 4, 7, 8** καθώς και το σημείο της βαθμονόμησης της περιοχής *site1*). Για την περιοχή *site1*, εκτός της μέτρησης στο ίζημα (γεωμετρία-2π) έγινε και συλλογή του φάσματος νερού σε γεωμετρία-4π. Οι *in-situ* μετρήσεις σε όλα τα σημεία στο ίζημα πραγματοποιήθηκαν σε γεωμετρία-2π ποντίζοντας το σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ στον πυθμένα σε γεωμετρία επαφής τηρώντας με τον τρόπο αυτό ίδιες συνθήκες μέτρησης με τη μέτρηση στο ίζημα στο σημείο της βαθμονόμησης, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.



Εικόνα 4.1: Περιοχή μετρήσεων *in-situ* φασματοσκοπίας-γ χρησιμοποιώντας το σύστημα ΚΑΤΕΡΙΝΑ. Τα σημεία των ποντίσεων του συστήματος καθώς και τα σημεία δειγματοληψίας ιζημάτων για ανάλυση στο εργαστήριο σημειώνονται στο χάρτη με κόκκινες κουκίδες.

Η μέτρηση της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων στο νερό στο σημείο της βαθμονόμησης, θεωρήθηκε χαρακτηριστική της περιοχής, επιπλέον οι μικρές μεταβολές στην αλατότητα του νερού που συμβαίνουν, δεν επηρεάζουν τη συγκέντρωση του ^{40}K στο νερό. Για τους παραπάνω λόγους δεν κρίθηκε απαραίτητη η λήψη επιπλέον φασμάτων στο νερό, σε κάθε σημείο όπου ποντίστηκε το σύστημα για τις μετρήσεις στο ίζημα.

Εκτός από τις *in-situ* μετρήσεις στο πεδίο, συλλέχθηκαν επιφανειακά δείγματα ιζήματος (στα σημεία **2, 3, 4, 7, 8** που φαίνονται στον χάρτη), για μετρήσεις φασματοσκοπίας-γ στο εργαστήριο. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στα επιφανειακά ιζήματα πραγματοποιήθηκε σε βαθμονομημένο

ανιχνευτή HPGe στο εργαστήριο σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.1.5.

Για τη συλλογή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος ‘δειγματολήπτης αρπαγής’ ώστε η συλλογή του επιφανειακού ιζήματος να γίνεται σε βάθος 15 cm περίπου μέσα στον πυθμένα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων στο επιφανειακό ίζημα (15cm βάθος από τον πυθμένα) στο εργαστήριο, αποτελεί μέτρηση αναφοράς και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της *in-situ* φασματοσκοπίας-γ (ενότητα 4.4).

4.2 Χαρακτηρισμός ιζήματος της περιοχής

Μέρος του επιφανειακού ιζήματος που συλλέχθηκε σε κάθε σημείο, για τη μέτρηση φασματοσκοπίας-γ στο εργαστήριο, χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό του ως προς την πυκνότητα (υγρή/αφυδατωμένη) και την ποσόστωση νερού. Στα επιφανειακά δείγματα **σε όλα τα σημεία** πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προσδιορισμού της **πυκνότητας** του ιζήματος και της **ποσόστωσης νερού** σε αυτό. Οι μετρήσεις της αφυδατωμένης πυκνότητας και της ποσόστωσης νερού υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις μετρήσεις αυτές στο σημείο της βαθμονόμησης (ενότητα 3.3.1). Για τον προσδιορισμό της υγρής πυκνότητας του ιζήματος χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της αφυδατωμένης πυκνότητας και της ποσόστωσης νερού [de Groot A.V. et al., 2009]. Οι αβεβαιότητες που εισάγονται στις μετρήσεις υπολογίστηκαν μέσω της θεωρίας διάδοσης σφαλμάτων παίρνοντας υπόψη αβεβαιότητες της μάζας και του όγκου. Στους υπολογισμούς της ποσόστωσης νερού θεωρήθηκε ότι δεν χάνεται ούτε προστίθεται νερό κατά την λήψη του ιζήματος από τον πυθμένα με το ‘δειγματολήπτη αρπαγής’ αλλά ούτε και αλλάζει η ποσότητα του νερού κατά τη μεταφορά και παραμονή (πριν τη μέτρηση) των δειγμάτων στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών σε όλα τα σημεία των δειγματοληψιών, συμπεριλαμβανομένου και του σημείου της βαθμονόμησης (*site1*), συγκεντρώνονται στον **πίνακα 4.1**. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν ώστε να ελεγχθεί :

α.) εάν οι παράμετροι του ιζήματος που επηρεάζουν τη μέτρηση φασματοσκοπίας-γ, που είναι η πυκνότητα και η σύσταση του, παραμένουν σταθερές για μια δεδομένη περιοχή και

β.) εάν οι τιμές αυτές είναι παραπλήσιες τιμές με αυτές που προσδιορίστηκαν στο σημείο της βαθμονόμησης (*site1*), έτσι ώστε η βαθμονόμηση ως προς την ανιχνευτική απόδοση του *in-situ* συστήματος εν να έχει γενική ισχύ στην ευρύτερη περιοχή. Από τα στοιχεία του πίνακα φαίνεται η **ομοιομορφία** της περιοχής **κατά μήκος** του πυθμένα ως προς τα χαρακτηριστικά της πυκνότητας του ιζήματος και της ποσόστωσης νερού σε αυτό. Οι μέγιστες σχετικές αποκλίσεις (%) από τις τιμές στο σημείο της βαθμονόμησης βρέθηκαν 30% για την πυκνότητα (υγρή) στο σημείο δειγματοληψιών 2 και 6% για την ποσόστωση νερού στο σημείο δειγματοληψιών 7 αντίστοιχα. Οι μέσες αποκλίσεις, από όλα τα σημεία υπολογίστηκαν στις τιμές 4% και 16% για την πυκνότητα (υγρή) και την ποσόστωση νερού αντίστοιχα.

| Σημείο Δειγματοληψίας | Ποσόστωση νερού στο ίζημα | Πυκνότητα αφυδατωμένου δείγματος | Πυκνότητα υγρού δείγματος |
|--------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| | (%) | (gr/cc) | (gr/cc) |
| site 1 | 0.26 ± 0.11 | 1.58 ± 0.06 | 2.14 ± 0.33 |
| 2 | 0.35 ± 0.11 | 1.41 ± 0.06 | 2.15 ± 0.37 |
| 3 | 0.29 ± 0.11 | 1.54 ± 0.06 | 2.15 ± 0.35 |
| 4 | 0.31 ± 0.11 | 1.52 ± 0.06 | 2.19 ± 0.36 |
| 5 | 0.29 ± 0.11 | 1.47 ± 0.06 | 2.07 ± 0.33 |
| 6 | 0.28 ± 0.11 | 1.53 ± 0.06 | 2.11 ± 0.33 |
| 7 | 0.29 ± 0.11 | 1.62 ± 0.06 | 2.27 ± 0.36 |
| 8 | 0.3 ± 0.11 | 1.52 ± 0.06 | 2.17 ± 0.35 |

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα πυκνότητας (gr/cc) και ποσόστωσης νερού (w/w %) στα επιφανειακά δείγματα ιζήματος, στα σημεία των in-situ μετρήσεων

Η ποσόστωση νερού στο ίζημα και η πυκνότητά του είναι συνάρτηση κυρίως της κατανομής του κόκκου του ιζήματος και εξαρτάται λιγότερο από την σύστασή του. Στα δείγματα ιζήματος που συλλέχθηκαν δεν πραγματοποιήθηκε **μέτρηση κοκκομετρίας** (ανάλυση κόκκου) αλλά παρατηρήθηκε σε όλα τα σημεία ότι στο 80%, κατά μέσο όρο, το ίζημα αποτελούνταν από χοντρόκοκκους σχηματισμούς (coarse sand). Η συνεκτικότητα του κόκκου του ιζήματος εξηγεί την καλή συμφωνία των φυσικών παραμέτρων (πυκνότητα, ποσόστωση νερού) του ιζήματος στην περιοχή.

Επίσης, στα δείγματα (πέραν του σημείου της βαθμονόμησης) δεν πραγματοποιήθηκε **προσδιορισμός των κύριων στοιχείων** του ιζήματος (XRF μέτρηση). Διαφορές ως προς τη σύσταση του ιζήματος (αποκλίσεις ως προς τα ποσοστά των κύριων οξειδίων στο ίζημα CaO/CaCO₃, SiO₂, Al₂O₃) στην ίδια περιοχή έχουν διαπιστωθεί και δίνονται σε βιβλιογραφικές αναφορές [Preda M. and Cox M.E., 2005]. Ωστόσο, η μέτρηση αυτή δεν κρίθηκε απαραίτητη για τους σκοπούς της εργασίας καθώς οι μικρές αποκλίσεις στα ποσοστά των κύριων στοιχείων δεν αναμένεται να επηρεάζουν έντονα την ανιχνευτική απόδοση του συστήματος. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η σύσταση του ιζήματος την ανιχνευτική απόδοση εξηγείται με όρους εξασθένησης των ακτίνων-γ στο ίζημα ως εξής:

α.) Η αλλαγή στη σύσταση του ιζήματος θα επιφέρει αλλαγή στο μέσο ατομικό αριθμό Z του υλικού (ίζημα), στο οποίο διαδίδεται μια ακτίνα-γ πριν ανιχνευθεί

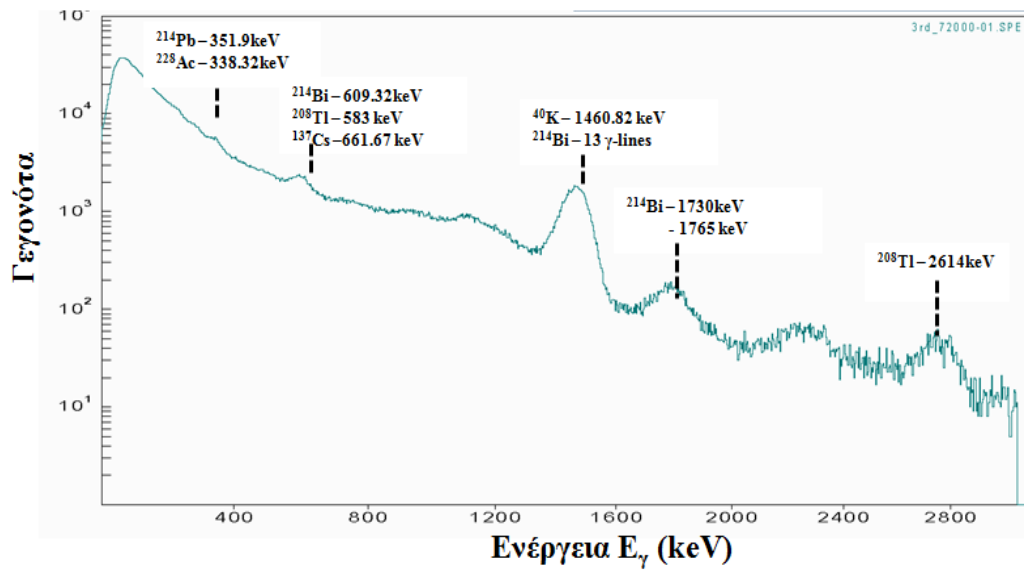
β) Για τα ραδιονουκλίδια που ανιχνεύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον (ενέργειες ακτίνων-γ 200-3000 keV), η κυρίαρχη αλληλεπίδραση μέσα στο ίζημα πριν ανιχνευθούν είναι η εξασθένηση λόγω του φαινομένου Compton και η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μέσω του φαινομένου αυτού είναι γραμμικά ανάλογη του ατομικού αριθμού Z, των διαθέσιμων δηλαδή ηλεκτρονίων στο υλικό [Knoll, 2000]. Για το λόγο αυτό η σκέδαση Compton δεν επηρεάζεται έντονα από αλλαγές της σύστασης (αλλαγή μέσου Z) του ιζήματος. Στις χαμηλές ενέργειες E_γ όπου το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο γίνεται κυρίαρχο (E_γ<200 keV), λόγω της έντονης εξάρτησης της πιθανότητας αλληλεπίδρασης μέσω του φαινομένου αυτού από τον ατομικό αριθμό Z (σ_{pe} ~ Z⁴⁻⁵) ενδεχομένως η ποσότητα ε_v να επηρεάζεται περισσότερο. Η επίδραση

ωστόσο δεν αναμένεται και πάλι να είναι σημαντική καθώς η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μιας ακτίνας-γ μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι περίπου δυο τάξης μεγέθους μικρότερη από την πιθανότητα σκέδασης Compton στο ιζημα. Για τους παραπάνω λόγους η ομοιομορφία του ιζήματος του πυθμένα ως προς σύστασή του θεωρήθηκε δεδομένη τόσο κατά την επιφάνεια του πυθμένα (σε όλη την περιοχή μελέτης) όσο και κατά το βάθος του. Επίσης η σύσταση σε όλα τα σημεία δειγματοληψίας θεωρήθηκε ίδια με αυτή που προσδιορίστηκε στο σημείο *site1*. Η υπόθεση αυτή θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω στην ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων (ενότητα 4.3).

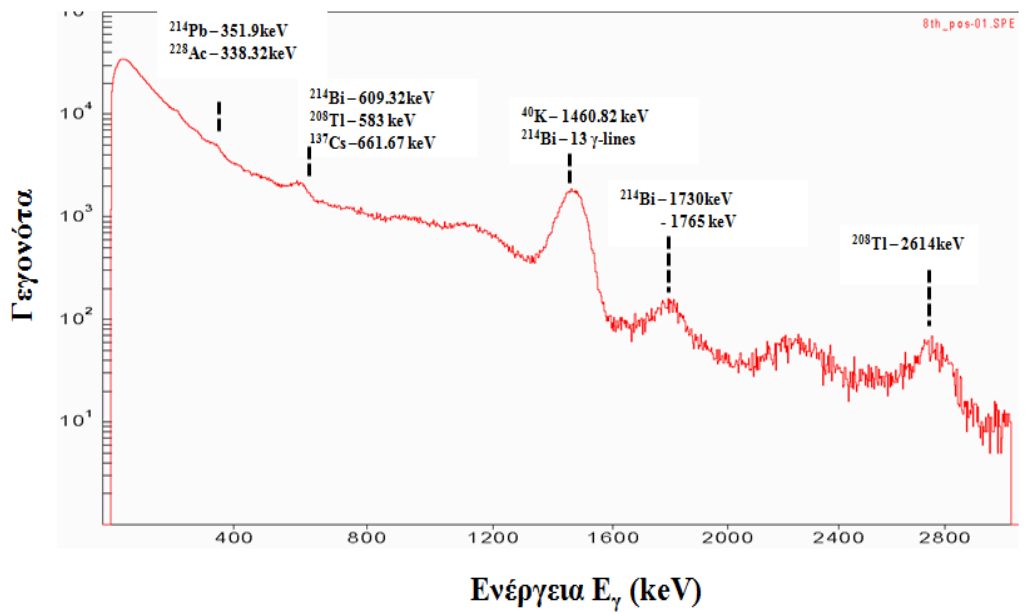
4.3 Πειραματικά φάσματα εργαστηριακής και *in-situ* μέτρησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά **φάσματα στο ιζημα** όπως μετρήθηκαν στο **πεδίο** χρησιμοποιώντας το σύστημα KATEPINA (μέτρηση απευθείας στον πυθμένα), και στο **εργαστήριο** χρησιμοποιώντας ανιχνευτή υψηλής διακριτικής ικανότητας HPGe (μέτρηση σε αφυδατωμένα επιφανειακά δείγματα ιζήματος) στα ίδια σημεία. Όλα τα φάσματα παρουσιάζονται όπως μετρήθηκαν, χωρίς δηλαδή να έχει γίνει αφαίρεση της ακτινοβολίας υποβάθρου. Η μεγάλη διαφορά στο ενεργειακό εύρος των κορυφών (διακριτική ικανότητα) στα φάσματα που μετρήθηκαν στο εργαστήριο σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη χρήση διαφορετικού τύπου ανιχνευτή στις δύο μετρήσεις.

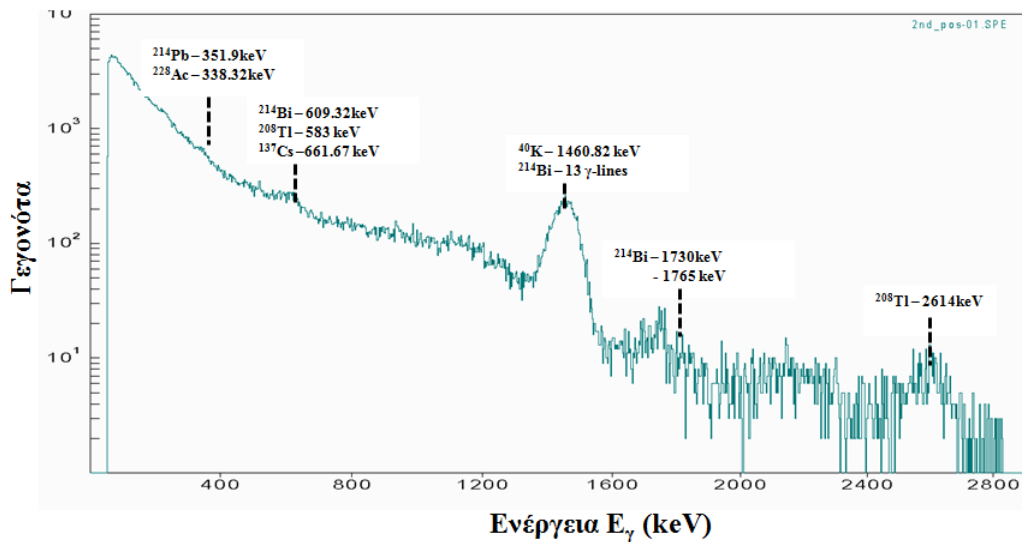
Για τη λήψη των ***in-situ* φασμάτων** του ιζήματος το σύστημα ποντίστηκε σε γεωμετρία 2π (ακριβώς όπως στο σημείο της βαθμονόμησης *site 1*) στα σημεία **3, 8** με **χρόνο συλλογής δεδομένων** περίπου **20 ώρες** (72000sec) και στα σημεία **2, 4, 7** περίπου **3 ώρες** (10800sec). Τα φάσματα όπως συλλέχθηκαν στο ιζημα στα σημεία 3, 8, 2 και 4 παρουσιάζονται στα γραφήματα 4.1 έως 4.4 αντίστοιχα. Η χαμηλή στατιστική των φασμάτων στα γραφήματα 4.3 και 4.4 οφείλεται στον μικρό σχετικά χρόνο μέτρησης (10800 sec), ενώ είναι εντυπωσιακό ότι στο φάσμα στο ιζημα υπάρχουν μετρήσιμες κορυφές ακόμη και σε μικρό χρόνο συλλογής δεδομένων. Για τη λήψη των εργαστηριακών φασμάτων ο **χρόνος συλλογής δεδομένων** ήταν **24 ώρες** για όλα τα δείγματα ιζήματος αλλά και για τις μετρήσεις υποβάθρου που πραγματοποιήθηκαν. Οι εργασίες στο πεδίο (*in-situ* μετρήσεις) διήρκεσαν 4 ημέρες και στο μικρό χρονικό διάστημα αυτό δεν υπήρχε η δυνατότητα λήψης πολύωρων φασμάτων σε όλα τα υπό μελέτη σημεία.



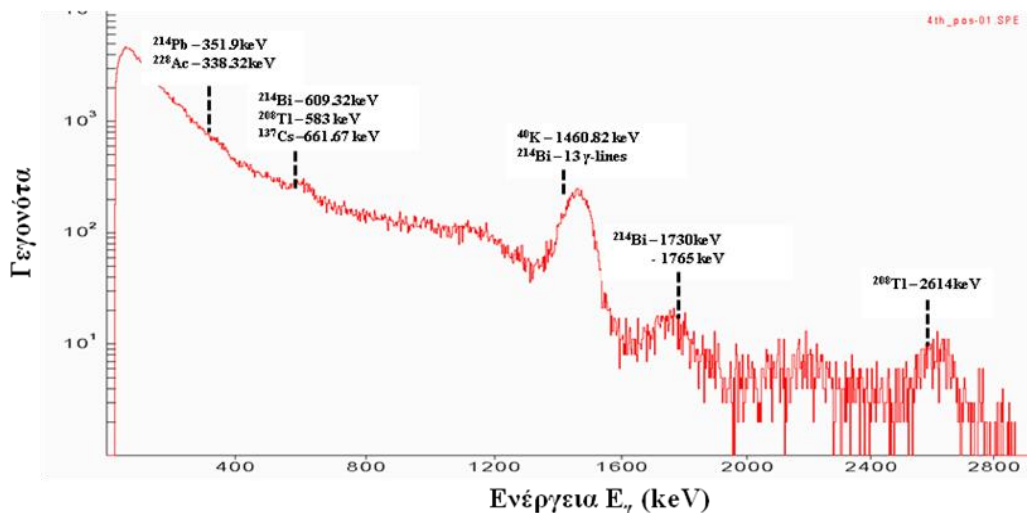
Γράφημα 4.1: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 3 όπως συλλέχθηκε με το in-situ σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα



Γράφημα 4.2: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 8 όπως συλλέχθηκε με το in-situ σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

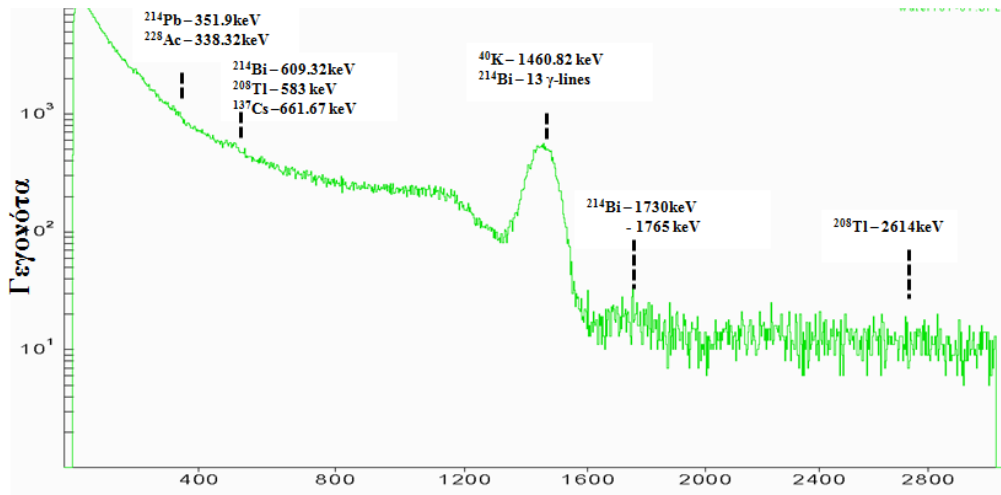


Γράφημα 4.3: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 2 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα



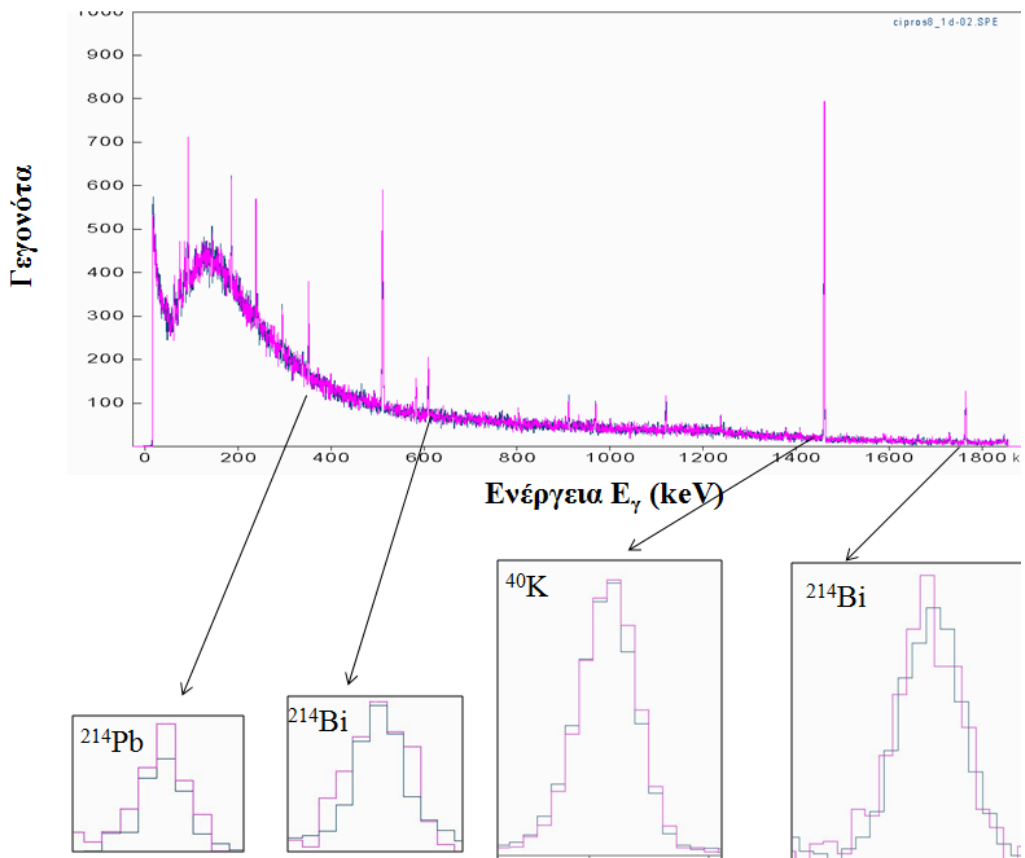
Γράφημα 4.4: Απεικόνιση του φάσματος στο ίζημα στο σημείο μέτρησης 4 όπως συλλέχθηκε με το *in-situ* σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα

Στο γράφημα 4. 5 δίνεται το φάσμα όπως μετρήθηκε στο νερό στο σημείο της βαθμονόμησης με χρόνο μέτρησης περίπου 17 ώρες (62952 sec). Στο γράφημα 4. 6 συγκρίνονται ποιοτικά τα δυο φάσματα στα σημεία *site 1, 8* στο στεγνό δείγμα ιζήματος που αναλύθηκε στο εργαστήριο (HPGe) και τέλος στο γράφημα 4.7 συγκρίνονται ποιοτικά τα δυο *in-situ* φάσματα στο ίζημα στα σημεία *site 1* (σημείο βαθμονόμησης) και 3.

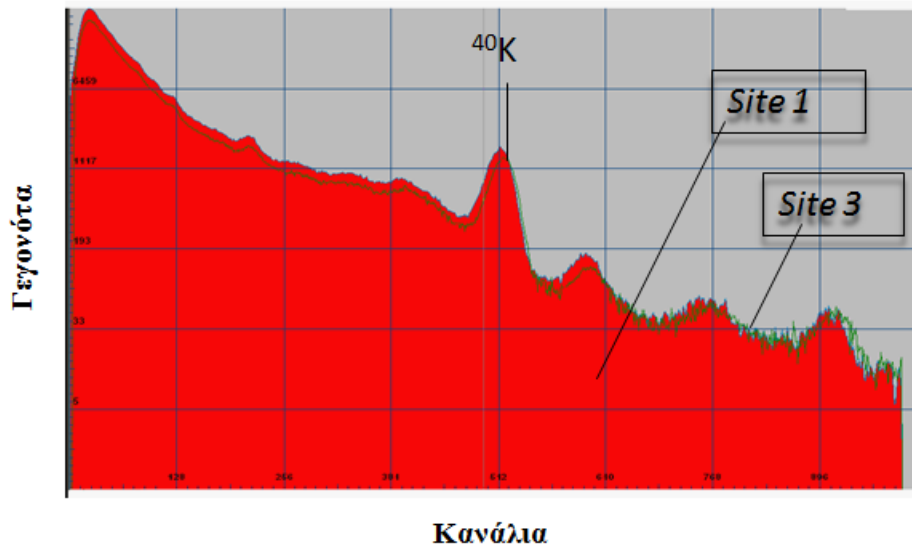


Ενέργεια E_γ (keV)

Γράφημα 4.5: Απεικόνιση του φάσματος στο νερό στο σημείο βαθμονόμησης 1 όπως συλλέχθηκε με το in-situ σύστημα KATEPINA σε ημι-λογαριθμική κλίμακα



Γράφημα 4.6: Απεικόνιση των φασμάτων στο ίζημα στα σημεία μέτρησης 1 και 8 όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο σε γραμμική κλίμακα. Σε μεγέθυνση παρουσιάζονται οι κυρίαρχες φωτοκορυφές για τα ραδιονουκλίδια ^{214}Pb (351.9 keV), ^{214}Bi (609.32, 1765 keV) και ^{40}K (1460.8 keV)



Γράφημα 4.7: In-situ φάσματα στο ίζημα στα σημεία site1, site 3 σε χρόνο μέτρησης 20h (72000 sec)

Η ομοιογένεια της περιοχής που μελετήθηκε από πλευράς συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων είναι εμφανής στα *in-situ* φάσματα αλλά και στα εργαστηριακά φάσματα, όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια στο γράφημα 4.6 όπου φαίνονται σε μεγέθυνση οι κυρίαρχες φωτοκορυφές στο φάσμα. Τα ραδιονουκλίδια που ανιχνεύονται στο φάσμα είναι τα ^{40}K , ^{214}Pb , ^{214}Bi και ^{208}Tl . Σε όλα τα φάσματα είναι έντονη η κορυφή του ^{40}K στα 1460.8 keV.

4.4 Αποτελέσματα των *in-situ* μετρήσεων στο ίζημα και σύγκριση με μετρήσεις αναφοράς στο εργαστήριο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων των *in-situ* μετρήσεων και της μέτρησης αναφοράς (HPGe) στο ίζημα, στα σημεία που μελετήθηκαν και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων (*in-situ* και εργαστηριακή) μεταξύ τους. Αρχικά δίνεται η σχέση υπολογισμού που εφαρμόστηκε στην ποσοτικοποίηση (προσδιορισμός συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων) των *in-situ* μετρήσεων, χρησιμοποιώντας τις τιμές της ανιχνευτικής απόδοσης ϵ_V που εκτιμήθηκαν θεωρητικά (MC προσομοιώσεις) κατά τη βαθμονόμηση του συστήματος (ενότητα 3.5.3). Αμέσως μετά ακολουθεί η παρουσίαση και τέλος η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων.

Τα βασικά μεγέθη (cps, ϵ_V) που χρειάζονται για την **ποσοτικοποίηση** (υπολογισμούς συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων) των *in-situ* μετρήσεων **στο ίζημα** περιλαμβάνουν :

- A.** Τον **υπολογισμό του ρυθμού ανίχνευσης γεγονότων**, από μια ή περισσότερες ακτίνες-γ ενός ραδιονουκλιδίου (cps^γ), σε μια φωτοκορυφή στα δυο *in-situ* φάσματα **στο ίζημα** (cps_s^γ) και **στο νερό** (cps_w^γ).

B. Τον προσδιορισμό της **ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος KATEPINA** για μετρήσεις στο ίζημα, ϵ_V , στη συγκεκριμένη ενέργεια ακτίνων- γ (φωτοκορυφή).

Η σχέση από την οποία υπολογίζεται η ενεργότητα των ραδιονουκλιδίων, A , σε μονάδες Bq/L δίνεται παρακάτω:

$$A = \frac{cps_s^v - \frac{1}{2} \cdot cps_w^v}{I_\gamma \cdot \epsilon_V} \Big|_{\text{KATEPINA}} \Big|_{\text{MCNP5}} \quad (4.1)$$

Όπου cps_s ο ρυθμός γεγονότων από το ίζημα, cps_w ο ρυθμός γεγονότων από το νερό, I_γ πιθανότητα εκπομπής και ϵ_V η απόδοση του συστήματος KATEPINA για μέτρηση ιζήματος.

Η *σχέση 4.1* περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού των συγκεντρώσεων στο ίζημα χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ποσότητες (ρυθμός ανίχνευσης γεγονότων και ϵ_V). Η αφαίρεση των γεγονότων που οφείλονται στο νερό πραγματοποιείται όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Η **ποσοτικοποίηση των *in-situ* μετρήσεων** με την παραπάνω σχέση (4.1) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα **αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης, των *in-situ* φασμάτων** που ελήφθησαν με το σύστημα KATEPINA στο νερό (*site 1*), και στο ίζημα (*sites 2, 3, 4, 7, 8*). Όπως φαίνεται στη *σχέση 4.1*, για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων, εισάγονται οι **τιμές της ανιχνευτικής απόδοσης ϵ_V που εκτιμήθηκαν θεωρητικά**, για τα χαρακτηριστικά του ιζήματος που προσδιορίστηκαν στο σημείο της βαθμονόμησης (*site 1*), μέσω MC προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας τον κώδικα **MCNP5** και παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.5.3 (*πίνακας 3.13*). Οι θεωρητικές τιμές της ϵ_V δίνουν τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών ακτίνων- γ σε αντίθεση με τα πειραματικά αποτελέσματα της ϵ_V σε πέντε μόνο ενεργειακές περιοχές (*βλέπε γράφημα 3.8*).

Στο σημείο αυτό, πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κρίνεται σκόπιμο να σχολιαστούν οι αβεβαιότητες που εισάγονται στις συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων και οφείλονται στις **παραδοχές** των θεωρητικών υπολογισμών για την εκτίμηση της ϵ_V . Στους υπολογισμούς έχουν χρησιμοποιηθεί τα στοιχεία του ιζήματος, πυκνότητα, ποσότητα νερού και σύσταση που μετρήθηκαν στο επιφανειακό δείγμα ιζήματος στο σημείο της βαθμονόμησης ενώ ταυτόχρονα έχει θεωρηθεί ως δεδομένο η **ομοιόμορφη κατανομή των παραπάνω τιμών** κατά βάθος του ιζήματος αφού στην θεώρηση του MC μοντέλου για τους υπολογισμούς της θεωρητικής εκτίμησης της ϵ_V χρησιμοποιείται εκτεταμένη πηγή ίδιου υλικού και χαρακτηριστικών σε όλο τον όγκο της πηγής (ενεργός όγκος) που υπολογίζεται σε ένα μέγιστο βάθος που δίνεται από την ενεργό ακτίνα. Τέλος στους θεωρητικούς υπολογισμούς θεωρείται **ομοιομορφία και στην κατανομή ραδιονουκλιδίων** κατά βάθος του ιζήματος.

Η ανάλυση όλων των φασμάτων (*in-situ*, HPGe) έγινε με χρήση του λογισμικού SPECTRW [Kalfas C.A., 2011]. Η χαμηλή στατιστική στα φάσματα καθώς και η ανίχνευση πολλών ραδιονουκλιδίων στην ίδια κορυφή (χαμηλή διακριτική ικανότητα

του NaI), όπως στις κορυφές στα 351 keV και στα 609 keV δυσκολεύει την ανάλυση των κορυφών. Η χαμηλή στατιστική των μετρήσεων οφείλεται στα χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας στην περιοχή. Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά την ανάλυση των κορυφών εντείνονται ακόμη περισσότερο στις χαμηλές αυτές ενέργειες λόγω της ύπαρξης υψηλού υποβάθρου Compton που οφείλεται κυρίως στη μεγάλη (σε σχέση με τα υπόλοιπα ραδιονουκλίδια) συγκέντρωση του ^{40}K στο ίζημα.

Η ποσοτικοποίηση του ^{214}Bi , έγινε μέσω της ανάλυσης της φωτοκορυφής του στα 1764.5 keV (13 ακτίνες-γ συνολικής πιθανότητας εκπομπής I_γ 11.6%). Στην ενέργεια αυτή όπου δεν υπάρχει συνεισφορά από το υπόβαθρο Compton του ^{40}K και έτσι διευκολύνεται η ανάλυση της κορυφής ως κορυφή χαμηλού υποβάθρου. Το ίδιο ισχύει και στην ανίχνευση του ^{208}Tl μέσω της κορυφής στα 2614 keV (με πιθανότητας εκπομπής, I_γ , 99 %). Οι δύο ακτίνες-γ στα 1730 keV και στα 2614 keV των ραδιονουκλιδίων ^{214}Bi και ^{208}Tl αντίστοιχα, εκπέμπονται με διαδοχικές αποδιεγέρσεις (cascade) και κατά την ανίχνευσή τους παρουσιάζονται φαινόμενα πραγματικής σύμπτωσης που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στους ποσοτικούς υπολογισμούς. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας τον κώδικα MCNP-CP [Berlizon A.N., 2006], που αποτελεί επέκταση του κώδικα MCNP ώστε να λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο αυτό.

Το μόνο εμφανές ραδιονουκλίδιο στα *in-situ* φάσματα για το οποίο δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της συγκέντρωσής του (ενδοαπορρόφηση μέσα στο ίζημα), είναι το ραδιονουκλίδιο ^{214}Pb , της σειράς του ^{238}U , το οποίο ανιχνεύεται στις ενέργειες 295 keV και 351.9 keV (αντίστοιχες φωτοκορυφές στο φάσμα).

Τα ποσοτικά αποτελέσματα των δυο μετρήσεων στο πεδίο (*in-situ*) και στο εργαστήριο (HPGe), σε όλα τα σημεία μέτρησης (sites 2, 3, 4, 7, 8) όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φασματοσκοπίας-γ παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2, όπου και δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης ενεργότητας (σε μονάδες Bq/L) για τα ραδιονουκλίδια ^{40}K , ^{214}Bi και ^{208}Tl στο ίζημα.

| Αποτελέσματα Ενεργότητας στα δείγματα- HPGe | | | | | | |
|---|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| (Bq / L) | | | | | | |
| ^{40}K | 1460.8 | 149 ± 13 | 152 ± 12 | 143 ± 10 | 145 ± 10 | 155 ± 13 |
| ^{214}Bi | 1764.5 | 5.7 ± 3.1 | 5.9 ± 1.7 | 6.2 ± 3.1 | 5.1 ± 1.0 | 6.3 ± 1.6 |
| ^{208}Tl | 583.19 | 2.7 ± 0.3 | 2.3 ± 0.3 | 2.5 ± 0.3 | 2.4 ± 0.3 | 2.3 ± 0.3 |
| | | site2 | site3 | site4 | site7 | site8 |
| Αποτελέσματα Ενεργότητας – KATEPINA(NaI) | | | | | | |
| (Bq / L) | | | | | | |
| ^{40}K | 1460.8 | 134 ± 13 | 174 ± 12 | 135 ± 11 | 146 ± 12 | 189 ± 13 |
| ^{214}Bi | 1764.5 | 5.4 ± 0.9 | 6.8 ± 0.6 | 6.3 ± 0.7 | 4.5 ± 0.7 | 5.9 ± 0.6 |
| ^{208}Tl | 2614 | 2.8 ± 0.4 | 2.1 ± 0.2 | 2.8 ± 0.3 | 2.5 ± 0.4 | 2.5 ± 0.3 |
| | | site2 | site3 | site4 | site7 | site8 |

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) στο ίζημα, στα σημεία δειγματοληψιών, με την εργαστηριακή μέθοδο και με την *in-situ* μέθοδο στα ίδια σημεία

Σε όλα τα σημεία του πυθμένα βρέθηκαν κοντινές συγκεντρώσεις και στα τρία ραδιονουκλίδια ^{40}K , ^{214}Bi και ^{208}Tl όπως φαίνεται στα αποτελέσματα των δύο

μετρήσεων *in-situ* και εργαστηριακών. Τα πειραματικά σφάλματα των *in-situ* μετρήσεων υπολογίστηκαν σε 10% για το ^{40}K , 17% για το ^{214}Bi , και 16 % για το ^{208}Tl (μέγιστες τιμές), και οφείλονται στη στατιστική των μετρήσεων. Μεγάλα σφάλματα παρουσιάζονται στα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης στο εργαστήριο στην περίπτωση του ^{214}Bi (1764.5 keV). Οι μεταβολές του ραδονίου ^{222}Rn στο χώρο του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια της ίδιας αλλά και διαφορετικών ημερών στις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις (24 ώρες κάθε δείγμα) δημιουργούν αντίστοιχες μεταβολές στα φάσματα υποβάθρου που μετρήθηκαν και επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα.

Σε όλα τα σημεία βρέθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων σε συμφωνία με τα δεδομένα από παλαιότερες μετρήσεις που βρίσκονται στη βιβλιογραφία. Τα σημεία στα οποία προσδιορίστηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ^{40}K , στα *in-situ* φάσματα ιζήματος, είναι τα σημεία δειγματοληψιών site 2 και site 3 και το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα εργαστηριακά αποτελέσματα.

Στον πίνακα 4.3 συγκρίνονται, τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.2 για τις δυο μεθόδους, ως προς την μεταξύ τους σχετική απόκλιση %, στα ίδια σημεία.

| Ραδιονουκλίδιο | Ενέργεια (keV) | <i>In-situ</i> /εργαστηριακές σχετικές αποκλίσεις % | | |
|-------------------|-------------------|--|------|------|
| | | min | mean | max |
| ^{40}K | 1460.8 | 1.0 | 8.1 | 22.0 |
| ^{214}Bi | 1765 | 3.0 | 7.6 | 15.0 |
| ^{208}Tl | 583.8/2614 | 4.0 | 8.0 | 10.0 |

sites 2, 3 4, 7, 8

Πίνακας 4.3: Σύγκριση των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων (Bq/L) μεταξύ της εργαστηριακής μεθόδου και των μετρήσεων πεδίου στα σημεία πόντισης του συστήματος KATEPINA

Η μέση σχετική απόκλιση υπολογίστηκε στο 8% σε όλα τα σημεία στα τρία ραδιονουκλίδια που μελετήθηκαν. Οι αποκλίσεις κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 1-22%, 3-15%, 4-10% στα ραδιονουκλίδια ^{40}K , ^{214}Bi και ^{208}Tl , αντίστοιχα. Η μείωση της απόκλισης μεταξύ των δυο μεθόδων καθώς αυξάνεται η ενέργεια των ακτίνων-γ είναι αναμενόμενη, εφόσον όσο μεγαλύτερη ενέργεια έχουν οι ακτίνες-γ τόσο περισσότερο μειώνεται η εξασθένιση αυτών στο ίζημα, και έτσι εξομαλύνονται οι διαφορές που πιθανό να υπάρχουν στην απόδοση εν λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών του ιζήματος σε κάθε σημείο.

Κεφάλαιο 5 Σύνοψη – Συμπεράσματα – Προοπτικές

Στην εργασία αυτή τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας της υπό μελέτη περιοχής καθορίστηκαν μέσω της *in-situ* μεθόδου φασματοσκοπίας ακτίνων- γ με μετρήσεις στο ίζημα χρησιμοποιώντας το σύστημα KATERINA σε γεωμετρία επαφής με τον πυθμένα (γεωμετρία 2 π). Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάπτυξη της νέας μεθοδολογίας *in-situ* φασματοσκοπίας ακτίνων- γ στο ίζημα. Παράλληλα, διερευνούνται οι προοπτικές εξέλιξης της μεθοδολογίας έτσι ώστε ο εκάστοτε χρήστης να μπορεί εύκολα, γρήγορα και με χαμηλό κόστος να χαρακτηρίζει τα επίπεδα ραδιενέργειας στους πυθμένες θαλασσών ή λιμνών. Πιο αναλυτικά, αρχικά συνοψίζονται τα στάδια ανάπτυξης της μεθοδολογίας, παρατίθενται οι δυσκολίες που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της καθώς και ο τρόπος επίλυσής τους με μετρήσεις στο εργαστήριο και υπολογιστικές μεθόδους και σχολιάζονται οι παραδοχές που έγιναν κατά την εφαρμογή της μεθόδου.

Στη συνέχεια, δίνεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων στην υπό μελέτη περιοχή και παρουσιάζονται οι πιθανές περαιτέρω εφαρμογές και τροποποιήσεις της μεθόδου με στόχο την βελτιστοποίησή της ώστε να επιτυγχάνεται εύκολα και άμεσα η χαρτογράφηση πυθμένων σε περιβάλλοντα με διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

5.1 Επιλογή γεωμετρίας ανιχνευτή-πυθμένα

Πρωταρχικός σκοπός της εργασίας ήταν η εύρεση της ιδανικής γεωμετρίας μέτρησης του πυθμένα με γνώμονα τα δύο παρακάτω κριτήρια:

- A. Το σύστημα να έχει υψηλή απόδοση ανίχνευσης
- B. Το σύστημα να είναι ευέλικτο, να δίνει άμεσα αποτελέσματα και να ποντίζεται χωρίς δύτη και χωρίς υψηλό ρίσκο μερικής ή ολικής καταστροφής (ακόμα και σε μεγάλα βάθη).

Η αρχική ιδέα ήταν η τοποθέτηση του συστήματος **μέσα στο ίζημα σε τέτοιο βάθος** ώστε, το υπερκείμενο ίζημα να απορροφά πλήρως τις ακτίνες- γ που εκπέμπονται από ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο νερό και το σύστημα να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση (δεδομένου ότι όλη η επιφάνεια του κρυστάλλου είναι μέσα στο ίζημα). Τα μειονεκτήματα της ιδέας αυτής ήταν η πειραματική δυσκολία της βύθισης του συστήματος μέσα στο ίζημα και το υψηλό ρίσκο καταστροφής του λόγω των πιθανών ανομοιογενειών (ύπαρξη σκληρού υποστρώματος ή σχηματισμών) του πυθμένα. Για τους παραπάνω λόγους, η γεωμετρία μέτρησης καθορίστηκε τελικά σε γεωμετρία 2 π (γεωμετρία επαφής) έτσι ώστε, η μέτρηση να υλοποιείται όταν το *in-situ* σύστημα βρίσκεται σχεδόν σε επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας. Στη γεωμετρία αυτή καταγράφονται και τα γεγονότα (ακτίνες- γ) που προέρχονται από το υπερκείμενο νερό, τα οποία ακόμα και αν έχουν μικρή συνεισφορά – με εξαίρεση το ^{40}K στο θαλασσινό νερό που είναι πάντα υψηλό

λόγω της υψηλής αλατότητας – επιβάλλεται να αφαιρούνται κατάλληλα από το φάσμα της μέτρησης στο ίζημα.

Η απόσταση μεταξύ του κρυστάλλου του ανιχνευτή και του πυθμένα αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο στη γεωμετρία 2π διότι επηρεάζει σημαντικά την ανιχνευτική απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση του συστήματος μεγαλώνει δραστικά στην περίπτωση όπου το σύστημα εισχωρεί, έστω και λίγο, μέσα στο ίζημα και μειώνεται όταν αυτό απομακρύνεται από τον πυθμένα. Επιβάλλεται λοιπόν η εύρεση μιας μεθοδολογίας γρήγορου προσδιορισμού της ακριβούς απόστασης μεταξύ συστήματος και πυθμένα την στιγμή της πόντισης.

5.2 Στάδια μεθοδολογίας και παραδοχές

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την ανάπτυξη της μεθόδου συνοψίζονται παρακάτω:

A. Το *in-situ* ανιχνευτικό σύστημα ποντίστηκε σε συγκεκριμένες θέσεις για τη συλλογή φασμάτων στο ίζημα και σε μία θέση – θέση βαθμονόμησης της μεθόδου (site1) – για τη συλλογή φάσματος στο νερό.

B. Δείγματα επιφανειακού ιζήματος ελήφθησαν από τα σημεία πόντισης του συστήματος και μετρήθηκαν στο εργαστήριο με ανιχνευτή HPGe με σκοπό τη βαθμονόμηση της μεθόδου. Για τη συλλογή των δειγμάτων ιζήματος χρησιμοποιήθηκε διάταξη ‘αρπαγής’ που δύναται να συλλέξει ίζημα από ένα βάθος 15 cm μέσα στον πυθμένα.

Γ. Ο κώδικας Monte Carlo MCNP5 εφαρμόστηκε για τον θεωρητικό υπολογισμό της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος στο ίζημα για μετρήσεις σε γεωμετρία 2π . Η ορθότητα των αποτελεσμάτων του κώδικα ελέγχθηκε, πριν την εφαρμογή του στο ίζημα, αναπαράγοντας τα αποτελέσματα παλαιότερης βαθμονόμησης της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος στο νερό με τον κώδικα GEANT4 [Bagatelas C. et al., 2009].

Κατά την ανάπτυξη και την εφαρμογή της μεθόδου θεωρήθηκε ότι το ίζημα που μελετήθηκε στο εργαστήριο και προήλθε από ομογενοποίηση δείγματος που λήφθηκε από βάθος 15 cm, συγκεντρώνει όλα τα χαρακτηριστικά του ιζήματος από το οποίο το *in-situ* σύστημα κατέγραφε γεγονότα, παρόλο που τα γεγονότα στη μέτρηση αυτή προέρχονταν και από μεγαλύτερα βάθη. Η μέγιστη απόσταση από τον πυθμένα από την οποία καταφθάνουν και καταγράφονται γεγονότα στο *in-situ* σύστημα ταυτίζεται, για κάθε διαφορετικής ενέργειας ακτίνα-γ, με την ενεργό ακτίνα (η απόσταση όπου η ακτίνα-γ απορροφάται πλήρως από το μέσο στο οποίο διαδίδεται). Στην περίπτωση λοιπόν ενός πυθμένα, όπου η κάθετη κατανομή της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων δεν μεταβάλλεται στον ενεργό όγκο του ιζήματος, η μεθοδολογία παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η ποσοτικοποίηση των *in-situ* μετρήσεων έγινε χρησιμοποιώντας τις θεωρητικές τιμές της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος, εν, εισάγοντας επιπλέον τις παρακάτω παραδοχές:

A. Θεωρείται κοινή σύσταση των κύριων στοιχείων του ιζήματος, σε όλα τα σημεία του πυθμένα, όπως προσδιορίστηκε από τα δεδομένα των μετρήσεων XRF και ποσόστωσης νερού στο σημείο βαθμονόμησης.

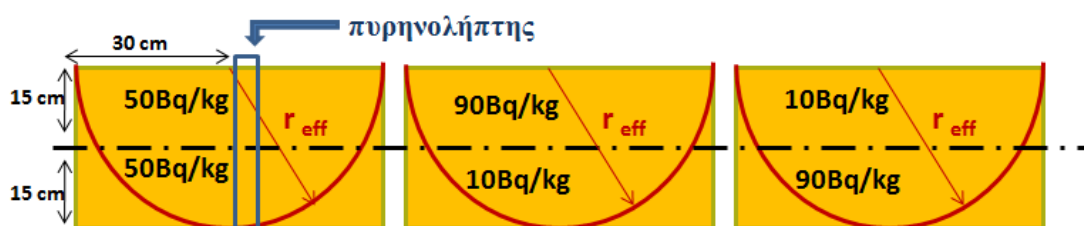
Β. Θεωρούνται ίδιες τιμές, 25% για την ποσόστωση του νερού και 2.1 gr/cc για την υγρή πυκνότητα στο ίζημα, σε όλα τα σημεία του πυθμένα, όπως προσδιορίστηκαν στο σημείο βαθμονόμησης.

Γ. Θεωρείται σταθερή κάθετη κατανομή των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στο ίζημα.

Η ανιχνευτική απόδοση του *in-situ* συστήματος για μετρήσεις στο ίζημα σε οποιαδήποτε περιοχή εξαρτάται σημαντικά από την μεταβολή των χαρακτηριστικών του ιζήματος (ποσόστωση νερού, κατανομή κόκκου, σύσταση, πυκνότητα) στους πυθμένες λόγω της διαφορετικής προέλευσης της ύλης (π.χ. βιογενής, χερσογενής, ηφαιστειακή) και της διαφορετικής γεωμορφολογίας κάθε περιοχής. Επίσης, η ομοιογένεια των χαρακτηριστικών του πυθμένα δεν είναι διασφαλισμένη ακόμα και στην ίδια περιοχή μελέτης. Για τον λόγο αυτό, οι διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του πυθμένα πρέπει να ελέγχονται στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, είτε με δεδομένα βιβλιογραφίας, είτε με νέες μετρήσεις χρησιμοποιώντας ανάλογα μετρητικά συστήματα. Η δυσκολία στον προσδιορισμό της ανιχνευτικής απόδοσης σε πυθμένα με ανομοιόμορφη κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο ίζημα συζητείται στην επόμενη παράγραφο.

5.3 Διερεύνηση της *in-situ* ανιχνευτικής απόδοσης

Η εφαρμογή της μεθόδου σε πυθμένες όπου η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει ανομοιομορφίες, εισάγει μεγάλη αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης εν του συστήματος. Για να εξηγηθεί η αβεβαιότητα που εισάγεται στους υπολογισμούς της απόδοσης του συστήματος δίνονται διαγραμματικά στην εικόνα 5.1 τρεις ακραίες περιπτώσεις ανομοιομορφίας στην κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ενός ραδιονουκλιδίου, το οποίο εκπέμπει μια μόνο ακτίνα-γ συγκεκριμένης ενέργειας.



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση α) σταθερής κατανομής συγκέντρωσης 50Bq/kg εις βάθος στο ίζημα (εικόνα αριστερά) β) ανομοιόμορφης κατανομής συγκέντρωσης με μεγαλύτερη τιμή κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα και γ) ανομοιόμορφης κατανομής συγκέντρωσης με μικρότερη τιμή κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα (εικόνα δεξιά)

Στην πρώτη εικόνα (εικόνα 5.1α) διακρίνεται η περίπτωση σταθερής κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης στο ίζημα. Θεωρούμε ότι σε ολόκληρο τον όγκο του ιζήματος η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου είναι σταθερή και ίση με 50Bq/kg. Στη μεσαία εικόνα (εικόνα 5.1β) σχεδιάζεται η περίπτωση ανομοιόμορφης κατακόρυφης κατανομής όπου στον όγκο του ιζήματος βρίσκονται δύο εντοπισμένες πηγές (του ίδιου ραδιονουκλιδίου), μία μεγάλης συγκέντρωσης 90 Bq/kg κοντά στην

επιφάνεια του πυθμένα, σταθερή σε όλο τον όγκο του ιζήματος στα πρώτα 15cm και μία μικρής συγκέντρωσης 10Bq/kg σταθερή στον υπόλοιπο μισό όγκο. Τέλος στην εικόνα δεξιά (εικόνα 5.1γ) διακρίνεται η αντίθετη από την προηγούμενη περίπτωση ανομοιόμορφης κατακόρυφης κατανομής, η περίπτωση δηλαδή δύο εντοπισμένων πηγών, μία **μικρής συγκέντρωσης 10 Bq/kg κοντά στην επιφάνεια**, σταθερή σε όλο τον όγκο του ιζήματος στα πρώτα 15cm και μία μεγάλης συγκέντρωσης, 90Bq/kg σταθερή στον υπόλοιπο μισό όγκο. Στην εικόνα 5.1 σχεδιάζεται επίσης ο ενεργός όγκος (μέσω της ακτίνας r_{eff}), για την ενέργεια ακτίνας-γ του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου, από τον οποίο καταφθάνουν γεγονότα και ανιχνεύονται από το *in-situ* σύστημα. Θεωρώντας ότι:

A. Η συλλογή του ιζήματος, για τη μέτρηση στο εργαστήριο, γίνεται με τον ίδιο τρόπο στις τρεις περιπτώσεις με χρήση πυρηνολήπτη, λαμβάνεται δηλαδή δείγμα (πυρήνας) από όλη την έκταση σε βάθος 30 cm μέσα στο ιζημα σε μια κατακόρυφη στήλη.

B. Πριν τη μέτρηση κάθε ένα από τα τρία δείγματα (πυρήνες) χωρίζεται κατακόρυφα σε 30 δείγματα (1 δείγμα ανά εκατοστό) που μετρώνται ξεχωριστά ώστε, ως τελικό αποτέλεσμα της συγκέντρωσης, να λαμβάνεται η μέση τιμή που υπολογίζεται από τα 30 δείγματα.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης A_{ref} στο εργαστήριο, για κάθε μια από τις 3 περιπτώσεις, θα ήταν η μέση τιμή 30 μετρήσεων και ίση και στις τρεις περιπτώσεις με 50Bq/kg. Το ίδιο αποτέλεσμα θα προέκυπτε με μια μόνο μέτρηση μιας μικρής μάζας από το κάθε δείγμα εάν πριν τη μέτρηση τα τρία δείγματα είχαν ομογενοποιηθεί πλήρως.

Η τιμή λοιπόν της ανιχνευτικής απόδοσης, ϵ_N , του συστήματος που θα υπολογιζόταν πειραματικά (σχέση 2.2), λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό γεγονότων cps από τη μέτρηση με το *in-situ* σύστημα και τη συγκέντρωση A_{ref} του ραδιονουκλιδίου που υπολογίστηκε στο εργαστήριο (σύμφωνα με τα παραπάνω βήματα A. και B.), θα ήταν σωστή στην περίπτωση της σταθερής κατακόρυφης κατανομής (εικόνα 5.1α), αφού η συγκέντρωση A_{ref} του ραδιονουκλιδίου είναι σταθερή σε όλο τον ενεργό όγκο από τον οποίο οι ακτίνες-γ φτάνουν τον κρύσταλλο και ανιχνεύονται. Επιπλέον, η τιμή αυτή θα συμφωνούσε με την θεωρητικά (MCNP5) εκτιμώμενη τιμή της ανιχνευτικής απόδοσης.

Στις δύο περιπτώσεις ανομοιόμορφης κατακόρυφης κατανομής στο ιζημα ο υπολογισμός της ανιχνευτικής απόδοσης που υπολογίζεται πειραματικά θα δώσει διαφορετικό αποτέλεσμα από την παραπάνω τιμή καθώς, ενώ αλλάζει ο ρυθμός γεγονότων που καταγράφονται από το *in-situ* σύστημα η τιμή της συγκέντρωσης A_{ref} που υπολογίζεται στο εργαστήριο παραμένει η ίδια. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την σχέση πειραματικού υπολογισμού (σχέση 2.2) και τη μέση τιμή της συγκέντρωσης 50Bq/kg που βρέθηκε στο εργαστήριο, θα υπολογιζόταν μεγαλύτερη τιμή για την ανιχνευτική απόδοση ϵ_N στην περίπτωση όπου η μεγάλη συγκέντρωση είναι κοντά στην επιφάνεια (εικόνα 5.1β) και μικρότερη τιμή στην αντίθετη περίπτωση (εικόνα 5.1γ), λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό ρυθμό γεγονότων που καταγράφονται λόγω της στερεάς γωνίας μέτρησης 2π και της ενδοαπορρόφησης μέσα στο ιζημα (μια ακτίνα-γ μακριά από τον ανιχνευτή πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση μέσα στο ιζημα χάνοντας παράλληλα μέρος της ενέργειάς της).

Από το παραπάνω παράδειγμα γίνεται εμφανές ότι η εφαρμογή της νέας μεθόδου για τον υπολογισμό της απόδοσης του *in-situ* συστήματος στις περιπτώσεις ανομοιομορφης κάθετης κατανομής ραδιονουκλιδίων θα εισήγαγε αβεβαιότητες στα αποτελέσματα αν δε ληφθούν υπόψη διορθώσεις για την κατανομή, στην περίπτωση όπου είναι γνωστή. Συνεπώς, η χρήση πυρηνολήπτη ώστε η συλλογή του ιζήματος να γίνεται από τέτοιο βάθος που να περιλαμβάνει την ενεργό ακτίνα, είναι σημαντική ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ανομοιομορφίες στην κατακόρυφη κατανομή του ιζήματος και να διερευνηθεί, σε τέτοια περίπτωση, ο σωστός τρόπος υπολογισμού της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος. Κάτι τέτοιο απαιτεί είτε αναλυτικούς υπολογισμούς της στερεάς γωνίας για επιμέρους ομοιογενή κατακόρυφα στρώματα του ιζήματος είτε εκτιμήσεις με υπολογιστικούς κώδικες MC αφού εισαχθεί στο αρχείο εισόδου η πραγματική κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων.

Μια γνωστή περίπτωση ραδιονουκλιδίου με ανομοιομορφη κατανομή στο ίζημα είναι το ανθρωπογενές ραδιονουκλίδιο ^{137}Cs . Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για τον ποσοτικό προσδιορισμό στην ειδική περίπτωση του ραδιονουκλιδίου ^{137}Cs (πυρηνικά ατυχήματα Fukushima, Chernobyl, πυρηνικές δοκιμές) θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά καθώς εξαρτάται από την εις βάθος κατανομή του ραδιονουκλιδίου στο ίζημα και επιπλέον η κατανομή αυτή διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

Η επίλυση του προβλήματος είναι δυνατή αφού προηγουμένως διερευνηθούν, με χρήση κωδικών MC, οι διακυμάνσεις στην ανιχνευτική απόδοση του *in-situ* συστήματος σε διαφορετικά προφίλ ^{137}Cs γνωστά από τη βιβλιογραφία και οργανωθούν τα αποτελέσματα σε μια βάση δεδομένων. Στη γενική περίπτωση όπου η εις βάθος κατανομή του ^{137}Cs δεν είναι γνωστή μπορεί να σχεδιαστεί μια διαφορετική διάταξη μέτρησης ώστε να συλλέγονται δεδομένα μόλις από 5-10 cm εκατοστά μέσα στο ίζημα, χρησιμοποιώντας π.χ. πλάκα μολύβδου ως μέσο θωράκισης από τα γεγονότα που προέρχονται από τα χαμηλότερα στρώματα στο ίζημα [Korun M., et al.,1994].

5.4 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα της εργασίας και αφορούν στα χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος KATEPINA και στον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων σε πυθμένα θάλασσας συνοψίζονται παρακάτω:

A. Βρέθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων στο ίζημα (4.5-6.8 Bq/L για το ^{214}Bi , 2.1-2.8 Bq/L για το ^{208}Tl και 134-189 Bq/L για το ^{40}K) σε όλα τα σημεία μετρήσεων στην περιοχή μελέτης χωρίς έντονες διακυμάνσεις μεταξύ τους.

B. Επιτεύχθηκε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των μετρήσεων φασματοσκοπίας ακτίνων-γ στο εργαστήριο και των αντίστοιχων μετρήσεων στο πεδίο, σε όλα τα υπό μελέτη σημεία (η σχετική απόκλιση μεταβάλλεται από 3-22 %).

Γ. Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος KATEPINA στο νερό υπολογίστηκε μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την ανιχνευτική απόδοση εν στο ίζημα λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων των δύο υλικών (νερό, ίζημα). Ο απαραίτητος χρόνος συλλογής δεδομένων, για επαρκή στατιστική είναι 3 ώρες για το ίζημα ενώ η τυπική διάρκεια συλλογής δεδομένων στο νερό είναι 24 ώρες.

Δ. Η λήψη ενός μόνο φάσματος στο νερό είναι αρκετή για τη μέθοδο λόγω της σταθερότητας της κατανομής των ραδιονουκλιδίων στο νερό και λόγω του ότι οι μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές της αλατότητας της θάλασσας δεν επηρεάζουν τη συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου ^{40}K , εντός των ορίων της αβεβαιότητας της μέτρησης. Προϋπόθεση όμως είναι στην υπό μελέτη περιοχή να μην υπάρχουν αλληλεπιδράσεις με υποθαλάσσιες πηγές νερού ή ισχυρά ρεύματα.

Ε. Αναπαράχθηκαν επιτυχώς με το κώδικα MCNP5 προηγούμενοι θεωρητικοί υπολογισμοί (GEANT4) για την ανιχνευτική απόδοση του συστήματος KATEPINA για μετρήσεις στο νερό σε γεωμετρία 4π. Η σύγκλιση των δύο διαφορετικών κωδίκων (GEANT4, MCNP5) στην εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος στο νερό ήταν μικρότερη από 10% στο ενεργειακό εύρος 300-2000 keV.

ΣΤ. Ο κώδικας MCNP5 αναπαρήγαγε τα αποτελέσματα της πειραματικής βαθμονόμησης του ανιχνευτικού συστήματος KATEPINA στο ίζημα και αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο που δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος σε οποιοδήποτε περιβάλλον (πυθμένες με διαφορετικά χαρακτηριστικά ιζήματος) και σε διαφορετικές γεωμετρίες μέτρησης.

Ζ. Η νέα μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς στη νότια περιοχή της Κύπρου, καθώς οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων που βρέθηκαν δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εργαστηριακής μεθόδου, και οφείλεται εν μέρει στις μικρές διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του ιζήματος (ποσόστωση νερού, υγρή πυκνότητα) στην περιοχή αυτή.

Η. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της *in-situ* μεθόδου σε σχέση με την εργαστηριακή μέθοδο για τον χαρακτηρισμό των επιπέδων ραδιενέργειας ενός πυθμένα συνοψίζονται στον πίνακα 5.1.

| Μεθοδολογία | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|---|--|--|
| Εργαστηριακή μέθοδος (HPGe σύστημα) | <ul style="list-style-type: none"> - Ακριβείς χώρο-χρονικά εντοπισμένες μετρήσεις - Ανίχνευση πολλών ραδιονουκλιδίων ταυτόχρονα λόγω της υψηλής ενεργειακής διακριτικής ικανότητας | <ul style="list-style-type: none"> - Ακατάλληλη μέθοδος για τον εντοπισμό βραχύβιων ραδιονουκλιδίων - Χρονοβόρα διαδικασία μέτρησης - Υψηλό κόστος για χαρτογράφηση πυθμένα |
| In – situ μέθοδος (σύστημα KATEPINA) | <ul style="list-style-type: none"> - Άμεση μέτρηση απευθείας σε οποιοδήποτε περιβάλλον - Μετρήσεις σε μεγάλα βάθη, όπου η συλλογή δειγμάτων δεν είναι εφικτή από το εξειδικευμένο προσωπικό (δύτες) και χρειάζεται ακριβός, βαρύς εξοπλισμός - Δυνατότητα διαρκούς παρακολούθησης των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων για μεγάλες χρονικές περιόδους (3 μήνες) - Δυνατότητα χρήσης in-situ συστημάτων ως σύστημα συναγερμού σε εφαρμογές ραδιοπροστασίας - Χαμηλό κόστος | <ul style="list-style-type: none"> - Αδυναμία ανίχνευσης ραδιονουκλιδίων στη χαμηλό-ενεργειακή περιοχή (< 90 keV) - Αθροιστικό σήμα από έναν μεγάλο όγκο δείγματος και σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα - Χαμηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα |

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φασματοσκοπίας ακτίνων-γ εργαστηριακής (HPGe) και in-situ (NaI)

5.5 Προοπτικές

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας επιτεύχθηκε ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον έπειτα από τη βαθμονόμηση του ανιχνευτικού συστήματος KATEPINA για μετρήσεις στο ίζημα στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα μελλοντικά σχέδια εστιάζουν στο πρόβλημα της έντονης εξάρτησης της εν από την ποικιλομορφία που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του ιζήματος σε διαφορετικούς πυθμένες. Για την εύρεση της

εξάρτησης αυτής σχεδιάζεται συστηματική μελέτη των φυσικών παραμέτρων του ιζήματος και κατόπιν, του μηχανισμού με τον οποίο αυτές επηρεάζουν την ανιχνευτική απόδοση εν μέσω προσομοιώσεων MC (MCNP5). Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει πρώτα να βρεθούν βιβλιογραφικά τα όρια τιμών της κάθε παραμέτρου καθώς και πιθανές μεταξύ τους συσχετίσεις. Τα δεδομένα αυτά θα εισαχθούν έπειτα στον κώδικα MC ώστε να εκτιμηθεί η ανιχνευτική απόδοση, για τις εν δυνάμει τιμές κάθε μιας παραμέτρου, με τελικό στόχο την εξαγωγή συσχετίσεων και την οργάνωση των αποτελεσμάτων σε μια βάση δεδομένων. Τέλος σχεδιάζεται να ελεγχθεί θεωρητικά η πιθανότητα η *in-situ* μέτρηση να επηρεάζεται από φαινόμενα πραγματικής άθροισης και να υπολογιστούν στην περίπτωση αυτή διορθωτικοί παράγοντες, χρησιμοποιώντας κατάλληλο κώδικα.

Τα θεωρητικά αποτελέσματα της εν θα συγκριθούν με τα πειραματικά δεδομένα που θα προκύψουν από *in-situ* μετρήσεις σε πυθμένες με αντίστοιχα ποικίλα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Οι ποντίσεις αυτές θα πραγματοποιηθούν με στόχο να προσδιοριστεί πειραματικά η εν. Επιπλέον, σχεδιάζεται να υλοποιηθούν ποντίσεις σε πυθμένες όπου είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις φυσικής ραδιενέργειας (NORM και TENORM περιοχές) για καλύτερη στατιστική των μετρήσεων με σκοπό την εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης με μεγαλύτερη ακρίβεια και την επέκτασή της στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, όπου στην παρούσα μελέτη δεν κατέστη δυνατή λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων σε αυτή την ενεργειακή περιοχή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Οι τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές του ^{238}U (ουράνιου), του ^{232}Th (θορίου) και του ^{235}U (ακτινίου).

| Μητρικός πυρήνας | Τύπος αποδιέγερσης | Χρόνος ημιζωής | Ενέργεια αποδιέγερσης MeV | Θυγατρικός πυρήνας |
|-------------------|--|-------------------------------|---------------------------|--|
| ^{238}U | α | $4.468 \times 10^9 \text{ y}$ | 4.270 | ^{234}Th |
| ^{234}Th | β^- | 24.10 d | 0.273 | ^{234}Pa |
| ^{234}Pa | β^- | 6.70 h | 2.197 | ^{234}U |
| ^{234}U | α | $2.455 \times 10^5 \text{ y}$ | 4.859 | ^{230}Th |
| ^{230}Th | α | $7.538 \times 10^4 \text{ y}$ | 4.770 | ^{226}Ra |
| ^{226}Ra | α | 1602 y | 4.871 | ^{222}Rn |
| ^{222}Rn | α | 3.8235 d | 5.590 | ^{218}Po |
| ^{218}Po | α 99.98 % β^- 0.02 % | 3.10 min | 6.115 0.265 | ^{214}Pb ^{218}At |
| ^{218}At | α 99.90 % β^- 0.10 % | 1.5 s | 6.874 2.883 | ^{214}Bi ^{218}Rn |
| ^{218}Rn | α | 35 ms | 7.263 | ^{214}Po |
| ^{214}Pb | β^- | 26.8 min | 1.024 | ^{214}Bi |
| ^{214}Bi | β^- 99.98 % α 0.02 % | 19.9 min | 3.272 5.617 | ^{214}Po ^{210}Tl |
| ^{214}Po | α | 0.1643 ms | 7.883 | ^{210}Pb |
| ^{210}Tl | β^- | 1.30 min | 5.484 | ^{210}Pb |
| ^{210}Pb | β^- | 22.3 y | 0.064 | ^{210}Bi |
| ^{210}Bi | β^- 99.99987% α 0.00013% | 5.013 d | 1.426 5.982 | ^{210}Po ^{206}Tl |
| ^{210}Po | α | 138.376 d | 5.407 | ^{206}Pb |
| ^{206}Tl | β^- | 4.199 min | 1.533 | ^{206}Pb |
| ^{206}Pb | - | σταθερός | - | - |

Πίνακας Α1. Ραδιενεργός σειρά του ^{238}U , Στον πίνακα παρουσιάζονται ο τύπος αποδιέγερσης για το κάθε μέλος της σειράς, ο χρόνος ημιζωής του και η εκλυόμενη συνολική ενέργεια

| Μητρικός πυρήνας | Τύπος αποδιέγερσης | Χρόνος ημιζωής | Ενέργεια αποδιέγερσης MeV | Θυγατρικός πυρήνας |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| ²³² Th | α | 1.40x10 ¹⁰ y | 4.081 | ²²⁸ Ra |
| ²²⁸ Ra | β ⁻ | 5.75 y | 0.046 | ²²⁸ Ac |
| ²²⁸ Ac | β ⁻ | 6.25 h | 2.124 | ²²⁸ Th |
| ²²⁸ Th | α | 1.9116 y | 5.520 | ²²⁴ Ra |
| ²²⁴ Ra | α | 3.6319 d | 5.789 | ²²⁰ Rn |
| ²²⁰ Rn | α | 55.6 s | 6.404 | ²¹⁶ Po |
| ²¹⁶ Po | α | 0.145 s | 6.906 | ²¹² Pb |
| ²¹² Pb | β ⁻ | 10.64 h | 0.570 | ²¹² Bi |
| ²¹² Bi | β ⁻ 64.06% α 35.94% | 60.55 min | 2.252 6.208 | ²¹² Po ²⁰⁸ Tl |
| ²¹² Po | α | 299 ns | 8.955 | ²⁰⁸ Pb |
| ²⁰⁸ Tl | β ⁻ | 3.053 min | 4.999 | ²⁰⁸ Pb |
| ²⁰⁸ Pb | . | σταθερός | . | . |

Πίνακας Α2. Ραδιενεργός σειρά του ²³²Th

| Μητρικός πυρήνας | Τύπος αποδιέγερσης | Χρόνος ημιζωής | Ενέργεια αποδιέγερσης MeV | Θυγατρικός πυρήνας |
|-------------------|--|-------------------------|---------------------------|--|
| ²³⁹ Pu | α | 2.41x10 ⁴ y | 5.244 | ²³⁵ U |
| ²³⁵ U | α | 7.04x10 ⁸ y | 4.678 | ²³¹ Th |
| ²³¹ Th | β ⁻ | 25.52 h | 0.391 | ²³¹ Pa |
| ²³¹ Pa | α | 3.276x10 ⁴ y | 5.150 | ²²⁷ Ac |
| ²²⁷ Ac | β ⁻ 98.62% α 1.38% | 21.772 y | 0.045 5.042 | ²²⁷ Th ²²³ Fr |
| ²²⁷ Th | α | 18.68 d | 6.147 | ²²³ Ra |
| ²²³ Fr | β ⁻ | 22.00 min | 1.149 | ²²³ Ra |
| ²²³ Ra | α | 11.43 d | 5.979 | ²¹⁹ Rn |
| ²¹⁹ Rn | α | 3.96 s | 6.946 | ²¹⁵ Po |
| ²¹⁵ Po | α 99.99977% β ⁻ 0.00023% | 1.781 ms | 7.527 0.715 | ²¹¹ Pb ²¹⁵ At |
| ²¹⁵ At | α | 0.1 ms | 8.178 | ²¹¹ Bi |
| ²¹¹ Pb | β ⁻ | 36.1 m | 1.367 | ²¹¹ Bi |
| ²¹¹ Bi | α 99.724% β ⁻ 0.276% | 2.14 min | 6.751 0.575 | ²⁰⁷ Tl ²¹¹ Po |
| ²¹¹ Po | α | 516 ms | 7.595 | ²⁰⁷ Pb |
| ²⁰⁷ Tl | β ⁻ | 4.77 min | 1.418 | ²⁰⁷ Pb |
| ²⁰⁷ Pb | . | σταθερός | . | . |

Πίνακας Α3. Ραδιενεργός σειρά του ²³⁵U

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αναλυτικοί υπολογισμοί της πειραματικής βαθμονόμησης στις ενέργειες ακτίνων-γ 351.9 keV (^{214}Pb), 609.32 keV (^{214}Bi), 1764.5 keV (^{214}Bi) και 2614 keV (^{208}Tl)

Η τιμή της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος στην ενέργεια ακτίνων-γ 351.9 keV υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση της φωτοκορυφής του ραδιονουκλιδίου ^{214}Pb που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη ενέργεια στο φάσμα της *in-situ* μέτρησης και τη συγκέντρωση A_{ref} , όλων των ραδιονουκλιδίων που συμμετέχουν στο σχηματισμό της συγκεκριμένης κορυφής, όπως υπολογίστηκε στο επιφανειακό δείγμα στο εργαστήριο, πολλαπλασιασμένη επί την πιθανότητα εκπομπής της συγκεκριμένης ακτίνας I_γ για κάθε ραδιονουκλίδιο, ως εξής:

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s |_{214Pb} - \frac{1}{2} \cdot cps_w |_{214Pb}}{I_\gamma \cdot A_{ref} |_{214Pb} + I'_\gamma \cdot A_{ref} |_{228Ac}}$$

Η τιμή της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος στην ενέργεια ακτίνων-γ 609.32 keV υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση της φωτοκορυφής του ραδιονουκλιδίου ^{214}Bi που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη ενέργεια στο φάσμα της *in-situ* μέτρησης και τη συγκέντρωση A_{ref} , όλων των ραδιονουκλιδίων που συμμετέχουν στο σχηματισμό της συγκεκριμένης κορυφής, όπως υπολογίστηκε στο επιφανειακό δείγμα στο εργαστήριο, πολλαπλασιασμένη επί την πιθανότητα εκπομπής της συγκεκριμένης ακτίνας I_γ για κάθε ραδιονουκλίδιο, ως εξής:

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s |_{214Bi} - \frac{1}{2} \cdot cps_w |_{214Bi}}{I_\gamma \cdot A_{ref} |_{214Bi} + I'_\gamma \cdot A_{ref} |_{137Cs} + I''_\gamma \cdot A_{ref} |_{208Tl}}$$

Η τιμή της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος στην ενέργεια ακτίνων-γ 1764.5 keV υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση της φωτοκορυφής του ραδιονουκλιδίου ^{214}Bi που εμφανίζεται στο φάσμα της *in-situ* μέτρησης, της τιμής της συγκέντρωσης $A_{ref} |_{214Bi}$, όπως υπολογίστηκε στο επιφανειακό δείγμα στο εργαστήριο, και την αθροιστική πιθανότητα εκπομπής ($I_\gamma = 0.21$) όλων των κορυφών του ραδιονουκλιδίου που συμμετέχουν στο σχηματισμό της συγκεκριμένης κορυφής ως εξής:

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s |_{214Bi} - \frac{1}{2} \cdot cps_w |_{214Bi}}{I_\gamma \cdot A_{ref} |_{214Bi}}$$

Η τιμή της ανιχνευτικής απόδοσης του *in-situ* συστήματος στην ενέργεια ακτίνων-γ 2614 keV υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση της φωτοκορυφής του ραδιονουκλιδίου ^{208}Tl που εμφανίζεται στο φάσμα της *in-situ* μέτρησης και της συγκέντρωσης $A_{ref | 214\text{Bi}}$, όπως υπολογίστηκε στο επιφανειακό δείγμα στο εργαστήριο, ως εξής, δεδομένου ότι η συγκέντρωσή του στο νερό βρέθηκε αμελητέα:

$$\varepsilon_V = \frac{cps_s | 208\text{Tl}}{I_\gamma \cdot A_{ref | 208\text{Tl}}}$$

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Agrafiotis K., Karfopoulos K.L. and Anagnostakis M.J., Calibration of an in-situ BEGe detector using semi-empirical, experimental and Monte Carlo Techniques, *Appl. Radiat. Isot.*, 69(8) (2010) 1151-1155.
- Bagatelas C., Tsabaris C., Kokkoris M., Papadopoulos C.T., Vlastou R., Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4pi geometry based on Monte Carlo simulation, *Environ. Monit. Assess.*, 165 (2010) 159 - 168.
- Berger M. J., Hubbell J. H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S. and Olsen K., XCOM: Photon Cross Section Database, version 1.5 (2010)
- Berlizov A.N., MCNP-CP_a correlated particle radiation source extension of a general purpose Monte Carlo N-particle transport code, *Applied Modeling and Computations in Nuclear Science* (2006).
- Blum, P., *Physical properties handbook: a guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores*, ODP, (1997).
- Boson J., Lidström K., Nylen T., Agren G. and Johansson L., In-situ gamma-ray spectrometry for environmental monitoring: A semi empirical calibration method, *Rad. Prot. Dosim.*, 121 (2006) 310-316.
- Breitzke M., *Physical properties of Marine Sediments*, Marine Geochemistry, (2006) 27-71.
- Canberra, 2001. Genie 200 Customization Tools Manual.
- Chabaux F. and Allegre C.J., ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibria in volcanics: A new insight into melting conditions, *Earth and Planetary Science Letters* 126 (1994) 61-74
- Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements, IAEA, (2003).
- Covelli S. and Fontolan G., Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines, *Environmental Geology* 30 (1995).
- Dadey K. A., Janecek T. and Adam Klaus, DRY-BULK DENSITY: ITS USE AND DETERMINATION, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 126(1992).
- De Felice P., Angelini P., Fazio A., Biagini R., Fast procedures for coincidence-summing correction in γ -ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.*, 52 (2000) 745-752
- De Groot A.V., Van der Graaf E.R., de Meijer R.J., Maurec M., Sensitivity of in-situ g-ray spectra to soil density and water content, *Nucl. Instrum. Methods*, 600 (2009) 519-523.
- Debertin K. and Helemer R.G., *Gamma X-ray spectrometry with semiconductors detectors*, North Holland, Amsterdam, (1988) 219-223.
- Devanathan R., Corrales L.R., Gao F. and Weber W.J., Signal variance in gamma-ray detectors—A review, *Nucl. Instrum. Methods*, 565 (2006) 637-649.

- Ehman, W.D. and Vance, D.E., 1998. Ραδιοχημεία και Πυρηνικές Μέθοδοι Αναλύσεως. Μακεδονικές Εκδόσεις.
- Eleftheriou G., Tsabaris C., Androulakaki E., Patiris D. L, Kokkoris M., Kalfas C.A. and Vlastou R., Radioactivity measurements in the aquatic environment using in-situ and laboratory gamma-ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.*, 82 (2013) 268-278
- Evans H. B., GRAPE—A device for continuous determination of material density and porosity. *Trans. 6th Annual SPWIA Logging Sym. Dallas, Texas. II, B1*, (1965).
- Evans R.D., 1955. *The Atomic Nucleons*. Krieger, New York.
- Gealy E. L., Scripps Institution of Oceanography, University of California, Saturated bulk density, grain density and porosity of sediment cores from the western equatorial pacific: LEG 7, GLOMAR CHALLENGER
- He Q. and Walling D.E., Interpreting Particle Size Effects in the Adsorption of ^{137}Cs and Unsupported ^{210}Pb by Mineral Soils and Sediments. *J. Environ. Rad.*, 30 (1996) 117-137.
- Storm E. and Israel H.I., Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements $Z = 1$ to $Z = 100$, *Nuclear Data Tables*, A7 (1970) 565-681.
- Philippot J.Cl., *IEEE, Trans. Nucl. Sci.*, NS-17/3 (1970) 446.
- Kalfas, C.A., 2011. A modern nuclear spectroscopy software package. *Advances in Nuclear Physics*, Hellenic Nuclear Physics Society, Athens, Greece.
- Knoll, G.F., 2000. *Radiation Detection and Measurement*. Wiley, New York.
- Lépy, M.C., Altitzoglou, T., Anagnostakis, M.J., Arnold, D., Capogni, M., Ceccatelli, A., de Felice, P., Dersch, R., Dryak, P., Fazio, A., Ferreux, L., Guardati, M., Han, J.B., Hurtado, S., Karfopoulos, K.L., Klemola, S., Kovar, P., Lee, K.B., Ocone, R., Ott, O., Sima, O., Sudar S., Švec, A., Chau Van Tao, Tran Thien Thanh, Vidmar, T., Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray Spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.*, 68 (2010) 1407-1412.
- X-5 Monte Carlo Team, 2003. MCNP5 – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-198, LA-CP-03-0245, Los Alamos National Laboratory, available upon request at: <https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/mcnp5.htm.l>
- Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter, UNEP, (1995).
- Mikada H., Moore, G.F., Taira, A., Becker, K., Moore, J.C., and Klaus, A. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 190/196* (2004)
- Mudroch A. and McKnight S. D., *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. CRC Press, Inc., Boca Raton, EL, (1991).
- Povinec P.P., Osvath I., Baxter M.S., Underwater Gamma-spectrometry with and NaI(Tl) Detectors, *Appl. Radiat. Isot.*, 47 (1996) 1127.
- Preda M. and Cox M.E., Chemical and mineralogical composition of marine sediments, and relation to their source and transport, Gulf of Carpentaria, Northern Australia, *Journal of Marine Systems* 53(2005) 169-186.
- Tsabaris C. and Ballas D., On-line gamma ray spectrometry at open sea, *Appl. Radiat. Isot.*, 62 (2005b) 83-89.

Tsabaris C. and Thanos I., An underwater sensing system for monitoring radioactivity in the marine environment, *Mediterranean Marine Science*, 5 (2004) 125-131.

Tsabaris C., Bagatelas C., Dakladas Th., Papadopoulos C.T., Vlastou R., Chronis G.T., An autonomous in situ detection system for radioactivity measurements in the marine environment, *Appl.Radiat.Isot.*, 66 (2008b) 1419–1426.

Tsabaris C., Eleftheriou G., Kapsimalis V., Anagnostou C., Vlastou R., Durmishi C., Kedhi M., Kalfas C.A., Radioactivity levels of recent sediments in the Butrint Lagoon and the adjacent coast of Albania, *Appl. Radiat. Isot.*, 65 (2007) 445-453.

Tsabaris C., Evangeliou N., Fillis-Tsirakis E., Sotiropoulou M., Patiris D. L. and H. Florou, Distribution of natural radioactivity in sediment cores from Amvrakikos gulf (western Greece) as a part of IAEA'S campaign in the Adriatic and Ionian seas, *Radiat. Prot. Dosim.*, (2011b) 1–14.

Tsabaris C., Monitoring natural and artificial radioactivity enhancement In the Aegean Sea using floating measuring systems, *Radiat. Prot. Dosim.*, 66 (2008a) 1599-1603.

Tsabaris C., Patiris D. L., Karageorgis A. P., Eleftheriou G., Papadopoulos V. P., Georgopoulos D., Papathanassiou E., Povinec P. P., In-situ radionuclide characterization of a submarine groundwater discharge site at Kalogria Bay, Stoupa, Greece, *J.Environ.Rad.*, 108 (2012) 50-59.

Tsabaris, C., Patiris, D.L., Lykousis, V., KATERINA: An in-situ spectrometer for continuous monitoring of radon daughters in aquatic environment, *Methods Phys. Res., Sect.* (2011a) A 626-627, S142–S144.

Tsabaris, C., Scholten J., Karageorgis, A.P., Commanducci, J-F., Georgopoulos, D., Kwong, L-L.W., Papathanassiou, E., Application of an in-situ underwater gamma spectrometer as a marine radon progeny monitor: continuous monitoring of groundwater discharges into the coastal zone. *Rad. Prot. Dosim.*, 142 (2010) 273-281

Vidmar T., Korun M. and Vodenik B., A method for calculation of true coincidence summing correction factors for extended sources, *Appl.Radiat.Isot.*, 65(2) (2007) 243-246.

Vlachos D.S. and Tsabaris C., Response function calculation of an underwater gamma ray NaI(Tl) spectrometer, *Nucl. Instrum. Methods*, 539 (2005a) 414-420.

Wedekind Ch., Schilling G., Grutmuller M. and Becker K., Gamma-radiation monitoring network at sea, *Appl.Radiat.Isot.*, 50 (1999) 733-741.

Winters J.W., *Geotechnical testing of marine sediment*, 1988

ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ, Π. Α., 1981. Πυρηνική φυσική. Τόμος 1, Ιωάννινα.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ, ΚΥΠΡΙΑΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ, 2010.